

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

SUKAHIR

Dosen Sekolah Tinggi Penerbangan Indonesia Curug, PO BOX 509 Tangerang 15001

ABSTRAK

Peralatan ATC Transponder terdiri dari 2 komponen utama, yaitu Transceiver (alat pemancar dan penerima sinyal gelombang radio) dan antena. Peralatan transceiver dipasang pada cockpit, sedangkan antena dipasang pada fuselage skin yang berlokasi di body station 427 bagian atas. Untuk menguatkan pemasangan antena, maka diperlukan penambal (doubler). Berdasarkan data SRM Boeing 737-200, geometrinya berukuran panjang 165,1 mm, lebar 266,7 mm dan tebalnya 2 mm. Penambal direkatkan dengan menggunakan paku keling sebanyak 74 dengan diameter 4,76 mm pada fuselage skin. Fuselage skin dimodelkan berupa pelat utama (existing 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. Difference fuselage pressure sebesar 53779 Pa dan jari-jari fuselage sebesar 1879,6 mm. Berdasarkan data tersebut, diperoleh hasil perhitungan tegangan yang bekerja pada fuselage yaitu tegangan tarik searah fuselage (sumbu X) sebesar 28,05 MPa dan tegangan tarik searah keliling fuselage (sumbu Y) sebesar 56,05 MPa. Besar beban yang timbul akibat adanya tegangan tersebut, untuk arah sumbu X adalah 20.284,5 N sedangkan untuk beban ke arah sumbu Y adalah sebesar 35.803,5 N. Harga konsentrasi tegangan nett (K_m) di tepi lubang pada pelat utama setelah dipasang penambal berdasarkan hasil analisis adalah 2,78 sedangkan harga konsentarsi tegangan gross (K_{tg}) adalah 3,8. Hasil analisis menunjukkan bahwa resultan beban geser maksimum yang terjadi pada paku keling adalah sebesar 675,76 N

Kata kunci : penambal, fuselage, paku keeling, beban statik

ABSTRACT

ATC Transponder equipment consist of 2 (two) mains component. They are Transceiver and Antenna. The transceiver is installed on cockpit panels, while the antenna is installed on fuselage skin that located on upper body station 427. the doubler must be used before attached the antenna on fuselage skin. Base on SRM Boeing 737-200, the doubler geometry consists of 165.1 mm of length, 266.7 mm of width and the thickness is 2 mm. The doubler is attached on fuselage skin by 74 rivets, with 4.76 of diameter. The fuselage skin is representative (modeled) by an existing skin with its geometry 354,33 mm of length, 266.7

mm of width and the thickness is 1.8 mm. Both materials of them are aluminum T2024-T3 with 72 GPa elastic modulus. The difference fuselage pressure is 53779 Pa with fuselage radius 1879.6 mm. So, the value of hoop tension stress is 56.05 MPa and longitudinal tension stress is 28.05 MPa. Because of them, the value of load can be counted, the result are 20284.5 N in X axis and 35803.5 N in Y axis. value of nett concentration factor (K_m) of existing skin is 2.78 and the value of gross concentration factor (K_{tg}) is 3.8. The result of analysis are the maximum shear strength resultant of rivet is 675.76 N

Keywords : Doubler, fuselage, rivet, static load

1. Pendahuluan

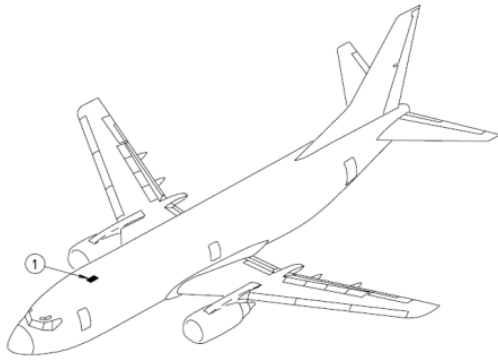
I.1 Latar Belakang

Berbagai modifikasi dilakukan pabrikan pesawat atau perusahaan penyelenggara perawatan pesawat sesuai dengan *Airworthiness Directive (AD)* dan *Service Bulletin (SB)* yang diterbitkan oleh pabrikan dan pemerintah di lokasi pesawat tersebut dioperasikan (*regulator*). Hal ini dilakukan untuk membantu perusahaan penerbangan (*airlines*) sebagai operator pesawat dan penumpang sehingga target *zero accident* dapat tercapai. 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 menaruh *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 Transpoder* pada *skin* pesawat harus dilapisi penambal

(*doubler*) yang berfungsi untuk membantu menahan beban disekitar lubang di mana antena tersebut dipasang. Berdasarkan peraturan di SRM pesawat Boeing 737-200, maka untuk memasang penambal harus digunakan paku keling. Penggunaan paku keling tersebut 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.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka permasalahan yang diteliti adalah analisa tegangan penambal (*doubler*) dan gaya paku keling pada penambal antena *ATC Mode S Transponder* pada *station 427 upper body* Boeing 737-200 dengan menggunakan metode elemen hingga. Lokasi penambal dapat dilihat pada gambar 1. yang ditunjukkan oleh notasi angka 1 (satu).



Gambar 1. Lokasi pemasangan doubler antena

I.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Melakukan analisa numerik dengan metode elemen hingga pemasangan penambal (*doubler*) pada pelat utama (*existing skin*) pesawat Boeing 737-200 dengan menggunakan beban statik.
2. Menentukan harga faktor konsentrasi tegangan di sekitar lubang pada pelat utama sebelum dipasang penambal.
3. Mengetahui besarnya faktor konsentrasi tegangan *nett* pelat utama yang berlokasi di sekitar lubang setelah dipasang penambal dan faktor konsentrasi tegangan *gross* di sekitar lubang penambal.
4. Menentukan resultan beban geser maksimal pada paku keling yang digunakan untuk memasang penambal.

I.3 Metode Penelitian

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini adalah analisis numerik dengan menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*). Analisis numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MSC NASTRAN 2005 dan untuk pemodelannya dilakukan secara manual

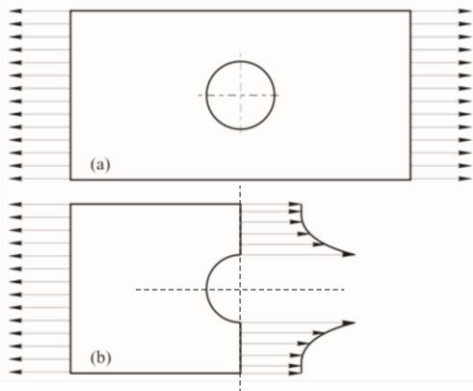
menggunakan perangkat lunak COREL DRAW X3, AUTOCAD 2008, dan MSC PATRAN 2005. Analisis numerik yang dihasilkan oleh perangkat lunak adalah distribusi tegangan yang terjadi pada paku keling dan tegangan maksimal di sekitar lubang kemudian dibandingkan dengan tegangan aktual yang diberikan sehingga diperoleh harga faktor konsentrasi tegangan *nett* dan *gross* di sekitar lubang pelat utama. Pemodelan struktur pelat pada sambungan paku keling digunakan pelat dua dimensi. Pelat dua dimensi tersebut menggunakan elemen *quadratic* dan *triangle*. Sedangkan untuk elemen paku keling dimodelkan dengan elemen pegas (*dof spring*). Analisa penelitian ini dibatasi hanya menggunakan beban statik saja

2. Tinjauan Teori

2.1 Konsentrasi Tegangan

Struktur pelat yang berbentuk bujur sangkar dengan geometri tertentu jika mendapat beban tarik dari semua sisi akan menghasilkan distribusi tegangan yang seragam di sekitar bidang struktur. 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 dan timbul konsentrasi tegangan yang dapat menurunkan kekuatan struktur, bahkan dapat menyebabkan kegagalan lebih cepat dari umur perancangannya. Gambar 2a. menunjukkan pelat berlubang diberikan beban tarik di sepanjang tepi pelat. Distribusi tegangan di sepanjang penampang berlubang semakin

meningkat hingga mendekati tepi lubang, ditunjukkan pada gambar 2b.



Gambar 2. 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 :

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

di mana :

σ = 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 (σ_{max}) dengan tegangan terdistribusi merata yang jauh dari lubang (σ_{nom}). Dalam persamaan, K_t didefinisikan dengan :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

Definisi tegangan nominal ada dua macam, yaitu :

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

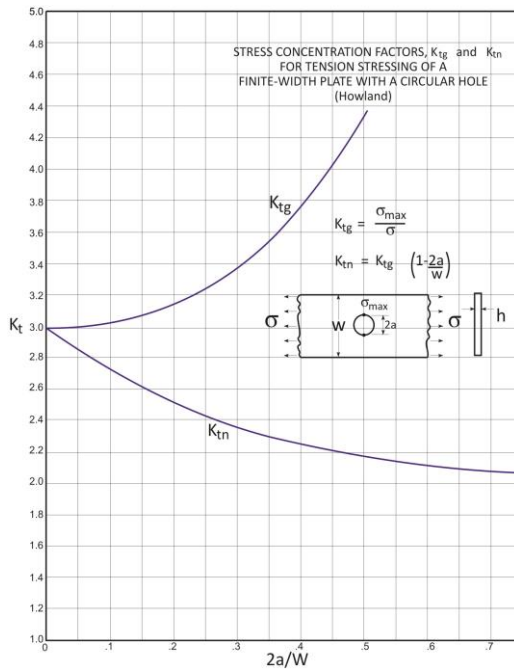
Definisi tegangan nominal di atas menyebabkan factor konsentrasi tegangan dikenal dengan dua persamaan, yaitu faktor konsentrasi tegangan *gross* berdasarkan luas penampang tanpa lubang (K_{tg}) dan faktor konsentrasi tegangan *net* berdasarkan luas penampang pelat berlubang (K_{tn}).

$$K_{tg} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}$$

$$K_{tn} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

2.2 Faktor Konsentrasi Tegangan Pelat Belubang Berbentuk Lingkaran

Harga faktor konsentrasi tegangan (K_t) pelat berhingga yang dilubang dengan lubang berbentuk lingkaran dapat dilihat pada gambar 3.



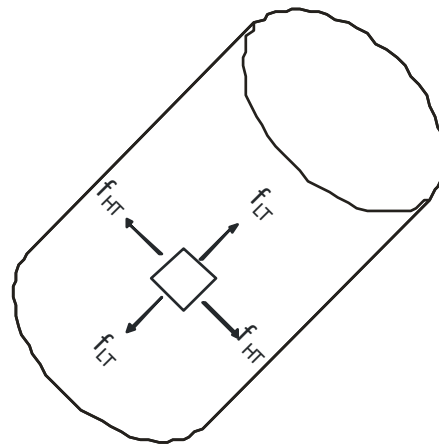
Gambar 3. Grafik faktor konsentrasi berhingga dengan

Pada grafik faktor konsentrasi tegangan pada gambar 3. dapat dilihat bahwa nilai K_t sangat terpengaruh terhadap fungsi $2a/w$. Notasi $2a$ dan w yang terdapat pada grafik berturut-turut adalah diameter yang terdapat pada pelat dan lebar pelat. Harga K_t akan sama dengan 3 (3) jika nilai $2a/w$ adalah 0 (nol), begitu juga nilai K_{tg} dan K_{tn} menjadi 3 (tiga). Grafik ini menunjukkan, 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 berikut :

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

2.3 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*). Ilustrasinya dapat dilihat pada gambar 4. 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 4. *Tension stress* pada *fuselage*

Berdasarkan gambar 4. dapat ditarik kesimpulan menjadi persamaan sebagai berikut :

Hoop tension stress

$$f_{HT} = \frac{pR}{t}$$

Longitudinal tension stress

$$f_{LT} = \frac{pR}{2t}$$

di mana :

f_{HT} = *hoop tension stress*

f_{LT} = *longitudinal tension stress*

p = perbedaan tekanan

R = jari-jari *fuselage*
 t = tebal dinding *fuselage*.

2.4 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan solusi numerik yang digunakan untuk menganalisis distribusi beban pada paku keling untuk pemasangan antena *ATC Tranponder* pada pesawat Boeing 737-200. Struktur dimodelkan sebagai kumpulan elemen yang sederhana sehingga memudahkan proses analisis. Hubungan yang bersifat kontinu diperlihatkan dengan adanya nodal-nodal yang menghubungkan satu elemen dengan elemen yang lain. Analisis ini hanya dibatasi pada pemodelan dan analisis numerik, tidak melakukan percobaan sebagai pembanding. Diharapkan hasil dari analisis numerik ini akan mendekati hasil percobaan.

2.5 Perbaikan Struktur dengan Paku Keling

Penerbitan pedoman dan tata cara pelaksanaan, teknik dan metode-metode yang dapat diterima untuk memperbaiki dan menginspeksi sebuah pesawat salah satunya adalah penetapan mengenai garis-

garis besar perbaikan struktur dengan menggunakan sambungan paku keling, dalam AC 43.13-1A dan 2A.

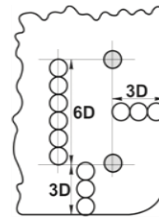
- a. Penggantian paku keling.
 Mengganti paku keling dalam perbaikan struktur harus berukuran dan berkekuatan sama dengan material sebelumnya apabila kedua hal tersebut masih memungkinkan. Jika pada lubang paku keling mengalami perubahan bentuk atau rusak maka lubang harus diperbesar dengan menggunakan ukuran paku keling setingkat lebih besar.
- b. Diameter paku keling.
 Diameter paku keling yang digunakan harus disesuaikan dengan tebal material yang digunakan. Diameter paku keling kurang lebih sebesar tiga kali tebal pelat (bagian struktur yang diperbaiki). Sebagai contoh, bila ketebalan pelat sebesar 0.05 in maka diameter paku keling yang dapat digunakan adalah 5/32 in atau paku keling berdiameter 3/16 in agar lebih aman digunakan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 1. sebagai petunjuk mengenai ukuran paku keling yang sesuai dengan tebal material

Tabel 1. Pemilihan ukuran paku keling

ORIGINAL MATERIAL GAUGE (in)	RIVET DIAMETER (in)			
	3/32	1/8	5/32	3/16
0,036	X	X	-	-
0,040	X	X	-	-
0,045	-	X	X	-
0,056	-	-	X	-
0,064	-	-	X	X
0,071	-	-	-	X
0,080	-	-	-	X

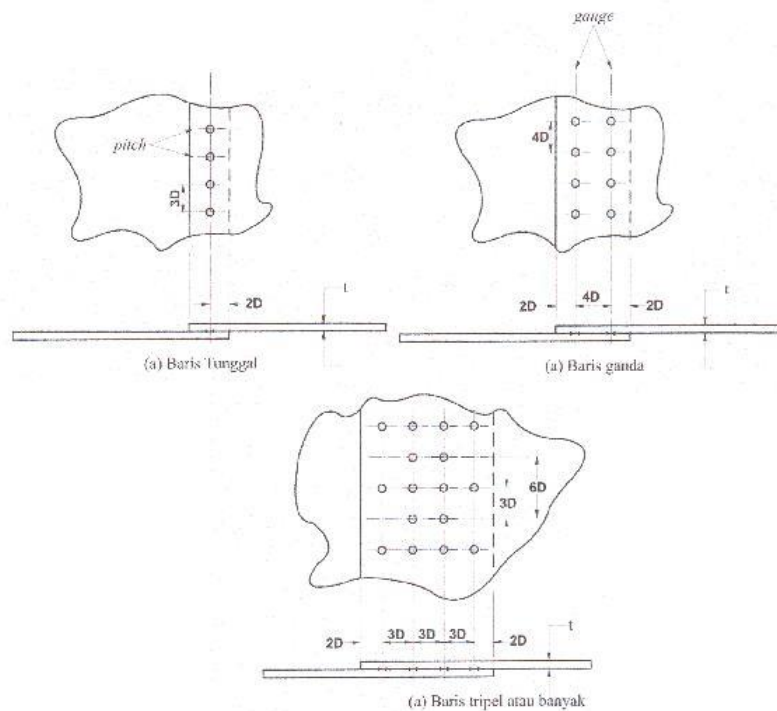
c. Jarak Tepi Antar Paku Keling.

Meletakkan *fastener* terlalu jauh dari tepi mengakibatkan struktur yang telah diperbaiki mengalami pembebanan yang lebih besar sehingga berakibat pada pinalti berat, yaitu berat yang berkaitan langsung dengan konsumsi bahan bakar. Akan tetapi, meletakkan *fastener* terlalu dekat pada tepi juga dapat mengakibatkan kegagalan sambungan oleh adanya beban lengkung yang terjadi secara spontan (pada material yang tipis terjadi beban tekuk), dan kegagalan sobek (yang terjadi pada material lebih tebal). Istilah yang digunakan untuk mengetahui seberapa besar jarak yang diperlukan dari tepi pelat ke titik pusat lubang *fastener* dikenal dengan jarak tepi (*edge distance* atau dalam Boeing dikenal dengan *edge margin*). Istilah ini berhubungan erat dengan jarak antar paku keling dan merupakan aktivitas pertama yang sering diputuskan ketika melakukan perbaikan ataupun modifikasi struktur. Untuk memperjelas pernyataan tersebut dapat dilihat pada gambar 5. Gambar tersebut menunjukkan cara mengukur jarak tepi dengan menggunakan diameter paku keling pada sebuah pelat tertentu.



Gambar 5. Jarak berdasarkan diameter

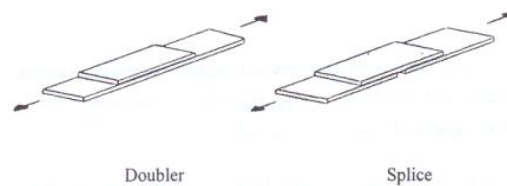
Aturan penentuan jarak tepi minimum yang direkomendasikan untuk *fastener* dengan bentuk kepala yang menonjol (*protruding head fastener*) umumnya adalah dua kali diameter kepala paku keling ($2D$) ditambah $1/16$ in atau jarak *fastener* tersebut maksimum adalah $4D$. Sedangkan jarak tepi minimum yang direkomendasikan untuk *fastener* dengan bentuk kepala yang sejajar dengan permukaan atas pelat (*flush head fastener*) umumnya tidak lebih dari $2\frac{1}{2}D$, ditambah $1/16$ in atau $2\frac{1}{2}D$ setingkat lebih besar dari ukuran *fastener* tersebut. Diameter paku keling yang digunakan umumnya berukuran $1,2 \sqrt{t}$ dan $1,4 \sqrt{t}$ di mana t adalah tebal pelat yang akan disambungkan menggunakan paku keling tersebut. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 6. Tabel tersebut memberikan penjelasan mengenai jarak tepi minimum antara *protruding head fastener* dan *flush head fastener* terlihat adanya perubahan nilai pertambahan jarak berbanding lurus dengan diameter paku keling yang digunakan.



Gambar 6. Jarak antar paku keling berdasarkan baris paku keling.

Dalam AC.43.13-1A dinyatakan bahwa jarak antar paku keling adalah jarak antara dua titik pusat kepala paku keling yang saling berdekatan. Jarak antar paku keling yang saling berdekatan dalam satu baris tunggal disebut *pitch* dan jarak antar paku keling yang saling berdekatan antar baris disebut *gauge*. Jarak antar paku keling yang saling berdekatan dalam satu baris tunggal sebesar tiga kali diameter paku keling dan empat kali diameter paku keling dalam aplikasi dua baris.

bekerja menyeberangi jarak antara dua elemen. Sedangkan *doubler* adalah elemen yang meneruskan sebagian beban bekerja sedangkan sisanya tetap mengalir melalui pelat utama.



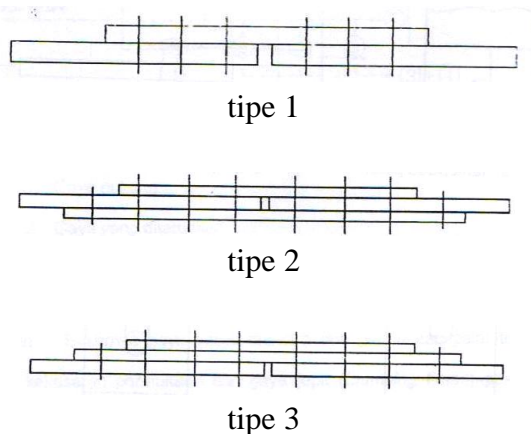
Gambar 7. Penambalan struktur

2.6 Konfigurasi Sambungan Paku Keling

Penambalan menggunakan paku keling dapat dibagi menjadi dua kelompok yaitu *splice* dan *doubler* (gambar 7.) *Splice* adalah elemen yang berfungsi sebagai jembatan meneruskan semua beban yang

Berdasarkan jumlah dan posisi pelat penambal maka sambungan menggunakan paku keling dapat dibagi atas 3 (tiga) jenis yaitu :

- (a) Sambungan paku keling pelat tunggal.
- (b) Sambungan paku keling dengan pelat penambal pada bagian atas dan bawah pelat utama.
- (c) Sambungan paku keling dengan pelat penambal bertumpuk di atas pelat utama.



Gambar 8. Berbagai tipe sambungan menggunakan paku keling

Sambungan pelat ganda tipe 2 dan tipe 3 yang akan digunakan dalam pemasangan antenna *Transponder*. Sambunga tipe ini dapat mengurangi beban yang akan dipindahkan oleh paku keling, karena beban yang dipindahkan oleh paku keling terlalu besar dan untuk mendapatkan distribusi beban yang lebih merata.

2.7 Perhitungan Beban Paku keling dengan metode Boeing

Perhitungan beban pada struktur dan harga fleksibilitas paku keling digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh struktur yang saling berhubungan pada waktu menahan beban tertentu. Pada struktur sambungan, memperoleh hasil perhitungan beban dan fleksibilitas paku

keling berarti mengetahui sejauh mana struktur tersebut akan gagal dan harga beban yang dapat dipindahkan oleh sebuah paku keling. Untuk menghitungnya dapat digunakan persamaan berikut sehingga dapat diketahui harga beban geser yang masih aman diterima oleh masing-masing paku keling dalam sistem sambungan serta fleksibilitas paku keling berdasarkan metode Boeing. Dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$P = F_{su} \times \left[\frac{\pi d_h^2}{4} \right] \quad (IV.1)$$

di mana,

P = beban geser yang diterima oleh paku keling

F_{su} = kekuatan geser

d_h = diameter paku keling

sedangkan untuk mencari fleksibilitas paku keling digunakan persamaan sebagai berikut :

$$f = \left[\frac{2 \times \left(\frac{t_1}{D_0} \right)^{0.85}}{t_1} + \frac{2 \times \left(\frac{t_2}{D_0} \right)^{0.85}}{t_2} \right] \times \frac{11}{8E_f}$$

di mana,

f = fleksibilitas paku keling

D_0 = diameter paku keling

t_1 = tebal pelat utama

E_f = modulus elastisitas paku keling.

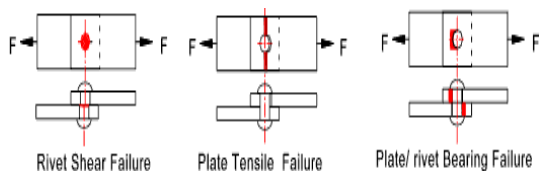
t_2 = tebal pelat penambal

Kedua persamaan di atas dipakai untuk menganalisis struktur sehingga diperoleh hasil perhitungan yang diinginkan.

Hubungan antara fleksibilitas paku keling dengan beban geser yang diterima oleh paku keling terdapat pada perubahan diameter paku kelingnya. Jika diameter paku keling diperkecil maka fleksibilitas paku kelingnya meningkat, sedangkan beban geser yang diterima paku keling menurun. Jadi, hubungan antara fleksibilitas paku keling dengan beban geser yang diterima paku keling adalah berbanding terbalik.

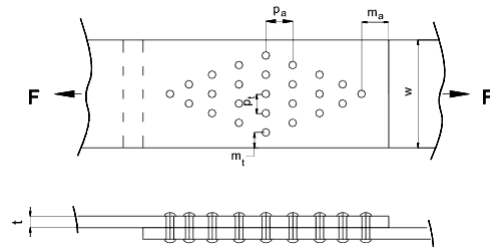
2.8 Modus-modus kegagalan pada Paku Keling

Dalam memperhitungkan kekuatan paku keling perlu diperhatikan modus-modus kegagalan pada waktu pemasangan paku keling. Terdapat 3 (tiga) macam modus-modus kegagalan pada paku keling, yaitu *shear failure*, *tensile failure* dan *bearing failure*.



Gambar 8. Modus modus kegagalan pada paku keling

Perhitungan tegangan-tegangan yang terjadi pada paku keling akibat adanya modus-modus kegagalan tersebut dapat dilakukan berdasar persamaan-persamaan di bawah ini :



Gambar 9. Prosedur penggabungan pelat dengan paku keling

Rivet Shear Stress :

$$\tau = \frac{F}{\left[\frac{n\pi d^2}{4} \right]} \quad (IV.3)$$

τ = Shear Stress (MPa)

d = Diameter paku keling (mm)

F = Total Axial Force (N)

n = Jumlah paku keling

plate shear stress :

$$\tau_c = \frac{F}{(2m_a t)}$$

m_a = Jarak paku keling dengan tepi pelat (gambar 9.)

Plate Tensile Stress

$$\sigma_t = \frac{F}{[t(w - n_r d_1)]}$$

σ_t = Tensile Stress (MPa)

d_1 = Diameter lubang paku keling (mm)

n_r = Jumlah paku keling pada baris memotong pelat

Plate /rivet bearing stress

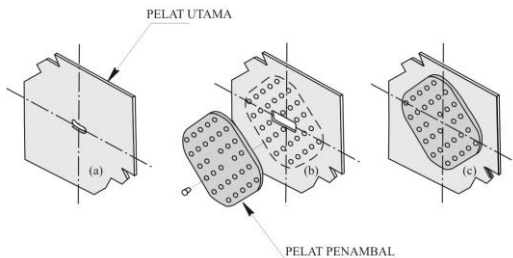
$$\sigma_c = \frac{F}{(n d t)}$$

t = Tebal pelat (mm)

d = Diameter paku keling (mm)
 n = Jumlah paku keling

2.9 Prosedur Pemasangan Penambal pada Struktur

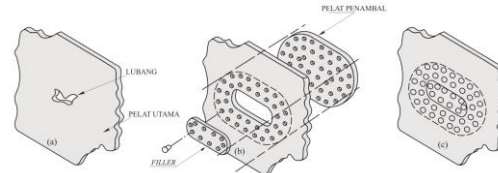
Jenis sambungan yang digunakan dalam perbaikan struktur pelat logam diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan lokasi pemasangan penambal yaitu *lap patch* dan *flush patch*. *Lap patch* atau disebut juga dengan sambungan *lap* merupakan jenis sambungan eksternal di mana antara bagian tepi penambal dan struktur yang diperbaiki saling berimpit satu sama lain. Transmisi beban-beban yang melalui paku keling dapat terjadi secara sempurna bila menggunakan sambungan *lap*. Pada gambar 10. di bawah ini memberikan gambaran mengenai aplikasi sambungan *lap* untuk pelat utama (*original skin*) yang dilubang.



Gambar 10. Prosedur perbaikan dengan lap patch

Pada gambar 11. menunjukkan *Flush patch* yaitu jenis sambungan yang dilakukan untuk memperbaiki struktur utama dengan menggunakan ukuran dan bahan material yang sama sebagai pengisi lubang pada daerah struktur yang rusak. Posisi penambal dari jenis sambungan ini dibentuk sama rata dengan permukaan struktur utama agar beban aerodinamis

yang melalui permukaan dapat mengalir dengan baik. Sambungan jenis ini lebih banyak diaplikasikan pada bagian struktur sayap pesawat sehingga tinggi permukaan struktur tambalan sejajar dengan struktur utama sayap.



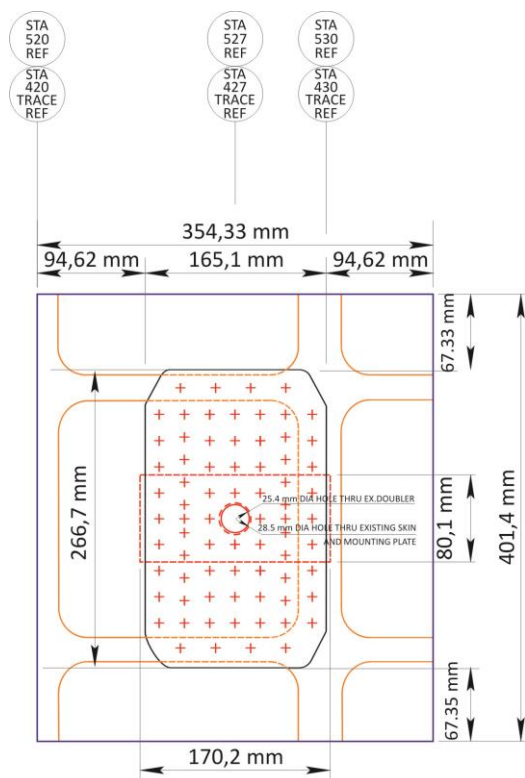
Gambar 11. Prosedur perbaikan dengan *flush patch*

Perlu diketahui juga bahwa pada kedua jenis sambungan, pengetahuan mengenai lokasi kritis dalam penyambungan paku keling antara struktur penambal tertentu terhadap struktur aslinya menjadi penting, karena kegagalan struktur dapat saja terjadi manakala seorang analis struktur kurang mengetahui lokasi kritis dengan variasi bentuk penambal struktur yang dimodelkan.

3. Analisis Numerik

Analisa numerik adalah analisa mempergunakan algoritma dari metode numerik, sedangkan metode numerik adalah metode pemrosesan dari data numerik menjadi hasil numerik. Untuk menganalisa secara numerik pemasangan penambal, terlebih dahulu ditentukan geometri dan propertinya. Menggambar geometri agar dapat di analisa dibutuhkan beberapa perangkat lunak. Bentuk geometri perlu langkah-langkah tertentu agar setiap gambar yang dihasilkan dapat diterjemahkan oleh perangkat lunak yang lainnya. Pemilihan perangkat lunak yang akan digunakan harus sesuai dengan kebutuhan perangkat lunak berikutnya.

Gambar 12 merupakan gambar hasil gambar ulang seluruh geometri yang akan dianalisa. Gambar tersebut berdasarkan dari gambar yang terdapat pada *Structure Repair Manual (SRM) Boeing 737-200*. Gambar tersebut digambar dengan menggunakan perangkat lunak Corel Draw X3. Hasil gambar ulang tersebut sesuai dengan ukuran bentuk asli. Ketelitian dalam menggambar benar-benar sangat dibutuhkan sehingga tidak terjadi pengulangan yang nantinya akan mempersulit dalam proses pembacaan gambar tersebut ke dalam perangkat lunak yang berikutnya.



Gambar 12. Gambar seluruh geometri

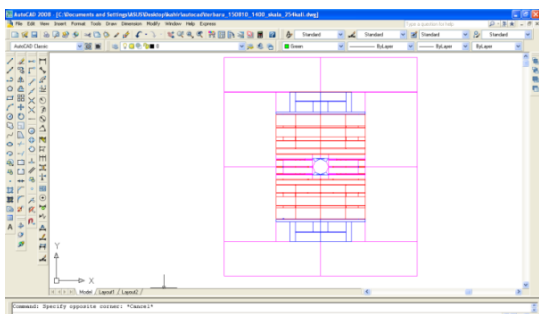
Tiap-tiap elemen harus digambar satu persatu. Pertemuan antar titik tiap-tiap elemen harus benar-benar pada posisi yang sempurna. Gambar tiap-tiap elemen

tersebut kemudian disatukan dalam satu grup sehingga berbentuk satu geometri penuh sesuai dengan gambar geometri aslinya. Hasil gambar geometri yang telah dilakukan pada perangkat lunak Corel Draw tersebut di *export* ke dalam perangkat lunak Autocad.

Hasil gambar pada perangkat lunak Corel Draw tersebut, kemudian di *export* ke perangkat lunak AUTOCAD, kemudian gambar tersebut digambar ulang dan dipisahkan per *layer*. Bentuk-bentuk *layer* yang akan digambar pada perangkat lunak AUTOCAD harus benar-benar sesuai dengan gambar aslinya. Ukuran diameter lubang dan jarak antar paku keling sudah harus diperhitungkan agar nanti tidak mengalami kesulitan pada saat dibaca oleh perangkat lunak MSC PATRAN NASTRAN 2005. Untuk mendapatkan bentuk ukuran sebenarnya pada perangkat lunak PATRAN NASTRAN 2005, gambar yang di dalam perangkat lunak AUTOCAD diperbesar 25.4 kali. Angka perbesaran tersebut diperoleh dari konversi ukuran inch ke milimeter. Karena pada perangkat lunak AUTOCAD 2008 ukuran gambarnya masih terbaca dalam bentuk milimeter.

Salah satu contoh bentuk *layer* yang telah di pisahkan dari gambar keseluruhan (gambar utama) dapat dilihat pada gambar 13. Gambar tersebut memperlihatkan bentuk dari geometri pelat utama (*existing skin*) yang telah digambar ulang pada perangkat lunak AUTO CAD . Gambar geometri tersebut disusun dari gabungan beberapa elemen yang berbentuk triangular dan kuadratik. Penyusunan elemen ini, pada perangkat lunak PATRAN 2005 disebut

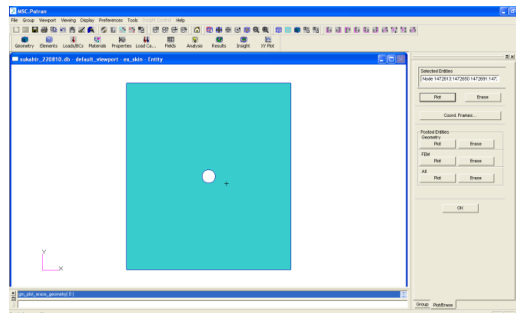
meshing element. Semakin rapat dalam pembuatan pola *meshing* ini, maka analisa suatu geometri menjadi lebih akurat. Tetapi, jika jumlah elemen terlalu banyak, akan menimbulkan kesulitan pada waktu melakukan proses analisa pada perangkat lunak PATRAN NASTRAN 2005, bahkan dapat menimbulkan komputer berhenti beroperasi (*hang*).



Gambar 13. Contoh pemodelan pelat utama pada AUTO CAD

Gambar tersebut kemudian di *export* dalam bentuk *file* ACIS (*.sat), kerana pada perangkat lunak MSC PATRAN NASTRAN 2005 tidak dapat menterjemahkan *file* AUTO CAD yang ber-*extension* *.dwg. Nama *file* yang digunakan, umumnya menggunakan nama *layer* yang sedang dikerjakan. Hal ini dilakukan untuk memudahkan dalam proses penggabungan *layer* pada perangkat lunak MSC PATRAN NASTRAN. Setelah *file* yang di *export* dalam bentuk *file* ACIS, maka *file* tersebut kemudian di *import* ke perangkat lunak MSC PATRAN NASTRAN. Untuk melakukan proses *import file*, terlebih dahulu harus diaktifkan perangkat lunak PATRAN. Setelah aktif, maka *file* yang masih berbentuk ACIS (*.sat) dibuka dengan cara di *import*, kemudian cari nama *file* yang berbentuk

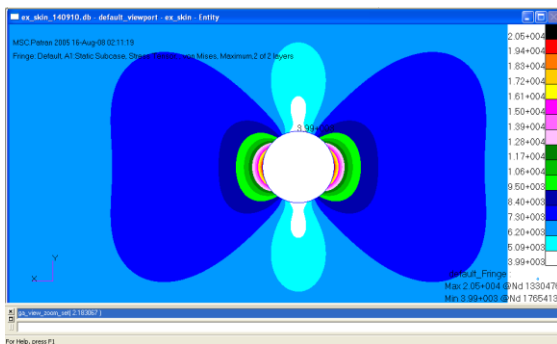
ACIS (*.sat). Salah satu contoh hasil *import file* pada perangkat lunak PATRAN, dapat dilihat pada gambar 14. sebagai berikut :



Gambar 14.
Pemodelan AUTOCAD ke PATRAN

Setelah gambar dapat dibaca oleh PATRAN dengan sempurna, maka langkah selanjutnya adalah memberi *load* pada elemen tersebut. Besarnya *load* yang diberikan berdasarkan hasil perhitungan secara manual yang sesuai dengan data-data *load* yang bekerja pada elemen yang akan dianalisa. Setelah diberikan *load*, maka selanjutnya elemen tersebut, diberikan data-data material yang akan dianalisa beserta sifatnya. Data-data material tersebut harus sesuai dengan data material secara fisik yang nantinya akan terpasang. Untuk menganalisa hasil elemen yang sudah diberikan *load*, maka digunakan menu *analysis*. Pada menu ini dibuat sebuah *file* yang ber-*extension* .bdf yang nantinya akan diaktifkan dan dianalisa dengan menggunakan perangkat NASTRAN. Hasil analisa NASTRAN berupa *file* yang ber-*extension* .xdb. Jika analisa pada NASTRAN tidak mengalami kendala, setelah terbentuk *file* yang ber-*extension* .xdb, maka untuk melihat hasil analisisnya diaktifkan kembali program PATRAN. Pada menu *analysis*, *file* yang ber-*extension* .xdb

tersebut di-attach (dipanggil kembali). Hasil analisa secara keseluruhan dapat dilihat pada menu *Results*. Contoh hasil analisis yang dilakukan oleh perangkat lunak PATRAN NASTRAN dapat dilihat pada gambar 15 sebagai berikut :



Gambar 15.

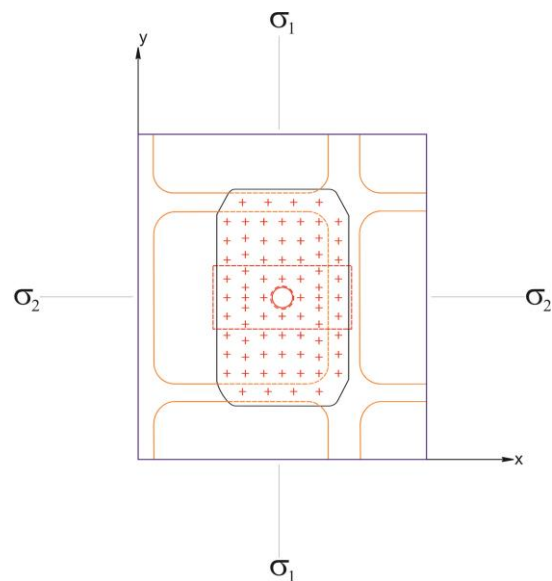
Contoh hasil analisis pemodelan pelat utama setelah diberi beban

Berdasarkan gambar 15. maka terjadi konsentrasi tegangan disekitar lubang setelah elemen tersebut diberi beban biaksial. Besarnya tegangan terlihat pada skala yang terdapat di samping elemen tersebut. Warna putih menunjukkan tegangan yang paling rendah, sedangkan warna merah menunjukkan tegangan yang paling besar (maksimal).

3.1 Perhitungan Beban Pelat Utama

Pada pembahasan pemasangan penambal (*doubler*) antenna ATC *transponder* ini, struktur yang paling banyak menerima beban adalah pelat utama, dikarenakan pelat utama tersebut merupakan lokasi dimana penambal diletakkan. Distribusi beban pada pelat utama ke penambal melalui paku keling. Berdasarkan data yang diperoleh dari *Structural Repair Manual (SRM) Boeing*

737-200, maka diperoleh data-data struktur diantaranya adalah *difference fuselage pressure* sebesar 0,054 MPa, jari-jari fuselage sebesar 1879,6 mm dan tebal struktur sebesar 1,8 mm. Berdasarkan data tersebut dapat diperoleh hasil perhitungan tegangan yang bekerja pada *fuselage* dengan menggunakan persamaan pada tinjauan teori. Hasil perhitungannya yaitu tegangan tarik searah *fuselage* (f_{LT}) sebesar 28,05 MPa dan tegangan tarik searah keliling *fuselage* (f_{HT}) sebesar 56,05 MPa. Dimana f_{HT} merupakan tegangan pada arah sumbu y , kemudian dapat dinotasikan sebagai σ_1 sedangkan f_{LT} merupakan tegangan pada arah sumbu x dan dinotasikan sebagai σ_2 .



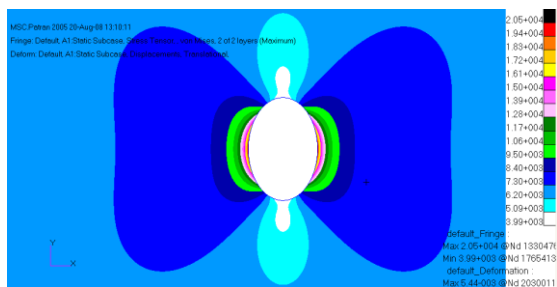
Gambar 16. Arah Pembebanan

Berdasarkan arah tegangan sumbu y dan sumbu x pada *fuselage*, maka dapat dihitung beban yang bekerja pada *existing skin*. Pada *data sheet structural provisions-ATC Antenna Sta. 427 upper body (drawing no. 65C35143)* diperoleh data panjang pelat utama sebesar 354,33 mm dan lebarnya

sebesar 401,4 mm. Dari sumber data tersebut, maka dapat dihitung besarnya beban yang bekerja pada pelat utama. Besarnya beban pada arah X adalah 20.284,5 N sedangkan untuk beban kearah Y adalah sebesar 35.803,5 N. Besarnya beban yang bekerja pada kedua arah tersebut pada pembebanan perangkat lunak PATRAN harus dibagi jumlah *nodal* sesuai dengan arah pembebanannya. Jumlah nodal dalam arah X sebesar 979 dan dalam arah Y adalah sebesar 864, sehingga diperoleh distribusi beban tiap-tiap *nodal* yang besarnya untuk arah X adalah 20,7 N, sedangkan besarnya beban tiap *nodal* kearah Y adalah 41,4 N.

3.2 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. Harga faktor konsentrasi (K_t) merupakan perbandingan tegangan maksimal di tepi lubang dengan tegangan nominal yaitu tegangan terdistribusi merata yang jauh dari lubang



Gambar 17.

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

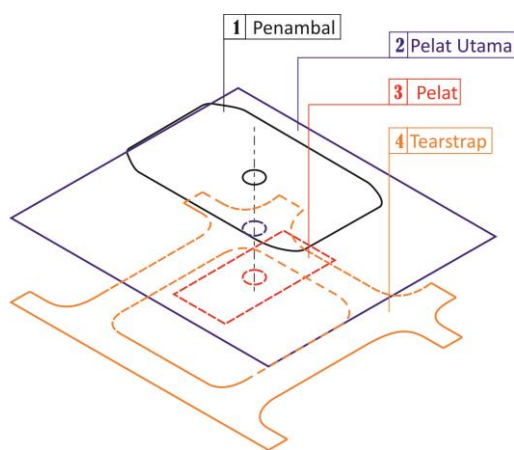
Gambar 17. memperlihatkan hasil analisis metode elemen hingga yang dilakukan oleh perangkat lunak PATRAN NASTRAN 2005. Nilai yang muncul pada data di samping gambar deformasi kontur tegangan satuannya adalah PSi, sehingga harus dirubah dalam bentuk satuan SI. Hasil analisis tegangan maksimal yang terlihat 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.

4. Hasil Analisis

Analisis pemasangan penambal pada pelat utama (*fuselage skin/existing skin*) pesawat Boeing 737-200 dianalisis berdasarkan model utuh dengan menggunakan metode elemen hingga dan sesuai data teknis yang telah diperoleh dari pihak pabrik pesawat. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan maksimal struktur penambal dalam menahan beban-beban yang bekerja pada struktur tersebut.

Berdasarkan data teknis, antenna *ATC Transponder* dipasang pada pelat utama *body station 427* bagian atas. Lokasi di mana antenna akan dipasang, diberi lubang dengan diameter sebesar 30,48 mm berbentuk lingkaran. Untuk memperkuat struktur pelat utama yang telah dilubangi, maka dipasang penambal berbentuk segiempat dengan bahan struktur sama. Penambal tersebut direkatkan dengan menggunakan paku keling sebanyak 74 dan diberi lubang berbentuk lingkaran dengan

diameter sebesar 25,4 mm yang digunakan untuk memasukan kabel antenna. Susunan struktur pemasangan antenna *ATC Transponder* pada *fuselage skin* Boeing 737-200 dapat dilihat pada gambar 18. Pada gambar tersebut menunjukkan posisi penambal, *tearstrap* dan pelat yang terpasang pada pelat utama yang sesungguhnya merupakan *fuselage skin*. Untuk menghindari adanya air masuk ke dalam *fuselage*, maka pada saat memasang antenna harus diberi *seal* di sekeliling tepi bagian antenna yang menempel pada penambal. *Seal* ini tidak diperhitungkan dalam analisis karena tidak menahan beban.



Gambar 18.

Susunan struktur pemasangan antenna *ATC Transponder*

4.1 Analisis Sambungan Paku Keling

Mekanisme sambungan paku keling merupakan salah satu syarat mutlak yang harus dipahami agar pada waktu proses pemasangan dan perbaikan struktur di pesawat dapat dilakukan dengan baik dan benar. Kesalahan dalam melakukan proses tersebut akan berakibat berkurangnya kemampuan paku keling dalam menahan beban maksimal yang bekerja pada paku keling tersebut. Pengetahuan tentang

mekanisme pemindahan beban dengan sambungan paku keling dan kekakuan paku keling harus benar-benar dipahami.

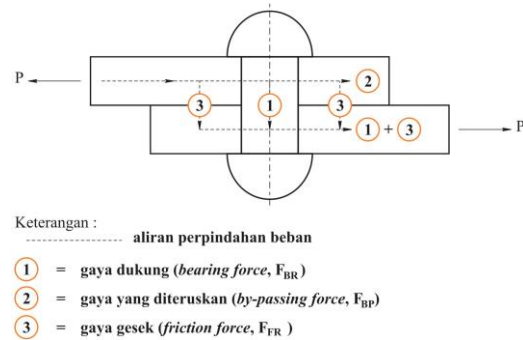
1. Perhitungan Kekakuan Paku Keling

Kemampuan paku keling dalam menahan beban geser dapat dihitung dengan menggunakan rumus fleksibilitas paku keling (metode Boeing). Dari hasil perhitungan tersebut, dapat dihitung kekakuan paku keling yang nilainya adalah berbanding terbalik dengan fleksibilitasnya. Pada penelitian ini, berdasarkan data yang diperoleh dari *SRM* Boeing 737-200, maka dapat diketahui data geometri tebal penambal sebesar 2,2 mm, pelat utama sebesar 1,8 mm, *tearstrap* sebesar 1,8 mm dan pelat sebesar 2,54 mm. Berdasarkan tabel 1, maka dapat ditentukan diameter paku keling yang digunakan adalah sebesar 4,76 mm, dengan modulus elastisitas paku keling sebesar 72 GPa. Perhitungan besarnya kekakuan paku keling pada arah X dan arah Y yang terpasang antara penambal dengan pelat utama yaitu sebesar 55196 MPa mm, antara pelat utama dan *tearstrap* sebesar 46852 MPa mm. Sedangkan besarnya kekakuan paku keling antara pelat utama dengan pelat yang mempunyai tebal 2,54 mm adalah sebesar 56111 MPa mm. Untuk mengetahui besarnya kekakuan paku keling arah Z, maka dapat dihitung berdasarkan luas diameter paku keling, modulus elastisitas paku keling dan setengah jarak antara dua pelat yang dihubungkan oleh paku keling. Berdasarkan *SRM* Boeing 737-200, dapat diperoleh data jarak antara dua pelat yang dihubungkan adalah sebesar 2,54 mm. Dengan diameter paku keling sebesar 4,76 mm dan modulus

elastisitasnya sebesar 72 GPa, maka diperoleh kekakuan paku keling arah Z sebesar 10251348 MPa mm.

2. Mekanisme Pemindahan Beban dengan Sambungan Paku Keling

Kegagalan pada daerah sambungan dapat terjadi karena bending momen sekunder (*secondary bending moment*) akibat adanya eksentrisitas, konsentrasi tegangan, defleksi yang berlebihan, dan lain-lain. Ketidakseragaman pertambahan panjang pada masing-masing pelat memberikan gambaran mengenai besarnya beban yang dialami oleh tiap-tiap paku keling adalah tidak sama. Paku keling terluar menahan beban lebih besar dibanding paku keling yang terdapat di tengah, atau dengan kata lain besar beban rata-rata yang ditahan oleh masing-masing paku keling mengalami penurunan dari posisi paku keling terluar hingga ke posisi paku keling yang berada di tengah. Ketidakseragaman pertambahan panjang masing-masing material kedua pelat menunjukkan bahwa pada lokasi tersebut terdapat perbedaan tegangan, yang ditimbulkan dengan adanya gaya dukung (*bearing force*), gaya yang diteruskan pelat (*by-passing force*), gaya gesek antar pelat (*friction force*). Ilustrasi dari berbagai gaya yang menimbulkan perbedaan tegangan dapat dilihat pada gambar 19. Sebagai berikut :



Gambar 19. Aliran perpindahan beban paku keling.

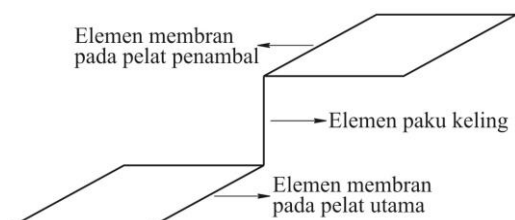
Pada gambar 19. menunjukkan aliran perpindahan beban pada masing-masing paku keling dari sistem sambungan. Garis putus-putus dengan ukuran garis seragam mengindikasikan adanya perpindahan beban yang mengalir di sekitar paku keling. Akibat adanya paku keling di lokasi tertentu dan gesekan antar pelat, terjadilah gaya yang membantu proses perpindahan beban pada material tersebut, atau gaya dukung dan gaya gesek antar pelat, berturut-turut diilustrasikan dengan nomor 1(satu) dan nomor 3 (tiga). Sedangkan nomor 2 (dua) memperlihatkan bahwa aliran beban tetap mengalir pada material tersebut, menunjukkan bahwa perpindahan beban tidak mungkin seratus persen melalui paku keling dan gesekan antar pelat.

4.2 Pemodelan Elemen Hingga

Analisis pemasangan struktur antena *ATC Transponder* yang menggunakan sambungan paku keling pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MSC. NASTRAN 2005 dan pemodelan elemen hingga menggunakan MSC. PATRAN 2005. 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.

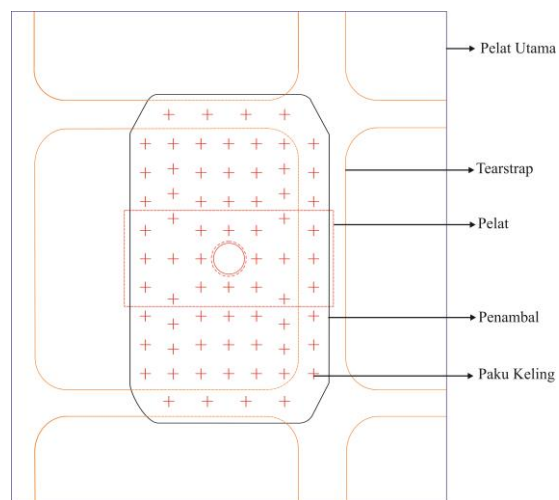


Gambar 20. Pemodelan sambungan paku keling

- 2) Paku keling dimodelkan dengan elemen pegas, sebagaimana diilustrasikan pada gambar 20.
- 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.

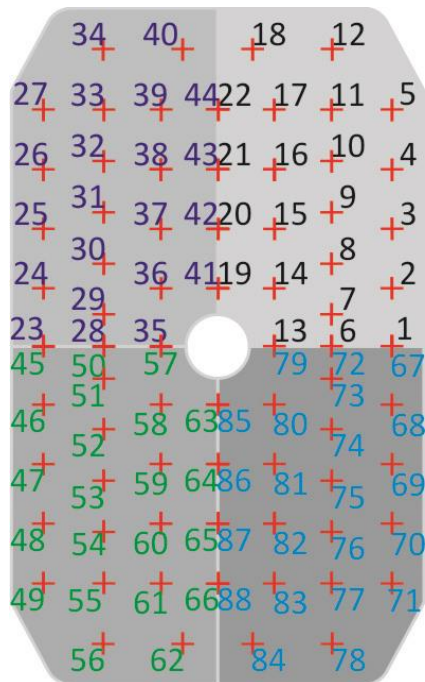
4.3 Posisi Paku Keling pada Geometri Struktur

Pada gambar 21. 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 21. Posisi paku keling pada geometri struktur

Sedangkan lokasi penomoran paku keling yang terdapat pada penambal dapat dilihat pada gambar 22.



Gambar 22. Lokasi penomoran paku keling pada penambal

Pemberian nomor paku keling sebagaimana yang tertulis pada gambar 22. mempunyai tujuan untuk mempermudah pengkodean tiap-tiap lokasi paku keling, sehingga dalam pembuatan grafik resultan pembebanan lebih mudah dibaca karena grafiknya terlihat lebih runtun dimulai dari paku keling yang mendapat pembebanan ringan sampai dengan paku keling yang mengalami pembebanan paling besar. Dari bentuk grafik tersebut juga diharapkan dapat dilihat hasilnya untuk dapat diambil kesimpulan serta mudah mengetahui lokasi paku keling yang mendapat pembebanan yang paling besar.

4.4 Pemodelan Seluruh Geometri

Pada pemodelan elemen hingga, pelat utama mengalami pembebanan biaksial dengan besar tegangan tarik searah keliling *fuselage* (σ_1) sebesar 56,05 MPa dan

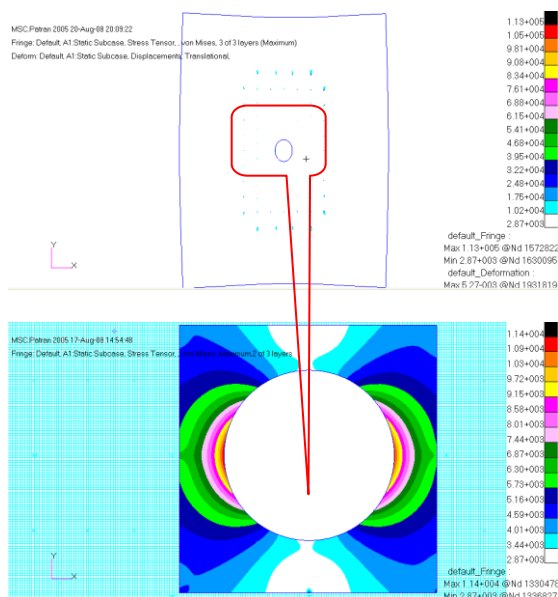
tegangan tarik searah *fuselage* (σ_2) sebesar 28,05 MPa atau sama dengan setengah dari besarnya σ_1 , sebagaimana telah dijelaskan pada sub bab V.3 tentang perhitungan beban. Untuk memperoleh besarnya tegangan yang terjadi pada pelat utama akibat beban yang bekerja pada struktur tersebut, maka digunakan perangkat lunak PATRAN NASTRAN 2005 untuk menggambar geometrinya dengan skala 1:1. 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 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 VI.6. Material pelat utama menggunakan aluminium T2024-T3 dengan modulus elastisitas 72 GPa.

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. 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*.

4.5 Hasil Analisis Tegangan Struktur Penambal

Hasil analisis dapat diperoleh setelah geometri pelat utama, penambal, *tearstrap* dan pelat digabungkan dengan menggunakan paku keling. Proses penggabungan keempat geometri tersebut dilakukan langsung pada perangkat lunak PATRAN NASTRAN 2005. Perubahan besarnya tegangan yang bekerja pada geometri tersebut terlihat dengan adanya perubahan warna pada kontur geometri.



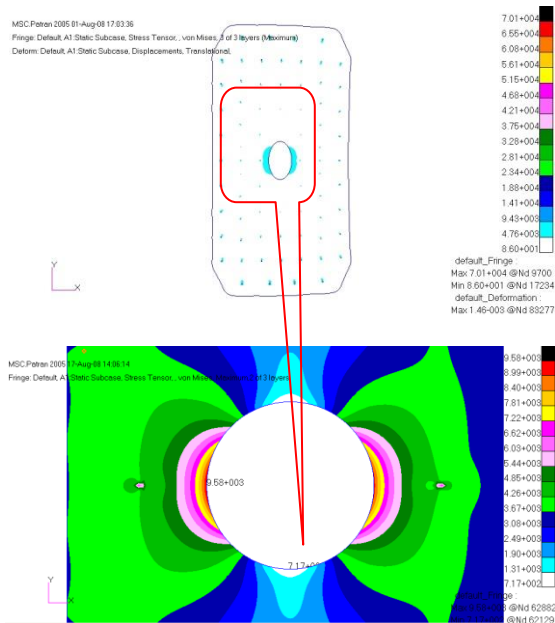
Gambar 23. Kontur tegangan pelat utama kondisi *model scale* setelah diberi beban

Pada gambar 23. 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}). 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 2,81 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 VI.6, 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.

Kontur tegangan berikutnya adalah kontur tegangan penambal yang dapat dilihat pada gambar 24. Konsentrasi

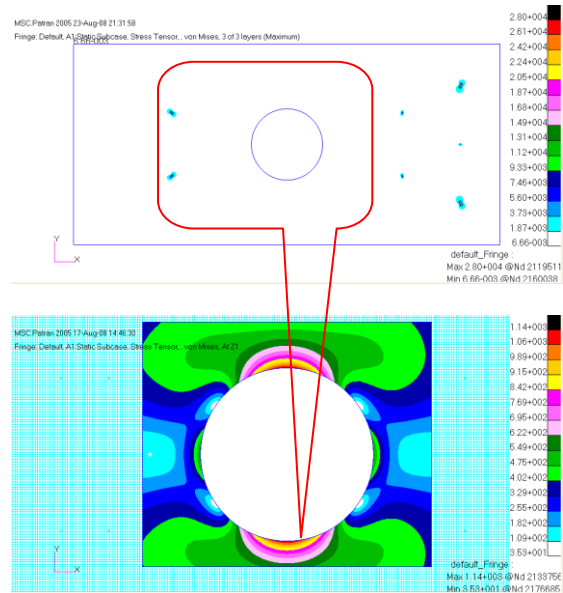
tegangan yang terjadi pada tepi lubang sudah terlihat jelas jika dibandingkan dengan konsentrasi tegangan di tepi lubang kontur tegangan pelat utama. Perbedaan rentang skala mengakibatkan terlihatnya kontur tegangan disekitar lubang pada penambal. Bentuk kontur tegangan akan terlihat lebih jelas setelah 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 24. Kontur tegangan penambal kondisi *model scale* setelah diberi beban

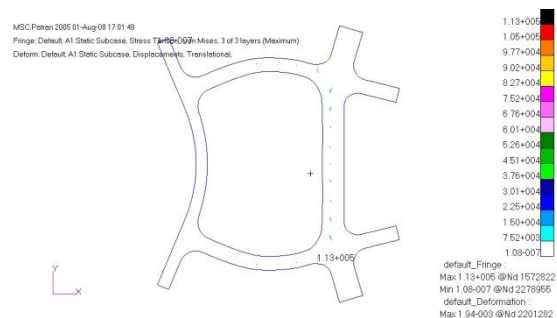
Berdasarkan perhitungan, maka harga faktor konsentrasi tegangan *gross* (K_{tg}) di sekitar lubang penambal adalah sebesar 3,8. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan terdistribusi dari pelat utama ke penambal melalui paku keling. Tegangan maksimal

paku keling masih terjadi pada nomor 56. Gambar 25 di bawah ini menunjukkan pemodelan pelat setelah diberi beban.



Gambar 25. 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.



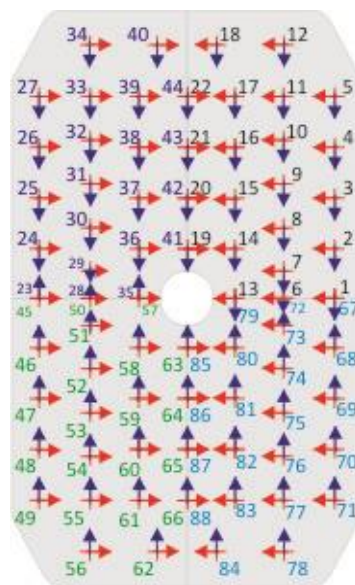
Gambar 26. Kontur tegangan *tearstrap* kondisi *model scale* setelah diberi beban

Tabel 1. Distribusi beban paku keling

Lokasi paku keling	Arah Pembebanan (Newton)		Lokasi paku keling	Arah Pembebanan (Newton)		Lokasi paku keling	Arah Pembebanan (Newton)	
	X	Y		X	Y		X	Y
1	-252.26	-0.04	31	141.22	-130.31	61	62.79	359.03
2	-259.90	-2.69	32	135.92	-226.02	62	9.13	651.12
3	-250.19	-102.88	33	125.21	-386.94	63	1.65	76.39
4	-219.30	-204.74	34	64.64	-672.55	64	0.42	108.44
5	-180.13	-385.27	35	75.55	0.07	65	0.61	186.74
6	-141.34	-0.01	36	67.45	-57.30	66	1.65	344.92
7	-143.67	12.15	37	63.85	-103.49	67	-252.26	-0.04
8	-149.50	-66.74	38	59.48	-191.37	68	-259.90	-2.70
9	-142.15	-127.69	39	62.81	-358.76	69	-250.18	102.88
10	-133.49	-223.10	40	9.16	-651.07	70	-219.31	204.74
11	-119.88	-384.24	41	1.70	-76.25	71	-180.15	385.28
12	-104.98	-577.12	42	0.53	-108.26	72	-141.34	-0.01
13	-82.35	-0.03	43	0.62	-186.58	73	-143.66	-12.13
14	-71.69	-56.15	44	1.70	-344.76	74	-149.48	66.76
15	-65.05	-102.17	45	273.57	0.04	75	-142.13	127.70
16	-58.16	-189.81	46	284.48	58.90	76	-133.49	223.12
17	-59.14	-356.51	47	273.28	144.71	77	-119.89	384.26
18	-46.93	-624.63	48	255.20	270.01	78	-105.02	577.10
19	1.70	-76.25	49	222.76	491.06	79	-82.35	0.03
20	0.53	-108.26	50	133.25	0.05	80	-71.66	56.20
21	0.62	-186.58	51	90.16	16.42	81	-65.01	102.22
22	1.70	-344.76	52	145.34	68.47	82	-58.15	189.86
23	273.57	0.04	53	141.21	130.53	83	-59.17	356.57
24	284.49	-58.81	54	136.03	226.27	84	-46.97	624.62
25	273.29	-144.62	55	125.27	387.16	85	1.65	76.39
26	255.16	-269.91	56	64.65	672.66	86	0.42	108.44
27	222.72	-490.93	57	75.55	0.07	87	0.61	186.74
28	133.25	0.05	58	67.47	57.49	88	1.65	344.92
29	90.17	-16.53	59	63.91	103.91			
30	145.36	-68.31	60	58.98	187.83			

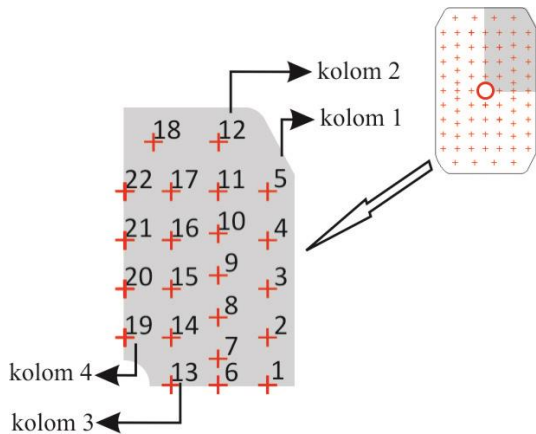
Kontur tegangan *tearstrap* terlihat hanya yang dilewati paku keling saja yang terdapat perubahan konsentrasi tegangan. Perubahan bentuk geometri yang tidak simetris menunjukkan lokasi pembebanan pada *tearstrap* yang hanya terjadi pada lokasi paku keling dipasang. Pada penunjukan skala, terlihat jelas 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*. Hasil analisis perhitungan distribusi beban tiap-tiap paku keling yang di analisa oleh perangkat lunak PATRAN NASTRAN 2005 dapat dilihat pada table 1. Pada tabel menunjukkan beban-beban yang bekerja pada arah X dan Y. Tanda ‘-‘ menunjukkan arah pembebanan yang berlawanan. Sedangkan dalam pembuatan grafik, data yang digunakan merupakan resultan beban arah X dan arah Y. 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. Berdasarkan tabel 1., maka diperoleh arah pembebanan pada paku keling pada tiap-tiap nomor sebagaimana terlihat pada gambar 27.



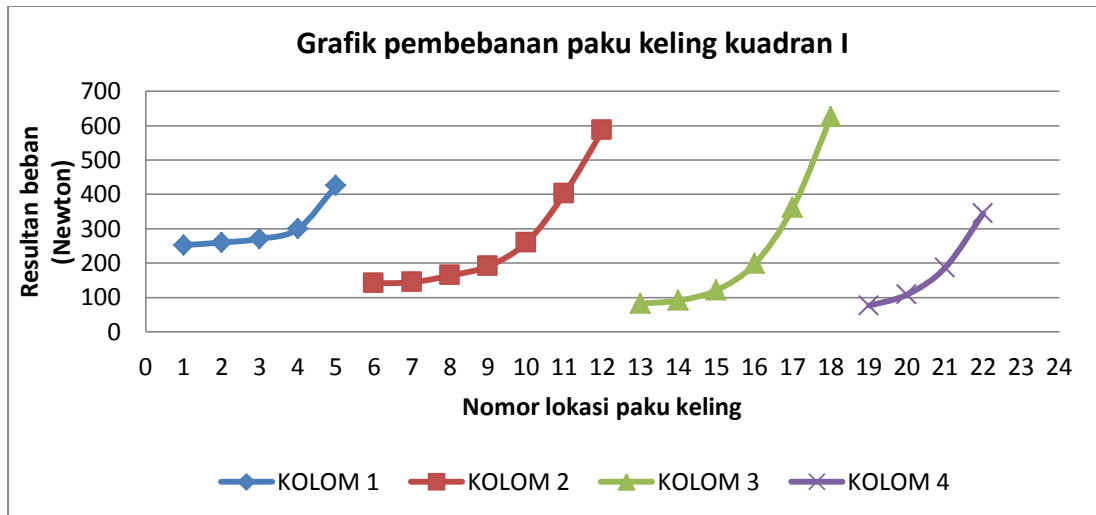
Gambar 27. Arah pembebanan paku keling

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 panambal, maka bentuk grafik pembebanan paku keling dalam tiap-tiap kolom harus simetris.



Gambar 28. Posisi paku keling sisi kanan atas (kuadran I)

Berdasarkan pada gambar 28, 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. Dari pengelompokan tersebut, maka dapat dibuat grafik pembebanan berdasarkan tabel 1.



Gambar 29. Grafik pembebanan paku keling kuadran I

Gambar 29. kolom pertama menunjukkan resultan arah pola kenaikan pembebanan paku keling yang linier dimulai dari paku keling nomor 1 dan mencapai beban maksimal pada paku keling nomor 5. Hal ini terjadi karena paku keling nomor 5 posisinya terluar dan dekat dengan posisi arah pemberian beban terbesar. Pemberian beban arah Y lebih besar dibanding pemberian beban arah X, sehingga

kemungkinan besar posisi paku keling yang terluar pada arah Y akan mendapat pembebanan maksimal. Pada grafik tersebut sudah terlihat jelas bahwa untuk kolom kedua beban maksimal diterima oleh paku keling nomor 12, sedangkan untuk kolom ketiga dan keempat berturut-turut beban maksimal yang oleh paku keling adalah paku keling dengan nomor 18 dan 22. Grafik ini membuktikan bahwa

apa yang diterangkan dalam teori sebelumnya adalah benar.

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 pembebanan 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. Grafik-grafik hasil resultan pembebanan tiap-tiap paku keling untuk lokasi yang lainnya dapat dilihat pada gambar-gambar grafik di berikutnya.

Hal serupa dilakukan pada kuadran III dan IV. Berdasarkan data yang terdapat pada table 1. dan gambar grafik tersebut dapat diketahui lokasi paku keling dimana saja yang mendapat resultan beban paling maksimal. 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 Bruhn tahun 1965, 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. Berdasarkan tabel Bruhn batas 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.

5. Simpulan dan Saran

5.1 Simpulan

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut.

1. Analisa numerik dengan metode elemen hingga pemasangan penambal pada pelat utama pesawat Boeing 737-200 dengan menggunakan beban statik telah dapat dilaksanakan.
2. Harga faktor konsentrasi tegangan di tepi lubang pada pelat utama sebelum dipasang penambal setelah di analisis adalah sebesar 2,8.
3. Harga faktor konsentrasi tegangan *nett* (K_{tn}), yaitu perbandingan tegangan maksimal di sekitar lubang pelat utama terhadap tegangan yang terdistribusi merata yang jauh dari lubang (tegangan nominal) setelah dipasangan 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.
4. Resultan beban maksimal paku keling terjadi pada nomor 56 yaitu sebesar 675,6 N. Berdasarkan tabel Burhn batas kekuatan beban geser

maksimal yang masih aman ditahan oleh paku keling eter 4,76 mm adalah 4498 N. Sehingga untuk pemakaian paku keling dengan diameter 4,76 mm pada pemasangan penambal antena *ATC transponder* dapat digunakan.

5.2 Saran

Saran penulis berkaitan dengan penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan pembuatan model lain dengan menggunakan diameter paku keling lebih kecil atau lebih besar dari 4,76 mm (6/32 in) yang digunakan sebagai pembanding dari penelitian yang sudah ada.
2. Perlu dilakukan pengujian terhadap specimen yang sesuai dengan penelitian ini, sehingga diperoleh hasil yang dapat dibandingkan antara perhitungan numerik dan analitis.

DAFTAR PUSTAKA

- Boeing Co. Ltd. (2004) : *Structural Repair Manual (SRM) Boeing 737-200*, U.S.A.
- Bruhn, E.F.(1965) : *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*, U.S.A.
- Chen, Chun. (2004) : *RAPIDC 2.0-Repair Assessment Procedure and Integrated Design for Commuters*, U.S.A.
- Craig, Roy R. Jr. (1996) : *Mechanics of Materials*, John Wiley & Sons Inc., U.S.A.
- Dahlan, Rusdi, (2000) : *Desain Perbaikan Struktur Berdasarkan Analisis Statik, Melalui Pemodelan Analitik*,

Perhitungan Numerik, dan Verifikasi Pengujian, Tesis Magister, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung.

FAA, Department of Transportation (1972) : *Advisory Circular (AC) No:43.13-1A and 2A*, Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

Knight, Charles E. (1993) : *The Finite Element Method in Mechanical Design*, PWS-KENT Publishing Company, Boston.

Kuntjoro, Wahyu. (2005) : *An Introduction to the Finite Element Method*, McGraw-Hill Education, Singapore.

Niu, Michael C.Y. (1991) : *Airframe Structural Design-Practical Design*

Information and Data on Aircraft Structures, Conlimit Press Ltd.

Peterson, R.E. (1974) : *Stress Concentration Factor*, John Wiley & Sons, New York.

Rachmandini, Yanti. (2001) : *Analisis Penambalan Lubang Segiempat pada Struktur Pelat Berpenguat dengan Menggunakan Sambungan Paku Keling*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Penerbangan, Institut Teknologi Bandung.

Sanderson, Jepperson, (2003) : *A & P Technician Airframe Textbook*, Printed in USA.