

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Komposit**

Komposit adalah suatu sistem material yang tersusun atas campuran atau kombinasi dari dua atau lebih material yang berbeda dalam bentuk dan komposisi kimia serta pada dasarnya tidak saling larut satu sama lain, dengan salah satu logam menjadi matriksnya. Pada saat yang sama matrik berfungsi sebagai penguatan secara keseluruhan dan untuk mendistribusikan kembali beban eksternal secara optimal ke masing-masing elemen penguat (**J. Susanto, H. Seputro, E. santoso, 2016**).

##### **2.1.1. Matrik dan Penguat**

###### **2.1.1.1. Aluminium *Copper Alloy* (seri 2xxx)**

Paduan ini dapat di heat treatment terutama yang mengandung (2,5-5%) Cu. Dari seri ini yang terkenal seri 2017 dikenal dengan nama “duralimin” mengandung 4%Cu, 0,5%Mg, 0,5%Mn pada komposisi standard. Paduan ini Mg ditingkatkan pada komposisi standard dari Al, 4,5%Cu, 1,5%Mg, 0,5%Mn, dinamakan paduan 2024 yang bernama Duralumin Super. Paduan yang memiliki Cu mempunyai ketahanan korosi yang jelek, jadi apabila ketahanan korosi khusus diperlukan permukaannya dilapisi dengan Al murni atau paduan Al yang tahan korosi yang disebut pelat alkad. Paduan ini banyak digunakan untuk alat-alat yang bekerja pada temperatur tinggi misalnya pada piston dan silinder head motor bakar.

###### **2.1.1.2. Abu Dasar Batubara**

Abu dasar batu bara (*bottom ash*) merupakan sisa hasil proses pembakaran batu bara, yang merupakan limbah meningkat setiap tahunnya, sehingga diperlukan penanggulangan, karena dapat mengakibatkan dampak lingkungan berupa polusi udara (**Tekmira, 2010**). Abu dasar mempunyai partikel lebih besar dan lebih berat dari pada abu terbang, sehingga abu dasar akan jatuh pada dasar tungku pembakaran dan terkumpul pada penampung debu lalu dikeluarkan dengan cara di semprot dengan air untuk kemudian di buang dan dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagai pasir. Sifat kimia, fisik, dan mekanik dari abu batu bara tergantung tipe batu bara, asal, ukuran, teknik pembakaran, ukuran *boiley*, proses pembuangan, dan metoda penanggulangan (**Talib, 2009**).

###### **2.1.1.3. Magnesium (Mg)**

Magnesium adalah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki simbol Mg dan nomor atom 12 serta berat atom 24,31. Magnesium adalah elemen terbanyak kedelapan yang membentuk 2% berat kulit bumi, serta merupakan unsur terlarut

ketiga terbanyak pada air laut. Logam alkali tanah ini terutama digunakan sebagai zat campuran (*alloy*) untuk membuat campuran aluminium-magnesium yang sering disebut "magnalium" atau "magnelium". Magnesium merupakan salah satu jenis logam ringan dengan karakteristik sama dengan aluminium tetapi magnesium memiliki titik cair yang lebih rendah dari pada aluminium. Seperti pada aluminium, magnesium juga sangat mudah bersenyawa dengan udara (Oksigen).

(<http://id.wikipedia.org/wiki/magnesium> 2009)

**Tabel 2.1.**Sifat Fisik Magnesium

Fase	Padat
Massa jenis	1.738 g/cm <sup>3</sup>
Titik cair	923 °K (650 °C, 1202 °F)
Titik didih	1363 °K (1090 °C, 1994 °F)
Konduktifitas termal	(300k) 156 w/(m.K)

## 2.2. *Electroless Plating*

### 2.2.1. Perlakuan Terhadap Penguat(*Electroless Plating*)

*Electroless plating* adalah salah satu metode pelapisan dengan cara mendeposisikan logam pada sebuah substrat dengan media larutan polar sebagai agen pereduksinya. Metode *Electroless plating* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode pelapisan yang lain, yaitu penggunaan temperatur rendah dalam proses pelapisannya yang mengurangi terjadinya oksidasi pada substrat dan proses pelapisannya tidak bergantung pada bentuk geometri specimen substrat serta biaya yang relatif murah.

*Electroless plating* biasanya digunakan untuk komponen mekanik ataupun elektronik khususnya untuk meningkatkan ketahanan aus (*wear resistance*) dan dalam beberapa kasus dilakukan untuk meningkatkan ketahanan korosi (dengan perlakuan panas khusus).*Electroless plating* dibagi menjadi dua bagian yaitu *autocatalytic plating* adalah proses *electroless plating* yang dimana elektron bebas yang berasal dari reduksi agen bergabung dengan ion logam dalam larutan dan membentuk logam padat pada permukaan, karena elektron diperoleh dari reduksi agen, maka proses pelapisan (*coating*) ini dapat terjadi setelah substrate tertutup/terlapis dengan ketebalan tertentu, *electroless* nikel adalah salah satu contohnya. Sedangkan *ion-exchange plating* adalah proses *electroless plating* yang dimana berbasis pada oksidasi dari substrate yang akan dilapisi oleh ion logam yang

lain yang berasal dari larutan pelapis, lapisan yang terbentuk dengan proses ini biasanya lebih tipis, sebab proses pelapisan akan terhenti ketika seluruh substrate telah terlapis dan tidak dapat dihasilkan lagi *supplai electron* dengan proses oksidasi, logam yang dilapisi dengan metode ini biasanya adalah seng dan timah (Zainuri. M, dkk. 2008).

Salah satu jenis metode pembuatan komposit matriks keramik  $Al_2O_3$  adalah melalui proses oksidasi, karena aluminium sulit berinfiltrasi dengan keramik  $Al_2O_3$ . Hal ini disebabkan pada awal oksidasi, aluminium membentuk lapisan tipis yang terjadi dipermukaan, lapisan tipis ini sulit ditembus dan sangat stabil. Rendahnya pembasahan dalam sistem logam dengan keramik, Mg dapat ditambahkan karena memiliki reaktivitas yang tinggi dan energi bebas yang kecil dalam proses oksidasi yang dapat menaikkan penetrasi kapilaritas oksida dan mempermudah terbentuknya *interface* logam/keramik juga mempengaruhi tegangan permukaan (Sahari G. N. Anastasia. 2009).

### 2.3. Metode *Gravity Casting*

Pengecoran gravitasi adalah pengecoran dimana logam cair yang dituangkan ke dalam saluran masuk menggunakan gravitasi. Karena adanya tekanan gravitasi, cairan logam mengisi ke seluruh ruang dalam rongga cetakan. Sebagai bahan cetakan terutama dipakai baja khusus, atau besi cor paduan. Cara ini dapat membuat coran yang mempunyai ketelitian dan kualitas tinggi. Sebagai bahan coran umumnya diambil paduan bukan besi yang mempunyai titik cair rendah seperti paduan aluminium, paduan magnesium atau paduan tembaga.

Penuangan logam cair ke dalam cetakan dan pengisian selanjutnya merupakan langkah yang sangat penting dalam pengecoran logam, karena perilaku logam cair dan pembekuannya menentukan apakah bentuk cor akan terbentuk dengan baik dan bebas dari cacat.

Parameter proses *gravity casting* mempengaruhi kualitas *casting* khususnya solidifikasi dan sifat mekanik. Muatan dipanaskan kembali ke suhu penuangan yang diperlukan dalam tungku meredam. Suhu leleh diukur menggunakan thermocouple tipe dip. Sampah yang dibuang mencair akhirnya gravitasi dituangkan ke dalam cetakan yang dipanaskan sebelumnya. Dengan setiap pengecoran dituangkan, suhu menurun karena solidifikasi paduan cair (A. Chennakesava Reddy, Ch. Rajanna, 2009)

## 2.4. Homogenizing

Homogenizing adalah suatu pemanasan pada temperatur tinggi dengan melebihi 50°C di atas garis kritis (*critical line*) pada diagram fasa Al-Cu. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan efek segregasi kimia akibat proses pembekuan lambat ingot/billet dan untuk memperbaiki mampu pengerjaan panas (*hot workability*).

Paduan aluimunium yang diperoleh dari hasil pengecoran cenderung memiliki mikrostruktur yang tidak seragam. Untuk itu perlu dilakukan suatu perlakuan untuk memperbaiki mikrostruktur paduan. Perlakuan yang umum dilakukan pada paduan Al-Cu pada hasil pengecoran adalah *homogeneizing*

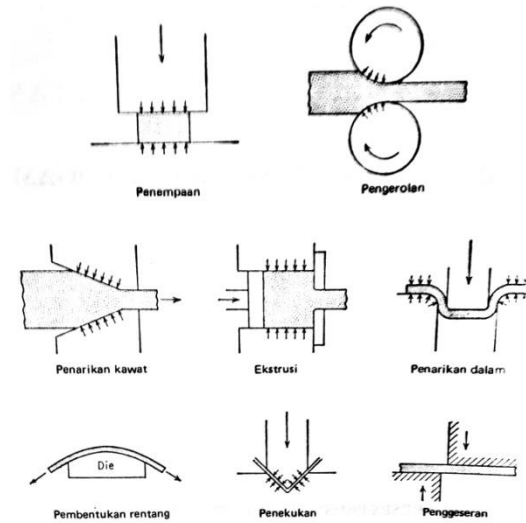
Sifat mekanik tidak hanya tergantung pada komposisi kimia suatu paduan, tetapi juga tergantung pada struktur mikronya. Suatu paduan dengan komposisi kimia yang sama dapat memiliki struktur mikro yang berbeda, dan sifat mekaniknya akan berbeda. Struktur mikro tergantung pada proses pengerjaan yang dialami, terutama proses laku-panas yang diterima selama proses pengerjaan. Menurut hasil penelitian yang dilakukan (**Generousdi, 2010**) pada material paduan aluminium 2024 proses homogenisasi aluminium 2024 pada temperatur 490°C dan waktu tahan 10 jam akan mengembalikan keadaan paduan pada kondisi awal dan menghasilkan penyebaran presipitat yang merata pada seluruh matriknya.

## 2.5. Proses Pembentukan Logam

### 2.5.1. Dasar Pembentukan Logam

Peran logam yang penting pada teknologi modern terutama disebabkan oleh mudahnya proses pembentukan logam tersebut menjadi bentuk seperti tabung, balok dan lembaran logam (pelat). Pembuatan bentuk secara umum dapat dilakukan dengan cara:

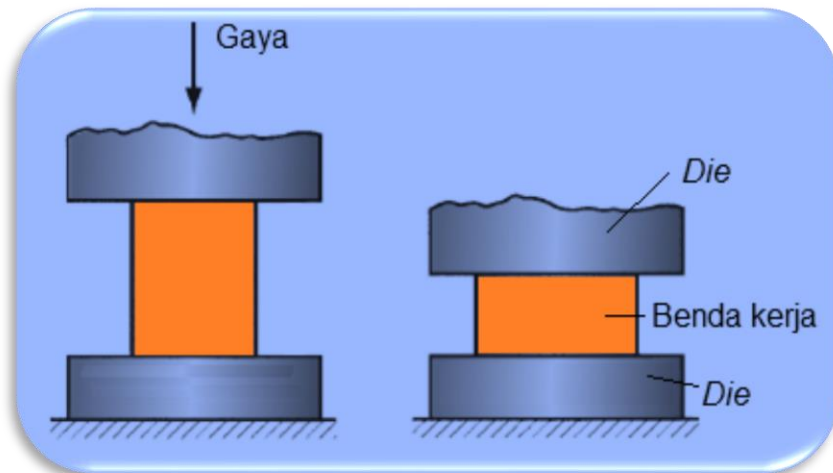
1. Cara proses deformasi plastik, di mana volume dan masa logam tetap dan logam bergerak dari satu tempat ke tempat yang lain.
2. Dengan cara menghilangkan bagian-bagian logam atau proses pemesanan, dimana bagian logam sebagian dihilangkan untuk dibentuk menjadi bentuk yang diinginkan.



**Gambar 2.1** Jenis operasi pembentukan

### 2.5.2. Pressing

Pressing atau pengepresan adalah proses dimana benda kerja ditekan diantara dua *die* (cetakan). Pressing atau pengepresan dilakukan dengan penekanan secara perlahan-lahan pada benda kerja. Proses penekanan tersebut akan menghasilkan bentuk benda kerja yang sesuai dengan apa yang diinginkan.



**Gambar 2.2** Proses pressing

## 2.6. Perlakuan Panas T6(*Heat Treatment*)

*Heat treatment* (perlakuan panas) adalah salah satu proses untuk mengubah struktur logam dengan cara memanaskan specimen pada *electric trance* (tungku) pada temperatur rekristalisasi selama periode waktu tertentu, kemudian didinginkan pada media pendingin seperti udara, air, air garam dan solar yang masing-masing mempunyai kerapatan pendinginan yang berbeda beda. Dengan adanya pemanasan dan pendinginan dengan kecepatan tertentu, maka bahan-bahan logam dan paduan memperlihatkan perubahan strukturnya. Perlakuan panas memiliki pengaruh yang besar pada karakteristik komposit seperti sifat mekanisnya yang lebih baik (**Keshavamurthy dkk, 2016**).

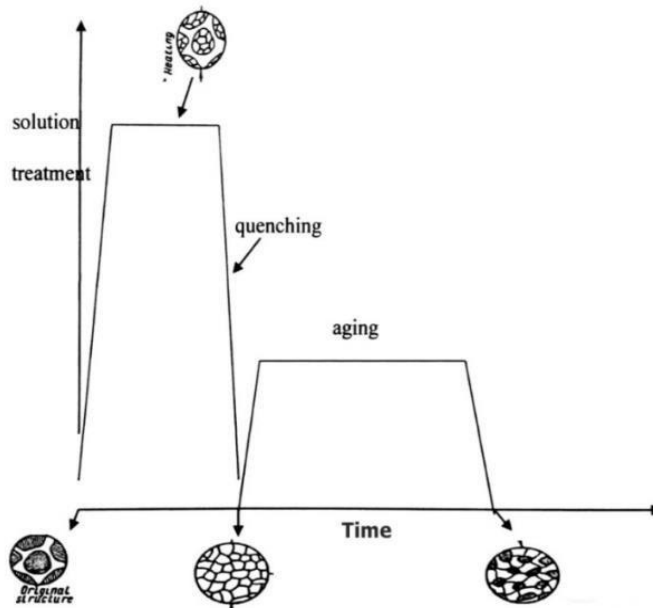
Perlakuan panas pada aluminium paduan dilakukan dengan memanaskan sampai terjadi fase tunggal kemudian ditahan beberapa saat dan diteruskan dengan pendinginan cepat hingga tidak sempat berubah ke fase lain. Jika bahan tadi dibiarkan untuk jangka waktu tertentu maka terjadilah proses penuaan (*aging*). 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 aluminium adalah dengan penuaan keras (*age hardening*). Melalui penuaan keras, logam paduan aluminium 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 aluminium berbeda dengan penemperan keras yang berlangsung pada penemperan keras baja.

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

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

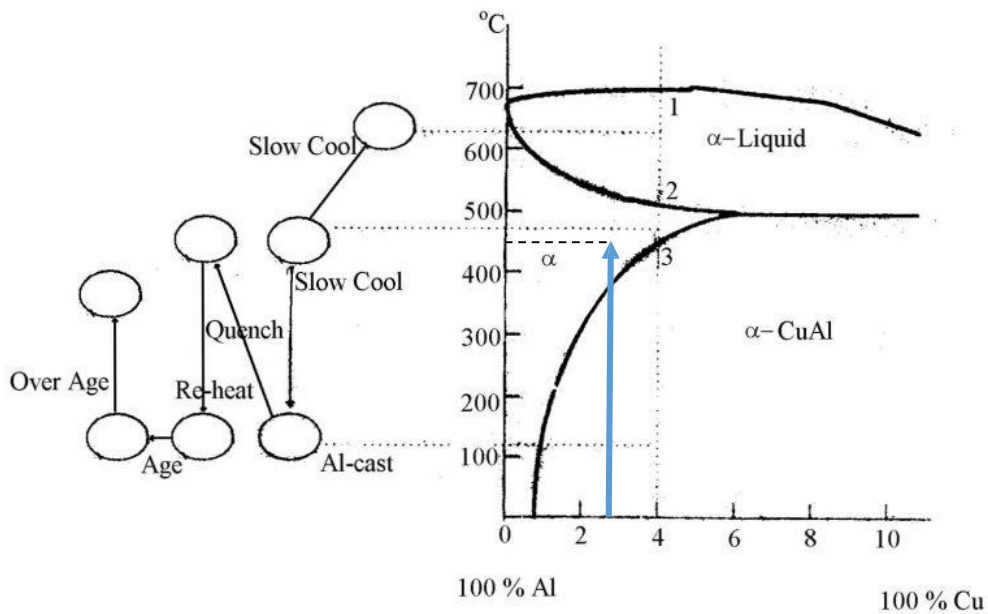
1. *Solution treatment*
2. *Quenching*
3. *Aging*



Gambar 2.3 Siklus Perlakuan Panas

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

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  $550^{\circ}\text{C}$  -  $560^{\circ}\text{C}$  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 2.4** Diagram fasa perlakuan panas Al-Cu

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

Quenching dilakukan dengan cara mendinginkan logam yang telah dipanaskan dalam dapur pemanas kedalam media pendingin. Pendingin dilakukan secara cepat, dari temperatur pemanas (540 °C) ke temperatur yang lebih rendah, pada umumnya mendekati temperatur ruang. Tujuan dilakukan quenching adalah agar larutan padat homogen yang terbentuk pada solution heat treatment dan kekosongan atom dalam keseimbangan termal pada temperatur tinggi tetap pada tempatnya. Pada tahap quenching akan menghasilkan larutan padat lewat jenuh (*Super Saturated Solid Solution*) yang merupakan fasa tidak stabil pada temperatur biasa atau temperatur ruang. Pada proses quenching tidak hanya menyebabkan atom terlarut tetap ada dalam larutan, namun juga menyebabkan jumlah kekosongan atom tetap besar. Adanya kekosongan atom dalam jumlah besar dapat membantu proses difusi atom pada temperatur ruang untuk membentuk *Zona Guinier-Preston* (*Zona GP*). *Zona Guinier-Preston* (*Zona GP*) adalah kondisi didalam paduan dimana terdapat agregasi atom padat atau pengelompokan atom padat (**Tata Surdia dan Shinroku Saito, 1992**).



### 2.6.3. Aging (Tahapan Penuaan)

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

Penuaan alami (*natural aging*) adalah penuaan untuk paduan aluminium yang di *age hardening* dalam keadaan dingin. Natural aging berlangsung pada temperatur ruang antara 15°C - 25°C dan dengan waktu penahanan 5 sampai 8 hari. Penuaan buatan (*artificial aging*) adalah penuaan untuk paduan aluminium yang di *age hardening* dalam keadaan panas. Artificial aging berlangsung pada temperatur antara 100°C-200°C dan dengan lamanya waktu penahanan antara 1 sampai 24 jam (Schonmetz, 1990).

Pada tahap penuaan buatan dalam proses *age hardening* dapat dilakukan beberapa variasi perlakuan yang dapat mempengaruhi hasil dari proses *age hardening*. Salah satu variasi tersebut adalah variasi temperatur *aging*. Temperatur *aging* dapat ditetapkan pada temperatur saat pengkristalan paduan aluminium (150°C), di bawah temperatur pengkristalan atau di atas temperatur pengkristalan logam paduan aluminium (Schonmetz, 1990).

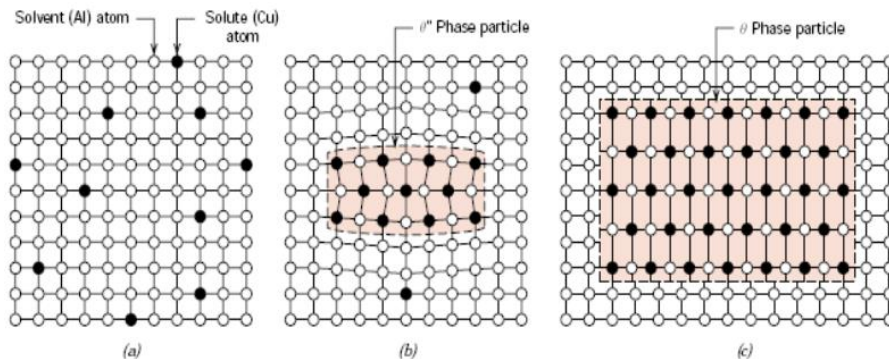
Pengambilan temperatur penuaan buatan pada temperatur antara 100°C-200°C akan berpengaruh pada tingkat kekerasan sebab pada proses penuaan buatan akan terjadi perubahan-perubahan fasa atau struktur. Perubahan fasa tersebut akan merubah nilai sifat mekanis semakin meningkat.

Urut-urutan perubahan fasa dalam proses artificial aging adalah sebagai berikut:

- a. Larutan Padat Lewat Jenuh (Super Saturated Solid Solution  $\alpha$ ) Setelah paduan aluminium melawati tahap solution heat treatment dan quenching maka akan didapatkan larutan padat lewat jenuh pada temperatur kamar. Pada kondisi ini secara simultan kekosongan atom dalam keseimbangan termal pada temperatur tinggi tetap pada tempatnya. Setelah pendinginan atau quenching, maka logam paduan aluminium menjadi lunak jika dibandingkan dengan kondisi awalnya.
- b. Zona [GP 1] adalah zona presipitasi yang terbentuk oleh temperatur penuaan atau aging yang rendah dan dibentuk oleh segregasi atom Cu dalam larutan padat lewat jenuh atau super saturated solid solution  $\alpha$  .(Smith, 1995) Zona [GP 1] akan muncul pada tahap mula atau awal dari proses artificial aging. Zona ini terbentuk ketika temperatur artificial aging dibawah 100°C atau mulai temperatur ruang hingga temperatur 100°C dan Zona [GP 1] tidak akan terbentuk pada temperatur artificial aging yang terlalu tinggi. Terbentuknya Zona [GP 1] akan mulai dapat meningkatkan kekerasan logam paduan aluminium (Smith, 1995). Jika artificial aging ditetapkan pada temperatur 100°C, maka tahap perubahan fasa hanya sampai terbentuknya zona [GP 1] saja. Proses pengerasan dari larutan

padat lewat jenuh sampai terbentuknya zona [GP 1] biasa disebut dengan pengerasan tahap pertama.

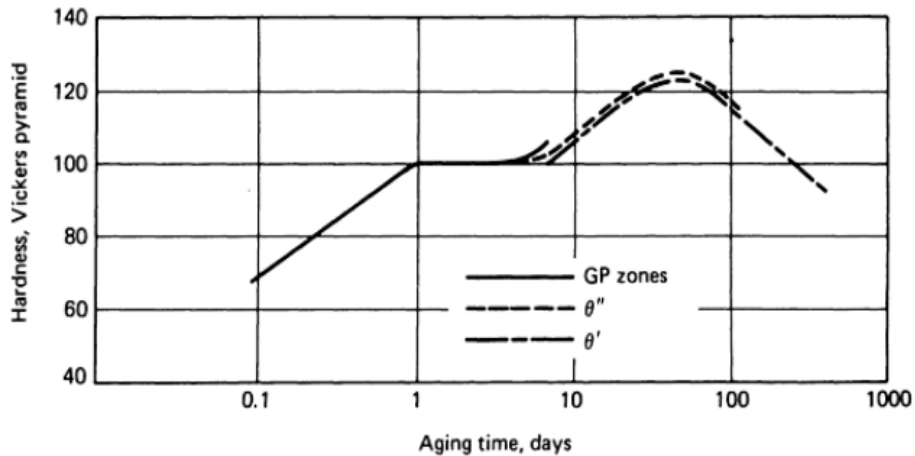
- c. Zona [GP 2] atau Fasa  $\Theta''$  Setelah temperatur artificial aging melewati  $100^{\circ}\text{C}$  ke atas, maka akan mulai muncul fasa  $\Theta''$  atau zona [GP 2]. Pada temperatur  $130^{\circ}\text{C}$  akan terbentuk zona [GP2] dan apabila waktu penahanan artificial agingnya terpenuhi maka akan didapatkan tingkat kekerasan yang optimal (Smith, 1995). Biasanya proses artificial aging berhenti ketika sampai terbentuknya zona [GP 2] dan terbentuknya fasa antara yang halus (presipitasi  $\Theta''$ ), karena setelah melewati zona [GP 2] maka paduan akan kembali menjadi lunak kembali. Jika proses artificial aging berlangsung sampai terbentuknya fasa  $\Theta''$  atau zona [GP 2], maka disebut dengan pengerasan tahap kedua. Gambar 2.3 menunjukkan terbentuknya kembali fasa keseimbangan pada proses aging aluminiumtembaga (Al-Cu) sehingga paduan akan kembali ke fasa awal yaitu  $\theta$ .



**Gambar 2.5** (a) supersaturated solute solution, (b) fasa  $\theta''$  mulai terbentuk precipitate (Al-Cu), (c) fasa keseimbangan  $\theta$  Al-Cu

- d. Fasa  $\Theta'$  Kalau paduan aluminium dinaikan temperatur aging atau waktu *aging* diperpanjang tetapi temperaturnya tetap, maka akan terbentuk presipitasi dengan struktur kristal yang teratur yang berbeda dengan fasa  $\Theta'$ . Fasa ini dinamakan fasa antara atau fasa  $\Theta'$ . Terbentuknya fasa  $\Theta'$  ini masih dapat memberikan sumbangan terhadap peningkatan kekerasan pada paduan aluminium. Peningkatan kekerasan yang terjadi pada fasa  $\Theta'$  ini berjalan sangat lambat.
- e. Fasa  $\Theta$  Apabila temperatur dinaikan atau waktu penuaan diperpanjang, maka fasa  $\Theta'$  berubah menjadi fasa  $\Theta$ . Jika fasa  $\Theta$  terbentuk maka akan menyebabkan paduan aluminium kembali menjadi lunak. Sementara waktu penahanan dalam penuaan buatan merupakan salah satu komponen yang dapat mempengaruhi hasil dari proses age hardening secara keseluruhan. Seperti halnya temperatur, waktu penahanan pada tahap penuaan buatan akan mempengaruhi perubahan struktur atau perubahan fasa paduan aluminium. Sehingga pemilihan waktu penahan penuaan buatan harus dilakukan dengan hati-hati. Urut-urutan perubahan fasa dalam proses penuaan buatan, hubungan antara waktu *aging* dengan kekerasan

paduan aluminium diawali oleh proses perubahan fasa yang terbentuk pada proses precipitation hardening dimana fasa berawal dari supersaturated solute solution, setelah proses quenching. Kemudian paduan akan mengalami penuaan atau munculnya presipitat baru seiring bertambahnya waktu.



**Gambar 2.6** waktu (aging) terhadap kekuatan dan kekerasan paduan aluminium (Smith, 1995).

Dalam kurva penuaan tersebut, pada awal-awal tahap artificial aging struktur atau fasanya masih berupa larutan padat lewat jenuh (*super saturated solid solution*). Seiring dengan penambahan waktu penuaan atau ketika penuaan sampai di daerah *under aged*, maka mulai terbentuk zona presipitat zona [GP1] dan paduan aluminium menjadi agak kuat dan keras. Ketika waktu *aging* ditambah lagi maka akan masuk dalam daerah *peak aged*. Pada daerah *peak aged* presipitat mengumpul atau mulai terbentuk zona [GP2] dan fasa antara yang halus (fasa  $\Theta'$ ). Jika fasa-fasa tersebut mulai terbentuk maka akan didapatkan tingkat kekerasan dan kekuatan logam paduan aluminium yang optimal. Apabila setelah mencapai *peak aged* (puncak penuaan) waktu artificial aging masih ditambah lagi maka akan masuk dalam daerah *over aged*. Pada daerah *over aged* ini akan didapatkan fasa  $\Theta$ , jika fasa  $\Theta$  ini terbentuk maka akan menyebabkan paduan aluminium menjadi lunak kembali dan berkurang kekerasannya (Smith, 1995).

## 2.7. Pengaruh Temperatur *Aging* dan Waktu *Aging* Terhadap Sifat Mekanis

### 1.7.1 Pengaruh Temperatur *Aging* Terhadap Sifat Mekanis

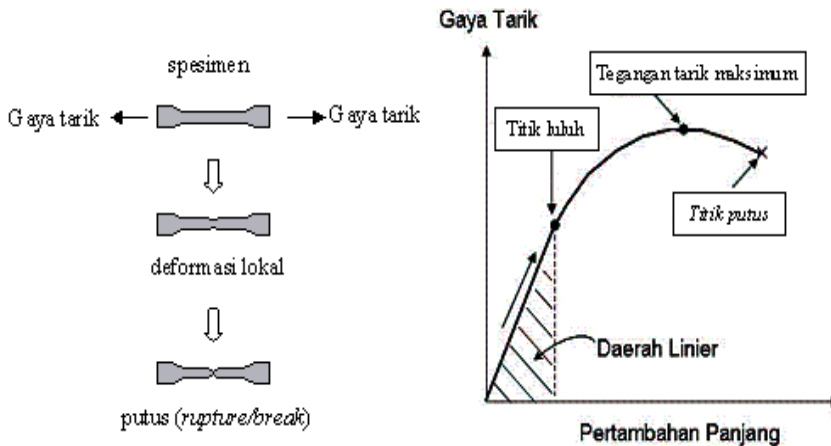
Salah satu cara yang dapat ditempuh untuk meningkatkan sifat mekanik yang baik adalah menerapkan perlakuan panas. Dalam penelitian (**Sigit Gunawan**) untuk material paduan aluminium AA 514.0 Bahan ini di gunakan untuk pengujian sifat mekanik. Spesimen ini diberi perlakuan *aging* dengan variasi suhu 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, dan 450°C, dengan waktu tahan masing-masing selama 1 jam dan di dinginkan di udara. Uji yang dilakukan menggunakan pengujian ketangguhan impak dan pengujian kekerasan. Hubungan antara temperatur *aging* dan kekerasan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur *aging*, nilai kekerasan rata-rata tertinggi diperoleh pada *raw material* yaitu sebesar 35,5 kg/mm<sup>2</sup>. karena penyebaran Al-Mg cukup merata terlihat dari struktur Al-Mg yang menyebar tidak beraturan. Kenaikan temperatur *aging* menyebabkan kekerasan meningkat tetapi ketangguhan impak cenderung menurun. Nilai ketangguhan impak tertinggi diperoleh pada temperatur *aging* 250°C sebesar 1,446 joule/mm<sup>2</sup>.

### 1.7.2 Pengaruh Waktu *Aging* Terhadap Sifat Mekanis

Pengaruh temperatur penuaan dan waktu penuaan buatan terhadap sifat mekanis sangat bergantung pada temperatur penuaan dan waktu penuaan. Pada penelitian (**Aditya R. Prabukhot, dkk, 2015**) menyelidiki pengaruh parameter perlakuan panas yaitu. Temperatur *aging* dan waktu *aging* pada kekerasan paduan aluminium 6082. Dengan menggunakan variasi temperatur *aging* 175°C, 185°C, 195°C, 205°C, 220°C dan waktu *aging* 2,4,6,8,10 jam. Pada temperatur penuaan di bawah 200°C tidak ada kenaikan atau penurunan nilai kekerasan yang diperoleh pada waktu penuaan. Untuk temperatur di atas 200°C, kekerasan menurun terus menerus seiring dengan bertambahnya waktu penuaan. Oleh karena itu pada suhu yang lebih tinggi paduan menunjukkan pengurangan kekerasan yang cepat dengan bertambahnya waktu penuaan.

## 2.8. Uji Tarik

Adalah salah satu uji stress strain mekanik yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan material dan mengetahui karakteristik dari material tersebut terhadap gaya tarik. Dalam pengujiannya, material uji ditarik sampai putus. Semua susunan struktur material bisa diketahui dengan jelas, sehingga dapat menentukan kualitas material tersebut.



Gambar 2.7 Gambaran uji Tarik

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 pertambahan panjang vs beban mengikuti aturan **Hooke** sebagai berikut:

*Rasio tegangan (stress) dan regangan (strain) adalah konstan*

**Stress** adalah **beban dibagi luas penampang bahan** dan **strain** adalah **pertambahan panjang dibagi panjang awal bahan**

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) atau  $F$  (N) maka batang uji (yaitu panjang uji) akan bertambah sebesar  $\Delta L$  (mm). Pada saat itu pada batang uji bekerja tegangan yang besarnya:

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

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

$P$  = beban tarik (kg), atau  $F$  = Gaya tarik (N)

$A_0$  = Luas penampang mula-mula ( $\text{mm}^2$ )

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

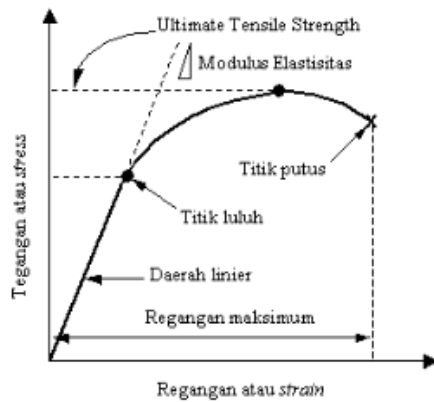
$$\epsilon = \Delta L/L_0 = (L - L_0)/L_0$$

dimana  $\epsilon$  = regangan (%)

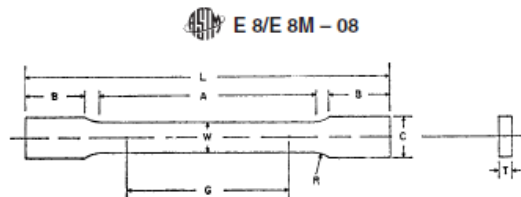
$L_0$  = panjang “batang uji” mula-mula (mm)

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

$$\text{Modulus Elastisitas: } E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$



**Gambar 2.8** Kurva Tegangan Regangan



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.006]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A—Length of reduced section, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B—Length of grip section (Note 8)	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

**Gambar 2.9** Specimen uji tarik ASTM E8

## 2.9. Uji *Fatigue*

### 2.9.1. Prinsip Dasar Kelelahan Pada Logam

*Fatigue* atau kelelahan adalah kerusakan material yang diakibatkan oleh adanya tegangan yang berfluktuasi yang besarnya lebih kecil dari tegangan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) maupun tegangan luluh (*yield*) material yang diberikan beban konstan.

Umur lelah didefinisikan sebagai jumlah siklus yang dicapai material sampai material tersebut mengalami patah dengan pembebanan tertentu. Batas lelah (*fatigue limit*) didefinisikan sebagai besarnya beban maksimal yang menghasilkan umur lelah tak terhingga.

Karakteristik kelelahan logam dapat dibedakan menjadi 2, karakteristik makro dan karakteristik mikro. Karakteristik makro merupakan ciri-ciri kelelahan yang dapat diamati secara visual (dengan mata telanjang dan kaca pembesar). Sedangkan karakteristik mikro hanya dapat diamati dengan mikroskop.

Ketahanan lelah suatu bahan tergantung dari perlakuan permukaan atau kondisi permukaan dan temperatur operasi. Perlakuan permukaan merubah kondisi permukaan dan tegangan sisa permukaan. Hal itu terjadi karena pada permukaan terjadi konsentrasi tegangan tekan atau tarik yang lebih tinggi. Pada kondisi permukaan sedang menerima tegangan tarik maka tegangan sisa tekan pada permukaan akan menghasilkan resultan tegangan tekan yang semakin besar. Tegangan tekan akan menghambat terjadinya *initial crack* atau laju perambatan retak. Sehingga ketahanan lelah meningkat, dan akan terjadi sebaliknya apabila terjadi tegangan sisa tarik di permukaan.

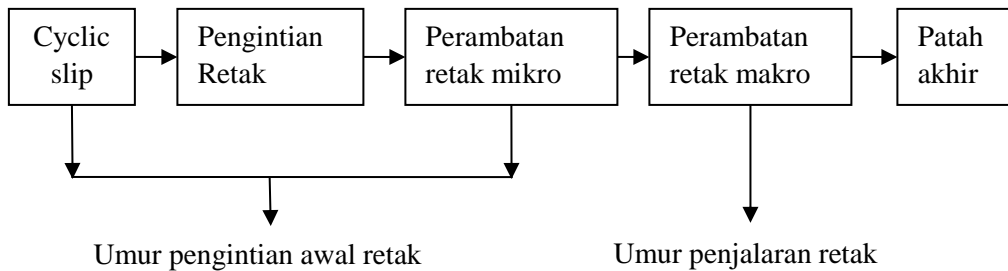
Pada dasarnya kegagalan *fatigue* dimulai dengan terjadinya retakan pada permukaan benda uji. Hal ini membuktikan bahwa sifat-sifat *fatigue* sangat peka terhadap kondisi permukaan, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kekasaran permukaan, perubahan sifat-sifat permukaan dan tegangan sisa permukaan (Dieter, 1992).

### 2.9.2. Mekanisme Perpatahan *Fatigue*

Kelelahan merupakan suatu kegagalan yang terjadi akibat sejumlah beban yang diterapkan pada suatu konstruksi. Kegagalan material dapat terjadi jauh dibawah tegangan luluhnya.

Mekanisme terjadinya kegagalan fatik dapat dibagi menjadi tiga fase yaitu: awal retak (*initiation crack*), perambatan retak (*crack propagation*), dan perpatahan akhir (*fracture failure*).

Kegagalan dan modus kelelahan dapat terjadi pada struktur yang mengalami beban berulang atau berfluktuasi. Terjadinya kelelahan pada struktur dapat dibagi menjadi beberapa fasa,



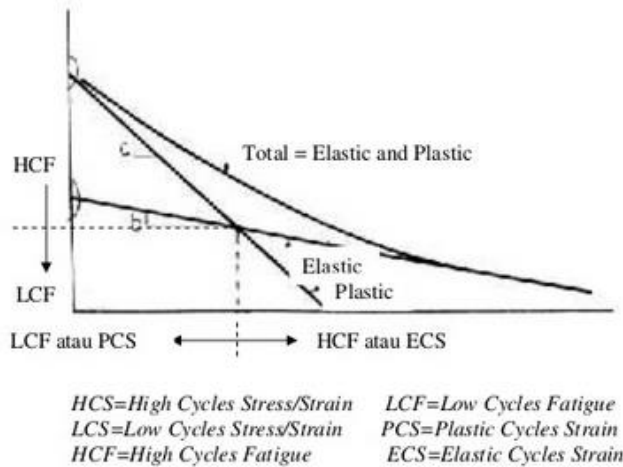
**Gambar 2.10** Mekanisme patah lelah

### 2.9.3. Kurva S-N

Kurva S-N adalah kurva yang didapat dari hasil pengujian fatik yang merupakan grafik hubungan antara kekuatan fatik (S: *Strength*) dan jumlah siklus pembebanan (N: *Number of Stress Cycle*). Metode dasar untuk penyajian data kelelahan adalah menggunakan kurva S-N, yaitu pemetaan tegangan (S) terhadap jumlah siklus hingga terjadi kegagalan (N). Nilai tegangan yang diplot dapat berupa nilai tegangan maksimum, minimum atau nilai rata-rata. Harga tegangan biasanya adalah tegangan nominal, yang paling banyak cara penentuan sifat-sifat fatik material dibuat dalam lenturan balik penuh, dimana tegangan rata-ratanya bernilai nol.

Kurva S-N memberikan banyak informasi sifat fatik karena pada saat pengujian, dimasukkan faktor geometri, perlakuan permukaan, kondisi pembebanan, temperatur dan proses perlakuan material. Konsep ini secara luas dipergunakan dalam aplikasi perancangan material dimana tegangan yang terjadi dalam daerah elastik dan umur lelah yang panjang. Metode S-N ini tidak dapat diterapkan dalam kondisi sebaliknya (tegangan dalam daerah plastis dan umur lelah yang relatif pendek) hal ini dapat dilihat pada gambar berikut ini.



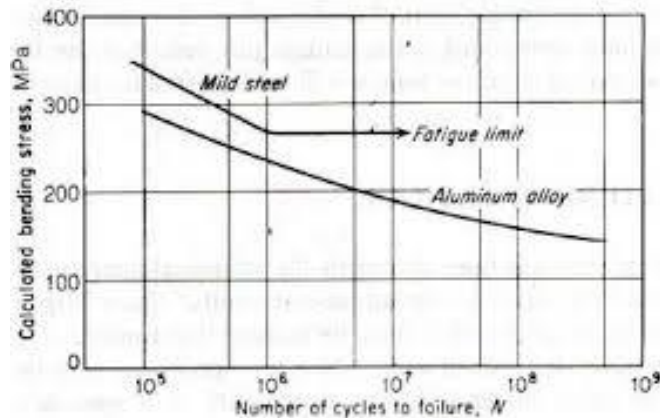


**Gambar 2.11** Pembagian daerah umur lelah dalam kurva S-N

Persamaan umum kurva S-N dinyatakan oleh persamaan (dowling,1991)

$$S = B + C \ln(N_f)$$

Dengan : B dan C konstanta empiris material

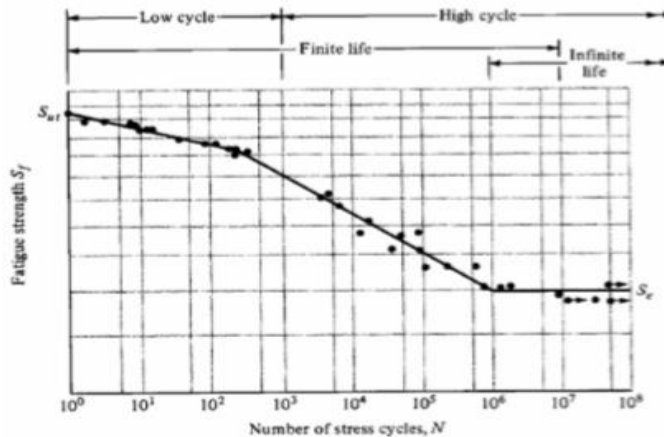


**Gambar 2.12** Kurva Kelelahan untuk logam besi dan bukan besi (Sumber: George E. Dieter, 1992)

Kurva tersebut didapat dari pemetaan tegangan terhadap jumlah siklus sampai terjadi kegagalan pada benda uji. Pada kurva ini siklus menggunakan skala logaritma. Pengujian *fatigue* dilakukan dengan cara memberikan stress level tertentu sehingga spesimen patah pada siklus tertentu. Retak *fatigue* biasanya dimulai pada permukaan di mana lentur dan torsi menyebabkan terjadinya tegangan-tegangan yang tinggi atau di tempat-tempat yang tidak rata menyebabkan terjadinya

konsentrasi tegangan. Oleh karena itu, batas kelelahan (*endurance limit*) sangat tergantung pada kualitas penyelesaian permukaan.

Contoh kurva S-N diperlihatkan pada Gambar 2.13



**Gambar 2.13** Grafik hasil pengujian fatik (*fatigue test*)

Dari grafik diatas terdapat informasi mengenai karakteristik fatik dari material. Sumbu horizontal menunjukkan data jumlah siklus pembebanan dan sumbu vertikal menunjukkan kekuatan fatik. Pada rentang siklus  $10^7$  sampai  $10^8$  dapat diamati ada tiga daerah spesimen yang diberi tanda panah. Tanda ini berarti bahwa spesimen belum patah pada saat pengujian dihentikan. Kondisi ini dinamakan batas ketahanan material dalam menerima beban fatik (*endurance limit*). Tingkat tegangannya dinamakan tegangan *endurance* ( $\sigma_e$ ). Untuk merencanakan komponen yang memiliki umur pakai aman atau bahkan umur tak hingga maka tingkat tegangan yang diaplikasikan harus dibawah batas tegangan *endurance* komponen tersebut.

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

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

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

$\sigma_{maks}$  = Tegangan maksimum

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.

#### 2.9.4. Aspek Rekayasa *Fatigue*

Pada pengujian material di laboratorium, hasil uji digambarkan dalam bentuk kurva S-N ini yaitu kurva skala-logaritma dari tegangan terhadap jumlah siklus hingga gagal. Dari kurva ini dapat diketahui bahwa *limit fatigue* dari material tersebut.

Diagram S-N ini menunjukkan bahwa beberapa jenis logam tahan terhadap tegangan dengan jumlah banyak, asalkan tegangan yang diterapkan berada dibawah tegangan limit. Tegangan ini disebut *limit ketahanan fatigue*.



















Siklus tegangan yang diterapkan terhadap spesimen merupakan satu-satunya variable tunggal penting untuk menentukan umur pada pembebanan *fatigue*, akan tetapi kinerja material juga sangat dipengaruhi oleh berbagai kondisi, yang dapat di rangkum sebagai berikut:

1. Persiapan permukaan  
Karena *fatigue* sering kali terjadi di permukaan atau dekat permukaan komponen, kondisi permukaan merupakan hal penting dalam menentukan umur *fatigue*. Penghilangan bekas permesinan dan ketidakteraturan pada permukaan selalu diperhatikan untuk meningkatkan sifat *fatigue*
2. Efek temperatur  
Temperatur mempengaruhi sifat *fatigue* sama seperti pengaruhnya terhadap kekuatan tarik, Kekuatan *fatigue* paling tinggi terdapat pada temperatur rendah dan turun secara bertahap dengan meningkatnya temperatur.
3. Frekuensi Siklus tegangan  
Pada berbagai logam, pengaruh frekuensi siklus tegangan pada umur *fatigue* kurang berarti, meskipun penurunan frekuensi biasanya menghasilkan umur *fatigue* yang sedikit lebih rendah. Efeknya lebih besar apabila temperatur uji *fatigue* dinaikkan, yaitu ketika umur *fatigue* tergantung pada waktu pengujian keseluruhan dan tidak pada jumlah siklus.

#### 2.9.5. Jenis Patahan Kelelahan

Dengan mempelajari penampilan permukaan retak dari kegagalan fatik, adalah mungkin untuk menentukan tingkat kelebihan beban serta tingkat konsentrasi tegangan relatif, lihat gambar 2.14. jika tidak ada konsentrasi tegangan, zona kelelahan berbentuk cembung, dilihat dari titik inisiasi fraktur. karena konsentrasi tegangan meningkat ada perubahan bertahap dan terus menerus ke zona berbentuk cekung. Ukuran area fraktur akhir meningkat dengan beban. berbeda dengan tegangan lentur yang berdenyut, tegangan lentur yang bergantian dan berputar dapat

memulai fraktur kelelahan dari dua sisi maupun dari satu sisi, tergantung pada ukuran penguat tegangan.

Type of fatigue stress Stress category	No stress concentration		Low stress concentration		High stress concentration	
	Light over-loading	Heavy over-loading	Light over-loading	Heavy over-loading	Light over-loading	Heavy over-loading
1. Pulsating flexural stress						
2. Alternating flexural stress						
3. Rotating bending stress						

**Gambar 2.14** Ilustrasi dari patahan kelelahan yang berbeda yang disebabkan oleh berbagai jenis kelelahan lentur (after G. Jacoby)