

**ANALISIS TEGANGAN PENAMBAL DAN GAYA PAKU KELING  
PADA PEMASANGAN ANTENA ATC TRANSPONDER  
PESAWAT BOEING 737-200**

**Sukahir<sup>(1)\*</sup>, Setyo Hariyadi S.P.<sup>(2)</sup>, Suyatmo<sup>(3)</sup>**

<sup>1</sup>Politeknik Penerbangan Palembang

<sup>2,3</sup>Politeknik Penerbangan Surabaya

e-mail: <sup>1</sup>sukahir@poltekbangplg.ac.id, <sup>2</sup>setyo\_hariyadi@poltekbangsby.ac.id

**Received :**  
29 November 2023

**Revised :**  
12 Desember 2023

**Accepted :**  
06 Maret 2024

**Abstrak:** Pesawat Boeing 737-200 perlu di pasang *ATC Transponder*, sehingga perlu ada modifikasi antena dipasang pada *fuselage skin* yang berlokasi di *body station 427* bagian atas. Tujuan artikel ini adalah Untuk menjamin kekuatan material dari pemasangan paku keling pada fuselage skin maka diperlukan simulasi numerik sehingga hasilnya lebih presisi. Metodologi adalah ekperimental simulasi numerik, data diolah dengan tool Patran Nastran. Hasilnya adalah Fuselage skin dimodelkan berupa pelat utama (*exixsting skin*) dengan ukuran panjang 354,33 mm, lebar 401,4 mm dan tebal 1,8 mm. Material pelat utama dan penambal adalah aluminium T2024-T3, modulus elastisitasnya 72 GPa, hasilnya bahwa resultan beban geser maksimum yang terjadi pada paku keling adalah sebesar 675,76 N dan paku keling yang mendapat beban maksimum tersebut posisinya paling jauh dari lubang, batas nilai kekuatan geser maksimum paku keling dengan diameter 4,76 mm sebesar 4498 N.

**Kata Kunci:** *fuselage skin*, metode elemen hingga, Patran Nastran, paku keling.

**Abstract:** Pesawat Boeing 737-200 perlu di pasang *ATC Transponder*, sehingga perlu ada modifikasi antena dipasang pada *fuselage skin* yang berlokasi di *body station 427* bagian atas. Tujuan artikel ini adalah Untuk menjamin kekuatan material dari pemasangan paku keling pada fuselage skin maka diperlukan simulasi numerik sehingga hasilnya lebih presisi. Metodologi adalah ekperimental simulasi numerik, data diolah dengan tool Patran Nastran. Hasilnya adalah Fuselage skin dimodelkan berupa pelat utama (*exixsting skin*) dengan ukuran panjang 354,33 mm, lebar 401,4 mm dan tebal 1,8 mm. Material pelat utama dan penambal adalah aluminium T2024-T3, modulus elastisitasnya 72 GPa, hasilnya bahwa resultan beban geser maksimum yang terjadi pada paku keling adalah sebesar 675,76 N dan paku keling yang mendapat beban maksimum tersebut posisinya paling

*jauh dari lubang, batas nilai kekuatan geser maksimum paku keling dengan diameter 4,76 mm sebesar 4498 N.*

**Keywords:** *fuselage skin, finite element method, Patran Nastran, rivets.*

## **PENDAHULUAN**

Pesawat Boeing 737-200 di produksi dari tahun 1967-1988, sehingga saat ini tidak diijinkan untuk terbang dari bandara asal ke bandara tujuan karena belum terpasang peralatan navigasi yaitu *ATC Transponder* yang digunakan untuk membantu menunjukkan posisi pesawat baik jarak dan ketinggian agar terbaca pada display peralatan RADAR pada waktu terbang instrumen (*Instrument Flight Rules/IFR*) sehingga dapat diatur dan dipandu oleh pemandu lalu lintas udara (*Air Traffic Controller*).. Untuk memasang peralatan tersebut perlu modifikasi salah satu bagian fuselage pesawat Boeing 737-200 sehingga dapat memasang peralatan *Air Traffic Control (ATC) Mode S Transponder*

Peralatan *ATC Mode S Transponder* terdiri dari *transceiver* (pemancar dan penerima sinyal gelombang radio) yang dipasang pada *cockpit* pesawat dan antena yang dipasang pada *skin* pesawat. Untuk memasang peralatan tersebut, selain memodifikasi di bagian *cockpit* untuk meletakkan *transceiver*-nya juga harus melubangi *skin* pesawat guna memasang antena *ATC Transponder* tersebut. Untuk membuat lubang pada *skin* harus sesuai dengan *Structure Repair Manual (SRM) Boeing 737-200*. Akibat adanya lubang tersebut, maka akan menimbulkan konsentrasi tegangan yang harus dianalisis.

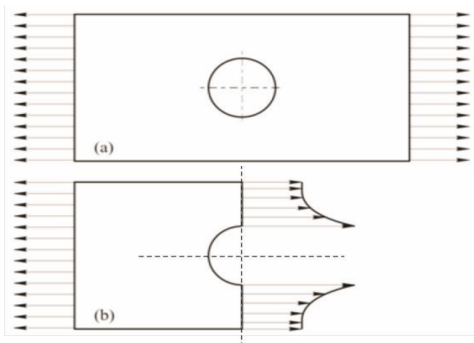
Pemasangan antena *ATC Transponder* pada *skin* pesawat harus

dilapisi penambal (*doubler*) yang berfungsi untuk membantu menahan beban disekitar lubang di mana antena tersebut dipasang. Pelaksanaan pemasangan penambal ini harus menggunakan paku keling (*rivet*) yang dapat menimbulkan konsentrasi tegangan akibat gaya geser paku keling. Untuk mengetahui kemampuan paku keling menahan beban geser maksimal dan berapa besar konsentrasi tegangan yang terjadi di sekitar lubang perlu dilakukan analisa numerik dengan menggunakan metode elemen hingga. Analisa ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan kekuatan geser paku keling dalam menahan struktur penambal terhadap beban yang bekerja pada struktur tersebut. Para peneliti yang telah mendalami distribusi tegangan dan pengaruhnya terhadap pelat berlubang antara lain Ion (Ion, 2014), Kumar (B.K & Kumar, 2014), Liu et al.(Liu et al., 2020), Chen et al.(Chen et al., 2021), Jiang et al.(Jiang et al., 2021), Obaid et al. (Obaid et al., 2022), dan lain-lain.

Penggunaan metode elemen hingga atau Finite Element Method pada analisis distribusi tegangan di sepanjang penampang berlubang telah dilakukan oleh banyak peneliti, diantaranya Niranjana et al.(Niranjana et al., 2018), Alamsyah et al.(Alamsyah et al., 2020), Profile (Profile, 2023), dan lain-lain. Sebelum melaksanakan pemasangan penambal pada fuselage pesawat Boeing 737-200, perlu di pahami hal-hal sebagai berikut :

### A. Konsentrasi Tegangan

Perubahan distribusi tegangan akan terjadi jika struktur mengalami perubahan geometri, seperti adanya retak, ada lubang, dan terjadi perubahan perluasan penampang lintang sehingga menyebabkan distribusi tegangan pada struktur menjadi tidak seragam sehingga menimbulkan konsentrasi tegangan yang dapat menurunkan kekuatan struktur, bahkan dapat menyebabkan kegagalan lebih cepat dari umur perancangannya. Gambar 1. menunjukkan pelat berlubang diberikan beban tarik di sepanjang tepi pelat.



Gambar 1. Pelat berlubang yang mengalami beban tarik.

Suatu struktur jika diberi beban maka akan mengalami tegangan. Pada kondisi elastik linier, tegangan yang di alami struktur besarnya sebanding dengan beban yang diterimanya. Besarnya tegangan pada suatu plat yang diberi beban murni dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

di mana:

$\sigma$  = tegangan pada penampang pelat (tegangan normal)

F = beban aksial yang diberikan (gaya yang bekerja)

A = luas penampang pelat.

Jika terjadi tegangan maksimum di tepi pelat berlubang di antara tegangan yang terdistribusi di sekitar pelat, maka harga faktor konsentrasi tegangan ( $K_t$ ) dapat ditentukan. Faktor konsentrasi tegangan ( $K_t$ ) digunakan untuk menyatakan pengaruh lubang dengan cara membagi tegangan maksimum di tepi lubang ( $\sigma_{max}$ ) dengan tegangan terdistribusi merata yang jauh dari lubang ( $\sigma_{nom}$ ). Dalam persamaan,  $K_t$  didefinisikan dengan:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (2)$$

Definisi tegangan nominal ada dua macam, yaitu :

1. tegangan pelat tanpa lubang
2. tegangan terdistribusi merata yang jauh dari lubang.

Definisi tegangan nominal di atas menyebabkan faktor konsentrasi tegangan dikenal dengan dua persamaan, yaitu faktor konsentrasi tegangan *gross* berdasarkan luas penampang tanpa lubang ( $K_{tg}$ ) dan faktor konsentrasi tegangan *nett* berdasarkan luas penampang pelat berlubang ( $K_{tn}$ ).

$$K_{tg} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} \quad (3)$$

$$K_{tn} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (4)$$

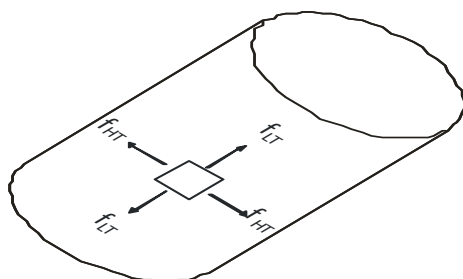
### B. Faktor Konsentrasi Tegangan Pelat Belubang Berbentuk Lingkaran

Harga faktor konsentrasi tegangan ( $K_t$ ) pelat berhingga yang dilubang dengan lubang berbentuk lingkaran mengacu pada Pilkey (Pilkey, 1998). Faktor eferensi tersebut ditunjukkan, jika harga  $K_{tg}$  sama dengan  $K_{tn}$  berarti nilai tersebut merupakan harga  $K_t$ -nya. Harga  $K_{tg}$  dan  $K_{tn}$  akan berubah jika terjadi perubahan nilai  $2a/w$ , peningkatan nilai  $2a/w$  menyebabkan harga  $K_{tg}$  dan berbanding terbalik dengan harga  $K_{tn}$  pada pelat berhingga. Perbandingan perubahan harga  $K_{tg}$  dan  $K_{tn}$  dapat dilihat pada persamaan (5).

$$K_{tn} = K_{tg} \left( 1 - \frac{2a}{w} \right) \quad (5)$$

### C. Tegangan pada Fuselage Pesawat

*Fuselage* pesawat berbentuk silinder dan terjadi tekanan di dindingnya. Tekanan tersebut dapat menimbulkan tegangan yang umumnya dibagi menjadi dua yaitu tegangan tarik searah *fuselage* (*longitudinal tension stress*) dan tegangan tarik searah keliling *fuselage* (*hoop tension stress*). Kedua tegangan tarik ini diperoleh dari perbedaan tekanan yang terjadi di sekitar silinder, jari-jari *fuselage* dan tebal dinding *fuselage*. Besarnya *hoop tension stress* dua kali *longitudinal tension stress*, dirumuskan sebagai berikut:



Gambar 2. *Tension stress* pada *fuselage*

Berdasarkan gambar 2 dapat ditarik kesimpulan menjadi persamaan sebagai berikut berdasarkan Pilkey (1998):

*Hoop tension stress*

$$f_{HT} = \frac{pR}{t} \quad (6)$$

*Longitudinal tension stress*

$$f_{LT} = \frac{pR}{2t} \quad (7)$$

dimana:

$f_{HT}$  = *hoop tension stress*

$f_{LT}$  = *longitudinal tension stress*

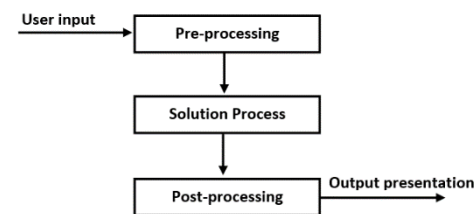
$p$  = perbedaan tekanan

$R$  = jari-jari *fuselage*

$t$  = tebal dinding *fuselage*.

### D. Prosedur Elemen Hingga

Cara kerja perangkat lunak elemen hingga yang biasa digunakan adalah *pre-processing*, *solution process* atau analisis, dan *post-processing*. Untuk lebih jelasnya dalam memahami prosedur tersebut dapat dilihat dalam gambar 3. Yang merupakan flowchart dari urutan cara kerjanya.



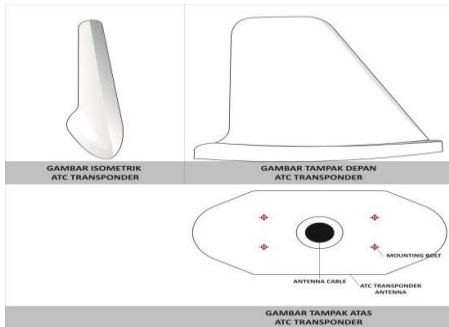
Gambar 3. Urutan cara kerja perangkat lunak elemen hingga

### E. Perhitungan Beban Aerodinamis

Perhitungan beban aerodinamis dalam penelitian ini diabaikan dikarenakan bentuk antena *ATC transponder* yang terpasang tidak menimbulkan gaya hambat (*drag*). Jika dilihat dari depan pesawat geometrinya

# Analisis Tegangan Penambal dan Gaya Paku Keling pada Pemasangan Antena ATC Transponder Pesawat Boeing 737-200

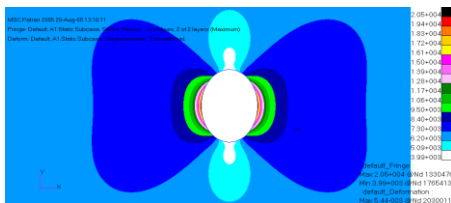
sangat tipis. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4. Pada gambar tersebut, geometri antenna jika dibandingkan dengan luas existing skin tidak akan menimbulkan gesekan di udara selama pesawat sedang terbang.



Gambar 4. Bentuk Antena ATC Transponder

## F. Harga Konsentrasi Tegangan Tepi Lubang Pelat Utama

Perhitungan harga konsentrasi tegangan pada pelat utama yang terjadi di tepi lubang harus dilakukan sebelum proses penambalan. Hasilnya dapat dipergunakan untuk mengetahui kebenaran proses analisis yang dilakukan dan perbandingan harga konsentrasi tegangan setelah dipasang penambal.



Gambar 5. Kontur tegangan di tepi lubang pelat utama tanpa penambal setelah diberi beban biaxial

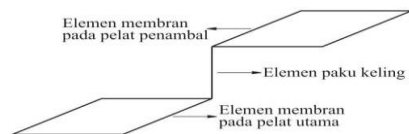
Harga faktor konsentrasi ( $K_t$ ) merupakan perbandingan tegangan maksimal di tepi lubang dengan

tegangan nominal yaitu tegangan terdistribusi merata yang jauh dari lubang sesuai dengan persamaan 2. Gambar 5 memperlihatkan hasil analisis metode elemen hingga yang dilakukan oleh perangkat lunak Patran Nastran. Nilai yang muncul pada data di samping gambar deformasi kontur tegangan satuannya adalah Psi, sehingga harus dirubah dalam bentuk satuan SI. Hasil analisis tegangan maksimal yang terlihat adalah sebesar 141,34 MPa dan tegangan terdistribusi merata yang jauh dari lubang yang nilainya lebih besar dari tegangan minimal adalah 50,33 MPa, maka harga konsentrasi tegangan di tepi lubang pada pelat utama adalah 2,81.

## G. Pemodelan Elemen Hingga

Analisis pemasangan struktur antenna ATC Transponder yang menggunakan sambungan paku keling pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Patran Nastran. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan model pada perangkat lunak tersebut adalah sebagai berikut

- 1) Pelat utama diasumsikan sebagai pelat datar dua dimensi, namun geometri tetap sama dengan data teknis. Pelat dimodelkan dengan elemen triangular dengan tiga nodal dan elemen segi empat dengan empat nodal. Adanya elemen triangular pada pelat tertentu dalam struktur antenna ATC Transponder mengidentifikasi posisi paku keling yang saling terhubung antara satu pelat dengan pelat lainnya.

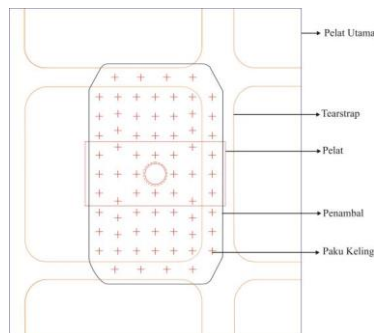


Gambar 6. Pemodelan sambungan paku keling

- 2) Paku keling dimodelkan dengan elemen pegas, sebagaimana diilustrasikan pada gambar 6.
- 3) Lubang paku keling hanya dimodelkan sebagai nodal pada elemen tertentu sehingga interferensi antara paku keling terhadap lubang tidak diketahui.
- 4) Gaya gesekan pada permukaan sambungan yang bersinggungan tidak dimodelkan.

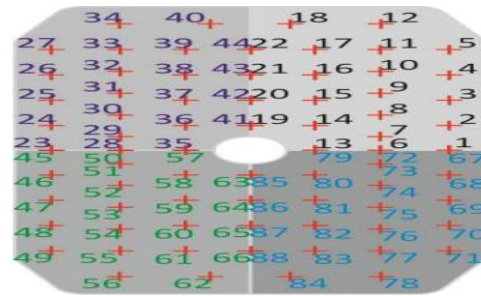
### Posisi Paku Keling pada Geometri Struktur

Gambar 7. memperlihatkan keseluruhan geometri struktur yang akan dianalisa. Tanda '+' pada gambar merupakan simbol paku keling. Jumlah paku keling pada model struktur penambal di atas sebanyak 74 buah dengan ukuran diameter paku keling yang sama yaitu sebesar 4,76 mm. Pada pemodelan elemen hingga, model paku keling menggunakan elemen pegas (*dof spring*), sehingga secara keseluruhan elemen pegas yang digunakan adalah 74 buah.



Gambar 7. Posisi paku keling pada geometri struktur

Sedangkan lokasi penomoran paku keling yang terdapat pada penambal dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 8. Lokasi penomoran paku keling pada penambal

Pemodelan Geometri Struktur Pelat Utama, Penambal, *Tearstrap* dan Pelat Pada pemodelan elemen hingga, pelat utama mengalami pembebanan biaksial dengan besar tegangan tarik searah keliling *fuselage* ( $\sigma_1$ ) sebesar 56,05 MPa dan tegangan tarik searah *fuselage* ( $\sigma_2$ ) sebesar 28,05 MPa atau sama dengan setengah dari besarnya  $\sigma_1$ .

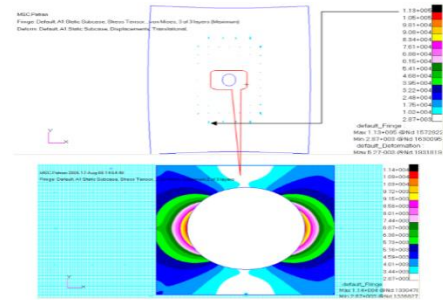
Berdasarkan data geometri pelat utama, diketahui panjang sebesar 354,33 mm, lebar sebesar 401,4 mm dan tebal struktur pelat utama sebesar 1,8 mm. Tiap-tiap elemen pada sebagian besar struktur pelat utama dimodelkan dengan elemen bujursangkar menggunakan elemen empat titik nodal. Panjang dan lebar satu elemen tersebut sebesar 0,41 mm atau kurang lebih 900.000 elemen hingga yang membentuk geometri pelat utama, sebagaimana terlihat gambar 8. Material pelat utama menggunakan aluminium T2024-T3 dengan modulus elastisitas 72 GPa.

## Analisis Tegangan Penambal dan Gaya Paku Keling pada Pemasangan Antena ATC Transponder Pesawat Boeing 737-200

Setelah pemodelan geometri pelat utama dibuat, maka selanjutnya dibuat pemodelan geometri penambal, *tearstrap* dan pelat. Geometri penambal yang akan dianalisa mempunyai ukuran panjang 165,1 mm, lebar 266,7 mm dan tebalnya 2,2 mm. Material penambal adalah aluminium T2024-T3 dengan modulus elastisitas 72 GPa, sedangkan geometri *tearstrap* berukuran sama dengan geometri pelat utama, namun bentuknya berbeda hanya sebagian saja yang terhubung dengan pelat utama. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 16. Geometri pelat mempunyai ukuran panjang sebesar 170,2 mm dan lebarnya 80,01 mm serta tebal 2,54 mm. Bahan material yang digunakan sama seperti pelat utama maupun penambal, yaitu aluminium T2024-T3 dengan modulus elastisitas 72 GPa. Untuk menggabungkan keempat geometri tersebut digunakan paku keling yang dimodelkan menggunakan *dof spring*.

### HASIL ANALISIS TEGANGAN STRUKTUR PENAMBAL

Hasil analisis tiap-tiap pemodelan setelah mendapat beban per *nodal* dapat dilihat dari berbagai gambar kontur tegangan yang terdapat pada gambar 8 sampai dengan gambar 20. Perubahan besarnya tegangan yang bekerja pada geometri tersebut terlihat dengan adanya perubahan warna pada kontur geometri. Perubahan nilai besaran selalu diikuti oleh perubahan warna, sehingga dengan melihat perubahan warna yang ada, sudah dapat diketahui adanya perubahan tegangan yang bekerja.

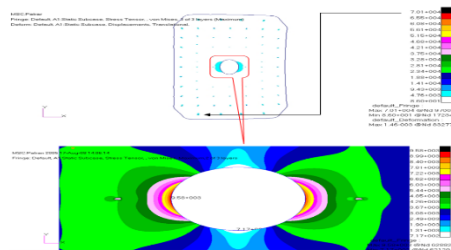


Gambar 9. Kontur tegangan pelat utama kondisi *model scale* setelah diberi beban

Pada gambar 9 terlihat jelas bahwa perubahan warna kontur tegangan menunjukkan perubahan nilai-nilai tegangan yang dimulai dari tepi lubang terus berkembang ke sekitar lubang, besaran nilainya sedikit demi sedikit berkurang yang ditunjukkan oleh perubahan warna kontur tegangan tersebut. Konsentrasi tegangan maksimal terjadi di tepi lubang yaitu sebesar 78,6 Mpa. Untuk mendapatkan tegangan nominal, dapat dilihat dari tegangan terdistribusi merata di sekitar lubang pelat utama yaitu 28,27 MPa. Dari data harga tersebut, maka dapat dihitung faktor konsentrasi tegangan *nett* ( $K_{tn}$ ) dengan menggunakan persamaan 5. Hasil perhitungan  $K_{tn}$  adalah sebesar 2,78. Di sini terlihat adanya perubahan nilai  $K_t$  akibat adanya pemasangan penambal. Nilai konsentrasi tegangan menjadi turun dari 2,8 menjadi 2,78. Hal ini membuktikan bahwa dengan adanya penambal, akan terjadi penurunan harga konsentrasi tegangan pada pelat utama, sehingga tegangan maksimal pada pelat utama nilainya turun dari 141,34 MPa menjadi 78,6 Mpa. Dengan demikian, akibat turunnya tegangan maksimal pada pelat utama akan menambah dan memperpanjang umur material struktur pelat utama tersebut. Pada gambar 8,

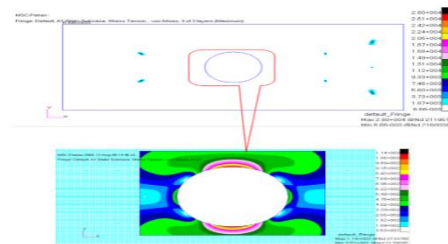
selain terdapat kontur tegangan di sekitar lubang, juga terlihat adanya konsentrasi tegangan yang terjadi di sekitar paku keling yang dimulai dari tepi paku keling, kemudian melebar ke arah Y dan -Y. Hal ini membuktikan bahwa beban arah Y (keliling *fuselage*) lebih besar dibanding dengan arah X (sejajar dengan *fuselage*). Tegangan maksimal terjadi pada paku keling nomor 56. Posisi paku keling mengacu pada Gambar 8.

Kontur tegangan berikutnya adalah kontur tegangan penambal yang dapat dilihat pada gambar 10. Konsentrasi tegangan yang terjadi pada tepi lubang sudah terlihat jelas jika dibandingkan dengan konsentrasi tegangan di tepi lubang kontur tegangan pelat utama. Perbedaan rentang skala mengakibatkan terlihatnya kontur tegangan disekitar lubang pada penambal. Bentuk kontur tegangan akan terlihat lebih jelas setelah difokuskan langsung pada lubang. Dari gambar tersebut terlihat bahwa tegangan maksimal di sekitar lubang penambal adalah 66,1 MPa dan tegangan nominalnya sebesar 17,2 MPa. Tegangan nominal ini merupakan tegangan yang terdistribusi merata di sekeliling struktur penambal (ditunjukkan warna biru).



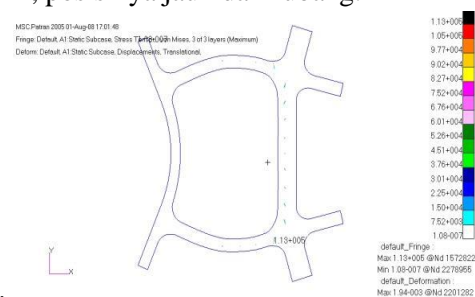
Gambar 10. Kontur tegangan penambal kondisi *model scale* setelah diberi beban

Berdasarkan persamaan 3, maka harga faktor konsentrasi tegangan *gross* ( $K_{tg}$ ) di sekitar lubang penambal adalah sebesar 3,8. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan terdistribusi dari pelat utama ke penambal melalui paku keling. Tegangan maksimal paku keling masih terjadi pada nomor 56. Sedangkan Gambar 11 di bawah ini menunjukkan pemodelan pelat setelah diberi beban.



Gambar 11. Kontur tegangan pelat setelah diberi beban

Konsentrasi tegangan terjadi pada sekitar lubang pelat dan jika diperhatikan dengan seksama, bahwa harga tegangan maksimal di tepi lubangnya adalah sama dengan nilai tegangan maksimal di tepi lubang pelat utama. Paku keling yang mendapat beban geser maksimal pada pemodelan ini, posisinya jauh dari lubang.



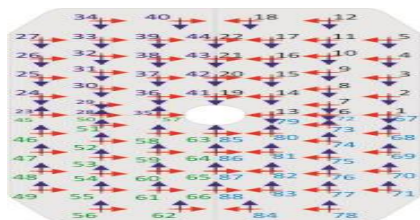
Gambar 12. Kontur tegangan *tearstrap* kondisi *model scale* setelah diberi beban

Kontur tegangan *tearstrap* terlihat hanya yang dilewati paku keling



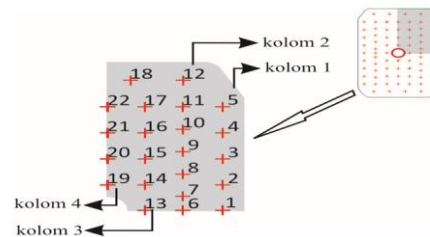
saja yang terdapat perubahan konsentrasi tegangan. Perubahan bentuk geometri yang tidak simetris menunjukkan lokasi pembebanan pada *tearstrap* yang hanya terjadi pada lokasi paku keling dipasang. Pada penunjukan skala, terlihat jelas nilai maksimal yang terjadi sama dengan nilai tegang yang terjadi pada skala pelat utama. Ternyata tegangan tersebut bersumber pada paku keling nomor 78. Pemasangan paku keling tersebut tembus sampai dengan *tearstrap*.

Nilai beban yang terdapat pada tiap-tiap paku keling terlihat kecil disebabkan penggunaan paku keling dengan diameter 4,76 mm. Dari ukuran diameter paku keling yang dipasang pada penambal yang mempunyai geometri dengan ukuran panjang sebesar 165,1 mm dan lebar sebesar 403,86 mm serta jumlah paku kelingnya sebanyak 74 buah, maka sangat mungkin beban yang diterima tiap-tiap paku keling nilainya kecil. Lain halnya, jika dibuatkan model pembebanan dengan diameter paku keling lebih kecil dari 4,76 mm, maka harga beban yang diterima tiap-tiap paku keling akan menjadi lebih besar akibat adanya kenaikan harga kekakuan paku keling dalam menahan beban. Dari hasil analisis di atas maka diperoleh arah pembebanan pada paku keling pada tiap-tiap nomor sebagaimana terlihat pada gambar 13.



Gambar. 13. Arah pembebanan paku keling

Untuk mempermudah mengetahui grafik hasil pembebanan tiap-tiap paku keling, maka dapat dilakukan pembagian menjadi empat kelompok yaitu sisi kanan atas (kuadran I), sisi kiri atas (kuadran II), sisi kiri bawah (kuadran III) dan sisi kanan bawah (kuadran IV). Dari pengelompokan hasil grafik tersebut diharapkan mampu mengetahui hasil pembebanan simetris atau tidak. Jika dilihat dari bentuk geometri penambal, maka bentuk grafik pembebanan paku keling dalam tiap-tiap kolom harus simetris. Bentuk-bentuk grafik hasil pembebanan dapat dilihat pada gambar 14 sampai dengan gambar 17.

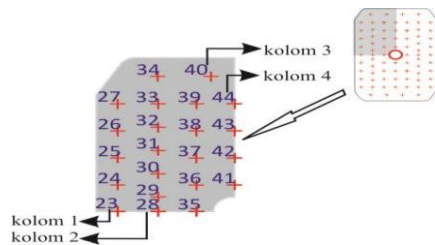


Gambar 14. Posisi paku keling sisi kanan atas (kuadran I)

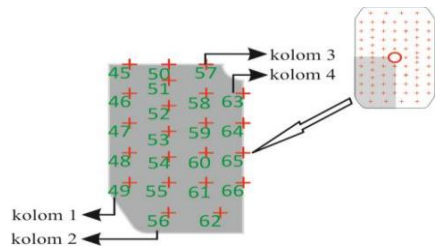
Berdasarkan pada gambar 13, maka dapat dikelompokkan menjadi empat kolom urutan posisi paku keling. Kolom pertama adalah nomor paku keling 1 sampai dengan 5, kolom kedua nomor paku keling 6 sampai dengan 12, kolom ketiga nomor paku keling 13 sampai dengan 18 dan kolom keempat adalah nomor paku keling nomor 19 sampai 22.

Untuk memperjelas pernyataan tersebut perlu dibuat grafik-grafik pembebanan pada lokasi-lokasi paku keling berikutnya. Pola pemberian nomor paku keling harus seperti pada kuadran I. Kesalahan dalam menentukan

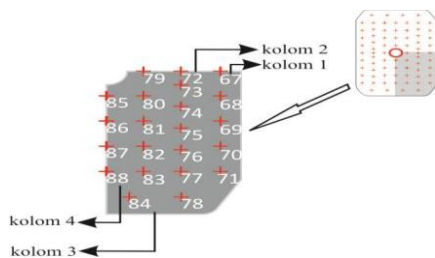
pemberian nomor paku keling pada lokasi berikutnya maka akan sangat berpengaruh pada pembacaan grafik hasil resultan beban yang diterima oleh tiap-tiap paku keling, sehingga pola pembanan paku keling secara linier tidak terlihat bahkan cenderung tidak simetri/acak. Pengelompokan per kolom dalam setiap arah pembebanan sangat membantu dalam mengidentifikasi posisi paku keling mana saja yang mendapat beban maksimal.



Gambar 15. Posisi paku keling sisi kiri atas (kuadran II)



Gambar 16. Posisi paku keling sisi kiri bawah (kuadran III)



Gambar 17. Posisi paku keling sisi kanan bawah (kuadran IV)

Resultan beban maksimal yang di terima paku keling secara jelas terlihat bahwa posisi paku keling terluarlah yang mendapat pembebanan paling besar. Pada kuadran II terlihat bahwa paku keling dengan nomor 27, nomor 34, nomor 40 dan nomor 44 mendapat resultan beban maksimal. Pada kuadran III, paku keling yang mendapat resultan beban maksimal terdapat pada paku keling nomor 49, nomor 56, nomor 62, dan nomor 66 sedangkan pada kuadran IV paku keling yang mendapat resultan beban maksimal terdapat pada paku keling nomor 71, nomor 78, nomor 84 dan nomor 88. Dari grafik distribusi beban paku keling di atas, maka dapat diketahui bahwa resultan beban yang paling besar adalah 675,76 N.

Berdasarkan data tabel Kekuatan geser material aluminum alloy (Bruhn, 2008), material paku keling yang digunakan untuk memasang penambal adalah Al 2024-T3, maka kekuatan geser maksimal yang diperoleh adalah sebesar 283 MPa . Untuk menentukan besar beban yang diijinkan dalam analisis pemasangan struktur ini, data diambil dari diameter paku keling terkecil dan tebal pelat paling tipis, artinya jika dipergunakan struktur dengan spesifikasi lebih tinggi dari struktur tersebut, maka struktur tersebut pasti lebih aman dipergunakan. Data tersebut adalah diameter paku keling sebesar 4,76 mm tebal (6/32 in) dan tebal pelat pelat utama sebesar 1.8 mm (0,071 in). Berdasarkan diameter paku keling dan tebal pelat, maka dapat diperoleh faktor skala dalam penentuan besar beban yang ditahan oleh pelat pelat geser ganda (*double shear*) adalah sebesar 0,857. Kemudian faktor

skala sebesar 0,857 dikalikan dengan kekuatan beban yang diijinkan sesuai dengan diameter paku keling 4,76 mm yaitu sebesar 1180. Hasil perkalian tersebut masih dalam satuan pounds, dan jika dikonversikan kedalam Newton, maka diperoleh batas kekuatan beban geser maksimal yang masih aman ditahan oleh paku keling adalah sebesar 4498 N.

Dari hasil analisis diperoleh resultan beban geser paling besar paku keling adalah 675,76 N. Kekuatan beban geser maksimal yang masih aman ditahan oleh paku keling adalah sebesar 4498 N. Sehingga untuk pemakaian paku keling dengan diameter 4,76 mm pada pemasangan penambal antena *ATC transponder* dapat dipergunakan.

### Kesimpulan

Pelat utama pesawat Boeing 737-200 dengan menggunakan beban statik dapat diperoleh harga faktor konsentrasi tegangan di tepi lubang pada pelat utama sebelum dipasang penambal setelah di analisis adalah sebesar 2,81. Harga faktor konsentrasi tegangan *nett* ( $K_n$ ), yaitu perbandingan tegangan maksimal di sekitar lubang pelat utama terhadap tegangan yang terdistribusi merata yang jauh dari lubang (tegangan nominal) setelah dipasang penambal antena *ATC Transponder* adalah sebesar 2,78 dan faktor konsentrasi tegangan *gross* ( $K_{tg}$ ), yaitu perbandingan tegangan maksimal di sekitar lubang penambal terhadap tegangan yang terdistribusi merata di tepi struktur penambal

adalah sebesar 3,8. Resultan beban maksimal paku keling terjadi pada nomor 56 yaitu sebesar 675,6 N. Berdasarkan tabel VI.2 batas kekuatan beban geser maksimal yang masih aman ditahan oleh paku keling berdiameter 4,76 mm adalah sebesar 4498 N. Sehingga untuk pemakaian paku keling dengan diameter 4,76 mm pada pemasangan penambal antena *ATC transponder* dapat digunakan.

### DAFTAR PUSTAKA

- Alamsyah, Wulandari, A. E., & Ramadhan, B. H. (2020). Analisa Kekuatan Bracket Pada Kapal Ro-Ro Menggunakan Aplikasi Finite Element. *SPECTA Journal of Technology*, 4(3), 97–105.
- B.K, S., & Kumar, R. (2014). Stress Analysis and Fatigue Life Prediction of Wing- Fuselage Lug Joint Attachment Bracket of a Transport Aircraft. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 03(15), 818–822. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0315154>
- Baran, D., & Petre, M. (2021). Hydrostatic pressure loads for a tank using “CID Distributed Loads” fields in a PATRAN FEM model. *INCAS Bulletin*, 13(4), 197–204. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2021.13.4.16>
- Bruhn, E. F. (2008). *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*. GRAN Corporation.
- Chen, F., Zhao, H., Huo, Y., Di, Q., Wang, W., & Zhou, X. (2021). A stress amplification model to evaluate the stress concentration of tool joint under complex loads. *Journal of Physics: Conference*

- Series, 1986(1).  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1986/1/012128>
- Ion, D. (2014). Computing Method of Forces on Rivet. *Incas Bulletin*, 6(1), 21–36.  
<https://doi.org/10.13111/2066-8201.2014.6.1.3>
- Jiang, X., Lv, Z., Qiang, X., & Zhang, J. (2021). Improvement of Stop-Hole Method on Fatigue-Cracked Steel Plates by Using High-Strength Bolts and CFRP Strips. *Advances in Civil Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6632212>
- K.S.Vishwanath, V. (2016). Damage Tolerance Evaluation of an Aircraft Skin Structure By Mvcci Technique (2D Analysis) Using Msc – Nastran / Patran. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 05(05), 510–516.  
<https://doi.org/10.15623/ijret.2016.0505096>
- Knight, C. E. (1994). *A Finite Element Method Primer for Mechanical Design*. Department of Mechanical Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Liu, N., Huang, Y. X., Cai, W., & Chen, K. (2020). Application of Improved Single-Hole Superposition Theory in Nonequal Cross-Section Tunnel Intersection. *Advances in Civil Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8837480>
- Niranjana, S. J., Patel, S. V., & Dubey, A. K. (2018). Design and Analysis of Vertical Pressure Vessel using ASME Code and FEA Technique. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 376(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012135>
- Obaid, S. hatam, Jaber, J., & Ibrahim, H. R. (2022). *The Geometry of Punch Cross Section Effect on Stress and Strain Values of Root Punch*. October. <https://doi.org/10.14704/nq.2022.20.7.NQ33159>
- Okoro, U., Ogwuagwu, V. O., Babawuya, A., & Olugboji, O. A. (2013). General Sensitivity Analysis of Dynamic Properties of Metal Rubber backed Active Magnetic Bearing using Nastran. *3rd Biennial Engineering Conference of Federal University of Technology Minna, Nigeria., May 2013*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3276.8489>
- Pilkey, W. D. (1998). “Peterson’s stress concentration factors” Second edition, by W.D. Pilkey. In *Strain* (Second, Vol. 34, Issue 2). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.1998.tb01083.x>
- Profile, S. E. E. (2023). *Finite Difference Analysis of Stress Distribution Around an Elliptical Hole in a Plate Subjected to Axial Loading*. May.
- Saravanan, G., Arul Johnson, A., & Pandiarajan, P. (2018). Finite element analysis of aircraft wing joint and fatigue life prediction under variable loading using MSC patran and nastran. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(11), 1111–1119.
- Wicahyadi, D., Chairri, M., & Nasmirayanti, R. (2022). Studi Numerik Kinerja Balok Baja Dengan Variasi Jarak Pengaku Menggunakan Program Msc. Patran/Nastran. *Civil Engineering Collaboration*, 7, 80–86. <https://doi.org/10.35134/jcivil.v7i2.45>