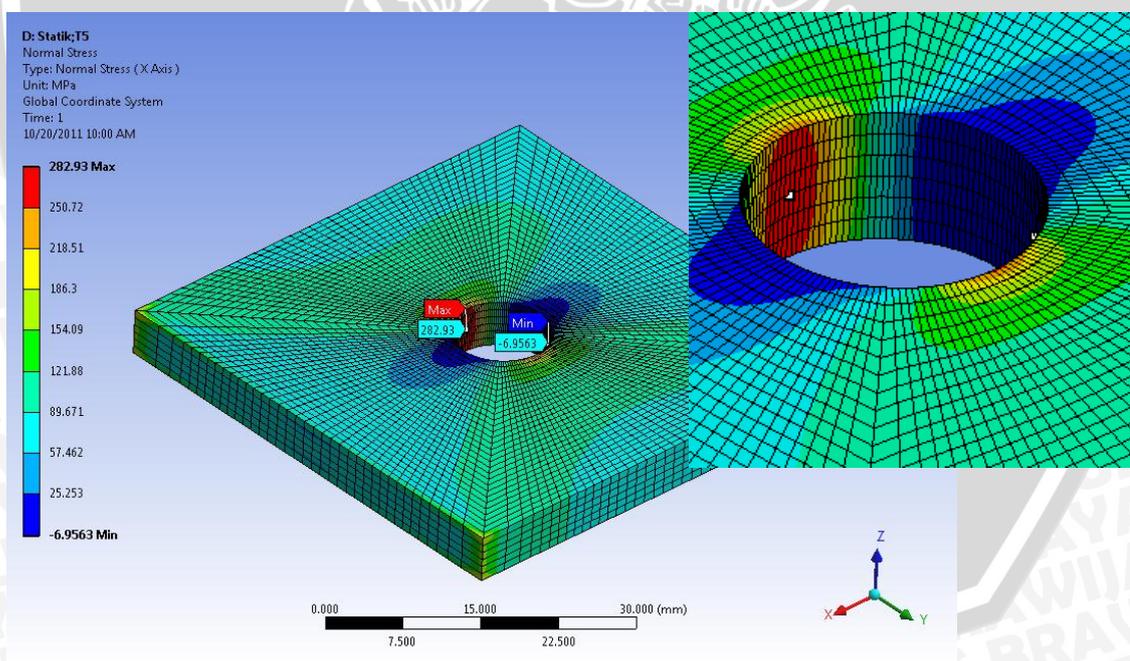


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi Pembebanan

Gambar 4.1 menunjukkan *contour* distribusi tegangan pada plat berlubang dengan tebal 5 mm setelah dilakukan pembebanan tarik axial sebesar 85 MPa. Tegangan yang terjadi bervariasi mulai dari tegangan kecil dan besar, dapat dilihat dari gambar tersebut terjadi konsentrasi tegangan disekitar lubang. Warna merah pada gambar menunjukkan tegangan tarik yang terjadi pada pelat, nilai terbesar terjadi disisi lubang pada arah paralel sumbu Y (259,45 Mpa). Pada daerah inilah biasanya retak awal material (*fatigue crack initiation*) akan dimulai sehingga tegangan kearah inilah yang akan dianalisa. Setelah terjadi pemusatan tegangan disisi lubang kearah sumbu Y warna merah ini akan memudar menjadi warna hijau bila semakin jauh dari lubang, hal ini menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi juga semakin turun. Selain itu, juga timbul warna biru yang menggambarkan terjadinya tegangan tekan pada plat yang dikenai beban tarik namun besarnya sangat kecil, sehingga dapat diabaikan dalam mendesain.



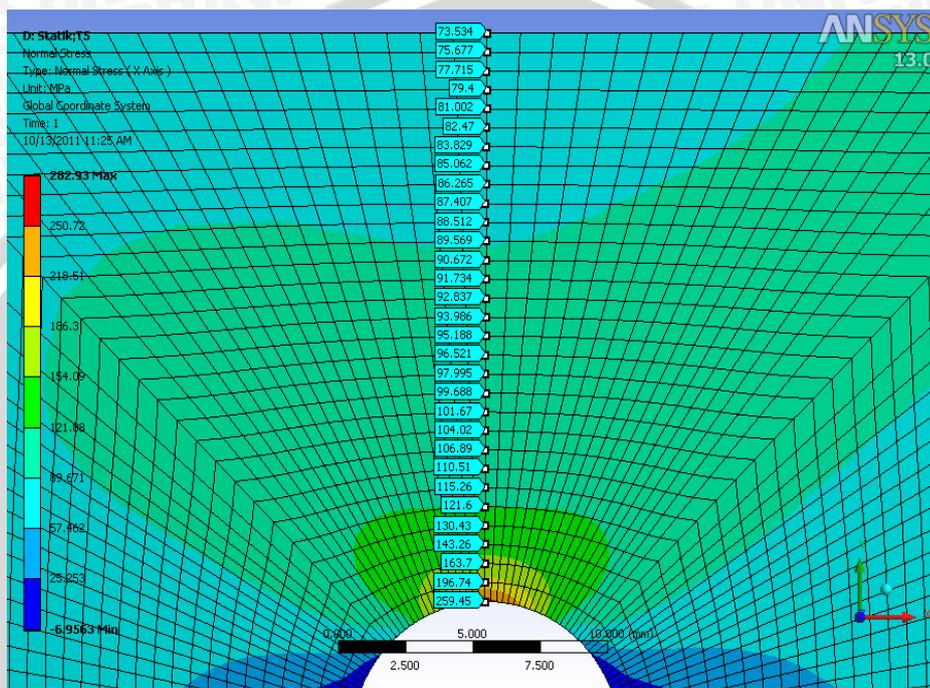
Gambar 4.1 *Contour* distribusi tegangan pada plat berlubang akibat pembebanan axial sumbu X

Untuk memvalidasi hasil simulasi ini maka dihitung konsentrasi tegangan pada plat berlubang secara eksak dengan menggunakan faktor konsentrasi tegangan (K), sebagai berikut:

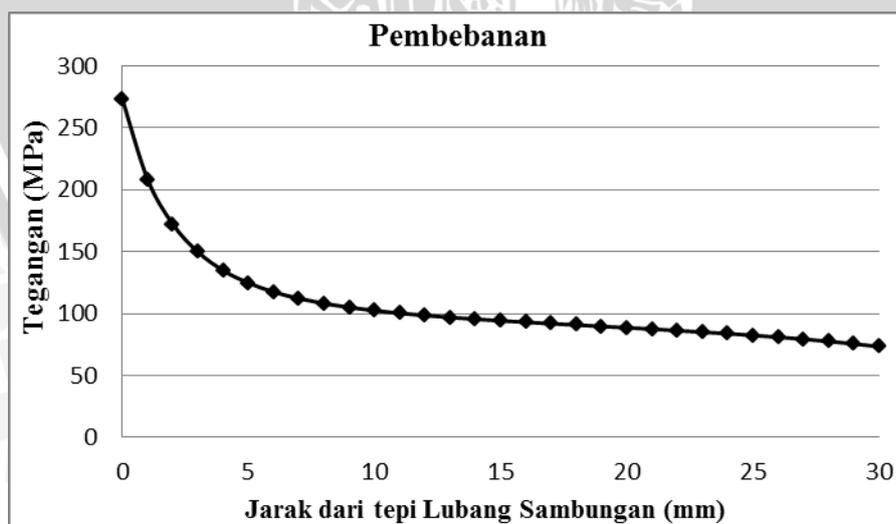
$$\sigma = P \times (1 + 2c/d) = 85 \text{ Mpa} \times (1 + 2 \times (5/5)) = 255 \text{ MPa}$$

Sedangkan hasil tegangan maksimum dari simulasi dengan bantuan *software* ANSYS 13 adalah 259,45 MPa. Maka tingkat keakuratan analisis dengan *software* ANSYS 13 adalah: $100\% - \frac{259,45 - 255}{255} \cdot 100\% = 99,9\%$.

Bila distribusi tegangan tersebut diplot dalam grafik besar tegangan terhadap jarak dari lubang sambungan, maka akan didapatkan hasil berikut ini:



Gambar 4.2 Nilai tegangan terhadap jarak akibat pembebanan



Gambar 4.3 Grafik hubungan jarak lubang dengan tegangan akibat pembebanan

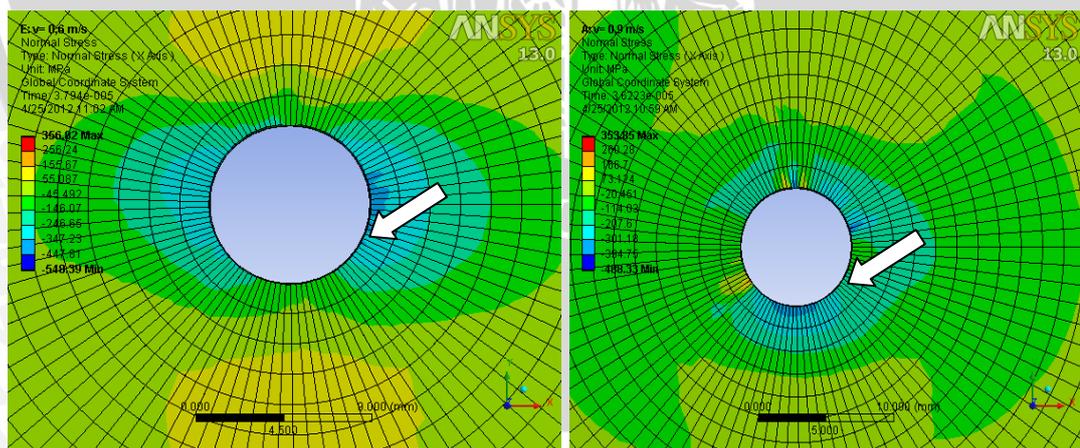
Dari hasil simulasi pembebanan axial ini dapat diketahui bahwa terjadi konsentrasi tegangan pada daerah sekitar lubang. Konsentrasi tegangan ini dikarenakan

adanya ketidakteraturan dimensi pada plat. Hal ini tentunya akan sangat membahayakan komponen struktur tersebut waktu digunakan tanpa ada hitungan yang cermat. Karena pada daerah tersebut akan terjadi deformasi plastis lokal dengan tegangan tarik yang dapat memicu timbulnya retak awal material, sehingga pada daerah tersebut memang perlu dilakukan perlakuan khusus sebelum perencanaan komponen struktur dilakukan.

4.2 Hasil Simulasi Proses *Cold Expansion Holes*

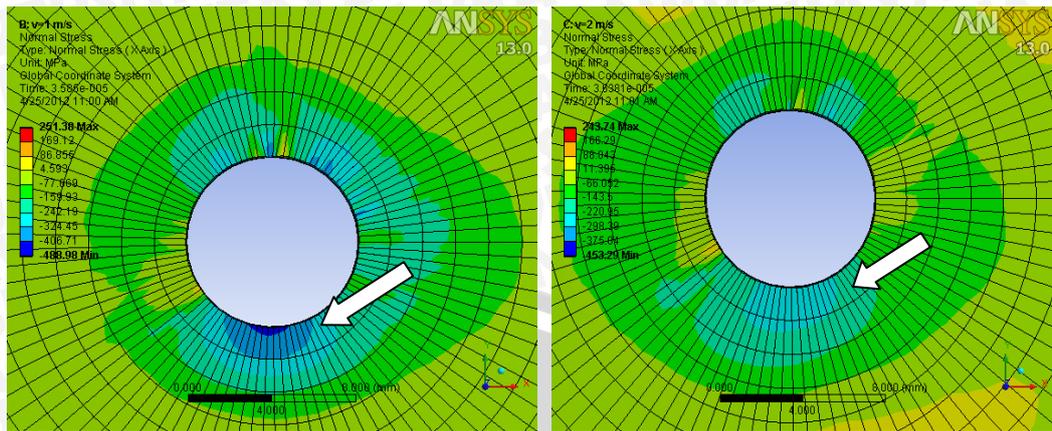
Setelah dilakukan simulasi dengan Ansys 13.0 akan didapatkan hasil distribusi tegangan sisa, tegangan sisa yang terjadi dalam bentuk tegangan normal kearah sumbu X. Gambar 4.4 menunjukkan *contour* distribusi tegangan sisa plat berlubang dengan variasi kecepatan 0,6 m/s, 0,9 m/s, 1 m/s, dan 2 m/s pada ketebalan 5 mm. Dari gambar tersebut menunjukkan bahwa terdapat tegangan sisa setelah proses *Cold Expansion Holes* dilakukan, yang besar dan kondisi tegangan sisa yang terjadi juga tergantung dari kecepatan mandrel yang digunakan.

Bila diamati dalam gambar, daerah sekitar lubang sambungan (tanda panah) terlihat berwarna biru hal ini menunjukkan bahwa pada daerah sekitar lubang tersebut terjadi tegangan sisa tekan (*compressive residual stress*) walaupun *mandrel* sudah dilepaskan. Bila semakin jauh dari sisi lubang sambungan, secara granual warna biru akan berubah menjadi warna merah. Hal ini mengidentifikasi bahwa tegangan akan bertransisi dari tegangan sisa tekan menjadi tegangan sisa tarik karena warna merah mewakili tegangan sisa positif atau tegangan tarik. Berikut gambarnya:



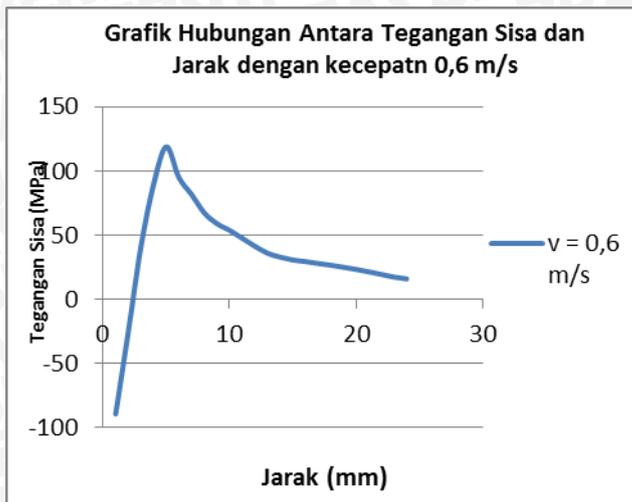
(a) $V = 0,6 \text{ m/s}$

(b) $v = 0,9 \text{ m/s}$

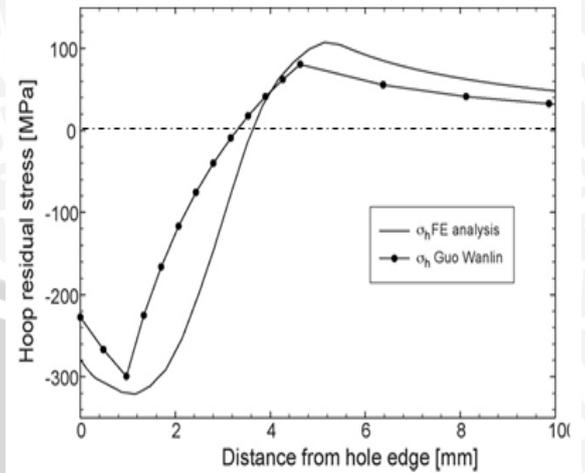
(c) $v = 1 \text{ m/s}$ (d) $v = 2 \text{ m/s}$

Gambar 4.4 *Contour* distribusi Tegangan sisa plat berlubang dengan tebal 5 mm
Dengan variasi kecepatan mandrel

Untuk memvalidasi hasil simulasi ini maka dilakukan perbandingan hasil grafik tegangan sisa yang terjadi pada simulasi ini dengan hasil distribusi tegangan sisa hasil perhitungan pada *journal* tulisan V. Nigrelli dan Pasta.S. Pada *journal* tersebut dituliskan bahwa distribusi tegangan sisa dari *Cold Expansion Hole Ball Models* dihitung dengan cara eksak oleh Guo Wanlin. Sedangkan untuk *Cold Expansion Holes* secara Finite elemen dihitung oleh V. Nigrelli dan Pasta.S, namun pada *journal* tersebut belum dihitung bagaimanakah distribusi tegangan sisa dengan diameter ekspansi (D_e) yang berbeda-beda. Jika hasil simulasi ini memiliki distribusi tegangan sisa dengan bentuk grafik yang mirip maka hasil simulasi ini dengan hasil distribusi dapat diterima, berikut perbandingan grafiknya:



(a)

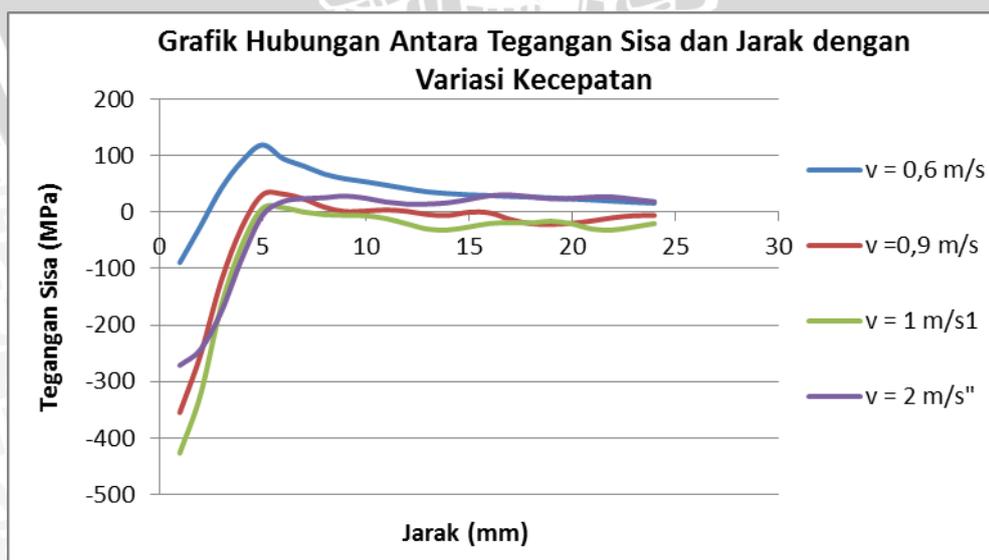


(b)

Gambar 4.5 Grafik perbandingan distribusi tegangan sisa (a) distribusi tegangan sisa hasil penelitian (b) hasil pada journal V. Nigrelli dan Pasta. S

Bila dilihat pada gambar diatas bentuk grafik yang dihasilkan pada simulasi ini adalah mirip dengan grafik hasil analisa Guo dan V. Nigrelli, yaitu sama-sama terbentuk tegangan sisa tekan pada daerah sekitar lubang dan akan bertransisi menjadi tegangan sisa tarik setelah menjauhi lubang sambungan.

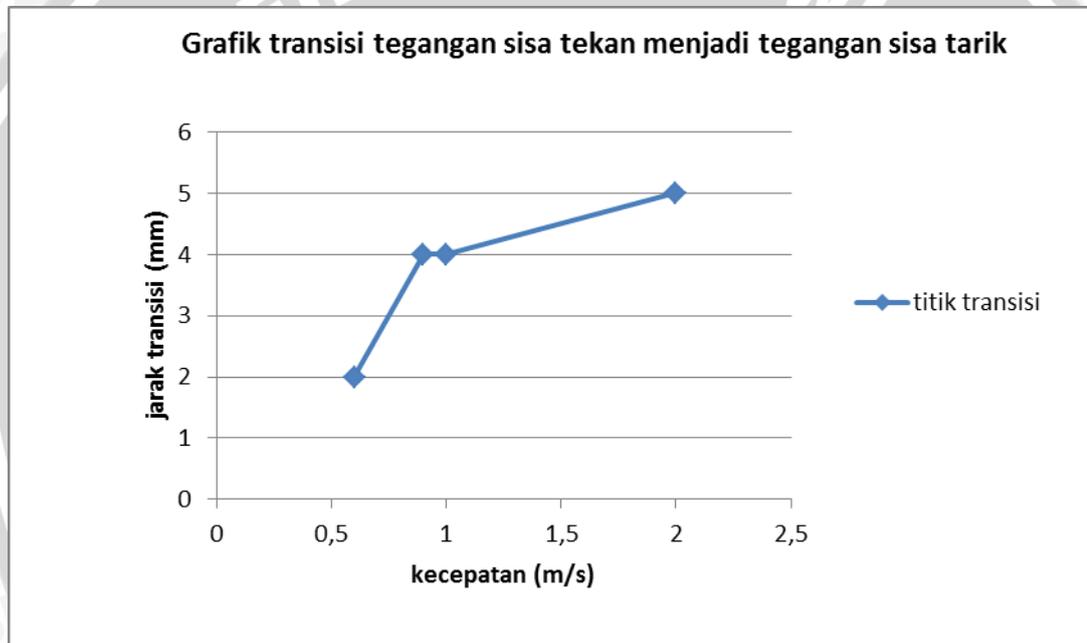
Untuk lebih mudah menganalisa distribusi tegangan sisa tersebut, maka semua variasi kecepatan mandrel diplot dalam grafik besar tegangan terhadap jarak dari lubang sambungan, maka akan didapatkan hasil berikut ini:



Gambar 4.6 Grafik hubungan jarak lubang sambungan dengan distribusi tegangan sisa yang terjadi.

Dari gambar grafik 4.6 tersebut Dari grafik di atas dapat diketahui bahwa dengan semakin tingginya kecepatan maka tegangan sisa tekan semakin meningkat. Hal ini disebabkan dengan semakin tingginya kecepatan maka energy yang digunakan untuk mendeformasi plastis material juga semakin besar. Dengan kecepatan 0,6 m/s, 0,9 m/s, 1 m/s, dan 2 m/s dihasilkan tegangan sisa tekan maksimum sebesar -89,36 MPa, 354,82 MPa, -426,4 MPa dan -271,19 MPa. Kecepatan yang semakin tinggi yaitu 2 m/s didapat tegangan sisa yang lebih rendah, hal ini dikarenakan strain limit material yang sudah maksimum.

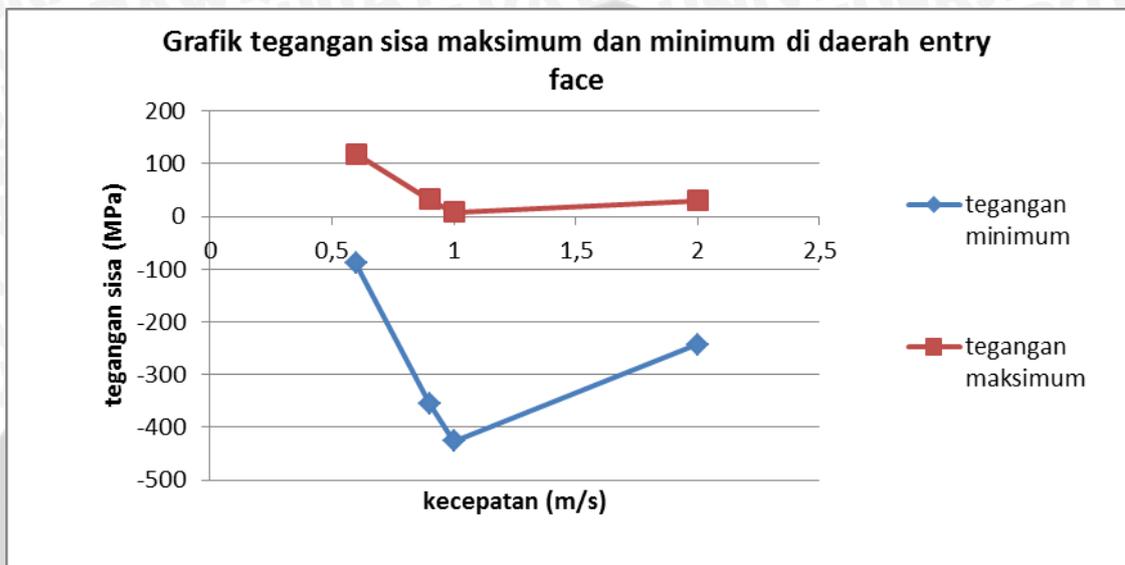
Selain itu, dapat dilihat transisi tegangan dari tegangan sisa tekan menjadi tegangan sisa tarik yang terjadi pada plat setelah proses *Cold Expansion Holes*, untuk lebih detail mengenai titik transisi tersebut dapat dilihat pada gambar grafik berikut ini:



Gambar 4.7 Titik transisi tegangan sisa pada berbagai kecepatan

Dapat diketahui dari gambar grafik 4.7 tersebut, titik transisi tegangan sisa berbagai kecepatan. Semakin tinggi kecepatan maka transisi tegangan sisa tekan menjadi tegangan sisa tarik semakin jauh pula. Contohnya untuk kecepatan 0,6 m/s dihasilkan jarak transisi dari tegangan tekan menjadi tegangan sisa tarik pada jarak 2 mm. Sedangkan untuk kecepatan 2 m/s dihasilkan jarak transisi dari tegangan tekan menjadi tegangan sisa tarik pada jarak 5 mm. Sehingga dalam mendesain suatu struktur yang dalam penggunaannya menggunakan *Cold Expansion Process* pada jarak setelah titik transisi tersebut perlu perhatian khusus, mengingat tegangan yang dihasilkan sudah menjadi tegangan sisa tarik yang merugikan. Tegangan sisa tarik ini akan menambah tegangan material pada saat material tersebut dibebani (waktu aplikasi).

Selain titik transisi, pada gambar grafik 4.6 dapat dilihat pula tegangan sisa tekan minimum dan tegangan sisa tarik maksimum pada plat berlubang setelah *Cold Expansion Hole* dilakukan. Berikut adalah tegangan sisa dengan nilai ekstrem yang terjadi pada plat berlubang dengan berbagai macam kecepatan yang berbeda-beda:



Gambar 4.8 Tegangan sisa *extreme* pada berbagai kecepatan

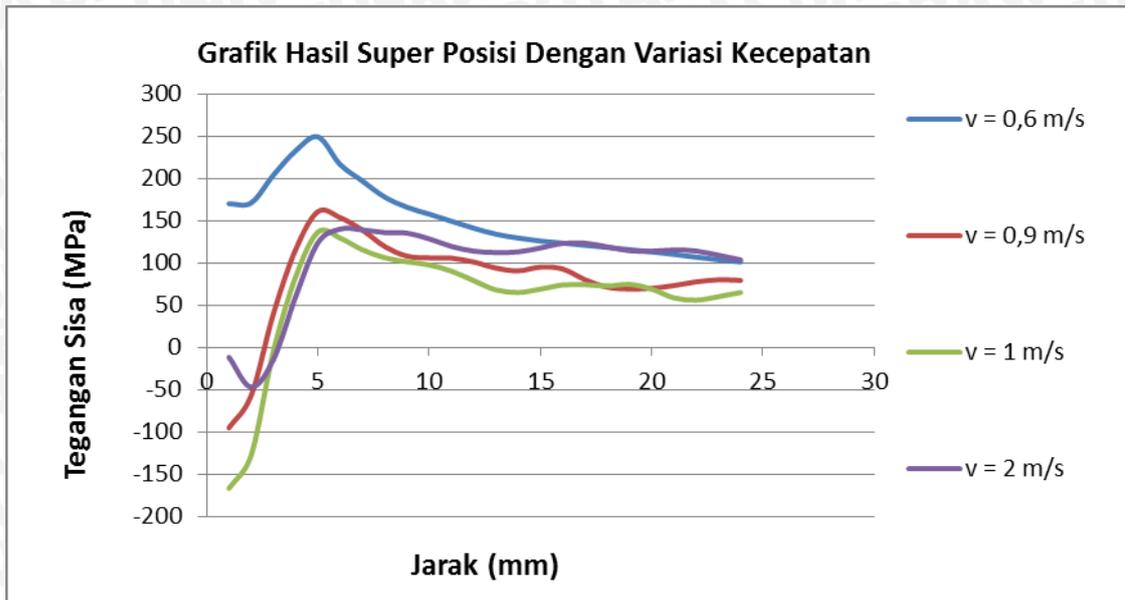
Pada gambar 4.8 di atas dapat ditunjukkan tegangan sisa tekan minimum dan tarik maksimum dari berbagai variasi kecepatan. Bila diamati dari berbagai variasi yang berbeda maka tegangan maksimum yang dihasilkan juga berbeda. Berikut ini kecenderungan bahwa semakin besar kecepatan pada mandrel yang digunakan maka semakin besar pula tegangan sisa tekan yang terbentuk mulai dari tepi lubang. Ini dapat diketahui pada variasi kecepatan 0,6 m/s, 0,9 m/s, 1 m/s dan 2 m/s.

Sehingga dari uraian daerah transisi dan tegangan sisa *extreme* yang terjadi tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa parameter kecepatan pada mandrel yang digunakan dalam *Cold Expansion Process* memang perlu diperhatikan. Oleh karena itu dalam pemilihan kecepatan mandrel pada *Cold Expansion Process* agar disesuaikan supaya tegangan sisa tekan yang terjadi semaksimal mungkin serta tidak menghasilkan tegangan sisa tarik yang terlalu besar.

4.3 Superposisi Tegangan Sisa dengan Tegangan Aplikasi

Hasil ini diperoleh dengan menjumlahkan tegangan sisa yang terjadi dengan tegangan akibat pembebanan. Hasil ini perlu ditampilkan karena pada superposisi inilah

seberapa besar pengaruh distribusi tegangan sisa terhadap tegangan akibat pembebanan dapat diketahui. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada plot grafik berikut ini:

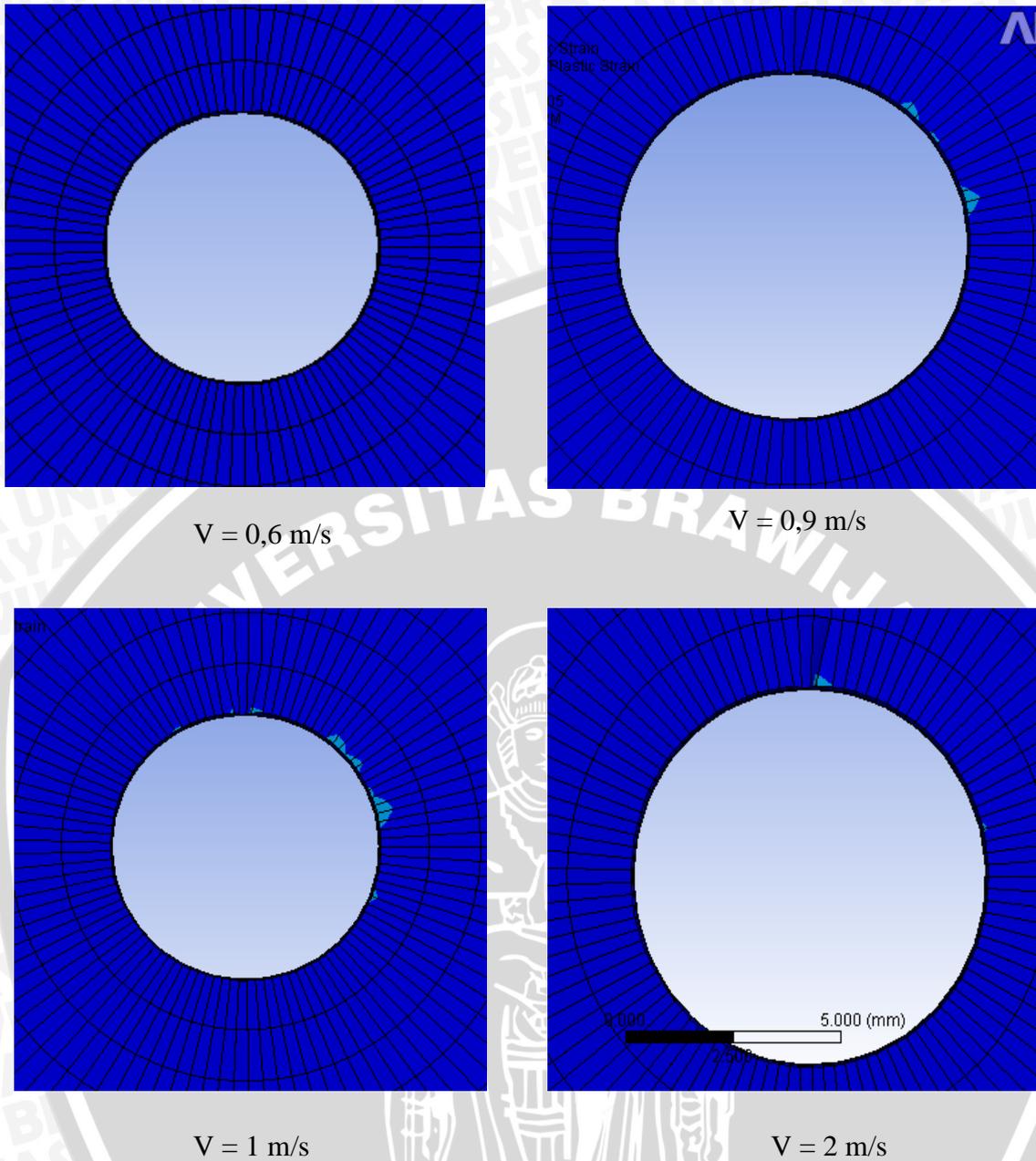


Gambar 4.9. Grafik hubungan antara jarak dan tegangan sisa super posisi pada proses cold expansion hole

Dari gambar ini dapat dilihat walaupun plat berlubang yang diekspansi diberi beban axial sebesar 85 MPa, di sekitar lubang sambungan tidak terjadi konsentrasi tegangan seperti pada plat yang tidak diberi perlakuan *Cold Expansion Hole* (base murni). Sebagai contoh pada variasi kecepatan 0,6 m/s bila tidak di ekspansi tegangan yang terjadi di tepi lubang adalah 259,49 Mpa, sedangkan yang telah ekspansi terlebih dahulu adalah 170,13 MPa. Hal ini sangat sesuai dengan harapan bahwa proses *Cold Expansion Hole* bertujuan untuk menurunkan konsentrasi tegangan pada area sekitar lubang sambungan yang mengakibatkan terjadinya inisiasi retak dari patah lelah pada komponen struktur.

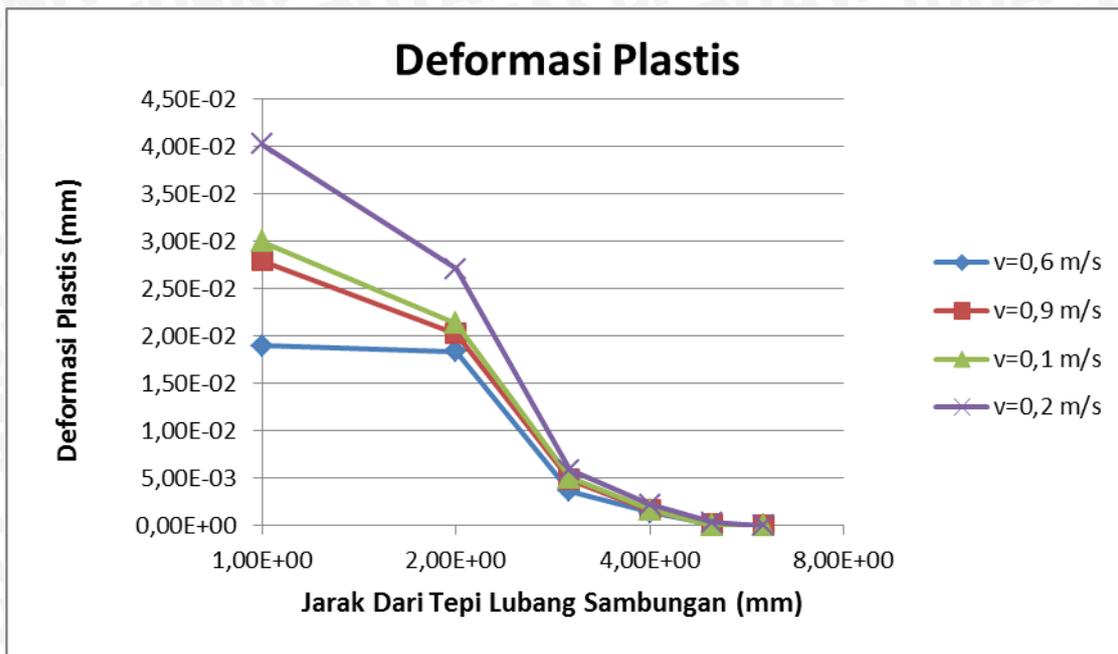
4.4 Pembahasan

Untuk mengetahui penyebab terjadinya distribusi tegangan sisa yang terjadi pada plat berlubang yang telah diekspansi, maka akan ditunjukkan *contour* regangan plastis yang terjadi pada plat berlubang setelah *Cold Expansion Holes*. Hasil plot regangan plastis yang terjadi pada material setelah proses *Cold Expansion Hole* dengan berbagai variasi kecepatan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.10. Distribusi regangan plastis pada plat berlubang setelah *Cold Expansion Holes* dilakukan

Dari gambar 4.10 tersebut dapat dilihat regangan plastis yang terjadi hanya terjadi disekitar lubang, hal ini diindikasikan dengan warna biru muda yang menggambarkan regangan plastis pada sisi dekat lubang sambungan plat berlubang setelah proses *Cold Expansion Holes*. Sedangkan pada jarak yang lebih jauh dari sisi lubang maka tidak terjadi deformasi plastis pada meterial, pada gambar terlihat warna biru tua. Sehingga tegangan sisa pada material akan berubah menjadi tegangan sisa tarik. Tegangan ini terbentuk karena adanya *reyielding* material yang tidak mengalami deformasi plastis. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik di bawah ini :



Gambar 4.11 Plot grafik distribusi regangan plastis berbagai variasi kecepatan mandrel yang berbeda

Gambar 4.11 di atas menggambarkan distribusi regangan plastis yang terjadi pada material setelah dilakukan proses *Cold Expansion Hole* yang dilakukan dengan menggunakan variasi kecepatan 0,6 m/s, 0,9 m/s, 1 m/s, 2 m/s. Dengan kecepatan yang lebih besar maka deformasi plastis yang terjadi pada material juga semakin besar. Pada gambar grafik tersebut dapat dilihat setelah jarak mulai 7 mm regangan plastis sudah bernilai nol. Hal ini menggambarkan bahwa deformasi plastis yang terjadi maksimum terjadi pada jarak 6 mm dari tepi lubang.