

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

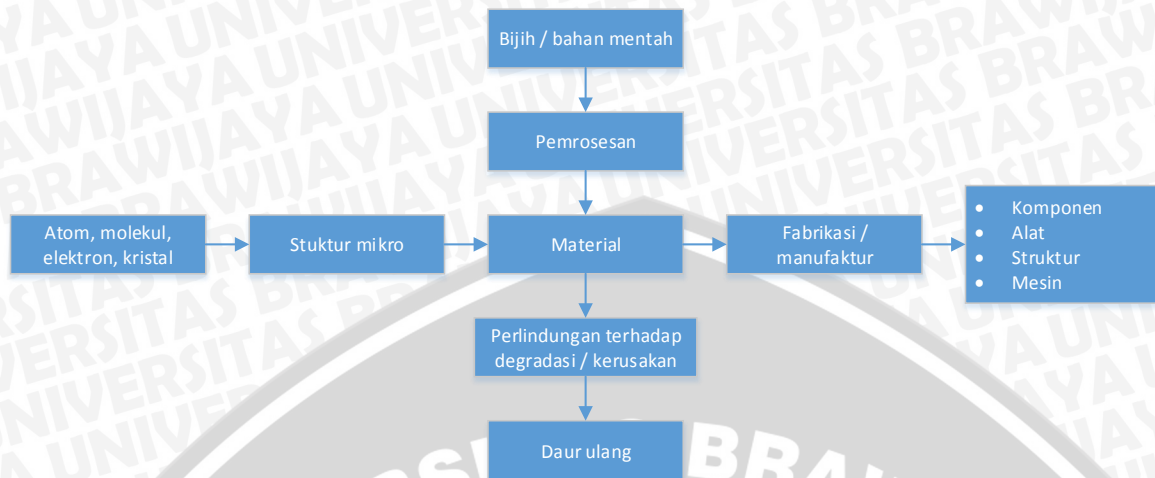
Shengping Wang, dkk (1998) dalam penelitian berjudul “*Compressive residual stress introduced by shot peening*” meneliti pada variasi bahan 20Cr, 30CrMo, 40Cr, GC4, 45steel dan LC9 paduan aluminium. Metode yang digunakan adalah pengujian, dimensi spesimen 15 x 10 x 50 mm yang telah di lapisi dan penembakan dilakukan oleh mesin pneumatik dengan bola tembak dari baja cor diameter 0.8 mm. Didapatkan hasil bahwa semakin banyak deformasi plastis, tegangan sisa juga semakin tinggi dan kekuatan fatigue meningkat.

S.A. Meguid, dkk (1998) dalam penelitian berjudul “*Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stress*” meneliti pada bahan AISI 316L stainless steel yang dilakukan single shot peening. Metode yang digunakan adalah simulasi pada ANSYS 5.3, dimensi spesimen bergantung dengan radius bola / R (lebar spesimen= 7 x R, tinggi= 4 x R dan tebal= 5 x R) dengan variasi kecepatan 50, 75 dan 100 m/s serta variasi diameter bola 0,5, 1 dan 2 mm. Didapatkan hasil bahwa semakin tinggi kecepatan maka deformasi plastis akan semakin dalam dan diameter bola semakin besar maka volume deformasi plastis akan semakin besar

Katsuji Tosha, dkk (2001) dalam penelitian berjudul “*Characteristic of shot peened surfaces and surface layers*” meneliti pada baja karbon sedang. Metode yang digunakan adalah pengujian, dimensi spesimen 25 x 25 x 11.5 mm variasi diameter bola 0,55, 1,1, 1,6 dan 2,2 mm serta variasi kecepatan penembakan 15, 20, 25, 30 dan 35 m/s. Didapatkan hasil bahwa semakin besar diameter bola dan semakin tinggi kecepatan maka kedalaman indentasi akan semakin jauh. Semakin dalam indentasi maka kekasaran permukaan yang terjadi semakin tinggi.

Jawad Badreddine, dkk (2014) dalam penelitian berjudul “*Simulation of shot dynamics for ultrasonic shot peening : Effect of process parameters*” meneliti pada bahan aluminium. Metode yang digunakan adalah simulasi menggunakan real-time animation, spesimen berbentuk tabung dan prisma (dimensi yang diukur 3.5 x 3.5 mm) dengan sudut prisma 0°, 20° dan 40° dan kecepatan 2.2 m/s dan 3.5 m/s. Didapatkan hasil bahwa semakin besar sudut maka *impact* akan terkonsentrasi dan menghasilkan nilai yang semakin besar.

## 2.2 Shot Peening



Gambar 2.1 Ruang lingkup pengetahuan material teknik  
Sumber : Sofyan (2011 : 4)

Pada gambar 2.1 dijelaskan tentang ruang lingkup material teknik yang berkaitan dengan material awal, proses dan produk. Material awal yaitu bahan yang akan digunakan untuk membuat suatu produk seperti contoh logam, keramik, plastis dan yang lain. Proses adalah langkah untuk mengolah material awal menjadi produk yang menambahkan nilai fungsi (*added value*) dan mengolah sifat yang dimiliki suatu material. Hasil dari semua proses ialah produk, yang mana akan digunakan sesuai kebutuhan dan keinginan.

Logam adalah material yang sering digunakan untuk pembuatan suatu produk / elemen. Sebagian besar logam dapat ditingkatkan kekuatan dan kekerasannya melalui beberapa teknik. Tujuan penguatan adalah menghasilkan logam dengan kekuatan dan kekerasan optimum serta keuletan yang cukup baik. Prinsip penguatan adalah menghambat pergerakan dislokasi dengan beberapa teknik. Ketika dislokasi terhambat maka logam akan semakin kuat dan keras. Teknik penguatan yang ada yaitu :

- a) Pengerasan regang (*strain hardening*) yaitu *shot peening*.
- b) Penguatan batas butir (*grain boundary strengthening*)
- c) Penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*)
- d) Penguatan pengendapan (*precipitation strengthening*)

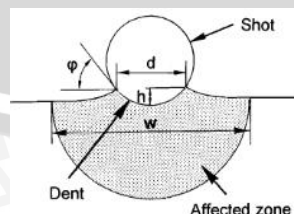
*Shot peening* adalah proses *cold working* (pengerjaan dingin) dimana pengerjaannya berada pada suhu dibawah rekristalisasi ( $723^{\circ}\text{C}$ ) atau pada suhu ruangan. Kelebihan penggunaan *cold working* adalah hasil pengerjaannya masih sesuai dengan dimensi dan toleransi yang ditentukan, diaplikasikan pada semua material dan dapat di-*finishing* dengan



baik (tidak terbentuk oksidasi). Proses ini biasanya digunakan untuk meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan. Sedangkan kekurangan *cold working* adalah struktur butiran yang akan berubah. *Cold working* dibagi menjadi 4 macam yaitu :

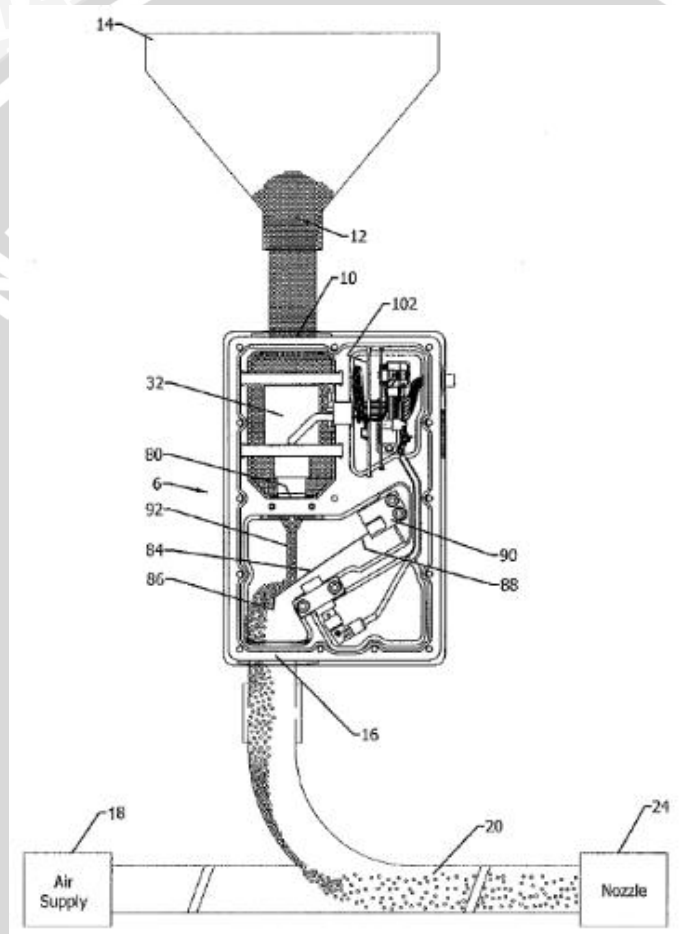
- Squeezing* (proses deformasi yang bersangkutan dengan permukaan material, untuk menghaluskan / memperkasar permukaan), didalamnya terdapat proses *rolling*, *swaging*, *cold forging*, *sizing*, *extrusion*, *riveting*, *staking*, *coining*, *peening*, *bunishing*, *die hobbing* dan *thread rolling*.
- Bending* (proses deformasi melebihi sumbu kerja dengan merubah dimensi / geometri material), didalamnya terdapat proses *angle*, *roll*, *roll forming*, *seaming*, *flaming* dan *straightening*.
- Shearing*, didalamnya terdapat proses *shearing*, *slitting*, *blanking*, *piercing*, *lancing*, *perforating*, *notching*, *nibbling*, *shaving*, *trimming*, *cutoff* dan *dinking*.
- Dan yang terakhir adalah *drawing* (proses deformasi dengan meletakkan logam pada lubang / cetakan kemudian ditekan) yang terdapat proses *bar and tube drawing*, *wire drawing*, *spinning*, *embossing*, *stretch forming*, *shell drawing*, *ironing* dan *high-energy rate forming*.

*Shot peening* terdiri dari 2 bagian yaitu *shot* dan *peening*. *Shot* adalah bola logam / kaca / partikel keramik / *cut wire* dan *peening* adalah penembakan. Jadi, *shot peening* adalah proses untuk merubah kondisi permukaan material dengan cara menembakkan partikel kecil dan keras berbentuk bola dari logam / kaca / partikel keramik / *cut wire* (diameter 0.25 – 1 mm) disuatu permukaan benda / material secara terus-menerus dengan kecepatan tinggi (20 – 150 m/s) pada jarak 300 mm. Penembakan partikel akan menimbulkan suatu cekungan seperti pada gambar 2.2. *Cold working* terjadi saat material mempertahankan bentuknya ketika ditembakkan oleh bola kecil, cekungan terjadi karena tegangan tekan yang besar melebihi tegangan yieldnya.



Gambar 2.2 Gambar indentasi  
Sumber : Tosha (2001 : 195)

Media yang biasa digunakan pada *shot peening* adalah *air blast system (ABS)* dan *centrifugal blast wheels (CBW)*. Kesamaannya adalah menggunakan udara berkecepatan dan bertekanan tinggi, yang membedakan adalah peletakkan atau penembakan bolanya (ABS menggunakan bantuan nozzle, sedangkan CBW meletakkan bola pada tengah *wheels*). Penelitian membuktikan bahwa hasil las akan gagal pada 250.000 siklus, ketika mendapatkan *shot peened* akan gagal pada 2,5 juta kali siklus dan kegagalan terjadi pada area luar daerah pengelasan (Wikipedia).



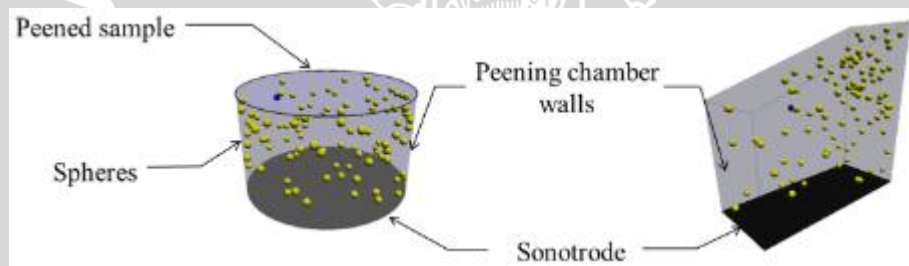
Gambar 2.3 Sistem *shot peening*  
Sumber : Champagne et el (2014 : 1)

Pada gambar 2.3 adalah mekanisme *shot peening*. Media *shot peening* dimasukkan ke nomor 14 (*hopper*), nomor 12 mengatur media *shot peening* yang akan ditembakkan (apabila logam maka digunakan pengatur magnetik, selain logam menggunakan pengatur yang berbeda). Penemuan terbaru adalah nomor 6, fungsinya adalah mengatur media tembak selain logam. Nomor 10 dan 32 adalah saluran turun dari media shot peening. *Orifice* terletak pada nomor 80. Terdapat sebuah *beam* nomer 84, 86, 88 dan 90 (nomor 90 adalah



penjepit dari *beam* tersebut). Fungsi *beam* adalah sebagai tempat peletakan spesimen yang akan dilakukan *shot peening*. Media yang telah selesai digunakan akan melewati *outlet* nomor 16 dan menuju ke nomor 20 yang akan diberi aliran udara bertekanan agar media menuju *nozzle*.

*Shot peening* tak hanya menggunakan 2 media yaitu ABS dan CBW saja, pengklasifikasian proses dibagi 6 yaitu : *ultrasonic shot peening*, *water jet peening*, *oil jet peening*, *micro shot peening*, *laser shock peening* dan *cavitation shotless peening*. *Ultrasonic shot peening* menggunakan sonotrode pada frekuensi ultrasonik (pemodelan pada gambar 2.4), *water jet peening* menggunakan bola dengan bantuan air berkecepatan tinggi, *oil jet peening* menggunakan bantuan minyak, *micro shot peening* menggunakan udara bertekanan, *laser shock peening* menggunakan laser berupa gelombang dengan pulsa dan *cavitation shotless peening* menggunakan proses kavitasi. Yang paling sering digunakan dari 7 proses *peening* yaitu : *shot peening* dan *ultrasonic shot peening*.

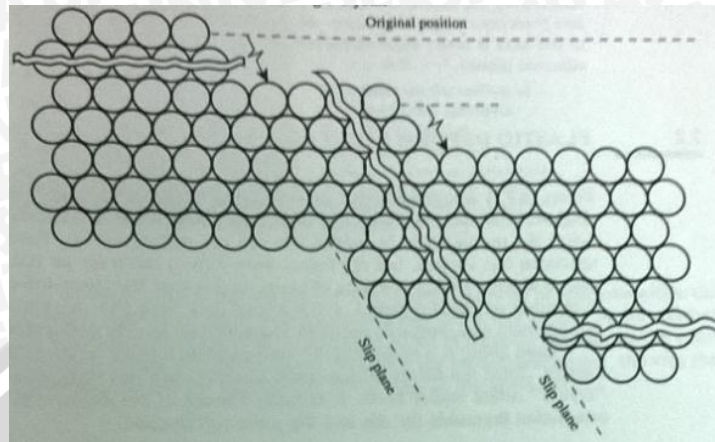


Gambar 2.4 Contoh pemodelan pada *ultrasonic shot peening*  
Sumber : Badreddine (2014 : 2)

Cekungan diakibatkan oleh material yang terdeformasi. Deformasi adalah proses Bergeraknya atom dari posisi awal. Deformasi dibagi 2 yaitu : deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis dan plastis terjadi pada permukaan yang terkena tembakan partikel. Umumnya deformasi plastis terjadi pada bagian yang terkena langsung oleh partikel, sedangkan deformasi elastis terjadi pada sekeliling bagian deformasi plastis karena pengaruh tegangan yang diberikan pada partikel.

Deformasi elastis adalah perubahan posisi atom pada pembebanan dibawah elastik, dimana atom sekelilingnya masih memiliki formasi yang sama dengan sebelum diberi beban dan atom akan kembali ke posisi semula jika beban dihilangkan serta tidak terjadi pemutusan ikatan kimia (saat tegangan luar diberi, jarak antar atom berubah dalam jumlah kecil sesuai dengan material dan struktur serta ikatannya). Sedangkan deformasi plastis adalah perubahan posisi atom karena terjadi slip (gambar 2.5) yaitu atom bergeser, pergerakan atom sangat jauh dari posisi semula (berada pada susunan atom baru lainnya) dan atom tidak akan

kembali keposisi semula apabila beban dihilangkan. Deformasi dipengaruhi oleh tegangan geser dan menyebabkan ukuran butir menjadi semakin kecil serta meningkatkan batas butir.



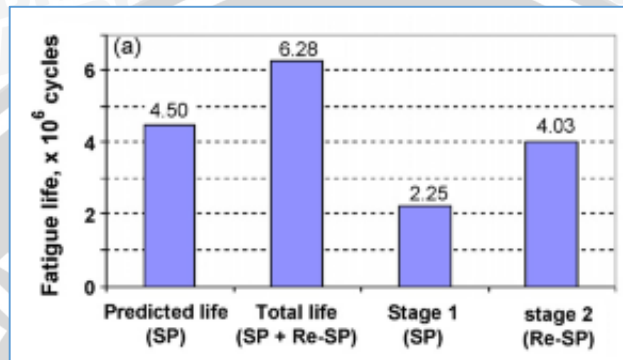
Gambar 2.5 Slip  
Sumber : Dalton (1993 : 45)

Keuntungan penggunaan *shot peening* adalah mudah, murah, bisa digunakan untuk berbagai macam ukuran (*flexible*), tidak merubah desain atau material yang sudah berbentuk komponen, berguna pada aplikasi industri dan meningkatkan ketahanan (fatigue, keausan, korosi, tegangan akibat retakan, kavitasi), menghentikan pertumbuhan retak dan meningkatkan karakteristik perpindahan panas. Inti penggunaan *shot peening* adalah mencapai kedalaman yang dapat dicapai oleh penembakan, maka hasil yang ditimbulkan adalah kekasaran permukaan yang akan meningkat baik secara makro ataupun mikro. Kekasaran permukaan memegang peranan penting dalam perencanaan suatu elemen mesin dan yang berhubungan dengan gesekan, keausan dan pelumasan. Kekasaran permukaan tidak pada semua permukaan sama tetapi berbeda yang disebabkan oleh fungsi / kegunaan elemen tersebut.

Yang mempengaruhi shot peening adalah material (properti mekanik), ukuran bola, ukuran spesimen, kecepatan tembak, sudut penembakan, waktu dan lainnya. Produk *shot peening* biasa digunakan untuk menahan pembebanan dinamik (beban yang berfluktuasi pada periode waktu), sedangkan pada statik struktur / pembebanan statik (beban berubah secara lambat terhadap waktu dan diberikan secara seragam) tidak terlalu berpengaruh atau bahkan tidak berpengaruh sama sekali. Hasil *shot peening* sangat sering ditemui disekitar yaitu : pegas, poros, roda gigi, sambungan, bantalan, silinder blok, impeller katup / klep, *crankshaft* dan yang lainnya.



Macam-macam *shot peening* yaitu : *traditional shot peening (single shot peening)*, *dual shot peening* dan *triple shot peening*. *Single shot peening* yaitu penembakan 1 bola pada 1 tempat (tidak ada pengulangan penembakan untuk tempat yang sama). Sedangkan *dual shot peening* adalah penembakan 2 bola tembak pada 1 tempat yang sama dengan pengaturan berbeda antara bola 1 dengan yang lain (frekuensi dan lain-lain). *Triple shot peening* hampir sama dengan dual shot peening tetapi menggunakan 3 bola pada 1 tempat.



Gambar 2.6 Pengaruh *shot peening* dan *re-shot peening*  
Sumber : Jiang ( 2006 : 142)

Dapat dilihat pada gambar 2.6 *shot peening* dan *re-shot peening* mempengaruhi nilai umur fatigue dari suatu material. Ketika diberi *shot peening* umur lelah bertambah. *Re-shot peening* adalah penembakan ulang menggunakan shot peening ketika material sudah mengalami kelelahan. Jika dilakukan 2 proses *shot peening* dan *re-shot peening* maka akan dihasilkan total umur dari umur awal dan tambahan umur lelah. Saat diberi *shot peening* akan terjadi pengerasan regang, sedangkan *re-shot peening* berguna untuk *recover* / memperkuat pengerasan regang.

### 2.3 Impuls dan Momentum

Penembakan partikel bola menuju spesimen menyebabkan tumbukan. Tumbukan yang terjadi merubah energi mekanik menjadi energi tekan dan kemungkinan energi kembali. Oleh karena itu diperlukan suatu asas untuk menganalisa tentang perubahan energi yang terjadi sebelum melakukan simulasi. Hukum yang paling dasar digunakan adalah hukum ketiga Newton tentang gerak yang berbunyi “terhadap setiap aksi senantiasa ada reaksi yang sama besar dan berlawanan arahnya, atau interaksi timbal-balik antara dua benda senantiasa sama dan arahnya berlawanan”. Hukum ketiga Newton sering dikenal dengan hukum “aksi-reaksi”.

Impuls-momentum merupakan besaran vektor yang memiliki besaran dan arah. Momentum adalah perkalian massa dan kecepatan sedangkan impuls adalah selisih / perubahan momentum (momentum awal - momentum akhir). Asas impuls-momentum adalah “besar dan arah impuls vektor gaya resultan terhadap sebuah partikel, dalam sembarang selang waktu, sama dengan besar dan arah perubahan vektor momentum partikel yang bersangkutan”. Penerapan asas impuls-momentum berguna pada gaya yang bekerja pada waktu yang sebentar, yaitu gaya yang timbul akibat tumbukan ataupun ledakan. Penggunaan asas impuls momentum untuk menyelesaikan permasalahan tumbukan dua benda, pemisahan dua benda, ledakan bom dan penyatuan 2 benda.

$$P = m \cdot v \quad (\text{Sears., Zemansky, 1999: 192}) \quad (2-1)$$

Keterangan : P = Momentum (kg.m/sec) ((kg.m.sec<sup>-1</sup>).s) (N.sec)

m = Massa benda (kg)

v = kecepatan benda (m/sec)

$$I = m \cdot v_2 - m \cdot v_1 \quad (\text{Sears., Zemansky, 1999: 193}) \quad (2-2)$$

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F \cdot dt \quad (\text{Sears., Zemansky, 1999: 191}) \quad (2-3)$$

Keterangan : I = Impuls (N.sec)

v<sub>2</sub> = kecepatan awal

v<sub>1</sub> = kecepatan akhir

Hukum yang digunakan pada impuls momentum adalah hukum kelestarian momentum dan hukum kelestarian energi kinetik. Hukum kelestarian momentum / hukum kelestarian momentum linier menyatakan “Jika gaya eksternal resultan yang bekerja pada sistem sama dengan nol, maka vektor momentum total sistem tetap konstan”. Sedangkan hukum kelestarian energi kinetik menyatakan “Energi kinetik pada benda yang bertumbukan sebelum dan sesudah memiliki nilai yang sama”.

Persamaan kelestarian momentum

$$m_A v_{A1} + m_B v_{B1} = m_A v_{A2} + m_B v_{B2} \quad (\text{Sears., Zemansky, 1999: 200}) \quad (2-4)$$

Persamaan kekekalan energi kinetik

$$\frac{1}{2} m_A v_{A1}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{B1}^2 = \frac{1}{2} m_A v_{A2}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{B2}^2 \quad (\text{Sears., Zemansky, 1999: 200}) \quad (2-5)$$

Hukum kelestarian momentum lebih umum digunakan daripada hukum kekekalan energi mekanik. Kelestarian momentum berlaku bagaimanapun gaya dakhil. Sedangkan kekekalan mekanik hanya berlaku pada gaya dakhil konservatif (kekal) seperti gravitasi dan elastisitas pegas yang memiliki sifat : tidak bergantung pada lintasan, sama dengan selisih antara harga akhir dan awal fungsi energi dan dapat timbul kembali sepenuhnya



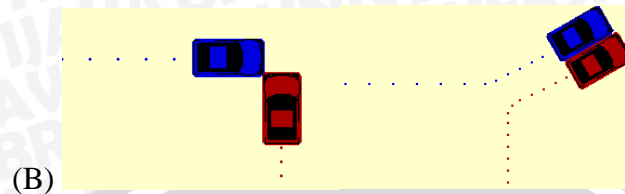
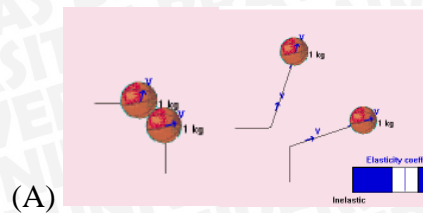
Tumbukan merupakan impuls yang terjadi setelah adanya momentum yang mengenai suatu material. Tumbukan dibagi menjadi 3 macam yaitu : lenting sempurna, lenting sebagian dan tidak lenting sama sekali (gambar 2.8 penggambaran lenting sempurna dan tidak lenting sama sekali). Pertimbangan momentum saja belum cukup mengetahui kecepatan akhir, dimana kecepatan awal dan massa telah ditentukan dan tumbukan yang terjadi dalam kondisi berhadapan antara 1 benda dengan benda yang lainnya. Sedangkan apabila berhadapan dengan benda yang bertumbukan secara langsung tidak perlu menggunakan rumus untuk menghitung kecepatan awal dan akhir, cukup menggunakan *stroboscope* dan mengetahui apakah tumbukan tersebut terjadi lenting sempurna, lenting sebagian atau tidak lenting sama sekali.



Gambar 2.7 *Stroboscope*  
Sumber : MC Tester (2004)

*Stroboscope* (gambar 2.7) adalah alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan menggunakan sumber sinar cahaya yang dapat disinkronisasi dengan kecepatan dan pengulangan gerakan sehingga benda yang berpindah sangat cepat terlihat tidak bergerak atau bergerak sangat lambat. Alat ini juga dapat digunakan mempercepat atau memperlambat kecepatan untuk keperluan pengamatan, analisis atau fotografi kecepatan tinggi. Prinsip pada alat ini mempelajari rotasi, pergerakan maju-mundur, atau obyek yang berputar. *Stroboscope* berasal dari bahasa Yunani “strobos” yang berarti pusaran air dan “skopein” yang berarti melihat. Joseph Plateau dari Belgia adalah penemu dari *stroboscope* pada tahun 1832.

Pada lenting sempurna berlaku hukum kelestarian momentum dan energi kinetik dimana tidak ada penyerapan energi ( $e=1$ ). Sedangkan lenting sebagian berlaku hukum kekekalan momentum, terdapat energi yang dibebaskan setelah tumbukan karena berubahnya energi mekanik menjadi energi panas / energi bunyi / energi yang lain ( $0 < e < 1$ ). Dan tidak lenting sama sekali berlaku hukum kelestarian momentum, setelah tumbukan kedua benda menyatu dan energi terserap keseluruhan ( $e=0$ ) seperti pada gambar 2.7.



Gambar 2.8 Penggambaran (A) lenting sempurna, (B) tidak lenting sama sekali  
Sumber : UNY (2010)

Koefisien restitusi ( $e$ ) adalah perbandingan perubahan kecepatan benda sesudah bertumbukan dan sebelum bertumbukan. Koefisien ini tidak memiliki satuan dan nilainya 0 sampai 1. Nilai negatif digunakan untuk mempositifkan nilai jika  $\Delta v$  bernilai negatif / arah yang berlawanan.

Tumbukan lenting sempurna

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad (\text{Sears., Zemansky, 1999: 200}) \quad (2-6)$$

Tumbukan tidak lenting sama sekali

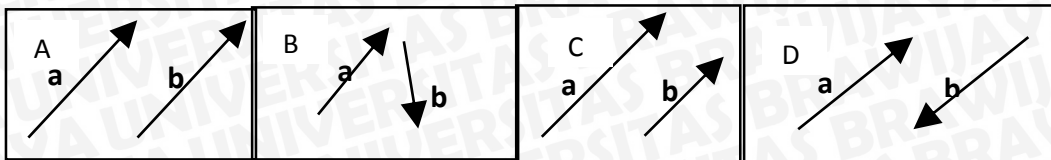
$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v' \quad (\text{Sears., Zemansky, 1999: 198}) \quad (2-7)$$

#### 2.4 Vektor kecepatan

Besaran dibagi menjadi yaitu besaran skalar dan vektor. Besaran skalar adalah besaran yang hanya dapat disebutkan besarnya (nilai), sedangkan besaran vektor adalah besaran yang harus disebutkan besarnya dan arahnya. Contoh besaran skalar yaitu : waktu, suhu, panjang, volume dan massa. Besaran vektor yaitu : kecepatan, percepatan, gaya, momentum, medan magnet dan medan listrik.

Setiap besaran vektor dapat diterangkan menggunakan anak panah yang disebut vektor. Besaran vektor ditulis dengan huruf tebal dan huruf yang sama tapi bentuknya biasa (tidak tebal) menyatakan besar dari besaran yang bersangkutan. Contoh : besar dai gaya  $F$  dinyatakan dengan  $F$ .



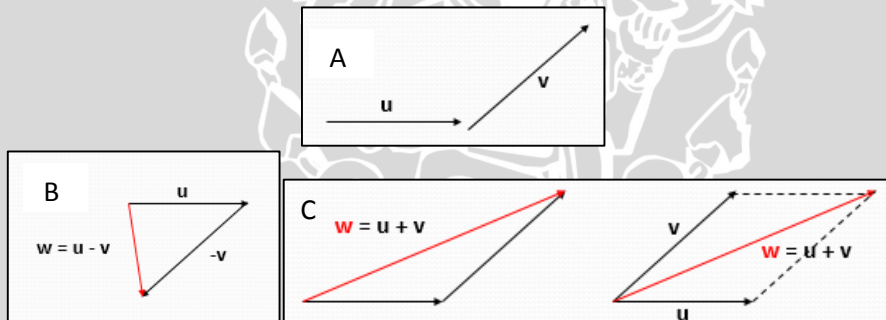


Gambar 2.9 Gambar (A) dua vektor sama,  $a = b$ , (B) dua vektor mempunyai besar sama, arah berbeda, (C) dua vektor arah sama, besaran beda dan (D) dua vektor besar dan arah berbeda

Sumber : Najib (2005 : 5)

Pada gaya tidak lengkap bila tidak disebutkan besarnya dan arah gayanya. Gaya juga dipengaruhi oleh garis kerja dan titik tangkapnya (garis gaya adalah garis yang terhingga panjangnya dan vektor gaya adalah bagian dari segmen garis gaya). Keefektifan gaya besar dan arah bergantung pada garis kerja dan titik tangkapnya (gambar 2.9 dan 2.10).

Dua vektor dianggap sama karena keduanya memiliki kesamaan besar dan arah. Analisa vektor merupakan salah satu cabang ilmu matematika murni. Vektor sebagai sebuah anak panah / sepotong garis lurus berarah yang bisa diidentifikasi dengan ilmu hitung pada aljabar, seperti penjumlahan, pengurangan (selisih vektor), penyusunan dan penguraian vektor.



Gambar 2.10 Gambar (A) vektor  $u$  dan  $v$ , (B) pengurangan vektor dan (C) penjumlahan vektor

Sumber : Najib (2005 : 6)

Perhitungan vektor dapat menggunakan metode segitiga, metode jajargenjang dan metode poligon. Metode segitiga menghasilkan bentuk segitiga pada vektor yang akan dijumlahkan dan metode jajargenjang menghasilkan bentuk jajargenjang (pada gambar 2.9 sebelah kiri metode segitiga dan sebelah kanan yaitu metode jajargenjang). Ketentuan penggunaan vektor dan pehitungannya, yaitu:

- a) Vektor yang memiliki arah berlawanan dari sumbu positif (x,y, z) diasumsikan bernilai negatif (-).
- b) Titik pangkal diletakkan pada ujung titik.

Rumus pengurangan vektor



$$\mathbf{u} - \mathbf{v} = \mathbf{w} \text{ atau } \mathbf{u} + (-\mathbf{v}) = \mathbf{w}$$

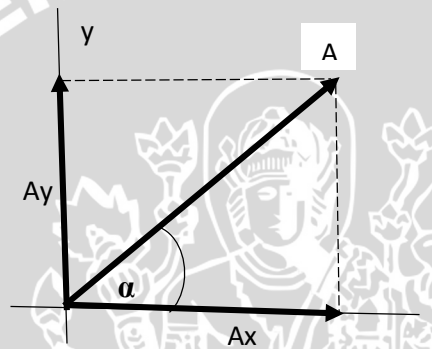
(Najib, 2005 : 6) (2-8)

Rumus penjumlahan vektor

$$\mathbf{u} + \mathbf{v} = \mathbf{w}$$

(Najib, 2005 : 6) (2-9)

Komponen adalah vektor yang hasil penjumlahan vektornya sama dengan vektor yang diketahui. Cara mencari komponen adalah dengan cara menguraikan vektor dengan garis sumbu x, y dan z. Antara vektor yang diketahui dan komponennya dihubungkan dengan *parallelogram* yang terbentuk dengan menarik garis putus-putus dari ujung vektor yang diketahui menjadi segiempat tegaklurus (gambar 2.11). Apabila komponen bernilai tegaklurus maka dapat dihitung dengan mudah.  $\alpha$  adalah sudut antara vektor A dan sumbu-x.



Gambar 2.11 Vektor  $A_x$  dan vektor  $A_y$  adalah komponen tegak lurus vektor  $A$  dalam arah sumbu-x dan sumbu-y

Sumber : Sears., Zemasky (1999 : 12)

Persamaan vektor komponen A pada sumbu x ( $A_x$ )

$$A_x = A \cdot \cos \alpha$$

(Sears., Zemansky, 1999: 13) (2-10)

Persamaan vektor komponen A pada sumbu y ( $A_y$ )

$$A_y = A \cdot \sin \alpha$$

(Sears., Zemansky, 1999: 13) (2-11)

Pada simulasi ini pengaturan sudut *shot peening* ( $\alpha$ ) dibentuk dari penembak / *gun* / *nozzle* ke sumbu tegak lurus dengan spesimen seperti pada gambar 2.11. Dapat dikatakan bahwa sudut ( $\alpha$ ) terletak antara kecepatan / gaya tembak dengan sumbu-y. Pengaturan alat tembak bisa dilakukan otomatis oleh mesin ataupun manual oleh operator.



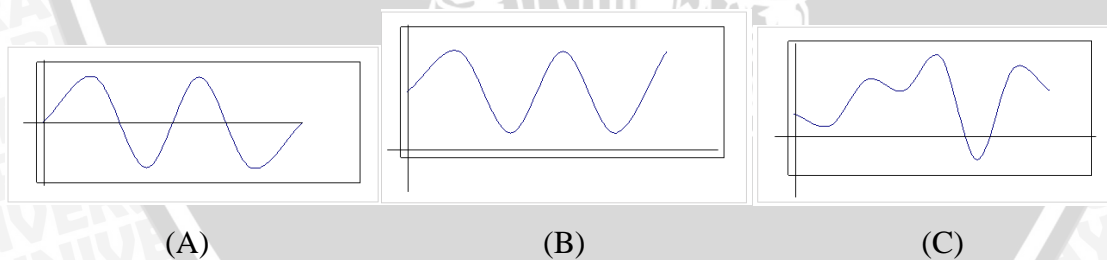


Gambar 2.12 Pengaturan alat tembak ke spesimen oleh operator  
Sumber : Norblastsrl (2013 : youtube)

## 2.5 Tegangan Sisa

Kegagalan pada material biasa disebabkan kelelahan. Kelelahan (*fatigue*) adalah rusak / patahnya suatu material logam yang mengalami tegangan secara berulang pada tegangan yang lebih kecil daripada tegangan yang diperlukan untuk mematahkannya. Kelelahan disebabkan oleh banyak faktor :

- a. Konsentrasi tegangan = bila terdapat distribusi tegangan yang tidak merata maka akan terjadi konsentrasi tegangan dan nilai *fatigue strength* akan menurun (tegangan yang akan diterima jauh lebih besar daripada harga rata-rata)
- b. Ukuran / dimensi = ukuran besar cenderung menurunkan *fatigue strength*
- c. Kekasaran permukaan = benda kerja kasar

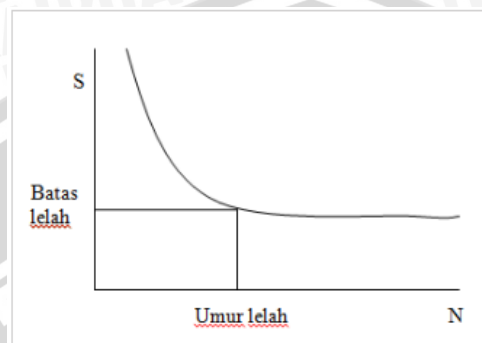


Gambar 2.13. Beban (A) bolak-balik, (B) tegangan berulang dan (C) tegangan tidak beraturan

Sumber : Saputro (2015)

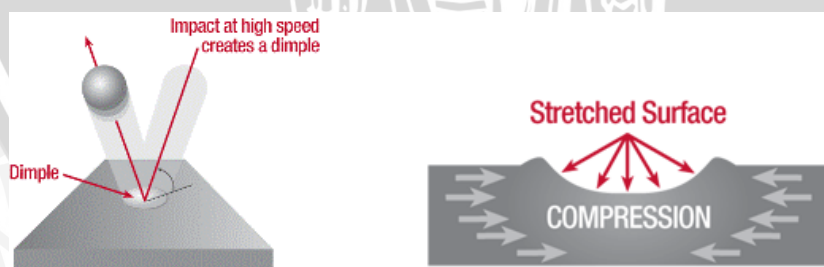
Uji lelah diberikan pada pembebanan dinamik. Diperlukan uji lelah karena pada pembebanan dinamik, tegangan berubah-ubah. Beban dinamik (gambar 2.13) dibagi menjadi 3 macam yaitu : beban tegangan bolak balik (mengalami tegangan tekan dan tarik secara bergantian), beban tegangan berulang (hanya mendapatkan tegangan tarik saja), dan beban

tegangan tidak beraturan (1 titik mengalami tegangan tarik, sedangkan titik yang lain akan mengalami tegangan tarik dan tekan). Karena beban yang diberikan berupa pengulangan maka nilai tegangan tahanan adalah rata-rata nilai tegangan maksimum dan minimum. Dari uji lelah didapatkan kurva S-N (*Stress-Number of cycle*) atau kurva T-S (Tegangan-Siklus) untuk menentukan batas lelah dan umur lelah dari material seperti pada gambar 2.14.



Gambar 2.14. Kurva S-N  
Sumber : Saputro (2015)

Tegangan sisa adalah tegangan yang terjebak pada material setelah proses manufaktur selesai dan tanpa dikenai pembebanan eksternal. Tegangan sisa biasanya terjadi dikarenakan pendinginan cepat, pengelasan, permesinan dan lain-lain. Tegangan sisa dibagi menjadi dua yaitu tarik dan tekan. Tegangan sisa yang terjadi adalah tegangan sisa tekan, karena deformasi plastis menyebabkan butiran meregang karena penekanan bola. Tegangan sisa tekan juga menyebabkan meningkatnya *microhardness*, yang mana pergeseran butir banyak dan jauh serta ukuran butir yang semakin halus.



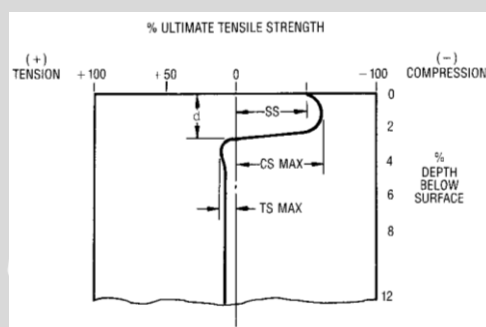
Gambar 2.15 Mekanisme *shot peening*  
Sumber : Eaglemaster (2015)

Pada gambar 2.15 ketika bola mengenai material dengan kecepatan tinggi, terjadi konsentrasi energi dalam bentuk luasan kecil (diameter bola). Energi digunakan untuk mendeformasi dan memantulkan bola kembali (energi paling banyak digunakan untuk mendeformasi material karena energi langsung mengenai material dahulu). Akan terbentuk



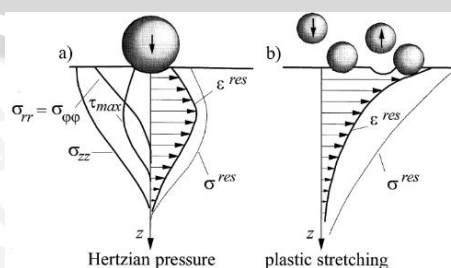
indentasi yang kecil, kedalaman indentasi biasanya bernilai 0.005 – 0.030 cm tergantung pada berbagai jenis faktor. Berikut penjelasan bagian-bagian dari profil tegangan sisa pada gambar 2.16 :

- SS (Surface Stress)* adalah tegangan yang diukur dari permukaan material setelah dikenai *shot peening*
- CS MAX (Maximum Compressive Stress)* adalah tegangan sisa tekan yang paling tinggi dari keseluruhan tegangan yang terjadi (tegangan tekan sampai tegangan tarik tertinggi)
- D (Depth)* adalah kedalaman tegangan tekan sampai ke tegangan netral (tegangan tekan melewati sumbu netral dan menjadi tegangan tarik pertama kali).
- TS MAX (Maximum Tensile Stress)* adalah tegangan tarik tertinggi yang terbentuk karena adanya keseimbangan.



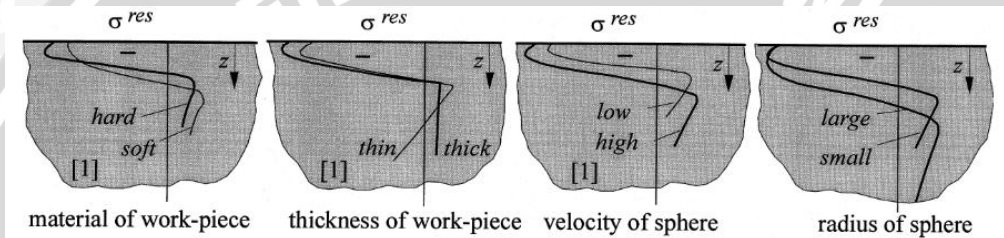
Gambar 2.16 Contoh profil tegangan sisa yang diakibatkan oleh *shot peening*.  
Sumber : Champaign Electronics Inc (2001 : 4)

Pada gambar 2.17 tegangan sisa bisa dijelaskan keberadaannya oleh 2 fenomena yaitu *hertzian pressure* dan *plastic stretching*. Pada fenomena *hertzian pressure* (tekanan hertzian), tegangan sisa terbesar terbentuk didekat permukaan. Dan pada *plastic stretching*, tegangan sisa tertinggi didapatkan pada permukaannya. Dalam penggambaran selama ini, yang sering digunakan untuk memperlihatkan hasil distribusi tegangan sisa *shot peening* yaitu fenomena *hertzian pressure*.



Gambar 2.17 Dasar *shot peening* (A) *hertzian pressure* dan (b) *plastic stretching*  
Sumber : Schiffner (1999 : 330)

*Shot peening* mengakibatkan deformasi elastis dan plastis. Deformasi plastis terjadi pada daerah yang berada tepat pada bagian yang terkena bola dari permukaan sampai kedalaman tertentu. Deformasi elastis terjadi pada bagian sekitar daerah plastis sampai pada kedalaman tertentu. Nilai deformasi yang terjadi tidak melebihi nilai yield yang terjadi pada material yaitu setengah dari nilai tegangan yield yang dimiliki material material. Jika nilai deformasi melebihi nilai yield dapat dipastikan bahwa material akan mengalami kerusakan secara langsung (pertimbangan faktor / parameter material bola, radius bola, kecepatan tembak, sudut tembak, material spesimen, ketebalan spesimen, waktu penembakan dan yang lain) pada gambar 2.18. Faktor / parameter *shot peening* sangat mempengaruhi distribusi tegangan sisa tekan yang terjadi pada material.

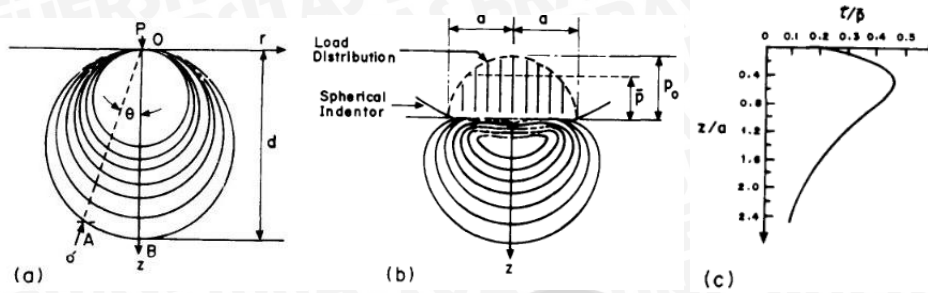


Gambar 2.18 Pengaruh parameter *shot peening* terhadap distribusi tegangan sisa.

Sumber : Schiffner (1999 : 330)

Berdasar sifat deformasi plastis dan elastis, sudah dapat diketahui bahwa plastis tidak dapat kembali pada posisi awal mengakibatkan nilai tegangan sisa tekan dari mengalami naik kemudian turun berbanding dengan kedalaman akibat indentasi. Deformasi yang terjadi biasanya berbentuk lapisan pada gambar 2.19. Semakin jauh maka deformasi yang terjadi maka semakin kecil. Perlu dibatasi penggunaan *shot peening* pada material, ketika terlalu banyak penembakan dan terbentuk daerah plastik (kondisi optimum) maka semakin banyak pula tegangan yang terjebak terdapat material. Tegangan tertinggi yang berada pada kondisi optimum bukanlah tegangan sisa tekan, melainkan tegangan sisa tarik dikarenakan bagian yang terdeformasi semakin besar dan menyebar. Saat tegangan sisa tarik lebih banyak maka kelelahan akan terjadi.

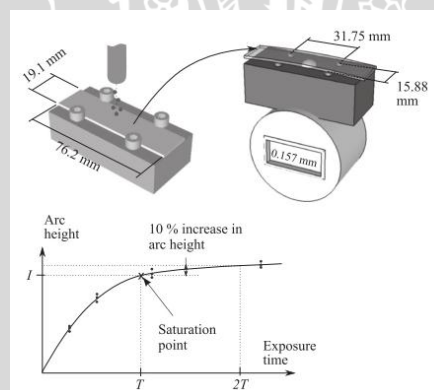




Gambar 2.19 Pada penembakan tunggal (A) persamaan boussinesq untuk P terkonsentrasi, (B) nilai  $\tau/P$  kontak dengan indenter halus dan (C) perbandingan  $\tau/P$  dengan  $Z/a$

Sumber : Al-Obaid (1994 : 253)

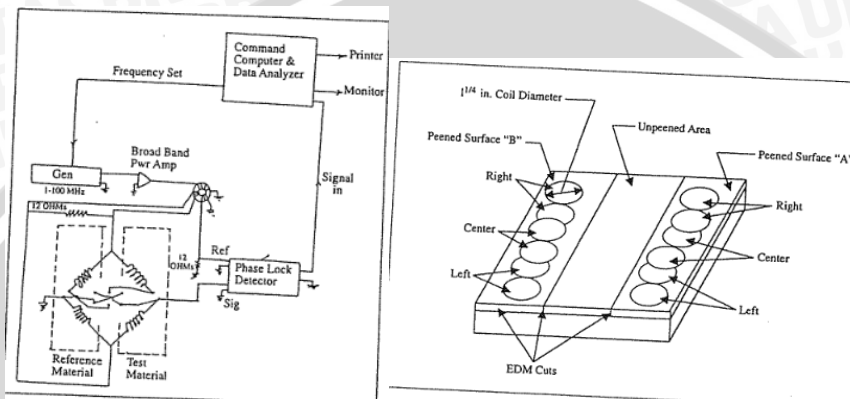
Untuk menghitung tegangan sisa tekan / energi / intensitas pada material digunakan *almen strip* yang diciptakan oleh John Almen dan *almen round* yang diciptakan oleh R. Bosshard. Kedua alat yaitu *almen strip* dan *almen round* digunakan bersamaan dan biasanya diberi nama *almen test*. Fungsi *almen test* tidak hanya untuk menghitung tegangan yang terjadi tetapi digunakan sebagai alat control industri *shot peening*.



Gambar 2.20 *Almen test*  
 Sumber : Garipey (2013 : 49)

*Almen test* seperti pada gambar 2.20 dilakukan dengan menembakkan bola pada lempengan yang diletakkan pada *almen holder*, kemudian dilakukan pengukuran defleksi dengan menggunakan *almen gauge* dengan dimensi yang telah ditentukan. Lalu dibuatlah plot kurva saturation. Nilai intensitas *shot peening* dihitung menggunakan *almen arc height* pada titik saturation. Batasan *almen strip* : pola tegangan sisa tekan sama pada material pada range kekerasan tertentu dan intensitas sama dapat terjadi dengan berbagai kombinasi tetapi polanya berbeda. Kelebihan dan kekurangan *almen strip* adalah mudah penggunaan dan mahal pengukurannya.

Selain *almen test*, alat lain yang dapat mengetahui distribusi tegangan sisa yaitu menggunakan *almen plates*. Pada penggunaan *almen plates* prinsipnya ketika menggunakan *almen test* tetapi lebih ringkas pada peralatannya. *Almen plates* menggunakan plat tipis sebagai alat bantu. Plat tipis dihubungkan dengan permukaan benda yang akan di *shot peening* menyebabkan plat tipis mengalami bending dan hasil ketinggian plat disebut *almen intensity*.



Gambar 2.21 *Eddy current test*

Sumber : Barac. Katcher. Soules. (2003 : 327)

Pada gambar 2.21 *eddy current test* adalah cara lain untuk mengetahui tegangan sisa yang terdapat pada material. Cara ini menggunakan bantuan koil untuk menyalurkan arus ke material. Koil biasanya dibuat dari substrat polimyd. Langkah *test* adalah mengatur frekuensi arus menuju ke amplifier dan kemudian mengarah ke material yang akan diuji dan akan arus diteruskan ke printer dan monitor menggunakan sensor pengubah.

Tegangan sisa tekan menaikkan umur lelah dari material sesuai dengan persamaan Goodman (gambar 2.22) pada kurva S-N. Kurva S-N terbentuk saat kelelahan dibawah tegangan yield. Bila kelelahan diatas tegangan yield maka dianalisa menggunakan kurva R-S (Regangan-Siklus) atau kurva  $\epsilon$ -N (*Strain-Number of cycle*). Siklus pengerasan/pelunakan dapat terjadi setelah melewati ratusan siklus. Total regangan yang terjadi didapatkan dari regangan elastis dan regangan plastis. Kurva T-S dan R-S saling berhubungan sesuai dengan persamaan Basquin dan Coffin-Manson. Secara garis besar, tegangan sisa tekan dapat memperpanjang umur material dan menghindari kegagalan.

Persamaan Goodman

$$\sigma_a = \sigma_{fat} \left[ 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{UTS}} \right] \quad (\text{Arbintarso, 2015) (2-12)}$$

Keterangan :  $\sigma_a$  = batas ketahanan pada  $\sigma_m$  (MPa)

$\sigma_{fat}$  = batas ketahanan pada  $\sigma_m = 0$  (MPa)



$\sigma_m$  = tegangan rata-rata (MPa)

$\sigma_{UTS}$  = kekuatan tarik (MPa)

Persamaan Basquin

$$\sigma_f = \sigma_0(2Nf)^b \quad (\text{Arbintarso, 2015}) \quad (2-13)$$

Persamaan Coffin-Manson

$$\Delta\varepsilon_p = \varepsilon_0(2Nf)^c \quad (\text{Arbintarso, 2015}) \quad (2-14)$$

Regangan total

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p \quad (\text{Arbintarso, 2015}) \quad (2-15)$$

$$\Delta\varepsilon = 2 \frac{\sigma_f}{E} (2Nf)^b + \varepsilon_0(2Nf)^c \quad (\text{Arbintarso, 2015}) \quad (2-16)$$



Gambar 2.22. Peningkatan umur lelah pada kurva S-N  
Sumber : Arbintarso (2015)






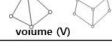
## 2.6 Software Berbasis Elemen Hingga

Konsep dasar elemen hingga adalah membagi struktur menjadi elemen-elemen yang lebih kecil dengan dimensi berhingga (elemen hingga). Sedangkan struktur asli dianggap sebagai *assembly* dari elemen-elemen hingga tersebut, dihubungkan oleh *joint* dengan jumlah berhingga yang disebut *node* / titik. Rumus keseimbangan dari semua struktur didapat dari menggabungkan rumus keseimbangan dari tiap elemen pada tiap *node* / titik. Kondisi batas dibebankan pada struktur agar didapat variable yang diinginkan (tegangan, regangan, distribusi temperatur, kecepatan aliran, dll). Macam software berbasis FEM sangat banyak yaitu : MSC. NASTRAN, ABAQUS, ANSYS, LSDYNA dan lainnya.

Fungsi elemen hingga adalah mempermudah perhitungan suatu struktur. Akan tetapi jika suatu struktur memiliki dimensi yang besar dan bentuk yang rumit, tentu jelas akan merepotkan ketika harus dihitung satu persatu. Oleh karena itu dibuatlah program simulasi komputer (software) berbasis FEM. Software FEM banyak dipakai pada sipil, mesin, penerbangan, mikroelektrik, bioengineering maupun material. Prosedur perhitungan dengan Metode Elemen Hingga (MEH):

## 1. Diskretisasi dan pemilihan elemen

Membagi struktur menjadi elemen-elemen kecil yang lebih sederhana dan dihubungkan pada titik / node kemudian dilakukan pemilihan elemen seperti model awal dari struktur, digunakan untuk mempermudah analisa menjadi 1D, 2D atau 3D pada gambar 2.23. Elemen 1D, 2D dan 3D memiliki DOF (*Degree Of Freedom*) yang berbeda. DOF atau derajat kebebasan adalah banyaknya perpindahan vektor komponen tiap satu node. 1D memiliki 1 DOF, 2D memiliki 2 DOF dan 3D memiliki 3 DOF pada tiap nodenya.

Type	Actual Models	Finite Element Expressions (Geometric Properties Defined by Nodes)	Additional Requirements (Actual Volume Calculation)
1D	 Rod (Truss)    Beam	 Length (L)	Area (A, cross-sectional shape) → $V = L \times A$
2D	 Shell, Plane Stress, Plane Strain, Axisymmetric, etc.	 Area (A)	Thickness (t) → $V = A \times t$
3D	 Solid	 Volume (V)	None (volume calculation possible)
Misc.	Spring, Mass, Rigid Link, etc.	-	-

Gambar 2.23 Diskretisasi dan pemilihan elemen

Sumber : Cyprien (2015)

## 2. Memilih fungsi pendekatan

Fungsi yang umum digunakan polinomial. Langkah-langkah analisis menggunakan simulasi komputer FEM secara umum dibagi menjadi 3 yaitu : *preprocessing* (proses awal), *solution* (proses solusi) dan general *postprocessing* (proses pembacaan hasil)

Tahap pada *preprocessing* adalah :

- Pemodelan geometri : penggambaran model geometri 1D, 2D, maupun 3D
- Pemilihan tipe elemen : mendiskritisasi model yang dibuat
- Material properties : memasukkan data material yang digunakan
- *Meshing* : membagi struktur menjadi elemen elemen kecil

Sedangkan tahap pada *solution* adalah :

- Memasukkan kondisi batas
- Menetapkan pembebanan
- Penyelesaian (*solving*)

Pada bagian *general postprocessing*, hasil analisis ditampilkan dalam beberapa bentuk yaitu *plot result*, *list result*, maupun animasi. *Plot result* menggambarkan sebaran variabel yang diinginkan dengan menggunakan warna / plot warna (terendah sampai



tertinggi pada tiap bagian). *List result* memberikan hasil berupa tabel informasi berisi nilai-nilai. Sedangkan animasi adalah pergerakan benda saat dikenai beban.

## 2.7 Lingkaran Mohr

Gaya dibagi menjadi 2 macam yaitu *surface forces* dan *body forces*. *Surface forces* adalah gaya yang bekerja pada permukaan (nilainya bisa berbeda beda pada suatu komponen) dan *body forces* adalah gaya yang bekerja pada keseluruhan benda seperti gaya gravitasi (nilainya sama pada tiap komponen). Tegangan adalah suatu gaya yang terdapat pada satuan luasan. Cara menghitung tegangan adalah gaya / beban dibagi dengan luasan daerah. Tegangan dibagi menjadi 3 berdasarkan arah gayanya yaitu tegangan normal dan geser. Tegangan normal adalah tegangan yang terjadi pada satu komponen dengan arah gaya dan luas daerah yang tegak lurus, sedangkan tegangan geser adalah tegangan yang terjadi dengan arah gaya dan luasan daerah yang searah. Tegangan yang terakhir adalah tegangan bearing yaitu tegangan yang dimiliki oleh benda itu sendiri tanpa dipengaruhi oleh gaya yang terjadi padanya.

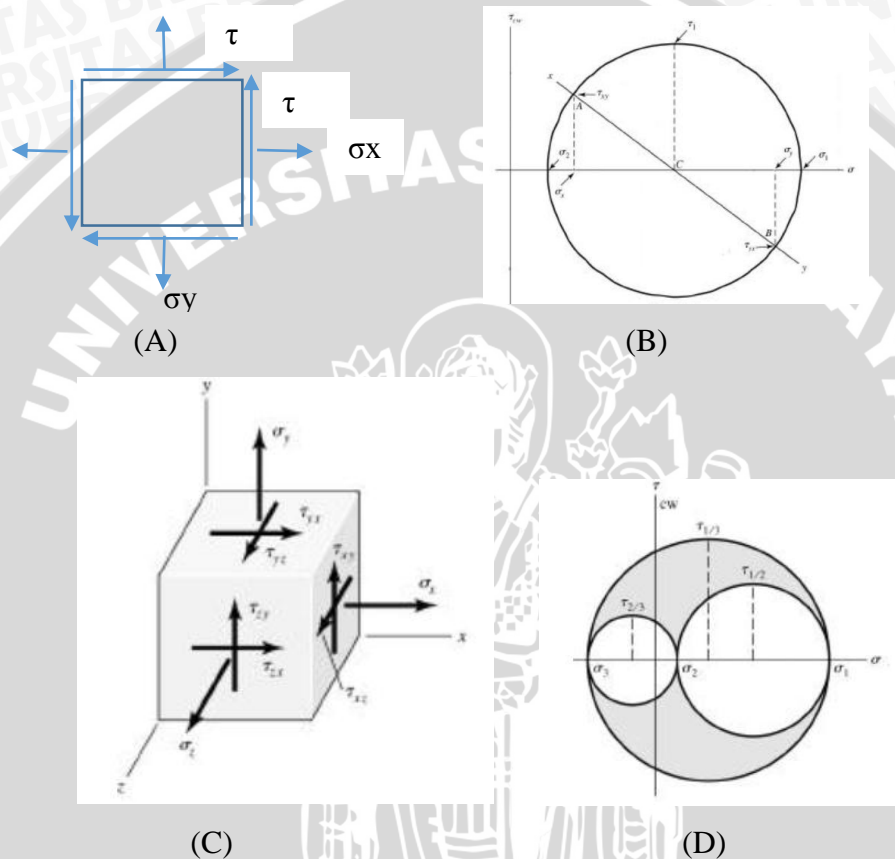
$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{paralel pada sumbu } x \\ \text{paralel pada sumbu } y \\ \text{paralel pada sumbu } z \end{array} \quad (\text{Knight :2000}) \quad (2-17)$$

Lingkaran mohr adalah lingkaran yang digunakan untuk mengetahui tegangan utama (*principal stress*) dan tegangan geser maksimum (*maximum shear stress*) yang terjadi pada suatu komponen. Tegangan utama adalah nilai maksimal dan minimal tegangan normal. Ketika tegangan utama terjadi, tidak ada tegangan geser sama sekali. Lingkaran mohr ada yang terbuat dari 2D ataupun 3D. Lingkaran mohr 2D digunakan untuk menyelesaikan persoalan 2D, sedangkan 3D digunakan untuk menyelesaikan persoalan 3D.

Penamaan tegangan terdiri dari 2 huruf, huruf pertama menjelaskan bidang yang dikenai gaya sedangkan huruf kedua menerangkan arah gaya. Pada gambar 2.23 dijelaskan perbedaan lingkaran mohr 2D dan 3D. Pada 2D lingkaran yang dibentuk hanya 1 sedangkan 3D yang dibentuk adalah 3 lingkaran (masing masing lingkaran untuk sumbu x, y dan z). Ketentuan nilai positif negatif berdasarkan kesepakatan. Cara membuat diagram mohr :

- 1) Diketahui tegangan normal yang terjadi dan tegangan geser (jika benda yang ingin dicari lingkaran mohrnya berupa 3D maka dipisah-pisah tiap bidang x, y dan z)
- 2) Buat garis sumbu x dan sumbu y
- 3) Nilai tegangan normal diletakkan pada pada sumbu x
- 4) Nilai tegangan geser diletakkan pada sumbu y
- 5) Buat lingkaran dengan diameter garis yang sudah ditentukan

- 6) Tegangan normal maksimal dan minimal didapatkan pada diameter lingkaran yang berhimpit dengan sumbu x (bagian kiri bernilai minimal dan kanan bernilai maksimal)
- 7) Tegangan geser maksimum didapatkan pada diameter lingkaran yang berada paling tinggi searah sumbu y
- 8) Ulangi proses 1-7 untuk bidang yang belum di lihat (benda 3D)



Gambar 2.24 Gambar (A) tegangan normal dan geser 2D, (B) lingkaran mohr 2D, (C) tegangan normal dan geser 3D dan (D) lingkaran mohr 3D  
 Sumber : Knight (2000)

### 2.8 Aluminum Alloy A5052.

*Aluminum Alloy A5052* adalah paduan aluminum dengan nomor seri 5052. Paduan seri ini berbahan dasar aluminum dengan tambahan magnesium. Material ini biasa digunakan untuk aksesoris, material konstruksi, kapal laut, gerbong, kereta roda, roda gigi, bahan arsitektur dan yang lain (bergantung dengan penambahan unsur paduan). Paduan jenis ini tidak dapat diperlakukan panas (*non-heat treatable*) yang berarti tidak bisa dikenai proses pemanasan untuk merubah sifat fisik dan sifat mekanisnya. Material ini hanya bisa menerima proses *cold working* untuk merubah sifatnya. Penggunaan nama A5052 berasal



dari standar AA (*Aluminum Association of America*) dengan menggunakan penamaan 4 angka.

Urutan ke-1      ke-2      ke-3      ke-4      ke-5      ke-6      ke-7  
                                   

Keterangan:

- Urutan ke-1 adalah huruf A yang merupakan singkatan Aluminium
- Urutan ke-2 menunjukkan jenis paduannya (penggunaan nomor) pada tabel 2.1
- Urutan ke-3 menggunakan angka 0 ~ 9. 0 menunjukkan paduan dasar, sedangkan 1 ~ 9 menunjukkan perbaikan dari paduan.
- Urutan ke-4 dan ke-5 menunjukkan kadar kemurnian aluminium untuk aluminium murni.

Contoh : A1100 memiliki unsur paduan total 1% dengan aluminium 99 %

- Urutan ke-6 menunjukkan bentuk dari material  
P : *Plate* (pelat), W : *Wire* (kawat), T : *Tube* (tabung), B : *Bar* (batang)
- Urutan ke-7 menunjukkan macam perlakuan panas yang telah dilakukan pada tabel 2.2

Tabel 2.1 Jenis paduan aluminium

1 : Aluminium murni dengan kadar 99 % atau lebih	5 : Paduan Al-Mg
2 : Paduan Al-Cu-Mg	6 : Paduan Al-Mg-Si
3 : Paduan Al-Mn	7 : Paduan Al-Zn-Mg
4 : Paduan Al-Si	8 : Paduan selain yang disebutkan
	9 : untuk cadangan penamaan

Sumber : Irawan (2013)

Tabel 2.2 Perlakuan panas material

Kode	Arti	Kode	Arti
F	Murni hasil produksi	T4	<i>Solution heat-treated</i> , lalu <i>natural aging</i>
O	Anil total ( <i>Full Annealing</i> )	T5	Didinginkan cepat dari pembentukan suhu tinggi, kemudian di " <i>aging / penuaan</i> " secara buatan.
H	Pengerasan pengerjaan ( <i>work hardening</i> )	T6	<i>Solution heat-treated</i> lalu penuaan buatan, artificial aging (di atas suhu ruang)
H1n	Pengerasan dengan pengerjaan	T7	<i>Solution heat-treated</i> lalu distabilisasi
H2n	Pengerasan dengan pengerjaan lalu dianil sebagian	T8	<i>Solution heat-treated</i> , pengerasan pengerjaan, penuaan buatan
H3n	Pengerasan pengerjaan Kemudian dianil dengan stabil n=2 (1/4 pengerasan), 4 (1/2 pengerasan), 6 (3/4 pengerasan), 8 (pengerasan dengan rasio pengerjaan 75%), 9 (pengerasan khusus)	T9	<i>Solution heat-treated</i> , penuaan buatan, pengerasan pengerjaan
T	Diperlakukan panas	T10	Setelah pengerjaan / pembentukan pada suhu tinggi, didinginkan cepat, pengerasan dengan pengerjaan, penuaan buatan
T2	Anil total ( <i>Full Annealing</i> )		
T3	<i>Solution heat-treated</i> (didinginkan seketika dari temperatur cair), Lalu pengerjaan dingin, lalu dibiarkan pada suhu ruang ( <i>natural aging</i> )		

Sumber : Irawan (2013)

Bahan utama dengan prosentase terbesar pada paduan ini adalah aluminum. Sifat dasar dari aluminum adalah ringan (berat jenis = 2.7 gram/cm<sup>3</sup>), konduktifitas listrik tinggi, penghantar panas yang baik, sifat pantul sinar yang baik, ulet, mudah dimesin dan dibentuk, serta tahan korosi (membentuk lapisan oksida). Sangat mudah untuk mendapatkan aluminum adalah salah satu faktor mengapa aluminum dipilih menjadi spesimen.

## 2.9 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka maka dapat diambil hipotesis bahwa perubahan kecepatan *shot peening* akan mempengaruhi nilai tegangan sisa / *residual stress*. Kecepatan



penembakan mempengaruhi nilai gaya kontak, luasan kontak dan distribusi tegangan. Hipotesis lain adalah perubahan sudut *shot peening* akan mempengaruhi nilai tegangan sisa/*residual stress*. Sudut penembakan mempengaruhi besarnya luasan kontak dan distribusi tegangan.



