



Analisa Pemandangan Beban pada Paku Keling dengan Menggunakan Metoda Boeing

(Load Transfer Analysis on Rivets using Boeing Method)

Rudy Nursofjan

Program Studi Aeronautika Pertahanan, Akademi Angkatan Udara
nursofjanrudy@gmail.com

Abstrak— *Dewasa ini banyak sekali cara yang dapat dilakukan untuk menyambung atau menggabungkan dua material, dimana salah satu metoda untuk penyambungan ini dapat menggunakan paku keling. Penyambungan dengan menggunakan paku keling sering dijumpai pada struktur jembatan, kapal laut dan paling banyak digunakan adalah pada struktur pesawat terbang. Sebagai penyambung, paku keling berfungsi untuk memindahkan beban dari suatu bagian struktur ke bagian struktur lain. Jika jumlah baris paku keling yang digunakan cukup banyak, asumsi distribusi beban pada paku keling biasanya dianggap sama (seragam), walaupun hal ini tidak dapat dibenarkan. Oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan untuk menentukan seberapa besar beban yang di terima oleh setiap paku keling dan menentukan baris paku keling yang paling kritis. Beban yang dipindahkan melalui paku keling tergantung pada kekakuan paku keling. Semakin besar harga kekakuan paku keling, beban yang dapat dipindahkan melalui paku keling akan semakin besar. Harga kekakuan paku keling berbanding terbalik dengan harga fleksibilitas paku keling, besar fleksibilitas yang digunakan dihitung menggunakan persamaan Boeing. Perhitungan yang dilakukan menggunakan metode elemen hingga yang disertai dengan beberapa contoh konfigurasi sambungan pada pelat.*

Kata Kunci— **Pemindahan Beban, Paku Keling, Metoda Boeing**

I. PENDAHULUAN

Pesawat terbang merupakan salah satu sarana transportasi yang banyak diminati oleh pengguna jasa angkutan karena memiliki kecepatan yang tinggi untuk mencapai suatu tujuan. Pesawat terbang di desain agar mampu memberikan kenyamanan dan keamanan terhadap personel dan barang maupun terhadap perlengkapan yang berada di pesawat serta keamanan terhadap lingkungan. Sebagai alat transportasi yang mobilitasnya sangat tinggi, maka pesawat terbang akan sangat kritis terhadap terjadinya kerusakan. kerusakan yang timbul pada pesawat terbang salah satunya adalah kerusakan pada struktur pesawat. kerusakan yang terjadi pada struktur pesawat dapat dikategorikan sebagai:

- kerusakan yang dapat dibiarkan, karena setelah dianalisis kerusakan yang terjadi tidak akan mempengaruhi distribusi beban pada struktur pesawat secara keseluruhan.
- kerusakan yang tidak dapat diperbaiki (no repairable)
- kerusakan yang dapat diperbaiki (repairable)

Pada struktur yang tidak dapat diperbaiki, apabila ditemukan adanya cacat meskipun kecil, maka komponen tersebut harus diganti atau diperbaiki dengan komponen baru (yang tidak mengandung cacat). Komponen-komponen yang termasuk kedalam kategori ini adalah komponen dengan tegangan yang bekerja sangat tinggi sehingga apabila terdapat cacat dengan ukuran kecil besarnya fracture toughness yang dimiliki oleh komponen tersebut akan terlampaui, sehingga komponen ini sangat kritis terhadap adanya cacat. Salah satu contoh komponen yang tidak dapat diperbaiki adalah landing gear pesawat terbang.

Sedangkan pada struktur yang mengalami kerusakan dan dapat diperbaiki, perbaikan dapat dilakukan dengan cara menambal bagian yang rusak. Pemasangan material penambal pada struktur pesawat dapat dilakukan dengan sambungan rekat (*bonding*) atau dengan menggunakan paku keling (*rivet*). Sambungan rekat tidak banyak dipakai pada perbaikan struktur karena biaya yang dikeluarkan sangat mahal dan memerlukan proses yang rumit, sehingga tidak terlalu disukai oleh operator pesawat. Teknik penyambungan menggunakan paku keling sampai saat ini merupakan salah satu cara penyambungan yang banyak dipakai pada struktur pesawat, karena mempunyai keuntungan sebagai berikut:

- Menggunakan cara konvensional untuk pemasangan paku keling.
- Mudah dalam pemasangan dan pelepasan.
- Biaya untuk produksi lebih murah.
- Mudah untuk diakan inspeksi.

Selain keuntungan yang dimiliki, maka penyambungan menggunakan paku keling juga mempunyai kerugian sebagai berikut:

- Lubang untuk pemasangan paku keling akan menyebabkan konsentrasi tegangan disekitar lubang.
- Lubang paku keling akan menurunkan kekuatan pelat.
- Berat pesawat akan bertambah yang disebabkan penggunaan paku keling.

II. LANDASAN TEORI

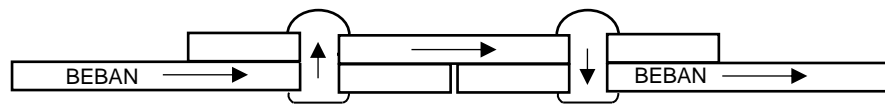
Struktur pesawat terbang yang ideal adalah satu unit struktur pesawat yang lengkap dan terbuat dari material yang sama, tetapi pada kenyataannya struktur yang demikian akan sangat sulit diperoleh. Struktur pesawat terbang terdiri dari banyak komponen yang terbuat dari bermacam-macam material, dimana untuk mengintegrasikan satu komponen dengan komponen lain diperlukan suatu sistem penyambungan.

Banyak cara yang dapat dilakukan untuk mengintegrasikan struktur menjadi satu kesatuan yang utuh, diantaranya dengan menggunakan *adhesive bonding*, menggunakan *bolt* atau dengan menggunakan paku keling (*rivets*). Pada keseluruhan struktur pesawat terbang, paku keling merupakan komponen yang paling banyak digunakan untuk menyambung (*joining*), karena paku keling mempunyai keuntungan diantaranya produksi paku keling dapat dilakukan secara otomatis sehingga dapat menekan biaya produksi, material dari jenis dan ketebalan berbeda dapat digabungkan, komponen yang dilapisi dengan cat maupun dengan pelapis lain dapat digabungkan dengan menggunakan paku keling, alat bantu yang digunakan untuk pemasangan paku keling merupakan peralatan konvensional.

Selain keuntungan yang dimiliki, sambungan paku keling juga memiliki beberapa kerugian diantaranya kekuatan tarik dan ketahanan *fatigue* lebih rendah bila dibandingkan dengan penggunaan *bolt* atau *screw*, komponen yang disambung menggunakan paku keling tidak dapat diperbaiki tanpa merusak paku keling, lubang paku keling akan menimbulkan konsentrasi tegangan serta dapat menjadi sumber awal terjadinya korosi.

A. Sambungan Paku Keling

Prinsip dasar penyambungan adalah menggabungkan dua material sehingga dihasilkan satu komponen utuh. Apabila pada komponen tersebut terjadi kerusakan, maka prinsip dasar penyambungan atau perbaikan pada daerah/area yang rusak dengan menggunakan paku keling adalah untuk mengembalikan kekuatan komponen ke kekuatan sebelum terjadinya kerusakan. Apabila tidak ada kerusakan, maka paku keling berfungsi untuk memindahkan sebagian beban pada pelat utama ke pelat penambal. Pada pelat utama yang mengalami kerusakan, paku keling digunakan untuk memindahkan beban agar tidak melewati daerah/area yang rusak ke pelat penambal, kemudian memindahkan beban tersebut ke pelat utama jika telah melewati daerah/area yang rusak [2].

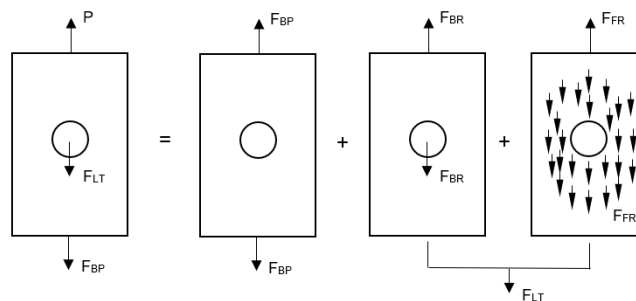


Gambar 1. Perpindahan beban pada paku keling [2]

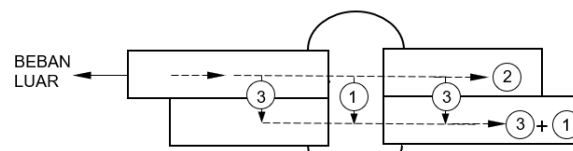
Pada sambungan susun dengan paku keling tunggal, gaya-gaya yang bekerja pada sambungan tersebut terdiri dari:

- Gaya yang dilewatkan (*by passing force*), F_{BP}
- Gaya gesek (*friction force*), F_{FR}
- Gaya dukung (*bearing force*), F_{BR}

Gaya dukung dan gaya gesek antar pelat bila dijumlahkan merupakan gaya total yang dipindahkan melalui paku keling (F_{LT}). Gaya-gaya tersebut dapat dilihat pada gambar 2 [6] dan 3 [4].



Gambar 2. Beban pada paku keling [6]



Gambar 3. Aliran beban pada paku keling [4]

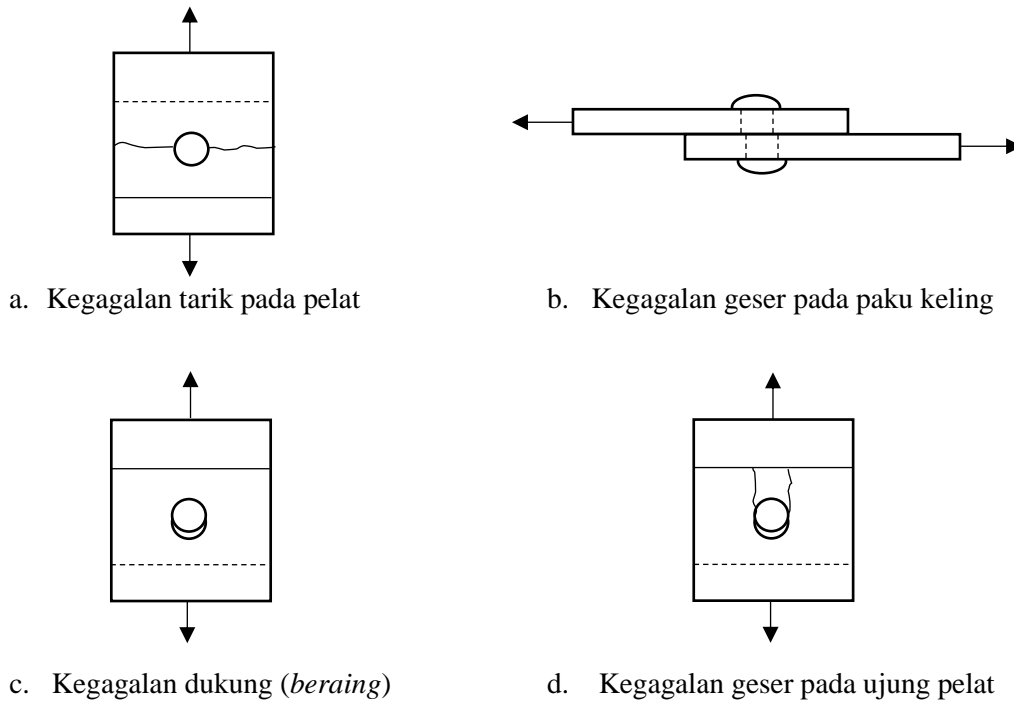
Pada gambar diatas, ditunjukkan aliran beban yang melalui paku keling dengan :

1. Gaya dukung
2. Gaya yang diteruskan
3. Gaya gesek

Perhitungan untuk menentukan besarnya gaya gesek sangat sulit untuk dilakukan. Besarnya gaya gesek diantara dua permukaan pelat tergantung pada kekasaran permukaan dan gaya jepit (*clamping force*) paku keling. Pengaruh gaya gesek ini akan menjadi besar jika gaya jepit besar, dan pada perhitungan pemindahan beban pada paku keling biasanya gaya gesek ini di abaikan.

Daerah sambungan merupakan sumber utama terjadinya kegagalan pada struktur. Kegagalan dapat terjadi karena bermacam-macam alasan yang disebabkan oleh banyak faktor, dimana keseluruhan faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan akan sangat sulit untuk ditentukan

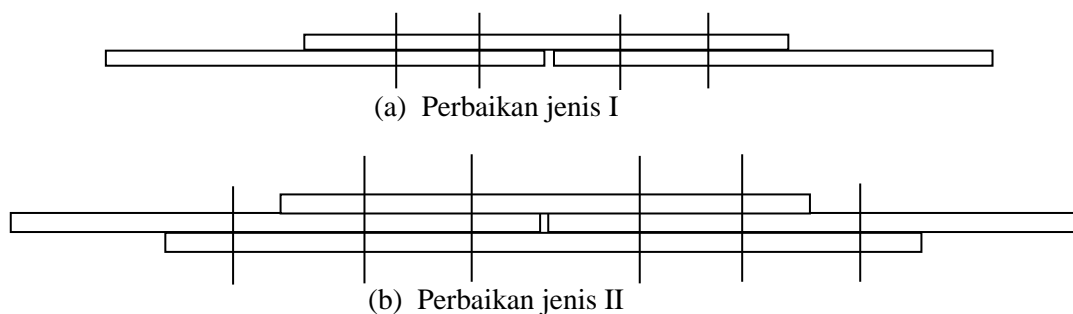
sampai dengan tingkat tertentu. Faktor-faktor ini tidak hanya mempengaruhi terhadap kekuatan static dan kekakuan, tetapi juga berpengaruh besar terhadap usia *fatigue* sambungan dan struktur secara keseluruhan. Secara umum kegagalan yang terjadi akan mengikuti salah satu modus berikut [3]:



Gambar 4. Beberapa kemungkinan modus kegagalan [3]

B. Macam-Macam Perbaikan Struktur Pelat

Perbaikan struktur yang dilakukan bertujuan untuk memperbaiki struktur yang rusak dan mengembalikan kekuatan struktur ke kekuatan sebelum terjadinya kerusakan. Secara umum bentuk perbaikan yang sering dipakai pada pelat logam seperti terlihat pada gambar 5 [5].



Gambar 5. Beberapa jenis perbaikan struktur [5]

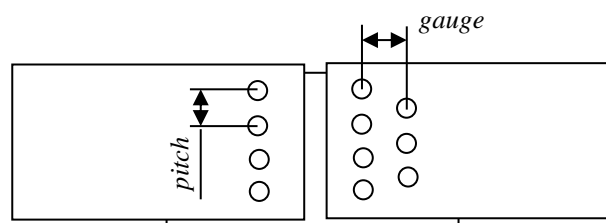
Pemilihan jenis material dan tipe perbaikan yang akan dipakai tergantung pada kebutuhan dan lokasi kerusakan, tetapi jenis perbaikan yang harus dilaksanakan oleh operator biasanya sudah terdapat pada *Structural Repair Manual* yang menyertai pesawat, sehingga operator tinggal

melaksanakan perbaikan dengan prosedur pelaksanaan sesuai dengan petunjuk yang terdapat didalam *Structural Repair Manual* tersebut.

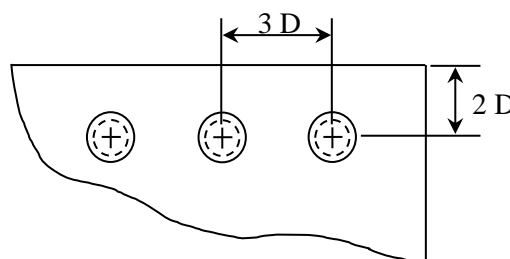
C. Garis-Garis Besar Desain Perbaikan

Garis besar desain perbaikan struktur telah ditentukan oleh *Federal Aviation Administration* (FAA) pemerintah Amerika Serikat pada publikasi AC 43.13-1A dan 2A, secara garis besar berisi sebagai berikut [2]:

- **Penggantian Paku Keling.** Dalam penggantian paku keling, ukuran semula sebaiknya digunakan jika ukuran diameter tersebut sesuai dengan lubang. Jika tidak, lubang sebaiknya diperbesar keukuran diameter yang lebih besar. Harus diperhatikan pada saat memperbesar lubang paku keling, kriteria jarak minimum antar paku keling dan jarak minimum paku keling terluar terhadap ujung pelat harus dipenuhi.
- **Diameter Paku Keling.** Diamater paku keling biasanya diambil kira-kira tiga kali tebal pelat yang terberat atau tiga kali pelat yang terluas untuk pelat tipis.
- **Jarak Antar Paku Keling.** Jarak antar paku keling dalam satu baris disebut *Pitch*, dan jarak antar baris paku keling disebut *Gauge* (gambar 6). Jarak antara dua paku keling dihitung dari center kepala paku keling ke center kepala paku keling yang lain. *Edge Distance* (jarak paku keling ke tepi pelat) adalah jarak dari center kepala paku keling ke tepi pelat (gambar 7). Harus diperhatikan bahwa paku keling yang berada pada bagian ujung baris harus memenuhi kondisi jarak pada dua arah. Jarak minimum antar paku keling telah ditentukan oleh FAA didalam AC 43.13-1A dan 2A adalah tiga kali diameter paku keling, sedangkan untuk paku keling berbentuk *countersunk* maka jarak minimum antar paku keling adalah tiga kali diameter *shank* (kepala paku keling). Kecuali untuk penggunaan dua baris paku keling, jarak minimum paku keling ke tepi pelat adalah dua kali diameter paku keling (gambar 7). Walaupun jarak minimum paku keling ke tepi pelat telah ditentukan sebesar dua kali diameter paku keling, tetapi sebaiknya jarak ke tepi pelat tidak kurang dari dua setengah kali diameter kepala paku keling untuk paku keling jenis *countersunk*.



Gambar 6. *Pitch* dan *Gauge* [2]



Gambar 7. Jarak minimum paku keeling [2]

- **Lebar Pelat Perbaikan.** Lebar pelat perbaikan sebaiknya dua kali lebar daerah yang rusak.

D. Pertimbangan-Pertimbangan Perbaikan Struktur Secara Umum.

Pertimbangan-pertimbangan perbaikan struktur secara umum yang banyak digunakan untuk mendesain struktur perbaikan sebagai berikut [2]:

- Apabila kerusakan pada struktur akibat retak, maka untuk menghentikan perambatan retak, pada bagian ujung retak di bor.
- Konsentrasi tegangan dapat diperkecil dengan cara menumpulkan bagian sudut pelat.
- Tebal pelat penambal (*patch*) minimal sama dengan tebal pelat utama.
- Susunan paku keling di desain sedemikian rupa sehingga baris paku keling akan sejajar dengan retak dan tegak lurus terhadap beban yang bekerja. Beban pada struktur yang bekerja pada paku keling diasumsikan sebagai satu beban (*single load*), walaupun beban sebenarnya lebih dari satu. Arah retak dapat digunakan untuk memperkirakan arah beban yang bekerja. Arah beban yang bekerja diasumsikan tegak lurus terhadap garis yang di tarik dari kedua ujung retak. Jika retak tidak membentuk suatu garis lurus, lebih dari satu arah beban digunakan.
- Jarak antar paku keling sama dalam semua arah sehingga tidak terjadi konsentrasi beban.
- Lebar material perbaikan harus lebih besar dari lebar kerusakan, sehingga tidak ada beban yang besar bekerja pada ujung retak.
- Struktur perbaikan harus mampu diperbaiki ulang.

III. PEMINDAHAN BEBAN PADA SAMBUNGAN PAKU KELING

A. Fleksibilitas Paku Keling

Fleksibilitas paku keling didefinisikan sebagai perpanjangan (*elongation*) yang terjadi pada paku keling (batang) akibat satu satuan gaya bekerja pada paku keling (batang tersebut). Besarnya harga kekakuan paku keling merupakan kebalikan dari harga fleksibilitasnya, sehingga dalam menentukan harga kekakuan paku keling cukup dengan menghitung besar fleksibilitas paku keling. Beberapa persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung fleksibilitas paku keling sebagai berikut [2]:

- Boeing

$$f = \left(\frac{2\left(\frac{t_1}{D_0}\right)^{0.85}}{t_1} + \frac{2\left(\frac{t_2}{D_0}\right)^{0.85}}{t_2} \right) \left(\frac{11}{8E_f} \right) \quad (1)$$

- Helmo Huth

$$f = \frac{1.1}{E_f} \left(\frac{4}{t_1} + \frac{3}{t_2} \right) \left(\frac{t_1+t_2}{2D_0} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2)$$

- Tate dan Rosenfield

$$f = \frac{2}{t_1 E_f} + \frac{2}{t_2 E_f} + \frac{32(t_1+t_2)(1+\nu)}{9E_f \pi D_0^2} + \frac{8(t_2^3+5t_2^2 t_1+5t_2 t_1^2+t_1^3)}{5E_f \pi D_0^2} \quad (3)$$

- Swift (Douglas)

$$f = \frac{1}{E_f D_0} \left[5.0 + \frac{4}{5} \left(\frac{D_0}{t_1} + \frac{D_0}{t_2} \right) \right] \quad (4)$$

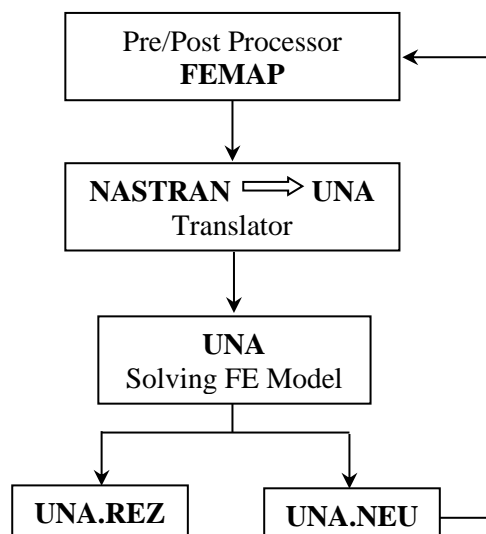
Pada kasus yang dibahas, besarnya fleksibilitas paku keling dihitung dengan menggunakan persamaan Boeing (1), dimana:

f	: Fleksibilitas paku keling
t_1	:Tebal pelat penambal
t_2	: Tebal pelat utama
D_0	: Diameter paku keling
E_f	: Modulus elastisitas bahan paku keling

Dari persamaan tersebut diatas terlihat bahwa besarnya harga fleksibilitas paku keling tergantung pada ketebalan pelat, diameter dan modulus elakstisitas paku keling.

B. Pemodelan Sambungan Paku Keling

Pelat pada pemodelan elemen hingga dimodelkan sebagai membran (*membrane*) dengan jenis elemen kaudratik. Paku keling dimodelkan sebagai pegas geser (*dof spring*) sehingga dianggap pegas hanya dapat berdeformasi dalam arah x dan y. Perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisa besarnya pemindahan beban menggunakan UNA 52 dan pemodelan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak FEMAP. Langkah-langkah yang dilakukan dimulai dengan membuat model sambungan paku keling sampai dengan hasil perhitungan distribusi beban, seperti pada gambar 8 berikut [8]:



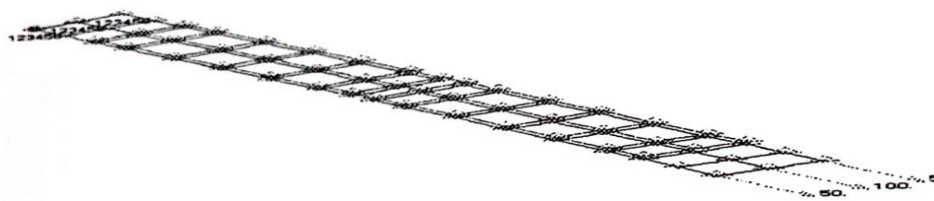
Gambar 8. Langkah-langkah Analisa model elemen hingga

Asumsi-Asumsi yang dilakukan pada pemodelan elemen hingga ini sebagai berikut:

- Nodal-nodal pada setiap elemen pelat diposisikan berada digaris tengah pelat, dan diletakkan pada sumbu netral pelat sehingga panjang paku keling sama dengan tebal pelat.
- Paku keling dimodelkan sebagai pegas geser (*dof spring*), sehingga harga fleksibilitas paku keling dijadikan input dalam bentuk harga kekakuan paku keling, yang diberikan dalam dua arah x dan y. Besarnya harga fleksibilitas paku keling diperoleh dengan menggunakan persamaan Boeing.
- Lubang paku keling tidak dimodelkan sehingga tidak dapat dihitung besar konsentrasi tegangan akibat lubang.

- Gesekan pada permukaan pelat yang bersinggungan tidak dimodelkan.

Pemodelan paku keling dengan menggunakan metode elemen hingga ini masih memperlihatkan kekurangan-kekurangan, seperti tidak diperhitungkannya pengaruh gaya jepit (*clamping force*) yang dihasilkan oleh paku keling dan tidak diperhitungkannya pengaruh daerah yang bersinggungan antara paku kelung dan pelat. Tetapi hasil yang diperoleh masih dapat digunakan untuk mengindikasikan perilaku perpindahan beban pada sambungan paku keling. Gambar 9 menunjukkan model sambungan paku keling yang diberikan perangkat lunak FEMAP.



Gambar 9. Model sambungan tipe I dengan sepuluh paku keling

IV. HASIL/IMPLEMENTASI MODEL DAN PEMBAHASAN

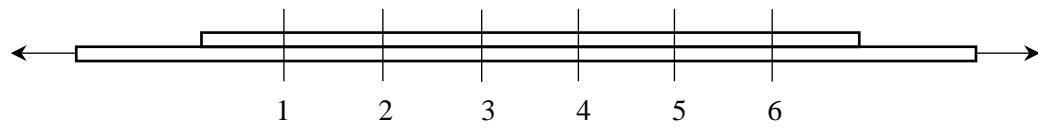
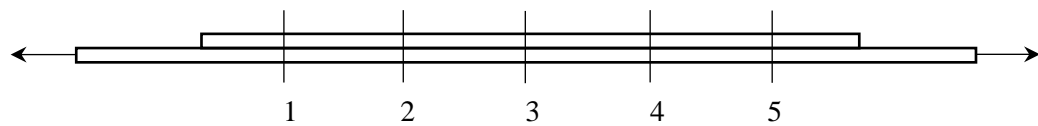
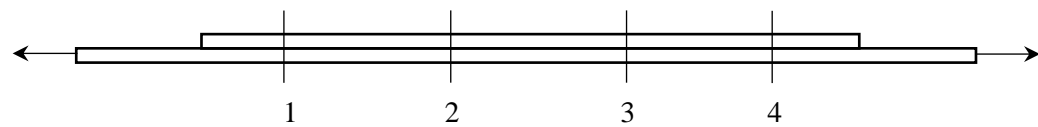
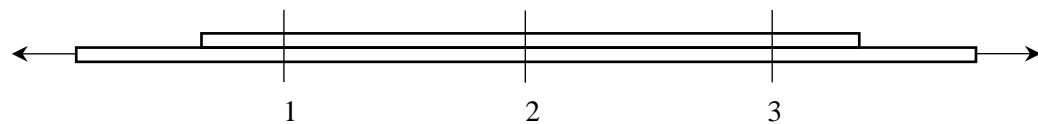
Pada bagian hasil/implementasi model dan pembahasan ini akan diperlihatkan distribusi beban yang terjadi pada paku keling yang dihitung menggunakan elemen hingga, pada daerah yang ditambah dengan menggunakan perbaikan tipe I. Analisa ini dimaksudkan untuk memperlihatkan kecenderungan distribusi beban yang terjadi pada paku keling sehingga dapat dijadikan sebagai acuan untuk menentukan paku keling yang paling kritis terhadap kegagalan.

A. Distribusi Beban Pada Paku Keling

1. Doubler

Pada konfigurasi ini akan dilihat kecenderungan distribusi beban pada paku keling, dimana pada pelat utama tidak terdapat kerusakan. Jumlah paku keling yang digunakan bervariasi mulai dari enam sampai tiga buah paku keling dan geometri pelat untuk setiap jumlah paku keling yang digunakan adalah sama (lihat gambar 10). Data-data yang digunakan pada konfigurasi ini sebagai berikut:

- Material pelat dan paku keling adalah Al-2024T3 dengan modulus elastisitas 72.000 MPa.
- Tebal pelat utama dan doubler sama yaitu 1,2 mm
- Diameter paku keling adalah tiga kali tebal pelat yaitu 3,6 mm.
- Fleksibilitas paku keling yang diperoleh dengan menggunakan persamaan Boeing sebesar $2.5E-05$ mm.N,
- Kekakuan paku keling $k = 39.967,24$ MPa.mm
- Beban luar yang digunakan sebesar 200 N

(a) *Doubler* dengan 6 paku keling(b) *Doubler* dengan 5 paku keling(c) *Doubler* dengan 4 paku keling(d) *Doubler* dengan 3 paku kelingGambar 10. *Doubler* dengan jumlah paku keling berbeda

Hasil yang diperoleh dari perhitungan menggunakan metoda elemen hingga dapat dilihat pada table 1 berikut:

No Paku Keling	Posisi Paku Keling (mm)	Beban	
		(N)	%
1	21.6	47.59	23.80
2	32.4	23.28	11.64
3	43.2	6.50	3.25
4	54	6.50	3.25
5	64.8	23.30	11.65
6	75.6	47.57	23.79

(a) Enam paku keling

No Paku Keling	Posisi Paku Keling (mm)	Beban	
		(N)	%
1	21.6	50.26	25.13
2	35.1	22.00	11.00
3	48.6	0.00	0.00
4	62.1	22.02	11.01
5	75.6	50.24	25.12

(b) Lima paku keling

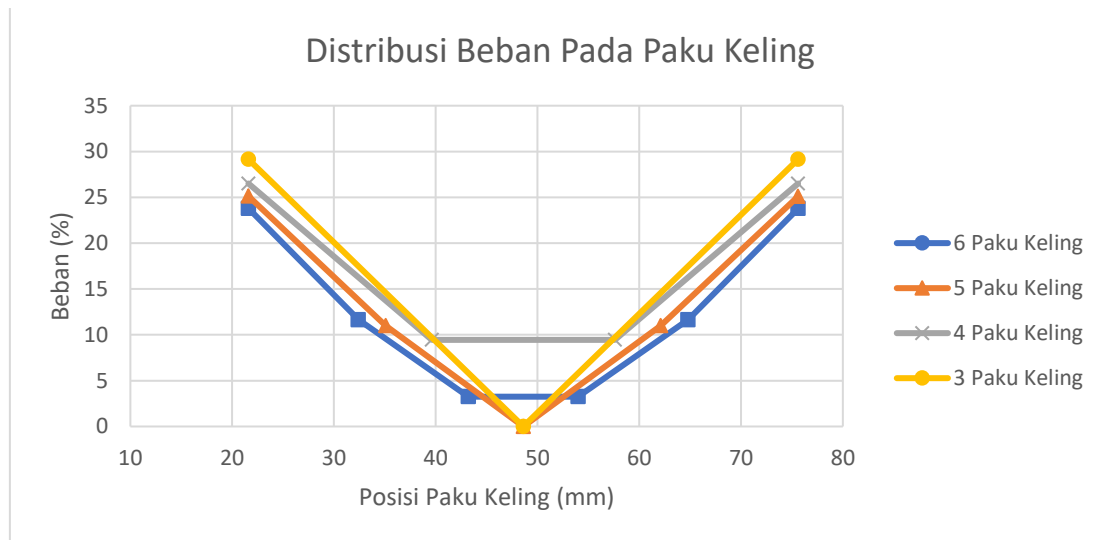
No Paku Keling	Posisi Paku Keling (mm)	Beban	
		(N)	%
1	21.6	53.02	26.51
2	39.6	18.89	9.45
3	57.6	18.90	9.45
4	75.6	53.01	26.51

(c) Empat paku keling

No Paku Keling	Posisi Paku Keling (mm)	Beban	
		(N)	%
1	21.6	58.30	29.15
2	48.6	0.00	0.00
3	75.6	58.30	29.15

(d) Tiga paku keling

Tabel 1. Persentase beban yang dipindahkan ke doubler melalui paku keling



Gambar 11. Distribusi Beban Pada Paku Keling

Dari data yang tercantum pada table 1, memperlihatkan besar beban yang dipindahkan oleh paku keling ke *doubler* tidak 100%, karena pelat utama tidak terputus (tidak terdapat kerusakan), sehingga beban yang mengalir hanya sebagian yang dipindahkan ke pelat penambal, dan sebagian beban akan diteruskan (*by passing force*). Fungsi pelat penambal (*doubler*) yaitu untuk memindahkan (mengurangi) sebagian beban pada pelat utama, sehingga beban yang melalui pelat utama berkurang.

Dari gambar 11 diatas terlihat bahwa banyaknya paku keling yang digunakan tidak menunjukkan pengurangan beban yang berarti pada paku keling terluar. Banyaknya paku keling yang digunakan hanya berpengaruh terhadap banyaknya beban dari pelat utama yang dapat dipindahkan ke *doubler*. Konfigurasi pada gambar 10 mempunyai bentuk yang simetris dan aliran beban pada *doubler* terjadi dalam dua arah, sehingga penggunaan paku keling dengan jumlah ganjil akan menyebabkan beban pada paku keling yang berada ditengah sama dengan nol, sehingga paku keling ini dapat dilepas/tidak dipasang jika ternyata paku keling ini tidak mempengaruhi kekuatan struktur.

2. Distribusi Beban pada paku keling untuk jenis perbaikan Tipe I

Salah satu jenis perbaikan yang paling banyak di pakai adalah jenis perbaikan tipe I (*butt joint*), karena perbaikan jenis ini merupakan perbaikan yang paling sederhana. Pada bagian ini akan dilihat kecenderungan distribusi beban pada paku keling, apabila jumlah paku keling yang digunakan untuk setiap geometri pelat yang sama, berbeda jumlahnya. Jumlah paku keling yang akan digunakan sebanyak enam, delapan dan sepuluh paku keling dengan material paku keling Al-2024T3, dimana tebal pelat penambal (t_1) dan pelat utama (t_2) adalah sama ($t_1/t_2 = 1$) dengan lebar celah 5mm. Bentuk sambungan *butt joint* dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12. Perbaikan tipe I

Hasil perhitungan dengan menggunakan metoda elemen hingga ditampilkan pada tabel 2 dan gambar 13 dibawah ini,

No Paku Keling	Posisi Paku Keling (mm)	Beban	
		(N)	%
1	21,60	53,80	26,90
2	32,40	33,32	16,66
3	43,20	25,76	12,88
4	54,00	33,32	16,66
5	64,80	58,80	26,90
5	84,20	53,80	26,90
4	95,00	33,32	16,66
3	105,80	25,76	12,88
2	116,60	33,32	16,66
1	127,40	53,80	26,90

(a) Perbaikan tipe I dengan sepuluh paku keling

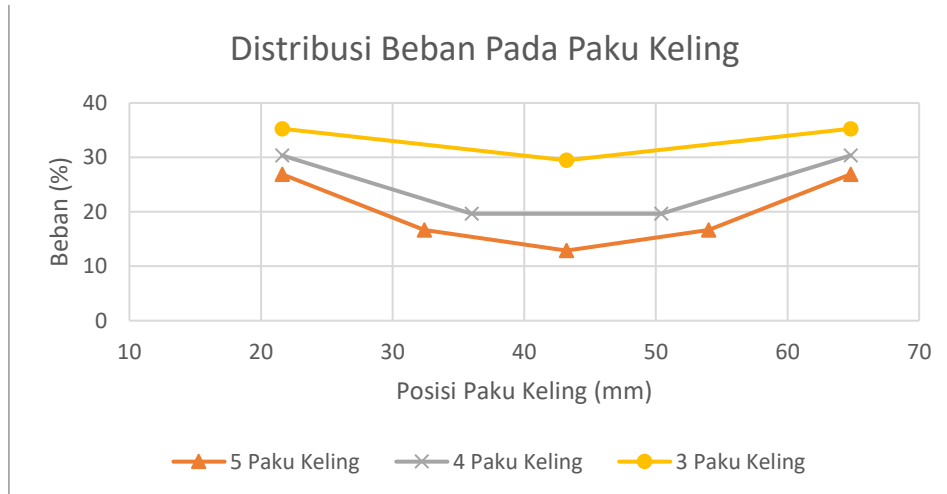
No Paku Keling	Posisi Paku Keling (mm)	Beban	
		(N)	%
1	21,60	60,72	30,36
2	36,00	39,28	19,64
3	50,40	39,28	19,64
4	64,80	60,72	30,36
4	84,20	60,72	30,36
3	98,60	39,28	19,64
2	113,00	39,28	19,64
1	127,4	60,72	30,36

(b) Perbaikan tipe I dengan delapan paku keling

No Paku Keling	Posisi Paku Keling (mm)	Beban	
		(N)	%
1	21,60	70,53	35,27
2	43,20	58,91	29,46
3	64,80	70,53	35,27
3	84,20	70,53	35,27
2	105,80	58,91	29,46
1	127,40	70,53	35,27

(c) Perbaikan tipe I dengan enam paku keling

Tabel 2. Hasil perhitungan elemen hingga



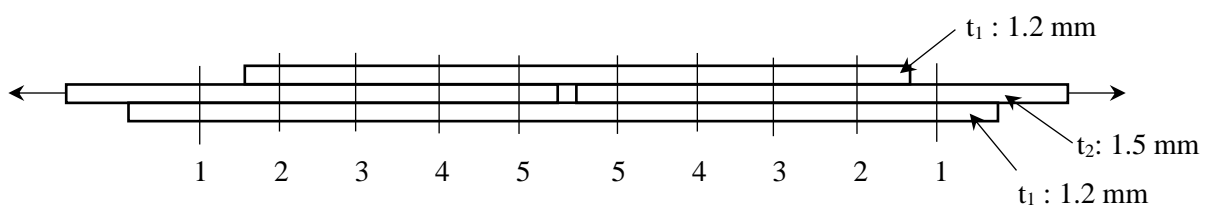
Gambar 13. Kurva distribusi beban pada perbaikan tipe I

Dari hasil yang diperoleh, terlihat bahwa penambahan jumlah paku keling yang digunakan pada geometri pelat yang sama, menghasilkan penurunan beban pada paku keling terluar secara signifikan. Penurunan beban yang dipindahkan melalui paku keling terluar ini akan menyebabkan paku keling tersebut menjadi tidak terlalu kritis terhadap kegagalan atau dengan kata lain menurunkan resiko terjadinya kegagalan pada paku keling terluar. Distribusi beban yang baik adalah distribusi beban dimana selisih beban yang dipindahkan pada setiap paku keling memiliki selisih yang tidak terlalu besar, namun demikian distribusi beban seperti itu akan sulit diperoleh. Distribusi beban yang hamper rata tersebut dapat diperoleh dengan cara memvariasikan kekakuan paku keling atau dengan menggunakan tebal pelat penambal (*doubler*) yang berbeda untuk setiap posisi paku keling. Beban yang bekerja dipindahkan seluruhnya oleh

paku keling ke pelat penambal, sehingga tidak ada beban yang melalui celah pelat, pelat penambal pada konfigurasi ini berfungsi sebagai splice, yaitu pelat yang memindahkan beban yang diberikan.

3. Distribusi Beban pada paku keling untuk jenis perbaikan Tipe II

Pada perbaikan tipe II ini akan dianalisa pemindahan beban yang terjadi pada paku keling apabila jumlah paku keling yang digunakan berbeda pada geometri pelat yang sama. tebal pelat penambal (t_1) sebesar 1.2 mm dan tebal pelat utama (t_2) adalah 1.5 mm dengan material untuk pelat penambal, paku keling maupun pelat utama adalah Al-2024T3, dimana jumlah paku keling yang akan dipakai untuk perbaikan tipe II ini adalah 10 paku keling dengan konfigurasi 4-1 (empat paku keling bagian dalam dan 1 paku keling bagian luar) untuk setengah bagian dari perbaikan tipe II. Selanjutnya hasilnya akan dibandingkan dengan perbaikan tipe I yang memiliki jumlah paku keling sama.

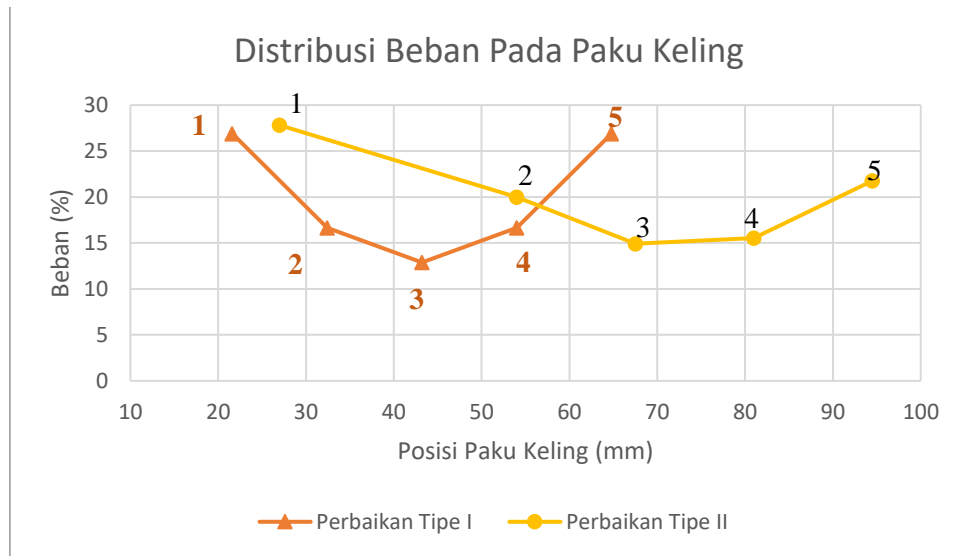


Gambar 14. Perbaikan tipe II konfigurasi 4-1

Hasil perhitungan dengan menggunakan metoda elemen hingga ditampilkan pada tabel 3 dan gambar 15 dibawah ini.

No Paku Keling	Posisi Paku Keling (mm)	Splice Bawah %	Splice Atas %	Total %
1	27,00	27,81		27,81
2	54,00	5,29	14,69	19,98
3	67,50	4,49	10,43	14,92
4	81,00	6,13	9,42	15,55
5	94,50	10,19	11,57	21,76
5	117,50	10,19	11,57	21,76
4	131,00	6,13	9,42	15,55
3	144,50	4,49	10,43	14,92
2	158,00	5,29	14,69	19,98
1	185,00	27,81		27,81

Tabel 3. Hasil perhitungan elemen hingga perbaikan tipe II konfigurasi 4-1



Gambar 15. Kurva distribusi beban pada perbaikan tipe II dibandingkan perbaikan tipe I

Dari hasil yang diperoleh pada perbaikan tipe II dimana celah atau kerusakan dilapisi pelat penambal pada kedua sisi terlihat bahwa paku keling terluang (posisi 1) memindahkan beban paling besar dibandingkan dengan paku keling lainnya. Namun demikian apabila dibandingkan dengan paku keling pada posisi yang sama untuk perbaikan tipe I, besar beban yang dipindahkan tidak jauh berbeda. Secara umum, kecenderungan distribusi beban pada paku keling pada perbaikan tipe II memiliki perbedaan yang tidak terlalu besar dan cenderung hamper terdistribusi secara merata. Tetapi ketika dibandingkan dengan perbaikan tipe I untuk paku keling nomor 2, 3, 4 dan 5 memiliki perbedaan yang cukup besar. Untuk perbaikan tipe II, paku keling kritis terhadap kegagalan terdapat pada paku keling nomor 1, sedangkan pada perbaikan tipe I, paku keling kritis terhadap kegagalan terdapat pada paku keling nomor 1 dan 5. Meskipun perbaikan tipe II memiliki distribusi beban pada paku keling mendekati rata, kemudahan pemasangan pelat penambal akan menjadi salah satu pertimbangan penggunaan perbaikan tipe II.

V. KESIMPULAN

Dari hasil Analisa pemindahan beban yang terjadi pada paku keling untuk perbaikan konfigurasi sambungan tunggal, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Besarnya distribusi beban pada paku keling tergantung pada kekakuan paku keling dan banyaknya paku keling yang digunakan pada suatu geometri tertentu.
- Selisih besarnya distribusi beban pada paku keling dapat dikurangi dengan memvariasikan kekakuan paku keling yang dipakai atau mengubah ketebalan pelat untuk setiap paku keling.
- Posisi paku keling akan mempengaruhi besar beban yang dipindahkan.
- Perbaikan struktur tipe II memberikan hasil distribusi relative lebih merata ke semua paku keling, namun demikian apabila perbaikan tipe II akan di aplikasikan di struktur pesawat terbang, tidak semua bagian dari pesawat dapat diperbaiki dengan menggunakan perbaikan tipe II.

Dalam rangka kelanjutan penelitian ini, disarankan Analisa pemindahan beban pada paku keling selanjutnya dengan menggunakan metoda yang berbeda terhadap beberapa konfigurasi perbaikan struktur.

REFERENSI

- [1] Niu, Michael Chun-Yung, *Airframe Structural Design*, Lockheed Aeronautical System Company, Burbank, California, USA, Conmilit Press Ltd, 1993.
 - [2] Kroes, Michael J. et. Al., *Aircraft Maintenance & Repair*. 6th edition, McGraw Hill Book Co., Singapore, 1993..
 - [3] Hutapea, Boyke, *Distribusi Gaya-Gaya Sambungan Paku Keling Pada Pelat Yang mengalami Beban Aksial Dengan Metoda Finite Eleman*, Tugas Akhir S-1, Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, 1991 .
 - [4] Gunawan, Fergyanto Efendy, *Analisis Sambungan Paku Keling, Rekat, Dan Penambalan Retak Secara Analitik, Numerik Dan Eksperimental*, Tesis Magister, Teknik Mesin, Fakultas Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung, 1998.
 - [5] Dahlan, Rusdi, *Desain Perbaikan Struktur Berdasarkan Analisis Statik Melalui Pemodelan Analitik Perhitungan Numerik dan Verivikasi Pengujian*, Tesis Magister, Program Studi Teknik Sistem Mekanika, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung, 2000.
 - [6] Modul Praktikum Teknik Uji Struktur, Jurusan Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.
 - [7] Suprayogi, *Distribusi Beban Pada Paku Keling Dengan Menggunakan Metoda Helmo Huth*, Rugas Akhir S-1, Jurusan Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, 2001.
 - [8] T Rudic, Zoran, *Una Computer Program For Static And Dynamic Structural Analysis By Finite Element Method, User & Verification Manual*, Bandung, 1995.
-