

ANALISIS TEGANGAN STRUKTUR PENGUAT PADA PEMASANGAN ANTENA TCAS PESAWAT BOEING 737-200

Oka Fatra

Dosen Sekolah Tinggi Penerbangan Indonesia Curug PO BOX 509 Tangerang (15001)

Abstrak: *Distribusi beban masing-masing paku keling dan tegangan struktur penguat yang direpresentasikan dengan harga normalized stress pada pemasangan antena TCAS pesawat Boeing 737-20, dikaji secara numerik dengan menggunakan metode elemen hingga. Beban paku keling dan harga normalized stress diamati untuk mengetahui pola distribusi beban paku keling, nilai beban maksimum yang diterima oleh paku keling pada posisi tertentu serta perubahan harga normalized stress di sekitar lubang struktur yang terintegrasi dalam pemasangan antena TCAS. Hasil analisis mengindikasikan bahwa distribusi beban paku keling semakin besar dan harga normalized stress mengalami penurunan apabila tebal penambal utama (external doubler) dan diameter paku keling lebih besar.*

Abstract: *Load distribution for each rivet and stress of structural reinforcement represented with normalized stress value in TCAS antenna installation of Boeing 737-200 aircraft, which are investigated numerically by finite element method. Rivet load and normalized stress value are observed to get a pattern of rivet load, a maximum load in certain position of rivet and the alteration of normalized stress value at around the holes which are integrated in TCAS antenna installation. The results indicate that the load distribution in larger value and decreasing value of normalized stress when the thickness of the external doubler and else rivet diameter are varied with the larger size.*

Kata Kunci: *distribusi beban, normalized stress, metode elemen hingga.*

PENDAHULUAN

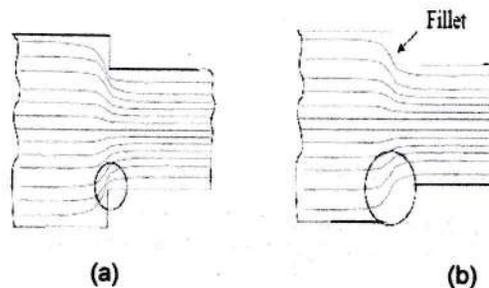
Diawali dengan terjadinya kecelakaan udara katastrofik antara dua pesawat terbang komersil di atas *Grand Canyon* pada tahun 1956, konsentrasi pertama yang dilakukan oleh industri penerbangan adalah berusaha mengadakan suatu instrumen sistem pencegahan kecelakaan di udara, TCAS (*Traffic Alert and Collision Avoidance System*) yang dilengkapi juga dengan antena.

Antena TCAS berfungsi untuk menerima dan mengirimkan sinyal gelombang pada jarak tertentu. Agar tidak mempengaruhi operasi penerbangan, antena yang berlokasi pada bagian luar pesawat terbang wajib dirancang khusus, memerlukan struktur yang tepat, struktur yang kuat dalam menahan

beban luar maupun beban antena itu sendiri serta struktur yang ringan pada saat pengoperasian.

Pemasangan struktur antena TCAS pesawat berpenumpang memiliki prosedur yang sama dengan perbaikan struktur pesawat yang mengalami retak karena berbagai macam pembebanan. Perbaikan struktur bagian yang mengalami kerusakan, mulanya mengidentifikasi kegagalan struktur kemudian menentukan metode sambungan struktur yang paling efektif dan efisien apabila dilubang. Agar kekuatan struktur pesawat tidak berkurang bahkan cenderung sama dengan kondisi awal sebelum dilubang, digunakan sambungan penambal pada struktur antena TCAS.

Dalam kasus ini dilakukan analisis pemasangan penambal struktur antenna TCAS pada struktur *existing skin* pesawat Boeing 737-200 dengan sambungan paku keling. Hasil analisis numerik perangkat lunak yang digunakan berupa distribusi beban paku keling yang terpasang antara struktur utama (*existing skin*) dengan pelat penambal utama (*external doubler*) serta distribusi tegangan pada tepi lubang yang dibandingkan dengan tegangan aktual pada *existing skin* sehingga diperoleh harga *normalized stress*.



Gambar 1.
(a) Pelat dengan sudut-sudut tajam
(b) Pelat dengan sudut-sudut yang dibulatkan.

FAKTOR KONSENTRASI TEGANGAN DAN TEORI PERBAIKAN STRUKTUR PELAT LOGAM

Faktor Konsentrasi Tegangan

Struktur pelat persegi empat dengan geometri tertentu yang mengalami beban tarik akan menghasilkan distribusi tegangan yang seragam di sekitar bidang struktur. Akan tetapi, jika pada struktur terjadi perubahan geometri, seperti adanya retak, sudut-sudut tajam di bagian sisi pelat, terdapat lubang serta perubahan luas penampang lintang maka distribusi tegangan pada struktur menjadi tidak seragam, sehingga menimbulkan konsentrasi tegangan yang dapat menurunkan kekuatan struktur bahkan menyebabkan kegagalan lebih cepat dari umur perancangannya.

Pentingnya pemahaman mengenai konsentrasi tegangan oleh para perancang maupun analis struktur cukup berasalan, karena solusi harus dicapai jika perubahan geometri terjadi di bagian struktur tertentu. Perubahan geometri yang dimaksudkan tidak hanya perubahan geometri yang tiba-tiba namun juga perubahan geometri yang disengaja seperti pembuatan lubang dalam pemasangan komponen tertentu maupun pemasangan instrumen penting lainnya pada struktur.

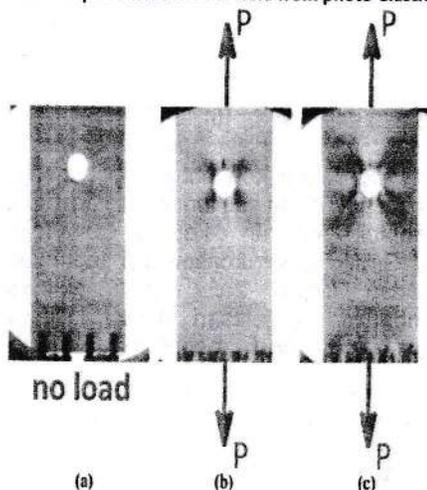
Gambar 1 memperlihatkan distribusi tegangan yang terjadi antara pelat dengan sudut-sudut tajam dan pelat dengan sudut-sudut yang dibulatkan (*fillet*).

Garis merah pada gambar 1.a (bagian dengan pembulatan) menunjukkan perubahan distribusi tegangan secara mendadak dan aliran tegangan pada daerah tersebut menumpuk sehingga besarnya tegangan yang mengalir sangat tinggi.

Gambar 1.b menunjukkan aliran tegangan yang terjadi di sekitar sudut yang dibulatkan cenderung lebih terpolakan dan besarnya tegangan lebih rendah daripada pelat dengan sudut-sudut yang ditajamkan. Kedua gambar memperlihatkan bahwa bagian sudut mengalami tegangan maksimum dan konsentrasi tegangan yang lebih tinggi terjadi pada pelat dengan sudut-sudut tajam.

The effect of holes on stress field

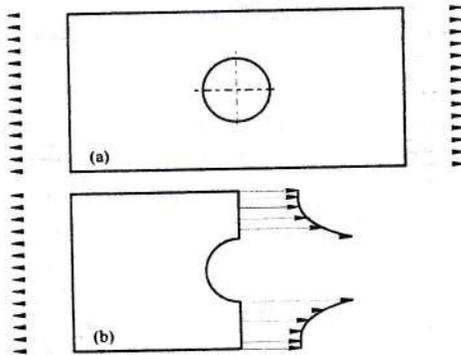
Stress in plate with circular hole from photo-elastic test



Gambar 2
Struktur pelat tanpa beban tarik (a), struktur pelat dengan beban tarik (b,c) [4]

Gambar 2 menunjukkan pengaruh lubang terhadap distribusi tegangan melalui pelat yang diperoleh dari hasil pengujian fotoelastis. Gambar 2.a memperlihatkan kondisi pelat yang belum diberi beban. Warna pelat pada lubang berubah setelah diberi beban (gambar 2.b) menunjukkan adanya konsentrasi tegangan yang terdapat di tepi lubang. Konsentrasi tegangan yang ditunjukkan dengan panah biru semakin nyata (gambar 2.c) ketika besaran beban tarik ditingkatkan sehingga diperoleh tegangan maksimum di daerah tersebut.

Gambar 3.a 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 3.b.

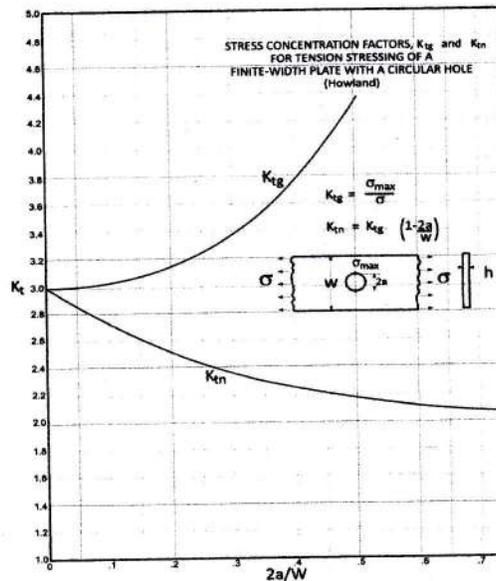


Gambar 3.
Pelat berlubang yang mengalami beban tarik [5].

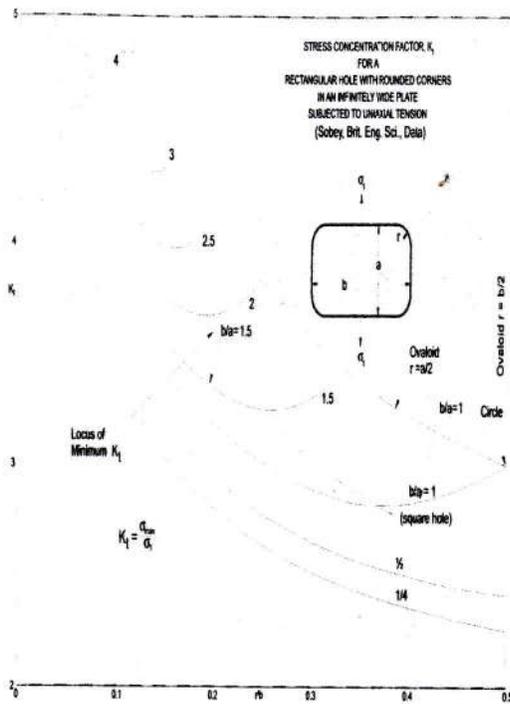
Harga faktor konsentrasi tegangan pelat tak hingga yang dilubang dengan lubang berbentuk lingkaran diketahui sama dengan tiga. Grafik faktor konsentrasi tegangan, K_t terhadap fungsi $2a/w$ pada gambar 4 memberikan penjelasan bahwa nilai $2a/w$ yang meningkat berbanding lurus dengan harga K_{tg} dan berbanding terbalik dengan harga K_{tn} pada pelat berhingga. Notasi $2a$ dan w yang terdapat pada grafik berturut-turut adalah diameter yang terdapat pada pelat dan lebar pelat dalam geometri tertentu.

Grafik faktor konsentrasi tegangan pada gambar 5 merupakan harga K_t terhadap fungsi r/b dan fungsi b/a pada pelat tak hingga yang dilubang dengan bentuk lubang persegi empat sudut-sudut dibulatkan yang

mengalami pembebanan uniaksial. Notasi r , b dan a berturut-turut adalah jari-jari sudut yang dibulatkan pada lubang persegi empat, panjang lubang persegi empat dan lebar lubang persegi empat pada pelat tak hingga. r/b sebagai salah satu parameter untuk menghasilkan harga K_t adalah tegangan yang bekerja jauh dari lubang berdasarkan luas penampang lubang yang utuh. Peningkatan r/b dengan perbandingan b/a tertentu pada gambar 5 akan mengakibatkan penurunan harga K_t hingga pada tingkat minimum sebagaimana ditunjukkan pada garis putus-putus kedua. Harga K_t meningkat kembali apabila r/b dalam besaran tertentu melewati garis putus-putus tersebut.



Gambar 4.
Grafik faktor konsentrasi tegangan pada pelat berhingga dengan lubang berbentuk lingkaran [3]



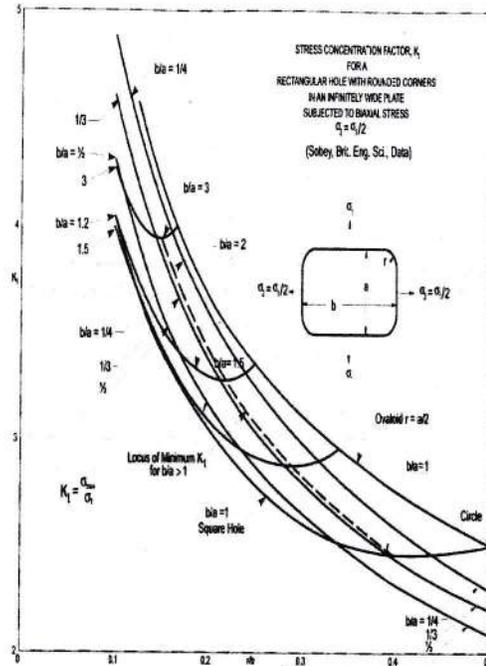
Gambar 5.

Grafik faktor konsentrasi tegangan pada pelat tak hingga dengan lubang berbentuk persegi empat sudut-sudut dibulatkan yang mengalami pembebanan uniaksial [3].

Untuk pelat berhingga, harga K_t dari grafik pada gambar 5 hanya berlaku untuk b/w yang kecil. Peningkatan harga b/w akan meningkatkan harga K_t sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2.1.

Gambar 6 memperlihatkan grafik faktor konsentrasi tegangan terhadap fungsi r/b dan fungsi b/a pada pelat tak hingga berlubang persegi empat dengan sudut-sudut yang dibulatkan yang mengalami pembebanan biaksial. \square_1 dan \square_2 berturut-turut adalah tegangan yang jauh dari lubang di mana harga σ_1 dua kali harga σ_2 . Perubahan r/b yang semakin meningkat dengan perbandingan b/a tertentu mengakibatkan penurunan harga K_t hingga pada tingkat minimum (ditunjukkan pada garis putus-putus).

Pada grafik dapat ditunjukkan bahwa dengan perbandingan r/b dan b/a yang sama, harga K_t pada pelat yang mengalami pembebanan uniaksial lebih tinggi daripada pelat yang mengalami pembebanan biaksial.



Gambar 6

Grafik faktor konsentrasi tegangan pada pelat tak hingga dengan lubang berbentuk persegi empat sudut-sudut dibulatkan yang mengalami pembebanan biaksial [3].

Teori Perbaikan Struktur Pelat Logam

Membangun sebuah pesawat terbang dengan jenis tertentu membutuhkan komponen pendukung yang tidak sedikit dan memerlukan berbagai tahapan analisis agar memenuhi persyaratan laik terbang. Beberapa komponen menjadi perhatian para pembuat pesawat di antaranya adalah paku keling, baut dan perekat karena berfungsi sebagai penyambung struktur pesawat atau biasa disebut *structural members*. Modifikasi pada bagian-bagian tersebut perlu dilakukan dengan beberapa alasan, yaitu untuk meningkatkan operasional pesawat, memperpanjang usia struktur atau memperbaiki beberapa masalah yang berpotensi mempengaruhi keselamatan penerbangan. Perubahan-perubahan tersebut sudah barang tentu dilakukan untuk menghadapi persaingan di pasar global yang semakin kompetitif dalam hal pelayanan transportasi udara.

Perbaikan struktur dilakukan untuk mengembalikan serta mempertahankan integritas struktur [8]. Adanya perbaikan ini umumnya ditentukan selama periode pemeriksaan terencana sebagai akibat dari pengoperasian pesawat udara yang mengalami pembebanan, erosi dan korosi. Namun terkadang perbaikan ini juga dilakukan oleh karena adanya insiden maupun kecelakaan kecil yang masih dapat diatasi dengan cepat berdasarkan pedoman manual yang dimiliki oleh masing-masing jenis pesawat. Pedoman yang diikuti oleh seorang teknisi agar sesuai dengan perancangan awal pesawat dengan jenis tertentu didasari atas sebuah prinsip yang dikenal dengan *as-designed* [8].

Penerbitan *Structural Repair Manual* (SRM) oleh industri pembuat pesawat merupakan jawaban yang diberikan kepada para operator penerbangan agar perbaikan struktur dapat dilakukan dengan baik. Adapun perbaikan struktur yang tidak terdapat dalam SRM seperti perubahan struktur akibat adanya pemasangan komponen baru yang terdapat pada pesawat sehingga memiliki dampak yang sama untuk jenis pesawat tertentu, industri pembuat pesawat menerbitkan *service bulletin* kepada para operator penerbangan dan telah disetujui oleh regulator penerbangan, tempat dilakukannya sertifikasi pada saat pesawat diproduksi maupun dioperasikan.

Dalam pengoperasian pesawat terbang masing-masing struktur memiliki tingkat kegagalan yang berbeda. Dua klasifikasi struktur pesawat berdasarkan tingkat risikonya adalah *primary structure* dan *secondary structure*. *Primary structure* adalah struktur yang diperlukan untuk penerbangan yang aman. Bila *primary structure* mengalami kegagalan maka pesawat akan mengalami kegagalan katastropik. *Secondary structure* adalah struktur yang masih dinyatakan aman dalam melanjutkan penerbangan ke lokasi pendaratan terdekat bila mengalami kegagalan struktur [9].

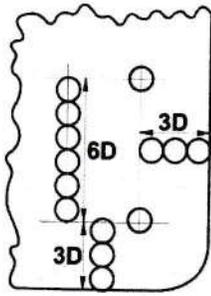
Penerbitan pedoman manual secara garis besar mengenai tata cara pelaksanaan, teknik dan metode-metode yang dapat diterima dalam memperbaiki dan menginspeksi sebuah pesawat oleh pihak yang berwenang, seperti *Federal Aviation Administration* (FAA) yang berdomisili di Amerika Serikat. Aturan-aturan yang telah

disetujui dan dipublikasikan berlaku sama untuk seluruh pesawat sipil yang disertifikasi oleh lembaga tersebut. Salah satunya adalah penetapan mengenai garis-garis besar perbaikan struktur dengan menggunakan sambungan paku keling, dalam AC 43.13-1A dan 2A [10] dengan cakupan sebagai berikut.

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. Perubahan diameter lubang wajib dilakukan dengan cermat dan teliti agar jarak antar paku keling dan jarak paku keling terluar dengan tepi pelat masih dapat dipertahankan.

Diameter Paku Keling. Gunakan 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.

Jarak Tepi dan Jarak 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. Gambar 3.1 menunjukkan cara mengukur jarak tepi dengan menggunakan diameter paku keling pada sebuah pelat tertentu.



Gambar 7
Pengukuran jarak tepi dengan menggunakan diameter paku keling [8].

Aturan penentuan jarak tepi minimum yang direkomendasikan untuk *fastener* dengan bentuk kepala yang menonjol (*protruding head fastener*) umumnya adalah dua kali diameter *protruding head fastener*, 2D ditambah 1/16 in atau 2D setingkat lebih besar dari ukuran *fastener* tersebut sehingga maksimum jaraknya 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 2-1/2D, ditambah 1/16 in atau 2-1/2D setingkat lebih besar dari ukuran *fastener* tersebut [11].

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.

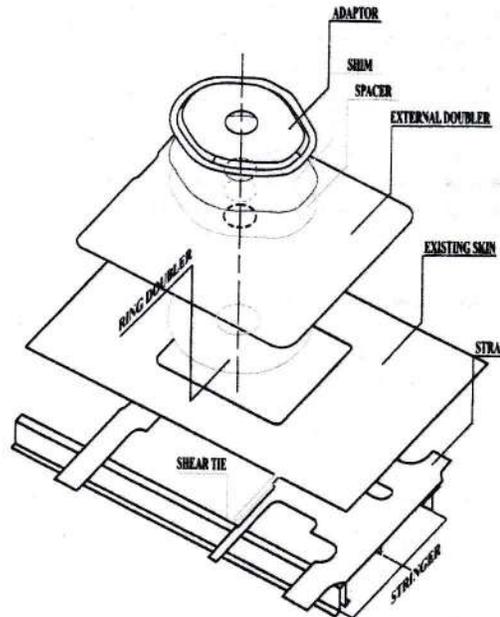
Lebar struktur perbaikan. Lebar struktur perbaikan minimal dua kali lebar struktur yang rusak.

PEMODELAN STRUKTUR ANTENA TCAS

Struktur antenna TCAS untuk pesawat Boeing tipe 737-200 dalam bab ini dianalisis berdasarkan model utuh dengan menggunakan metode elemen hingga, sesuai data teknis yang telah diperoleh dari pihak pabrik pembuat pesawat (dalam hal ini

perusahaan Boeing) dan data penelitian yang telah dilakukan dalam kurun waktu tertentu.

Berdasarkan data teknis, *existing skin* yang berlokasi di bagian bawah *fuselage* (lazimnya disebut dengan *Body Station* atau disingkat BS) diberi lubang berbentuk segiempat dengan masing-masing sudut dibulatkan mulai dari BS 297.77 sampai dengan BS 312.71. *Existing skin* yang telah dilubangi kemudian disambung *external doubler* dengan bahan struktur sama, dan diberi lubang berbentuk lingkaran yang bertujuan untuk meletakkan komponen antenna. Pada *external doubler*, tersambung penambal berbentuk lingkaran (*ring doubler*) dan tempat kedudukan antenna (*adaptor*) yang juga memiliki sifat material sama dengan *existing skin*.



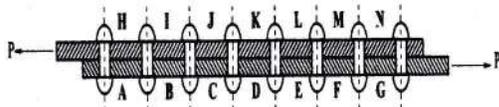
Gambar 8
Susunan struktur antenna TCAS yang terpasang pada *fuselage*

Pada gambar 8 diperlihatkan posisi *shim*, *spacer* dan beberapa penguat (*shear tie*, *tear strap* dan *stringer*). Dalam kondisi sebenarnya, *adaptor* berada pada level paling bawah dari urutan posisi penempatan struktur antenna TCAS. Kemudian dari bawah ke lapisan atas berturut-turut *shim*, *spacer*, *external doubler* dan *ring doubler*.

Pemahaman mengenai apa dan bagaimana sambungan paku keling dalam perbaikan struktur maupun pemasangan struktur pada bagian tertentu di pesawat menjadi hal penting dimiliki agar umur perancangan sebuah pesawat dapat tercapai bahkan melebihi dari yang telah ditetapkan. Adanya ketetapan mengenai usia tambahan operasional pesawat ini tentu dilakukan dengan berbagai penelitian dan perhitungan, sehingga dihasilkan kesimpulan berupa nilai perpanjangan operasi. Oleh sebab itu, mekanisme sambungan paku keling merupakan salah satu syarat mutlak dipahami agar pada waktu proses perbaikan struktur dan pemasangan struktur baru di pesawat tertentu dapat dilakukan dengan baik dan benar.

Sebagaimana diketahui bahwa kegagalan pada daerah sambungan dapat terjadi karena *bending* momen sekunder (*secondary bending moment*) akibat adanya eksentrisitas, konsentrasi tegangan, defleksi yang berlebihan, dan lain-lain [18].

Pada sambungan paku keling, pemindahan beban dari satu pelat ke pelat lainnya terjadi melalui paku keling dengan ilustrasi gambar 9.



Gambar 9

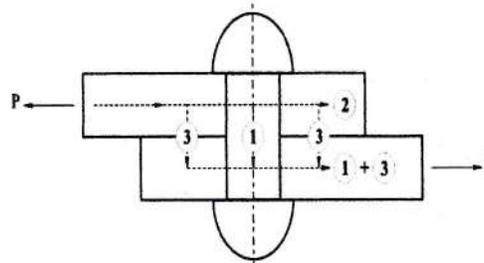
Dua pelat dengan sambungan paku keling yang mengalami pembebanan uniaksial.

Gambar 9 menunjukkan bahwa pada saat pelat geser tunggal ditarik dengan beban uniaksial, material G dan H mengalami pertambahan panjang yang besar dibandingkan dengan material (ditunjukkan dengan huruf A sampai dengan N) lainnya. Sedangkan panjang material A dan N ketika ditarik dengan beban uniaksial sama besar, relatif kecil. 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.

Ketidakteraturan pertambahan panjang masing-masing material kedua pelat menunjukkan bahwa pada lokasi tersebut terdapat perbedaan tegangan, sebagai akibat dari adanya :

- Gaya dukung (*bearing force*)
- Gaya yang diteruskan pelat (*by-passing force*)
- Gaya gesek antar pelat (*friction force*).



Keterangan :
..... aliran perpindahan beban

- 1 = gaya dukung (*bearing force*, F_{BR})
- 2 = gaya yang diteruskan (*by-passing force*, F_{BP})
- 3 = gaya gesek (*friction force*, F_{FR})

Gambar 10

Aliran perpindahan beban paku keling.

Aliran perpindahan beban pada masing-masing paku keling dari sistem sambungan pada gambar sebelumnya, ditunjukkan oleh gambar 10. 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 satu dan nomor tiga. Sedangkan nomor 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.

Struktur *existing skin* mengalami pembebanan tarik biaksial, berupa tegangan tarik searah *fuselage* (*longitudinal tension stress*) dan tegangan tarik searah keliling *fuselage* (*hoop tension stress*). Besarnya *hoop tension stress* dua kali *longitudinal tension stress*, dirumuskan sebagai berikut:

- *Hoop tension stress*

$$f_{HT} = \frac{pR}{t} \quad (1)$$

- *Longitudinal tension stress*

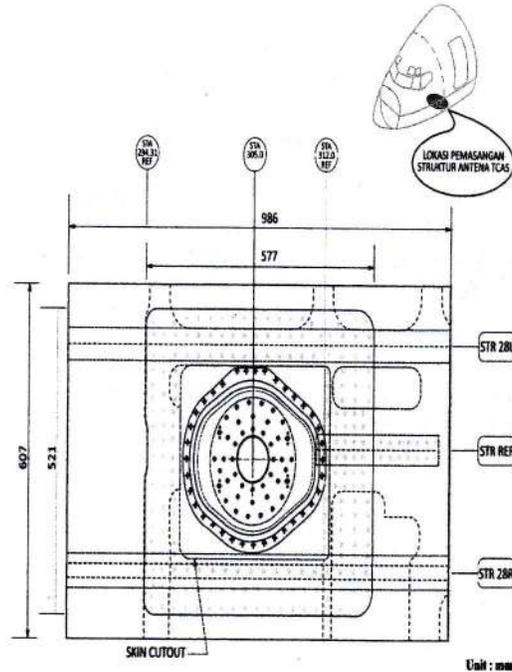
$$f_{LT} = \frac{pR}{2t} \quad (2)$$

di mana:

- f_{HT} = *hoop tension stress*
- f_{LT} = *longitudinal tension stress*
- p = perbedaan tekanan
- R = jari-jari *fuselage*
- t = tebal dinding *fuselage*.

Dalam pemodelan elemen hingga, *existing skin* mengalami pembebanan biaksial dengan besar tegangan tarik searah keliling *fuselage* (disebut juga dengan σ_1) sebesar 56.05 MPa dan tegangan tarik searah *fuselage* (disebut juga dengan σ_2) sebesar 28.03 MPa atau sama dengan setengah dari besarnya σ_1 . Besaran nilai kedua tegangan tarik tersebut, diperoleh dengan menggunakan parameter perbedaan tekanan (*differential cabin pressure*) yang terjadi di sekitar kabin pesawat Boeing 737-200, jari-jari *fuselage* dan tebal *existing skin* dengan harga berturut-turut sebesar 0.05 MPa (7.8 psi), 1880 mm (74 in) dan 1.8 mm (0.071 in). Geometri lubang *existing skin* dimodelkan dengan panjang (b) dan lebar (a) lubang berturut-turut sebesar 379 mm dan 330 mm, sehingga rasio kedua ukuran lubang (b/a) diperoleh sebesar 1.15. Pada geometri lubang *existing skin*, tepi lubang yang berada dekat dengan BS 312.0 memiliki diameter setengah kali lebih kecil dari tepi lubang yang letaknya berdekatan dengan BS 294.31 yaitu sebesar 25.4 mm, sehingga perbandingan nilai r/b adalah sebesar 0.034.

Gambar 11 menampilkan geometri struktur antenna TCAS dan *existing skin*, dimodelkan dengan posisi paku keling yang telah didesain berdasarkan ketentuan pihak pembuat pesawat.



Gambar 11
Geometri *existing skin* dan struktur antenna TCAS.

Dalam pemodelan elemen hingga fleksibilitas paku keling digunakan untuk memperoleh harga kekakuan paku keling yang dihitung dengan rumus:

$$k_{x,y} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

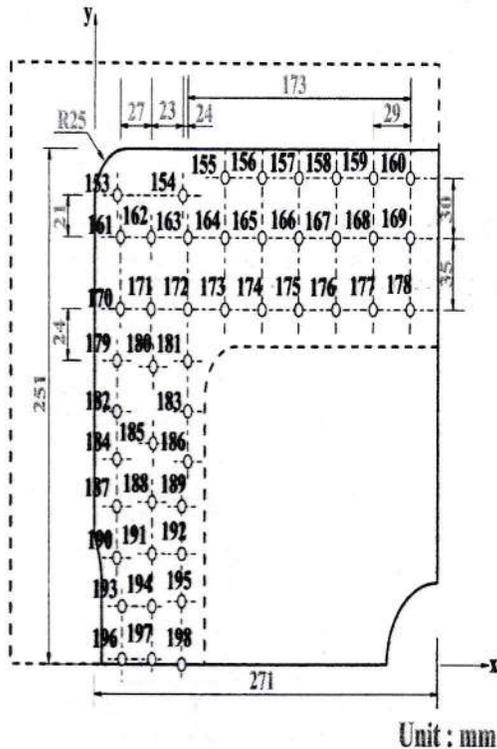
$$k_z = \frac{A_r E_r}{L} \quad (4)$$

di mana:

- $k_{x,y}$ = kekakuan paku keling arah x dan y
- k_z = kekakuan paku keling arah z
- f = fleksibilitas dari persamaan Boeing
- A_r = luas paku keling
- E_r = modulus elastisitas paku keling
- L = setengah jarak antar dua pelat.

Rumus fleksibilitas paku keling berdasarkan metode Boeing adalah:

$$f = \left[\frac{2 \times \left(\frac{t_1}{D_0} \right)^{0.85}}{t_1} + \frac{2 \times \left(\frac{t_2}{D_0} \right)^{0.85}}{t_2} \right] \times \frac{11}{8E_f} \quad (5)$$



Gambar 15
Seperempat sisi kiri atas geometri *external doubler* dengan posisi dan jarak antar paku keling.

Dalam penelitian ini, struktur dirancang berjumlah sembilan model dengan tiga klasifikasi pengaruh.

Tabel 1
Model 1 dan model 2

MODEL 1				
<i>Existing skin</i> yang dilubang, tanpa penambal dan penguat				
Pembebanan Biaksial (MPa)				
$f_{HT} = \sigma_1 = 56.05$		$f_{LT} = \sigma_2 = 28.03$		
<i>Existing Skin</i>				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	986	607	1.8	72000

MODEL 2				
<i>Existing skin</i> yang dilubang, dengan penguat (<i>tear strap + stringer</i>)				
Pembebanan Biaksial (MPa)				
$f_{HT} = \sigma_1 = 56.05$		$f_{LT} = \sigma_2 = 28.03$		
<i>Existing Skin</i>				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	986	607	1.8	72000
<i>Stringer 28R (STR 28R)</i> ^{*)} <i>line penampang</i>				
Material	Tipe	Tebal (mm)	A_c^i (mm ²)	E (MPa)
Al 7075-T6	Topi	1.0	102	71600
<i>Stringer Ref (STR REF)</i> ^{*)} <i>line penampang</i>				
Material	Tipe	Tebal (mm)	A_c^i (mm ²)	E (MPa)
Al 2024-T4	T	1.8	150	72000
<i>Stringer 28L (STR 28L)</i> ^{*)} <i>line penampang</i>				
Material	Tipe	Tebal (mm)	A_c^i (mm ²)	E (MPa)
Al 2024-T4	T	1.8	141	72000
<i>Tear Strap</i>				
Material	Tebal (mm)			E (MPa)
Al 2024-T3	1.8			72000
<i>Paku Keling</i>				
Material	Model	Diameter (mm)	kekakuan paku keling/baut	
Al 2024-T3	⊙	4.7625	k_{xy} (N/mm) k_z (N/mm)	
Al 2024-T4			STR 28R	
			52353.27	10251348
			STR 28L dan STR REF	
			54706.09	10251348
<i>Tear Strap</i>				
			54706.09	10251348

Keterangan :

⊙ merupakan simbol paku keling/baut yang terpasang pada lokasi tertentu (warna lingkaran sesuai dengan gambar lokasi pemasangan).

Data tabel 1 digunakan untuk membandingkan harga *normalized stress* di tepi lubang yang dialami oleh masing-masing *existing skin* pada pemodelan. Model 1 dan model 2 memperlihatkan harga faktor konsentrasi tegangan, K_t di tepi lubang *existing skin*. Harga tersebut diperoleh dengan menggunakan rumus:

$$K_t = \frac{\sigma_{maks}}{\sigma_{nom}} \quad (6)$$

Pengaruh Struktur Tertentu pada Pemasangan Antena TCAS terhadap Distribusi Beban Paku Keling

Data tabel 2 berikut ini merupakan informasi data struktur yang digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh struktur apabila salah satu atau beberapa struktur antena TCAS ditiadakan.

Tabel 2
Model 3, model 4 dan model 5

MODEL 3				
Existing skin yang dilubang, dengan external doubler dan penguat (tear strap + stringer)				
Pembebanan Biaksial (MPa)				
$f_{III} = \sigma_1 = 56.05$		$f_{IV} = \sigma_2 = 28.03$		
Existing Skin				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	986	607	1.8	72000
External Doubler				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	577	521	2	72000
Paku Keling				
Material	Model	Diameter (mm)	kekakuan paku keling/baut	
Al 2024-T3	○	4.7625	k_{xy} (N/mm)	k_z (N/mm)
Al 2024-T4			54706.09	10251348

MODEL 4				
Existing skin yang dilubang, dengan external doubler dan penguat (shear tie + tear strap + stringer)				
Pembebanan Biaksial (MPa)				
$f_{III} = \sigma_1 = 56.05$		$f_{IV} = \sigma_2 = 28.03$		
Existing Skin				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	986	607	1.8	72000
External Doubler				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	577	521	2.0	72000
Shear Tie				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	18.5	330	1.8	72000
Paku Keling				
Material	Model	Diameter (mm)	kekakuan paku keling/baut	
Al 2024-T3	○	4.7625	k_{xy} (N/mm)	k_z (N/mm)
Al 2024-T4			55195.76	10251348

Keterangan :

○ merupakan simbol paku keling/baut yang terpasang pada lokasi tertentu (warna lingkaran sesuai dengan gambar lokasi pemasangan).

MODEL 5				
Existing skin yang dilubang, dengan external doubler + ring doubler dan penguat (shear tie + tear strap + stringer)				
Pembebanan Biaksial (MPa)				
$f_{III} = \sigma_1 = 56.05$		$f_{IV} = \sigma_2 = 28.03$		
Existing Skin				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	986	607	1.8	72000
External Doubler (ED)				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	577	521	2.0	72000
Ring Doubler				
Material	Diameter (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)	
Al 2024-T3	214	1.27	72000	
Shear Tie (ST)				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	18.5	330	1.8	72000
Paku Keling				
Material	Model	Diameter (mm)	kekakuan paku keling/baut	
Al 2024-T3	○	4.76	k_{xy} (N/mm)	k_z (N/mm)
Al 2024-T4	●	3.97	ED dan ST	
	●	6.36	55195.76	10251348
	●	2.38	Ring Doubler	
	●		46018	7118991
	●		68616.67	18224619
	●		29809.6	2562837

Keterangan :



merupakan simbol paku keling/baut yang terpasang pada lokasi tertentu (warna lingkaran sesuai dengan gambar lokasi pemasangan).

Model hanya untuk mengetahui hasil distribusi beban dan harga *normalized stress*, tidak merekomendasikan perubahan struktur yang telah didesain oleh pabrik pembuat pesawat.

Pengaruh Variasi Tebal External Doubler terhadap Distribusi Beban Paku Keling

Tabel 3 merupakan variasi tebal *external doubler* berturut-turut untuk model 6, model 7 dan model 8. Model 6 merupakan data struktur antenna TCAS yang digunakan untuk mengetahui sejauh mana perilaku perpindahan beban masing-masing paku keling dan berapa besar harga *normalized stress* yang terjadi pada struktur yang dilubang apabila tebal *external doubler* sebesar 1.8 mm.

Tabel 3
Model 6, model 7 dan model 8

MODEL 6, MODEL 7 DAN MODEL 8				
Existing skin yang dilubang, dengan variasi tebal external doubler dalam pemasangan struktur antenna TCAS				
Pembebanan Biaksial (MPa)				
$f_{UT} = \sigma_1 = 56.05$		$f_{LT} = \sigma_2 = 28.03$		
Existing Skin				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	986	607	1.8	72000
External Doubler (MODEL 6)				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	577	521	1.8	72000
External Doubler (MODEL 7)				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	577	521	2.0	72000
External Doubler (MODEL 8)				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	577	521	2.29	72000
Ring Doubler				
Material	Diameter (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)	
Al 2024-T3	214	1.27	72000	
Adaptor				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	358	311	0.635	72000
Shear Tie				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	18.5	330	1.8	72000
Paku Keling				
Material		k_{xy} (N/mm)	k_z (N/mm)	
Al 2024-T3	○	4.76	ED dan ST (MODEL 6)	
Al 2024-T3	○	3.97	54706.9	10251348
Al 2024-T4	●	6.36	ED dan ST (MODEL 7)	
	○	2.38	55195.76	10251348
	○		ED dan ST (MODEL 8)	
	○	55678.9	10251348	
Ring Doubler				
	○	45620.48	7118991	
	●	68023.95	18224619	
	●	29552.1	2562837	
Adaptor				
	○	43192	7118991	

Keterangan :

-
-
- merupakan simbol paku keling/baut yang terpasang pada lokasi tertentu (warna lingkaran sesuai dengan gambar lokasi pemasangan).

Model 7 adalah data struktur antenna TCAS yang menjadi referensi guna mempelajari pengaruh perubahan parameter yang dilakukan pada model-model lain. Model 8 adalah data struktur antenna TCAS dengan variasi tebal *external doubler* sebesar 2.29 mm.

Pengaruh Variasi Diameter Paku Keling pada External Doubler terhadap Distribusi Beban Paku Keling

Variasi diameter paku keling yang terpasang antara *existing skin* dan *external doubler* dimodelkan dengan model 9.

Tabel 4
Model 9

MODEL 9				
Existing skin yang dilubang, dengan variasi diameter paku keling sebesar 6.35 mm pada external doubler dalam pemasangan struktur antenna TCAS				
Pembebanan Biaksial (MPa)				
$f_{UT} = \sigma_1 = 56.05$		$f_{LT} = \sigma_2 = 28.03$		
Existing Skin				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	986	607	1.8	72000
External Doubler				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	577	521	2	72000
Ring Doubler				
Material	Diameter (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)	
Al 2024-T3	214	1.27	72000	
Adaptor				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	358	311	0.635	72000
Shear Tie				
Material	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	E (MPa)
Al 2024-T3	18.5	330	1.8	72000
Paku Keling				
Material		k_{xy} (N/mm)	k_z (N/mm)	
Al 2024-T3	○	6.35	ED dan ST	
Al 2024-T3	○	3.97	70486.12	18224619
Al 2024-T4	●	6.36	70486.12	18224619
	●	2.38	29809.6	2562837
Ring Doubler				
	○	46018	7118991	
	●	68616.67	18224619	
	○	29809.6	2562837	
Adaptor				
	○	43548.15	7118991	

Keterangan :

-
-
- merupakan simbol paku keling/baut yang terpasang pada lokasi tertentu (warna lingkaran sesuai dengan gambar lokasi pemasangan).

Model 9 dibandingkan dengan model 7 agar pengaruh parameter diameter paku keling mampu memberikan penjelasan mengenai distribusi perpindahan beban pada

paku keling dan *normalized stress* yang terjadi di sekitar tepi lubang struktur.

Untuk menentukan besar beban yang diijinkan dalam analisis pemasangan struktur ini, data diambil dari Bruhn dan MatWeb. Paku keling yang digunakan dalam struktur antena TCAS memiliki bahan Al 2024-T3 dan Al 2024-T4 dengan kekuatan geser yang diperoleh sebesar 283 MPa. Data menunjukkan bahwa penambahan tebal pelat dan ukuran diameter paku keling yang semakin besar akan meningkatkan harga beban yang diijinkan, sesuai dengan data yang diperoleh dari literatur.

Diameter paku keling terkecil dan tebal pelat paling tipis pada struktur yang terintegrasi dalam pemasangan antena TCAS pesawat Boeing 737-200, digunakan sebagai nilai sampel dalam menentukan apakah beban yang dialami oleh paku keling memenuhi batas aman atau tidak. Nilai sampel diameter paku keling dan tebal pelat yang dimaksud berturut-turut sebesar 2.38 mm dan tebal pelat *adaptor* sebesar 0.635 mm. Faktor skala dalam penentuan besar beban yang ditahan oleh pelat geser tunggal (*single shear*) dan pelat geser ganda (*double shear*) berturut-turut diperoleh sebesar 0.972 dan 0.714. Kemudian faktor skala sebesar 0.714 dikalikan dengan kekuatan beban yang diijinkan sesuai dengan diameter paku keling 2.38 mm sehingga diperoleh batas kekuatan beban yang masih aman ditahan oleh paku keling di atas, tebal pelat sebesar 0.635 mm sebesar 940 N. Dengan demikian, dapat diputuskan bahwa apabila beban yang diterima oleh paku keling melebihi angka 940 N sebaiknya perlu dilakukan pengkajian ulang.

HASIL DAN DISKUSI

Distribusi Beban Paku Keling

Subbab ini memberikan penjelasan mengenai hasil analisis model struktur antena TCAS dengan membandingkan pengaruh keberadaan struktur tertentu dalam pemasangan antena TCAS sesuai dengan data teknis yang diberikan, pengaruh variasi tebal *external doubler* dan pengaruh diameter paku keling/baut yang terpasang pada *external doubler*. Sebelum dibahas lebih lanjut mengenai hasil analisis pemodelan hingga, data kekuatan paku keling yang

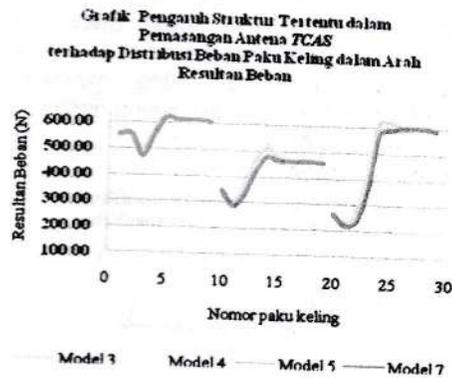
terpasang pada kesembilan model perlu diketahui terkait dengan besar beban maksimum yang mampu ditahan oleh masing-masing paku keling. Berdasarkan data yang diperoleh dari Bruhn dan MatWeb, paku keling yang digunakan dalam struktur antena TCAS memiliki bahan Al 2024-T3 dan Al 2024-T4 dengan kekuatan geser yang diperoleh sebesar 283 MPa. Data menunjukkan bahwa penambahan tebal pelat dan ukuran diameter paku keling yang semakin besar akan meningkatkan harga beban yang diijinkan, sesuai dengan data yang diperoleh dari literatur.

Untuk menentukan besar beban yang diijinkan dalam analisis pemasangan struktur ini, data diambil dari diameter paku keling terkecil dan tebal pelat paling tipis, yaitu diameter paku keling sebesar 2.38 mm dan tebal pelat *adaptor* sebesar 0.635 mm. Faktor skala dalam penentuan besar beban yang ditahan oleh pelat geser tunggal (*single shear*) dan pelat geser ganda (*double shear*) berturut-turut diperoleh sebesar 0.972 dan 0.714. Kemudian faktor skala sebesar 0.714 dikalikan dengan kekuatan beban yang diijinkan sesuai dengan diameter paku keling 2.38 mm sehingga diperoleh batas kekuatan beban yang masih aman ditahan oleh paku keling di atas, tebal pelat sebesar 0.635 mm sebesar 940 N. Dengan demikian, dapat diputuskan bahwa apabila beban yang diterima oleh paku keling melebihi angka 940 N sebaiknya perlu dilakukan pengkajian ulang.

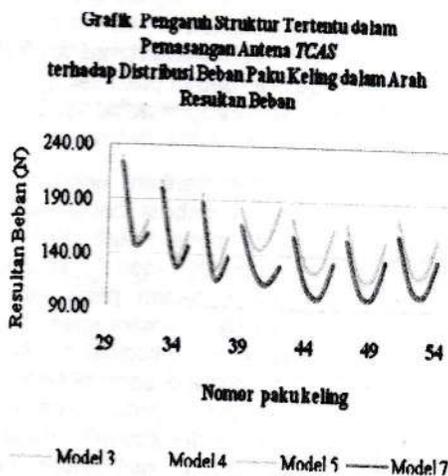
Kesembilan model yang dirancang menunjukkan hasil analisis numerik, berupa grafik distribusi beban masing-masing paku keling serta *normalized stress* berdasarkan tiga klasifikasi pengaruh.

Gambar 16 merupakan grafik pengaruh struktur tertentu dalam pemasangan struktur antena TCAS terhadap distribusi beban paku keling dalam arah resultan beban, berturut-turut untuk model 3, model 4, model 5 dan model 7. Gambar 16 mengilustrasikan pola distribusi beban paku keling yang hampir sama dalam tiap baris. Selisih harga distribusi perpindahan yang relatif stabil antara satu paku keling dengan paku keling berikutnya dalam satu baris, dapat dilihat pada paku keling nomor 5 sampai dengan nomor 9 pada baris pertama, paku keling nomor 14 sampai dengan nomor 19 pada baris kedua dan paku

keling nomor 24 sampai dengan nomor 29 pada baris kedua.



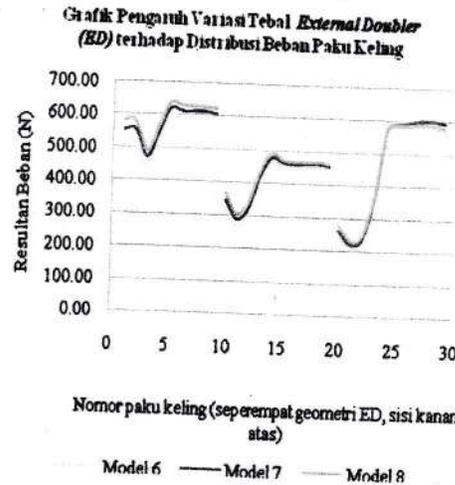
Gambar 16 Grafik pengaruh struktur tertentu dalam pemasangan antena TCAS terhadap distribusi beban paku keling dalam arah resultan (nomor 1 sampai dengan nomor 29).



Gambar 17 Grafik pengaruh struktur tertentu dalam pemasangan antena TCAS terhadap distribusi beban paku keling dalam arah resultan (nomor 30 sampai dengan nomor 54).

Gambar 17 menunjukkan pola distribusi beban paku keling dengan bentuk yang cenderung menyerupai bentuk parabola pada

masing-masing baris, mulai paku keling nomor 30 sampai dengan nomor 54. Harga beban yang diterima oleh masing-masing paku keling yang diperlihatkan antara gambar 16. dengan gambar 17. menunjukkan bahwa paku keling nomor 1 sampai dengan nomor 29 cenderung menerima beban yang lebih besar dibanding dengan paku keling nomor 30 sampai dengan paku keling nomor 54.

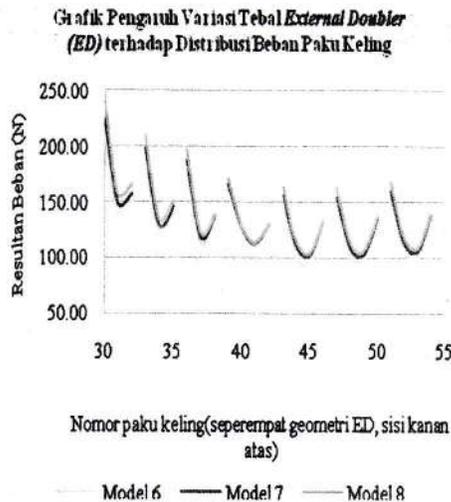


Gambar 18 Grafik pengaruh variasi tebal external doubler terhadap distribusi beban paku keling (nomor 1 sampai dengan nomor 29).

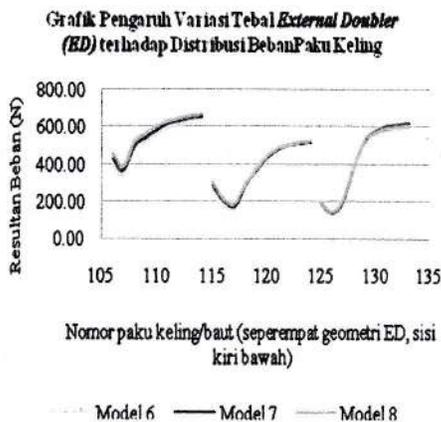
Gambar 18 memperlihatkan distribusi beban paku keling yang terjadi pada model 6, model 7 dan model 8 dalam resultan beban. Baris pertama dengan paku keling nomor 1 sampai dengan nomor 9 menyatakan bahwa model 8 mampu menahan paku keling dengan harga beban paku yang lebih besar dibanding dengan baris pertama paku keling model 7. Sebaliknya, gambar 18 memberikan gambaran mengenai besar beban yang ditahan oleh paku keling baris pertama model 6 tampak lebih kecil dibanding dengan model 7. Harga maksimum resultan beban yang mampu ditahan oleh model 6, model 7 dan model 8 berturut-turut adalah sebesar 598.73 N, 619.97 N dan 640.00 N, terletak pada posisi paku keling nomor 5.

Gambar 19 merupakan grafik pengaruh variasi tebal external doubler terhadap distribusi beban paku keling nomor 30 sampai dengan nomor 54. Pola distribusi beban paku

keling yang diperlihatkan tiap-tiap baris hampir sama dengan tren kurva berbentuk parabola. Paku keling nomor 30, 33, 36, 39,43 dan 47 dan 51 merupakan paku keling terluar, menerima beban paling besar dibandingkan dengan posisi paku keling lainnya dalam satu baris.

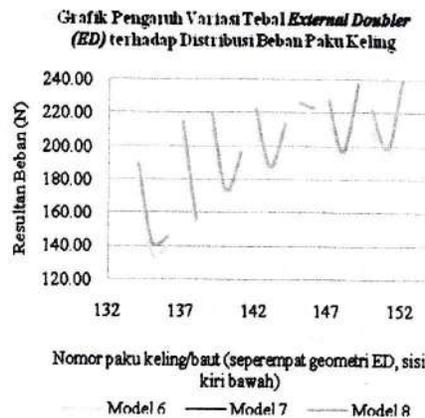


Gambar 19
Grafik pengaruh variasi tebal *external doubler* terhadap distribusi beban paku keling (nomor 30 sampai dengan nomor 54).



Gambar 20
Grafik pengaruh variasi tebal *external doubler* terhadap distribusi beban paku keling (nomor 106 sampai dengan nomor 133).

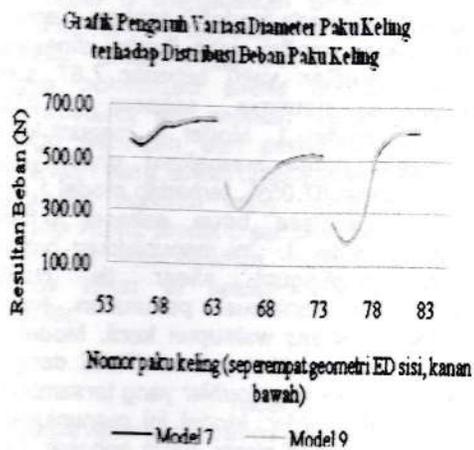
Pola distribusi beban paku keling yang ditampilkan pada gambar 20 menunjukkan bentuk yang sama dengan grafik pada gambar 19. Pengaruh model 8 masih terlihat pada grafik, khususnya antara paku keling nomor 106 sampai dengan nomor 114. Harga resultan beban paku keling maksimum diterima oleh model 8, paku keling nomor 114 sebesar 669.91 N.



Gambar 21
Grafik pengaruh variasi tebal *external doubler* terhadap distribusi beban paku keling (nomor 134 sampai dengan nomor 152).

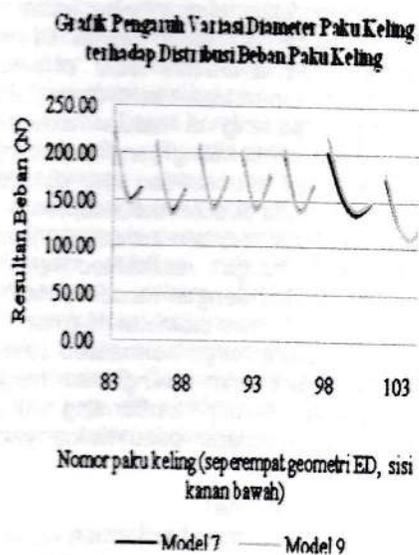
Gambar 21 memberikan penjelasan bahwa selisih harga distribusi beban paku keling antara model 6, model 7 dan model 8. Dalam kondisi geometri model struktur simetris, pola distribusi beban paku keling idealnya adalah sama antara satu sisi dengan sisi lainnya. Namun kondisi tersebut tidak berlaku dalam model 6 sampai dengan model 8 karena data yang diperoleh menunjukkan bahwa model struktur *existing skin* yang lebih panjang di sisi bawah dan kanan struktur.

Gambar 22 menampilkan grafik pengaruh variasi diameter paku keling terhadap distribusi beban paku keling. Paku keling nomor 55 sampai dengan 63 menunjukkan bahwa model 9 mampu menahan beban lebih besar dibanding dengan model 7 di masing-masing paku keling tersebut. Dan pengaruh model 9 dalam menerima beban paku keling memang cenderung terlihat menahan beban yang lebih besar di setiap paku keling meski relatif kecil.



Gambar 22
Grafik pengaruh variasi diameter paku keling terhadap distribusi beban paku keling (nomor 53 sampai dengan nomor 82).

Gambar 23 berikut ini menjelaskan bahwa pengaruh model 9 relatif lebih baik dibanding dengan model 7 pada posisi paku keling nomor 83 sampai dengan nomor 105, terhadap distribusi beban paku keling.



Gambar 23
Grafik pengaruh variasi diameter paku keling terhadap distribusi beban paku keling (nomor 83 sampai dengan nomor 105).

Normalized Stress

Analisis *normalized stress* pada pemasangan struktur antenna TCAS terhadap model dilakukan tidak hanya mengamati besar tegangan di sekitar lubang *existing skin* namun juga struktur lain, seperti lubang pada *ring doubler, external doubler*, dan *adaptor*. Harga *normalized stress* diperoleh berdasarkan tegangan nominal pada *existing skin* dalam kondisi yang belum dilubang.

Harga *normalized stress* yang digunakan sebagai referensi untuk mengetahui prosentase perbandingan *normalized stress* terhadap model struktur yang sesuai dengan data teknis dan data yang dikembangkan adalah *normalized stress* dengan skenario model 1. Tabel 5 berikut ini adalah harga *normalized stress* yang diperoleh dari hasil analisis elemen hingga.

Tabel 5
Harga *normalized stress* model 1 sampai dengan model 9

$\frac{\sigma}{\sigma_0}$	Model Struktur								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R ₁	8.78	7.05	1.21	1.14	1.11	1.18	1.10	1.02	1.06
R ₂	8.75	8.15	1.19	1.13	1.10	1.19	1.10	1.02	1.06
R ₃	6.62	5.66	0.94	0.94	0.92	0.98	0.91	0.85	0.88
R ₄	6.60	6.20	0.93	0.93	0.90	0.95	0.89	0.84	0.87

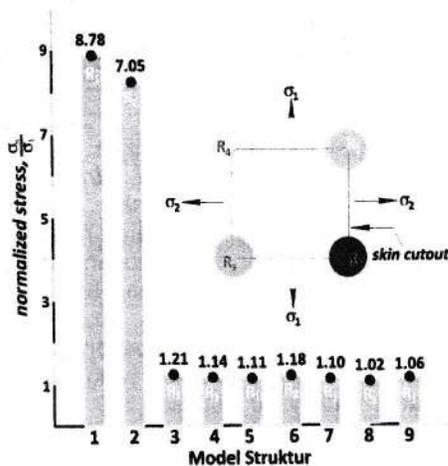
Tabel di atas memberikan informasi mengenai harga *normalized stress* yang terjadi di tepi lubang *existing skin*. R₁, R₂, R₃ dan R₄ berturut-turut adalah harga *normalized stress* yang terdapat di tepi lubang *existing skin* sisi kanan atas, sisi kanan bawah, sisi kiri bawah dan sisi kiri atas. *Existing skin* pesawat Boeing 737-200 berbahan Al 2024-T3 dengan sifat material yang memiliki kekuatan tarik *yield* sebesar 350 MPa dan kekuatan tarik maksimum sebesar 470 MPa.

Harga *normalized stress* model 1 diperoleh sebesar 8.78, lokasi di R₁. Perlu diketahui bahwa diameter R₁ dan R₂ setengah kali diameter R₃ dan R₄. Ini menunjukkan bahwa apabila diameter tepi lubang yang dibulatkan lebih besar beberapa kali dari tepi lainnya, harga *normalized stress* mengalami penurunan. Harga *normalized stress* model 1 diperoleh dari perbandingan antara tegangan yang terletak di tepi lubang *existing skin* sebesar 492 MPa terhadap tegangan nominal yang diaplikasikan, yaitu

sebesar 56.05 MPa atau tegangan dalam arah keliling *fuselage*.

Tegangan yang dihasilkan dengan pemodelan elemen hingga memberikan informasi bahwa jika lubang ditarik tanpa penambal dan penguat dengan geometri model 1 maka harga tegangan maksimumnya melebihi kekuatan tarik *yield* maupun kekuatan tarik maksimum bahan yang digunakan. Dampak yang terjadi apabila *existing skin* dilubang sesuai dengan data dari pabrik pembuat pesawat (seperti model 1) adalah material mengalami deformasi plastis dan berakhir dengan retak yang terjadi di sekitar tepi lubang.

Gambar 24 menampilkan kontur tegangan yang terjadi di *existing skin* yang mengalami pembebanan biaksial. Kondisi ini bukan merupakan kondisi aktual pada struktur pesawat dan merupakan perbandingan harga *normalized stress* terhadap model-model yang ada. Untuk memudahkan pembacaan harga *normalized stress*, tabel 5 dikonversi menjadi data grafik, sebagaimana ditampilkan dalam gambar 24.



Gambar 24

Grafik perbandingan harga *normalized stress* untuk setiap model.

Gambar 24 menampilkan perbandingan harga *normalized stress* model 1 sampai dengan model 9. Harga *normalized stress* model 2 menunjukkan penurunan sebesar 1.73 atau prosentase sebesar 19.74% terhadap model 1. Kemudian Harga *normalized stress* mengalami penurunan

drastis terjadi pada model 3 dengan skenario pembebanan model yang hanya dipasang *external doubler*, yaitu sebesar 7.57 atau prosentase turunnya sebesar 86.57% terhadap model 1. Model 4 menunjukkan prosentase harga *normalized stress* yang turun sebesar 87.05% terhadap model 1 dan selisih prosentase turun sebesar 0.84% terhadap model 3. Ini menunjukkan bahwa pengaruh penguat *shear tie* cukup memberikan kontribusi penurunan harga *normalized stress* walaupun kecil. Model 5, pemasangan struktur antena TCAS dengan menambahkan *ring doubler* yang tersambung di *external doubler*. Model ini menunjukkan harga *normalized stress* turun sebesar 7.67 terhadap model 1. Jika *normalized stress* model 5 dibandingkan dengan model 3 dan 4 maka prosentase selisihnya berturut-turut sebesar 1.19% dan 0.36%. Kondisi ini menunjukkan bahwa model 5 memiliki pengaruh yang lebih baik dibanding dengan kedua model tersebut.

Selanjutnya dikaji berturut-turut model 6, model 7 dan model 8. Harga *normalized stress* paling kecil menunjukkan bahwa model 8 memberikan pengaruh yang lebih baik dibanding dengan model 6 dan model 7. Ini berarti bahwa penambahan tebal pelat memiliki pengaruh yang besar dalam menurunkan harga *normalized stress*. Di sisi lain pengaruh penambahan tebal *external doubler* berarti menambah kekakuan paku keling yang terpasang di sekitar *external doubler*, seperti paku keling yang terpasang di antara *external doubler* dan *ring doubler* serta antara *external doubler* dan *adaptor*.

Model terakhir adalah model 9 yang memperlihatkan harga *normalized stress* lebih kecil dibanding dengan model 7. Hal ini mengindikasikan bahwa diameter paku keling juga mempengaruhi harga *normalized stress* atau dengan kata lain peningkatan harga kekakuan paku keling berbanding lurus dengan ukuran diameter paku keling yang diperbesar.

Tabel 6

Harga *normalized stress* pada lubang *external doubler*

$\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$	Model Struktur								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{kanan}			1.27	1.25	0.98	1.09	1.00	0.92	1.00
D_{kiri}			1.26	1.25	0.98	1.08	0.99	0.91	0.99

Tabel 6 menjelaskan pengaruh posisi paku keling yang terpasang di sekitar *external doubler*. Simbol D_{kanan} dan D_{kiri} menyatakan harga *normalized stress* di tepi lubang, berturut-turut sisi sebelah kanan dan kiri. Harga diperoleh dari perbandingan besar tegangan yang terjadi di tepi lubang terhadap tegangan nominal yang terdapat struktur antenna TCAS. Model 3 sampai dengan model 5 menunjukkan harga *normalized stress* turun di sekitar lubang *external doubler*.

Tabel 7
Harga *normalized stress* pada lubang *ring doubler*

$\frac{\sigma}{\sigma_0}$	Model Struktur								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_{kanan}					0.78	0.86	0.79	0.72	0.79
E_{kiri}					0.79	0.86	0.78	0.72	0.79

Tabel 7 menampilkan harga *normalized stress* pada lubang *ring doubler* dengan simbol E_{kanan} dan E_{kiri} berturut-turut merupakan harga *normalized stress* sisi sebelah kanan dan kiri. Perolehan harga *normalized stress* tersebut merupakan hasil perbandingan tegangan di tepi lubang *ring doubler* terhadap tegangan nominal yang dialami oleh *existing skin*.

Perlu diingat kembali bahwa model 7 dan model 9 dibandingkan pada subbab sebelumnya untuk mengetahui seberapa besar pengaruh parameter diameter paku keling yang terpasang antara *external doubler* dengan *existing skin*. Harga *normalized stress* di sekitar lubang *ring doubler* menunjukkan bahwa penambahan diameter paku keling cenderung sama antara model 7 dan model 9. Perilaku *normalized stress* yang sama juga ditunjukkan oleh keduanya di tepi lubang *external doubler*.

Tabel 8
Harga *normalized stress* pada lubang *adaptor*

$\frac{\sigma}{\sigma_0}$	Model Struktur								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F_{atas}						0.11	0.10	0.10	0.10
F_{bawah}						0.10	0.10	0.09	0.09

Tabel 8 menampilkan harga *normalized stress* pada lubang *adaptor* di sisi atas dan bawah. Perbandingan antara tegangan di kedua sisi terhadap tegangan nominal menghasilkan harga *normalized stress* di tepi lubang *adaptor*. Harga rata-rata yang relatif kecil menunjukkan bahwa *adaptor* memiliki fungsi utama sebagai lokasi dipasangnya komponen antenna TCAS dan mengindikasikan sebagai struktur yang mengokohkan lubang *external doubler* di urutan terbawah.

KESIMPULAN

Pemasangan struktur antenna TCAS yang dilakukan pada pesawat Boeing 737-200 dalam pemodelan elemen hingga menunjukkan kesamaan pola distribusi beban pada seperempat bagian struktur pelat penambal, dalam hal ini berupa *external doubler*. Besar resultan beban maksimum diterima oleh paku keling nomor 114, model struktur 8 sebesar 669.91 N. Batas aman yang masih diterima paku keling sebesar 940 N. Hasil analisis distribusi beban dan perhitungan beban paku keling yang diijinkan berdasarkan data literatur memberikan simpulan bahwa paku keling aman digunakan.

Perbedaan jari-jari sudut yang dibulatkan pada tepi lubang *existing skin* berpengaruh terhadap harga *normalized stress* di masing-masing tepi lubang. Jari-jari tepi lubang *existing skin* yang berada di BS 297.77 berharga dua kali lebih besar dari jari-jari tepi lubang di BS 312.71. Hasil analisis diperoleh simpulan bahwa jari-jari tepi lubang lebih besar memiliki harga *normalized stress* yang lebih kecil.

Parameter variasi tebal pelat *external doubler* dan variasi paku keling mempengaruhi harga *normalized stress*. Pelat penambal semakin tebal dan diameter paku keling semakin besar, mampu mengurangi harga *normalized stress*.

Adanya *ring doubler* dalam pemasangan struktur akan mempengaruhi harga *normalized stress* di tepi lubang *external doubler*. Apabila *ring doubler* divariasikan dengan ukuran lebih tebal, harga *normalized stress* semakin menurun di tepi lubang *external doubler*.

DAFTAR PUSTAKA

1. U.S. CONGRESS, OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT, "Safer Skies with TCAS: Traffic Alert and Collision Avoidance System-A Special Report, OTA-SET-431", U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1989.
2. DAHLAN, RUSDI, "Desain Perbaikan Struktur Berdasarkan Analisis Statik, Melalui Pemodelan Analitik, Perhitungan Numerik, dan Verifikasi Pengujian", Tesis Magister, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung, 2000.
3. PETERSON, R.E., "Stress Concentration Factors", John Wiley & Sons, New York, 1974.
4. AMIRFAZLI, A., "Stress Concentration Around a Circular Hole-Handout.pdf", Feb.2009.
5. SPOTTS, M.F., "Design of Machine Elements", Prentice Hall, New Jersey, 1985.
6. NIU, MICHAEL C.Y., "Airframe Structural Design-Practical Design Information and Data on Aircraft Structures", Conlmit Press Ltd., 1991.
7. RACHMANDINI, YANTI, "Analisis Penambalan Lubang Segiempat pada Struktur Pelat Berpenguat dengan Menggunakan Sambungan Paku Keling", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Penerbangan, Institut Teknologi Bandung, 2001.
8. SANDERSON, JEPPEPERSON, "A & P Technician Airframe Textbook", Printed in USA, 2003.
9. HUTAPEA, BOYKE, "Analisa Perbaikan Struktur Retak dengan Material Glare 3 dan Teknik Perekatan Memakai Metoda Numerik dan Verifikasi Pengujian", Tesis Magister, Jurusan Teknik Penerbangan, Institut Teknologi Bandung, 2001.
10. FAA, Department of Transportation, "Advisory Circular (AC) No:43.13-1A and 2A", Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1972.
11. CHEN, CHUN, "RAPIDC 2.0-Repair Assessment Procedure and Integrated Design for Commuters", U.S.A., 2004.
12. KUNTJORO, WAHYU, "An Introduction to the Finite Element Method", McGraw-Hill Education, Singapore, 2005.
13. KNIGHT, CHARLES E., "The Finite Element Method in Mechanical Design", PWS-KENT Publishing Company, Boston, 1993.
14. CRAIG, ROY R. JR "Mechanics of Materials", John Wiley & Sons Inc., U.S.A., 1996.
15. IRYANI, LENNY, "Faktor Konsentrasi Tegangan Pelat Berlubang dengan Pelat Penambal", Tesis Magister, Jurusan Teknik Penerbangan, Institut Teknologi Bandung, 2002.
16. FREDELL, ROBERT S., "Damage Tolerant Repair Techniques for Pressurized Aircraft Fuselages", California, 1994.
17. BRUHN, E.F., "ANALYSIS and Design of Flight Vehicle Structures", U.S.A., 1965.
18. MEKA, UDAY S., "Finite Element and Analytical Models for Load Transfer Calculations for Structures Utilizing Metal and Composites with Large CTE Differences", Thesis, Madras University, India, 2004.
19. MAHARDIKA, MADE, "On the Analysis of Riveted Repair Patches", Ph.D Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 1999.
20. STRUCTURAL REPAIR MANUAL OF BOEING 737-200.