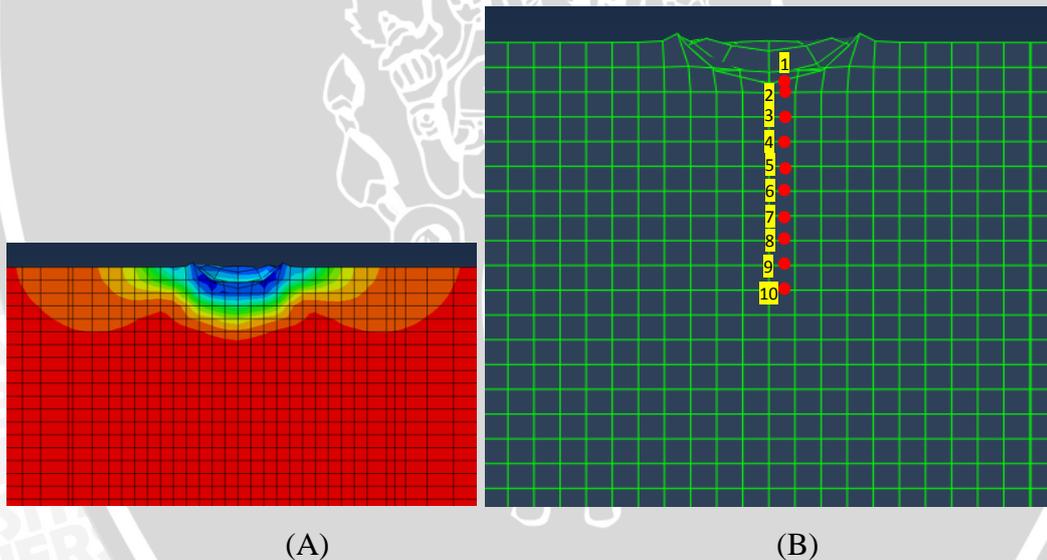


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Hasil Pengujian

Pengambilan data dilakukan dengan cara :

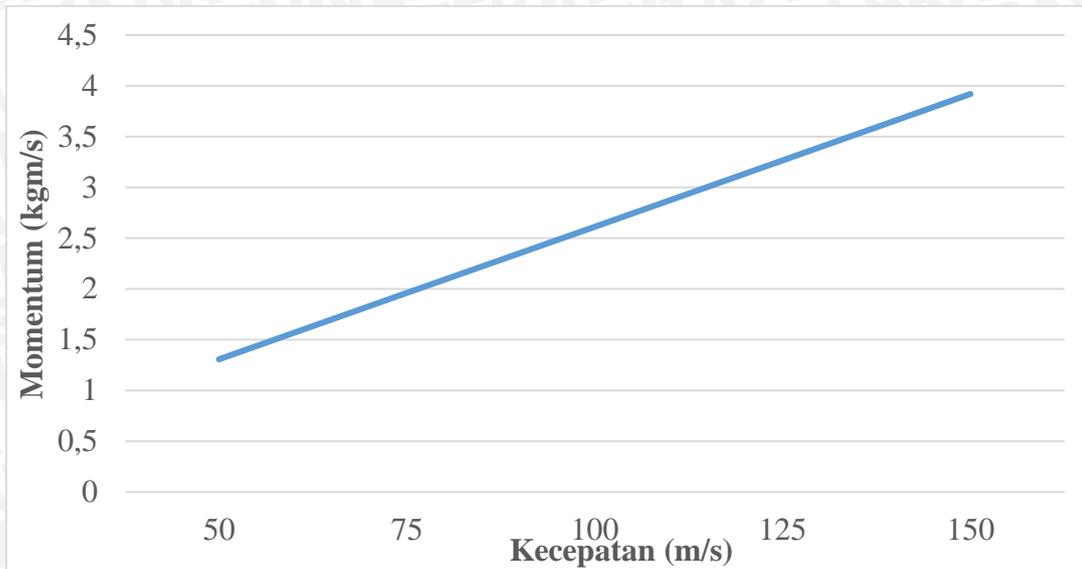
- Merubah arah tampilan dari sumbu x (sumbu y adalah tinggi benda)
- Memotong benda menjadi setengah. Atur kesesuaian potongan agar semua titik bisa dipilih
- Mengubah bentuk tampilan menjadi *minimal principal stress*
- Memastikan deformasi yang dipakai adalah 1
- Memperhalus sebaran warna
- Memilih titik-titik pengambilan data searah dengan kedalaman sesuai dengan gambar 4.1. Batas akhir titik yang dipilih, kedalamannya harus sama agar bisa dibandingkan. Pada variasi sudut, pemilihan titik / node harus disamakan.



Gambar 4.1 (A) *minimal principal stress* dan (B) pengambilan data

4.2. Grafik dan Pembahasan

4.2.1. Analisa Grafik Pengaruh Kecepatan Terhadap Momentum



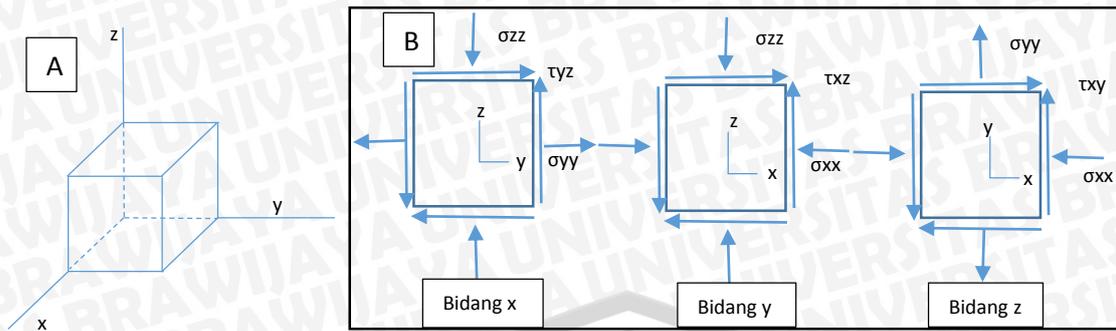
Gambar 4.2 Pengaruh kecepatan terhadap momentum

Gambar 4.2 merupakan pengaruh kecepatan terhadap momentum. Digunakan variasi kecepatan 50 m/s, 75 m/s, 100 m/s, 125 m/s dan 150 m/s. Gaya tumbuk terbesar pada kecepatan 150 m/s dengan nilai 3,92 kg.m/s. Semakin besar kecepatan maka gaya tumbuk bola terhadap spesimen juga semakin besar sesuai dengan rumus :

$$Ft = mv$$

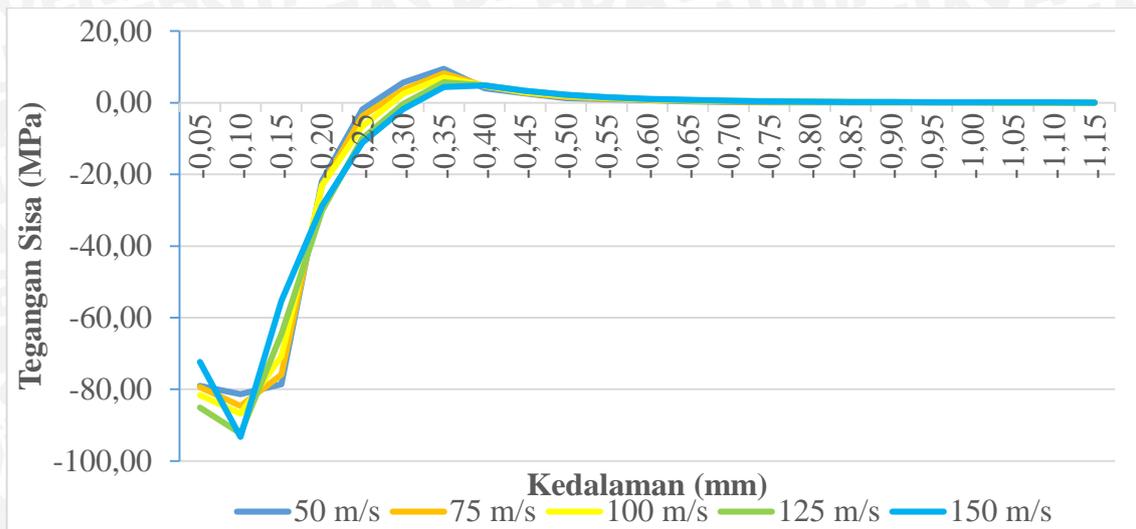
4.2.2. Analisa Grafik Pengaruh Kecepatan Terhadap Distribusi Tegangan Sisa

Pengambilan data dilakukan pada saat tegangan yang terjadi adalah *minimal principal stress*. *Minimal principal stress* adalah tegangan utama berupa tegangan normal setelah dikalkulasi antara tegangan normal dan tegangan geser pada tiap bidangnya. Spesimen *shot peening* adalah kubus 3D yang berdimensi 30 x 20 x 10 mm. Karena spesimen berbentuk 3D, maka lingkaran mohr digunakan untuk 3D (gambar 4.3). Contoh penyelesaian lingkaran mohr 3D pada kedalaman 0 mm dengan kecepatan 50 m/s (cara membuat diagram mohr dapat dilihat pada lampiran 2) :



Gambar 4.3 (A) 3D dan (B) gaya pada bidang x, y dan z

1. Menggambar rancangan tegangan yang terjadi pada komponen 3D
2. Mencari tegangan yang terjadi pada kedalaman 0 mm dengan kecepatan 50 m/s (didapatkan nilai s_{11} (σ_{xx}) = -64,69 MPa, s_{22} (σ_{yy}) = 44,78 MPa, s_{33} (σ_{zz}) = -67,00 MPa, s_{12} (τ_{xy}) = -1,20 MPa, s_{13} (τ_{xz}) = 0,22 MPa dan s_{23} (τ_{yz}) = -1,01 MPa). Nilai σ positif arahnya keluar / tarik, sedangkan σ negatif arahnya kedalam / tekan. Bila τ positif searah jarum jam, maka τ negatif berlawanan arah jarum jam.
3. Buat sumbu x untuk tegangan normal dan sumbu y untuk tegangan geser.
4. Pada bidang x, yang dibutuhkan adalah σ_{yy} , σ_{zz} , τ_{yz} yang bernilai 44,78 MPa, -67,00 MPa dan -1,01 MPa. Buatlah titik dengan koordinat A (44,78 : -1,01) dan koordinat B (-67,00 : 1,01). Tarik garis lurus antara titik A dan B. Buatlah lingkaran dari titik pusat lingkaran yang berhimpit dengan garis sumbu x.
5. Pada bidang y, yang dibutuhkan adalah σ_{xx} , σ_{zz} , τ_{xz} yang bernilai -64,69 MPa, -67,00 MPa dan 0,22 MPa. Buatlah titik dengan koordinat C (-64,69 : 0,22) dan koordinat D (-67,00 : -0,22). Tarik garis lurus antara titik C dan D. Buatlah lingkaran dari titik pusat lingkaran yang berhimpit dengan garis sumbu x.
6. Pada bidang z, yang dibutuhkan adalah σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy} yang bernilai -64,69 MPa, 44,78 MPa dan -1,20 MPa. Buatlah titik dengan koordinat E (-64,69 : 1,20) dan koordinat A (44,78 : -1,20). Tarik garis lurus antara titik E dan A. Buatlah lingkaran dari titik pusat lingkaran yang berhimpit dengan garis sumbu x.
7. Lingkaran yang berhimpit dengan sumbu x adalah 3 garis. *Principal stress* dibagi menjadi 3 yaitu : maksimal (garis paling kanan), *middle* (garis tengah dan minimal (garis paling kiri)



Gambar 4.4 Pengaruh kecepatan terhadap distribusi tegangan sisa

Gambar 4.4 diatas merupakan grafik pengaruh kecepatan terhadap distribusi tegangan sisa yang terjadi pada spesimen. Dari grafik dapat dilihat bahwa kecepatan mempengaruhi distribusi tegangan sisa pada spesimen dengan variasi kecepatan 50 m/s; 75 m/s; 100 m/s; 125 m/s dan 150 m/s. Sudut yang digunakan yaitu 0° . Didapatkan hasil tegangan sisa tekan dan tarik pada semua variasi. Tegangan sisa tekan berada dipermukaan sampai kedalaman sekitar 0,25 mm hingga 0,35 mm. Sedangkan tegangan sisa tarik terbentuk setelah kedalaman 0,25 mm sampai 0,75 mm. Pada kedalaman 0,75 mm nilai tegangan sisa cenderung konstan (nilainya tidak berubah). Distribusi tegangan sisa dengan variasi kecepatan dapat dilihat pada lampiran 3.

Dari gambar 4.4 didapatkan nilai tegangan sisa tekan maksimum terkecil ke terbesar dari 50 m/s, 75 m/s, 100 m/s, 125 m/s dan 150 m/s yang masing masing bernilai -81,34 MPa, -84,64 MPa, -86,77 MPa, -92,30 MPa dan -93,33 MPa. Nilai tegangan sisa tekan mengalami penurunan setelah mengalami nilai maksimum sampai terbentuk tegangan sisa tarik. Tegangan sisa tarik maksimum dari terkecil sampai terbesar yaitu : 150 m/s, 125 m/s, 100 m/s, 75 m/s, dan 50 m/s yang bernilai 4,87 MPa, 5,75 MPa, 7,06 MPa, 8,18 MPa, dan 9,51 MPa. Kemudian nilai tegangan sisa tarik mengalami penurunan setelah mengalami nilai maksimum sampai menjadi konstan.

Shot peening adalah proses penembakan bola dengan menggunakan kecepatan yang telah ditentukan. Kecepatan inilah yang akan mempengaruhi besar gaya tumbuk ke spesimen. Gaya tumbuk adalah impuls dari kecepatan dan massa bola tembak. Waktu penembakan dianggap sama. Massa bola yang digunakan sama karena bahan yang digunakan adalah A5052 Aluminium Alloy. Pada simulasi komputer yang digunakan, kecepatan pantul dari bola tidak diperhitungkan sehingga gaya yang diterima hanya berasal

dari kecepatan tembak saja. Kecepatan pantul hanya digunakan untuk menaikkan posisi bola agar tidak menekan spesimen.

$$Ft = mv$$

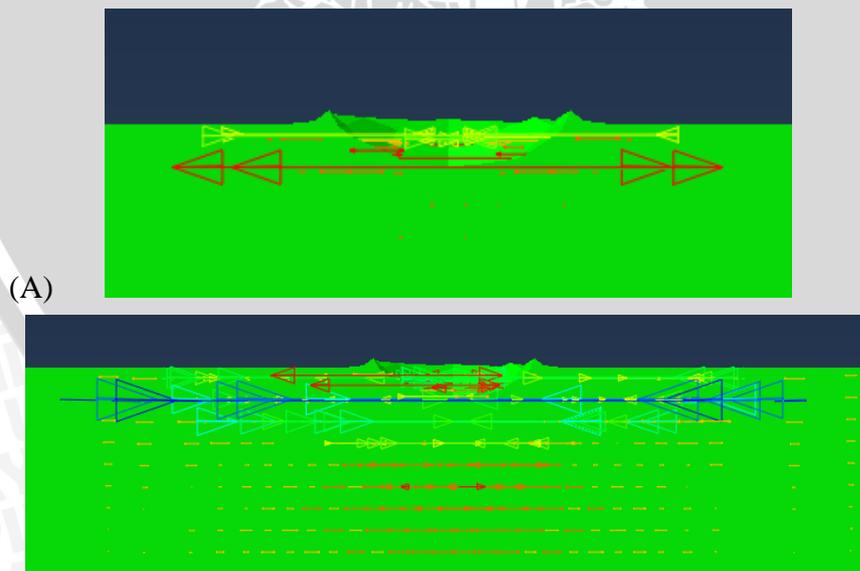
Gaya tumbuk bola merupakan tegangan yang diberikan bola tiap luasan. Tegangan bola yang akan mempengaruhi apakah spesimen mengalami deformasi plastis atau deformasi elastis. Spesimen mengalami deformasi plastis jika tegangan bola melebihi tegangan yield dari spesimen yaitu A5052 *Aluminium Alloy*. Deformasi plastis bisa terdiri dari bagian plastis dan elastis.

$$\sigma > \sigma_{yield} = \text{deformasi plastis}$$

Ketika spesimen ditumbuk oleh bola, spesimen akan membentuk cekungan (gambar 4.5). Bola yang menumbuk spesimen menyebabkan spesimen tertekan sehingga butiran akan semakin padat pada bagian yang sekitar tumbukan. Terjadi pergeseran posisi butir spesimen dinamakan *plastic strain*. *Plastic strain* ditunjukkan pada gambar 4.6. *Plastic strain* dibagi menjadi 2 yaitu *loading* (bola masih menekan spesimen) dan *unloading* (bola sudah tidak mengenai spesimen).



Gambar 4.5 Arah gaya tumbuk ketika menekan spesimen



Gambar 4.6 *Plastic strain* (A) *loading* dan (B) *unloading*

Deformasi yang terjadi pada saat penumbukan adalah deformasi plastis. Semakin jauh dengan penembakan maka deformasi yang terjadi semakin berkurang karena luasan yang

terdeformasi semakin banyak. Tegangan sisa terjadi setelah beban dihilangkan. Saat bola memantul maka material akan memberikan gaya perlawanan untuk kembali ke bentuk semula. Gaya perluasan berupa tegangan yang tertahan inilah yang disebut tegangan sisa. Tegangan yang tertahan inilah yang disebut tegangan sisa. Gambar 4.6 (B) menunjukkan arah tegangan sisa yang terdapat pada pada spesimen

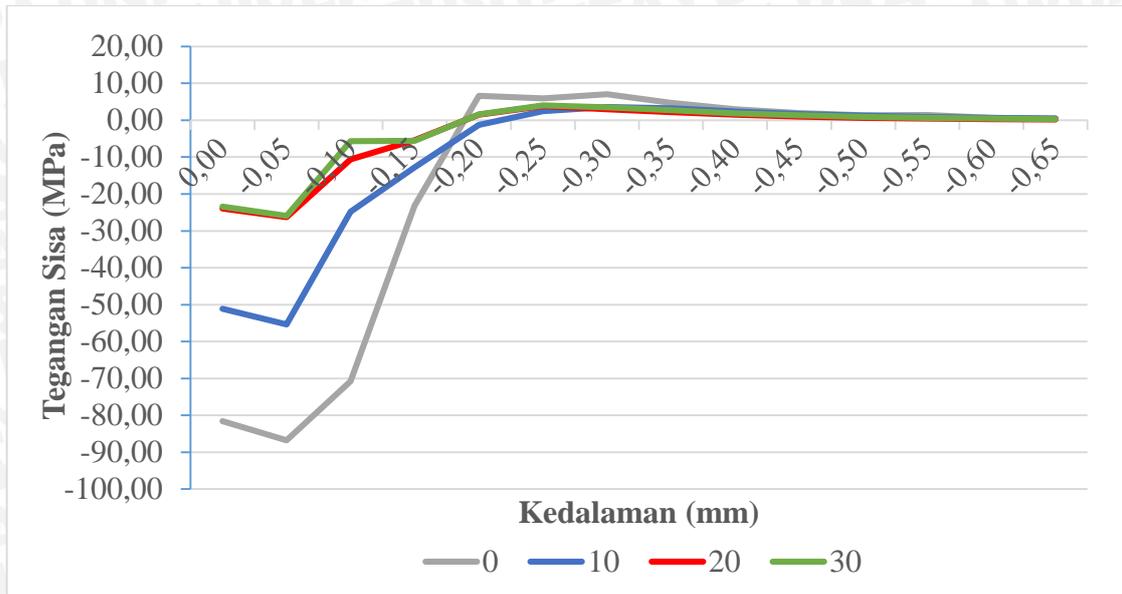
Gaya tumbuk merupakan gaya tekan, maka tegangan sisa yang didapatkan pada sekitar tumbukan adalah tegangan sisa tekan. Tegangan sisa tarik bisa terjadi pada hasil *shot peening*. Hal ini disebabkan kondisi awal spesimen yang tidak memiliki tegangan kemudian mengalami tegangan sisa tekan (-), perlu adanya tegangan sebagai penyeimbang berupa tegangan sisa yang bernilai positif pada kedalaman dibawah tegangan sisa tekan.

Semakin besar kecepatan bola maka gaya tumbuk bola besar. Gaya tumbuk besar menyebabkan gaya reaksi juga besar. Dengan besarnya gaya reaksi maka tegangan juga semakin besar. Jika tegangan besar maka tegangan sisa yang ditimbulkan juga besar karena nilai tegangan semakin jauh dari yield material. Pada variasi kecepatan, hasil *shot peening* paling baik digunakan untuk komponen yang dikenai beban berulang yaitu pada kecepatan 150 m/s karena nilai tegangan sisa tekan maksimum yang tinggi dengan tegangan sisa tarik maksimum yang rendah dengan kedalaman yang sama.

Lampiran 3 menampilkan distribusi warna tegangan yang terjadi pada material dengan variasi kecepatan. Distribusi warna tidak hanya ditinjau dari kedalaman saja tetapi juga dilihat dari permukaan bagian atas / searah dengan penglihatan pistol tembak. Simulasi variasi kecepatan ini menggunakan α (pistol ke sumbu y) bernilai 0, berarti kedudukan pistol tembak berada tegak lurus dengan kedudukan spesimen. Dengan kedudukan tegak lurus ini menyebabkan terjadinya tegangan normal (tegangan geser = 0). Semakin tinggi kecepatan maka luasan permukaan yang terkena efek tumbukan semakin besar / banyak. Hal ini sesuai dengan rumus bahwa :

$$\sigma_{normal} = \frac{F}{A_{tegak\ lurus\ F}}$$

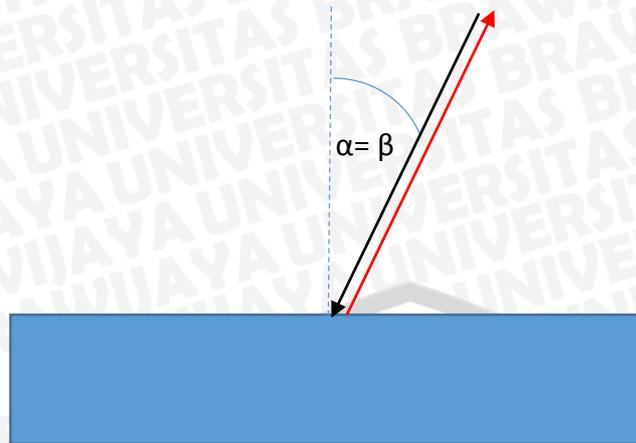
4.2.3. Analisa Grafik Pengaruh Sudut Terhadap Distribusi Tegangan Sisa



Gambar 4.7 Pengaruh sudut terhadap distribusi tegangan sisa

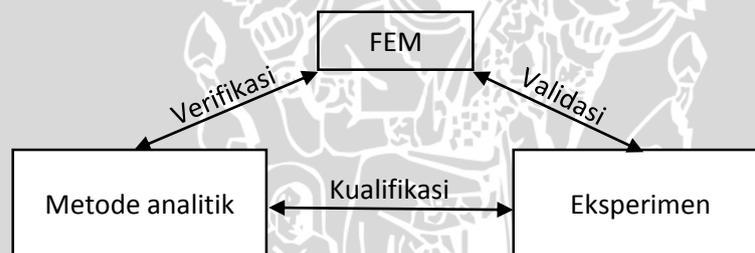
Gambar 4.7 diatas merupakan grafik pengaruh sudut terhadap distribusi tegangan sisa yang terjadi pada spesimen. Dari grafik dapat dilihat bahwa sudut mempengaruhi distribusi tegangan sisa pada spesimen dengan variasi sudut 0° , 10° , 20° dan 30° . Kecepatan yang digunakan sama yaitu 100 m/s. Didapatkan hasil tegangan sisa tekan dan tarik pada semua variasi. Tegangan sisa tekan berada dipermukaan sampai kedalaman 0,15 mm, setelahnya akan terbentuk tegangan sisa tarik. Pada kedalaman 0,60 mm nilai tegangan sisa cenderung konstan (nilainya tidak berubah). Distribusi tegangan sisa dengan variasi sudut dapat dilihat pada lampiran 4.

Dari gambar 4.7 didapatkan nilai tegangan sisa tekan maksimum terbesar ke terkecil dari 0° , 10° , 20° dan 30° yang masing masing bernilai -70,73 MPa, -55,34 MPa, -26,28 MPa dan -25,96 MPa. Nilai tegangan sisa tekan mengalami penurunan setelah mengalami nilai maksimum sampai terbentuk tegangan sisa tarik. Tegangan sisa tarik maksimum dari terbesar sampai terkecil yaitu : 0° , 30° , 20° dan 10° yang bernilai 7,05 MPa, 4,05 MPa, 3,83 MPa, dan 3,57 MPa. Kemudian nilai tegangan sisa tarik mengalami penurunan setelah mengalami nilai maksimum sampai menjadi konstan.



Gambar 4.8 Penentuan sudut dan arah kembali bola

Pada gambar 4.8 dilukiskan arah tembak berwarna hitam, sedangkan arah kembali berwarna merah. Diberikan sudut tembak (α) pada penembakan. Diasumsikan sudut pantul / kembali bola sama dengan sudut tembak / datang. Sudut kembali tidak diperhitungkan pada simulasi. Semakin besar sudut tembak maka pistol tembak akan semakin jauh dengan sumbu y dan semakin dekat dengan sumbu x (permukaan spesimen).

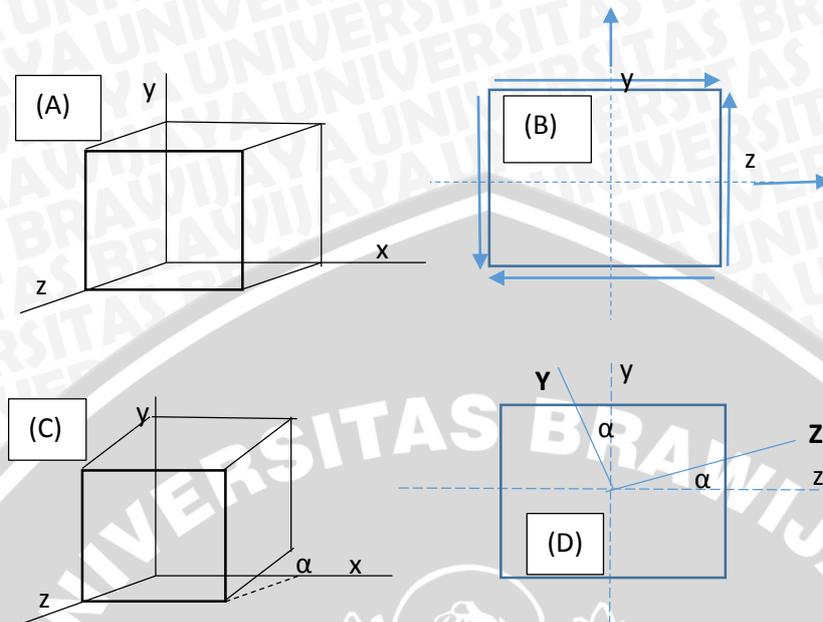


Gambar 4.9 FEM, metode analitik dan eksperimen

Momentum dengan kecepatan sama akan bernilai sama, akan tetapi dengan adanya sudut menyebabkan tegangan yang berbeda pada penampangnya. Hal ini dapat diidentifikasi menggunakan transformasi tegangan / menggunakan metode analitik seperti pada gambar 4.9. Perlu adanya pengkajian ulang apakah hasil dari simulasi komputer adalah benar. Tidak dapat dipisahkan antara metode analitik, FEM dan eksperimen. Membandingkan FEM, analitik dan eksperimen tidak bisa dibandingkan langsung, melainkan dengan cara melihat kecenderungan hasilnya.

Dapat dilihat pada gambar 4.10 tegangan yang bekerja bila tanpa sudut dan dengan adanya sudut (α) pada penampang x. Penampang x sumbu y dan z membentuk sudut α , menjadi sumbu **Y** dan **Z**. Tegangan yang ada adalah tegangan normal dan geser. Tegangan inilah yang harus tranformasikan (tabel 4.1) pada penampang baru yang terbuat dari sumbu

Y dan Z. Lakukan hal yang sama untuk 2 penampang yang lainnya sehingga didapatkan nilai σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy} , σ_{xz} dan σ_{yz} .



Gambar 4.10 (A) benda posisi awal, (B) tegangan geser serta tegangan normal, (C) benda miring dengan sudut (α) dan (D) transformasi tegangan disebabkan sudut (α)

Tabel 4.1 cosinus transformasi

	x	y	z
X	1	0	0
Y	0	$\cos \alpha$	$-\sin \alpha$
Z	0	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$

Rumus tegangan normal dan geser transformasi

$$\sigma_{yy} = \sigma_{yy} \cos^2 \alpha + \sigma_{zz} \sin^2 \alpha - 2\sigma_{xy} \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_{yy} \sin^2 \alpha + \sigma_{zz} \cos^2 \alpha + 2\sigma_{xy} \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\sigma_{yz} = -(\sigma_{yy} - \sigma_{zz}) \sin \alpha \cos \alpha + \sigma_{yz} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)$$

Rumus regangan normal dan geser transformasi

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu \sigma_{xx} - \nu \sigma_{zz})$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{E} (\sigma_{zz} - \nu \sigma_{xx} - \nu \sigma_{yy})$$

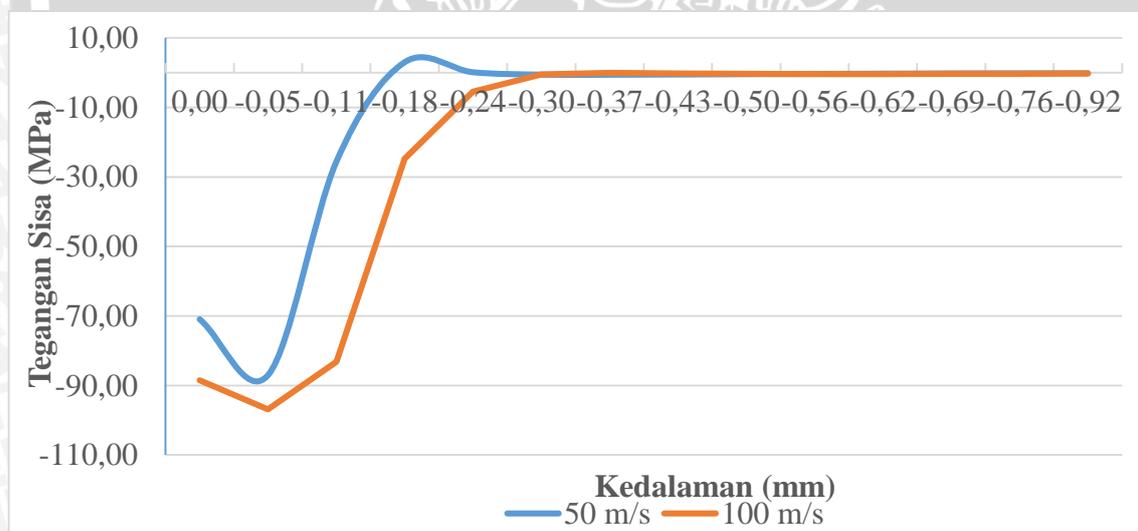
$$\epsilon_{yz} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{yz}$$

Ketika sudut 0° , tegangan maksimal didapatkan pada sumbu y karena bola ditembakkan dari arah y dan tidak memiliki nilai pada sumbu z sehingga nilai tegangan sisa besar. Dengan

adanya sudut penembakan maka gaya harus ditransformasikan terhadap sudutnya. Semakin besar sudut menyebabkan sumbu transformasi semakin jauh (tegangan untuk sumbu y akan berkurang) sehingga tegangan semakin kecil. Jika tegangan kecil maka tegangan sisa juga kecil. Pada variasi sudut, hasil *shot peening* paling baik digunakan untuk komponen yang dikenai beban berulang yaitu sudut 10^0 karena nilai tegangan sisa tekan maksimum cukup tinggi, kedalaman untuk tegangan sisa tekan besar, tegangan sisa tarik maksimum bernilai rendah, dan kedalaman tegangan sisa tarik kecil.

Lampiran 4 menampilkan distribusi warna tegangan yang terjadi pada spesimen dengan variasi sudut. Distribusi warna tidak hanya ditinjau dari kedalaman saja tetapi juga dilihat dari permukaan bagian atas / searah dengan penglihatan pistol tembak. Dengan adanya sudut, arah tembakan / pusat penembakan akan berpindah. Semakin besar sudut maka pusat penembakan akan berpindah mendekati permukaan. Semakin dekat dengan permukaan maka menyebabkan luasan yang terkena juga semakin besar.

4.2.4. Analisa Grafik Pengaruh Kecepatan Pada Sudut 20^0 Terhadap Distribusi Tegangan Sisa



Gambar 4.11 Pengaruh kecepatan pada sudut 20^0 terhadap distribusi tegangan sisa

Gambar 4.11 diatas merupakan grafik pengaruh kecepatan pada sudut 20^0 terhadap distribusi tegangan sisa yang terjadi pada spesimen. Dari grafik dapat dilihat dapat dilihat bahwa kecepatan mempengaruhi distribusi tegangan sisa pada spesimen dengan variasi 50 m/s dan 100 m/s. Sudut yang digunakan yaitu 20^0 . Didapatkan hasil tegangan sisa tekan pada kedua kecepatan dan tegangan sisa tekan hanya terjadi pada kecepatan 50 m/s.

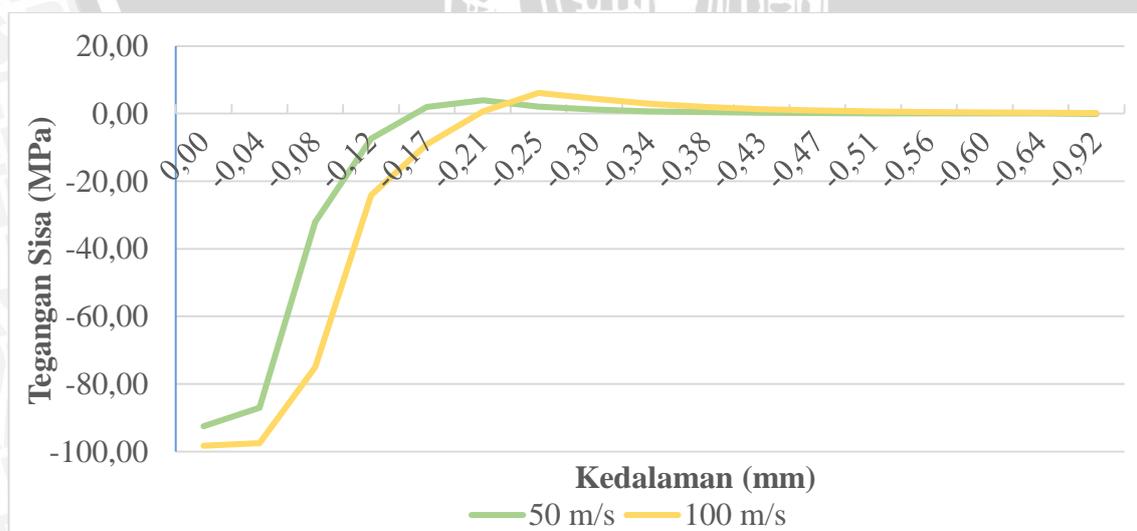
Tegangan sisa tekan berada dipermukaan sampai kedalaman sekitar 0,16 mm hingga 0,30 mm. Sedangkan tegangan sisa tarik terbentuk setelah kedalaman 0,18 mm pada kecepatan 50 m/s. Setelah itu nilai tegangan sisa cenderung konstan (nilainya tidak berubah) pada setiap variasi.

Dari gambar 4.11 didapatkan nilai tegangan sisa tekan maksimum terbesar ke terkecil dari 100 m/s dan 50 m/s yang bernilai -96,88 MPa dan -86,99 MPa. Nilai tegangan sisa tekan mengalami penurunan setelah mengalami nilai maksimum. Tegangan sisa tarik maksimum terdapat pada kecepatan 50 m/s yang bernilai 3,05 MPa.

Nilai tegangan dari besar ke kecil sesuai dengan rumusan impuls dimana massa dikalikan kecepatan, dengan kecepatan yang besar maka nilai gaya juga akan besar. Sudut yang sama membuat luasan yang untuk ditumbuk sama pada setiap variasi kecepatan, baik 100 m/s ataupun 50 m/s. Gaya dari tumbukan dengan kecepatan 100 m/s yang lebih besar dari 50 m/s membuat tegangan yang dihasilkan pada luasan yang sama dengan kecepatan 100 m/s lebih besar daripada 50 m/s. Dengan tegangan yang lebih besar inilah, maka nilai tegangan sisa yang terjadi juga lebih besar.

Pada variasi kecepatan dengan sudut 20° , hasil *shot peening* paling baik digunakan untuk komponen yang dikenai beban berulang yaitu kecepatan 100 m/s. Hal ini dikarenakan nilai tegangan sisa tekan maksimum tinggi dengan kedalaman untuk tegangan sisa tekan besar dan tidak memiliki tegangan sisa tarik sama sekali.

4.2.5. Analisa Grafik Pengaruh Kecepatan Pada Sudut 30° Terhadap Distribusi Tegangan Sisa



Gambar 4.12 Pengaruh kecepatan pada sudut 30° terhadap distribusi tegangan sisa

Gambar 4.12 di atas merupakan grafik pengaruh kecepatan pada sudut 30° terhadap distribusi tegangan sisa yang terjadi pada spesimen. Dari grafik dapat dilihat bahwa kecepatan mempengaruhi distribusi tegangan sisa pada spesimen dengan variasi 50 m/s dan 100 m/s. Sudut yang digunakan yaitu 30° . Didapatkan hasil tegangan sisa tekan dan tarik pada variasi. Tegangan sisa tekan berada dipermukaan sampai kedalaman sekitar 0,12 mm hingga 0,21 mm. Sedangkan tegangan sisa tarik terbentuk setelah kedalaman 0,17 mm sampai 0,43 mm. Pada kedalaman 0,43 mm nilai tegangan sisa cenderung konstan (nilainya tidak berubah).

Dari gambar 4.12 didapatkan nilai tegangan sisa tekan maksimum terbesar ke terkecil dari 100 m/s dan 50 m/s yang bernilai -97,52 MPa dan -92,51 MPa. Nilai tegangan sisa tekan mengalami penurunan setelah mengalami nilai maksimum sampai terbentuk tegangan sisa tarik. Tegangan sisa tarik maksimum dari terbesar sampai terkecil yaitu 100 m/s dan 50 m/s yang bernilai 6,12 MPa, dan 3,99 MPa. Kemudian nilai tegangan sisa tarik mengalami penurunan setelah mengalami nilai maksimum sampai menjadi konstan.

Pada variasi kecepatan dengan sudut 30° , hasil *shot peening* paling baik digunakan untuk komponen yang dikenai beban berulang yaitu kecepatan 100 m/s. Hal ini dikarenakan nilai tegangan sisa tekan maksimum tinggi, kedalaman untuk tegangan sisa tekan besar, tegangan sisa tarik maksimum cukup rendah akan tetapi memiliki kedalaman yang kecil.

