

Peran stop-drilling dalam menurunkan konsentrasi tegangan crack-tip material aluminium 2024-T3 (The Role Of Stop-Drilling In Reducing Crack Tip Stress Concentration In Aluminium 2024-T3)

Elisabeth Anna Prattiwi¹, Irfan Wibowo^{1,*}, Fajar Nugroho², Dwi Hartini¹, Djarot Wahyu Santoso¹

^{1,3}Department of Aerospace Engineering, ITD Adisutjipto, Indonesia

²Department of Mechanical Engineering, ITD Adisutjipto, Indonesia

Article Info

Article history:

Received September 26, 2024

Accepted November 11, 2024

Published November 30, 2024

Keywords:

Konsentrasi Tegangan
Aluminium 2024-T3
Stop Drilling
Pengujian Tarik
Finite Element Analysis (FEA)

ABSTRACT/ABSTRAK

Dalam penelitian ini membahas pengaruh metode *stop-drilling* terhadap konsentrasi tegangan pada *crack tip* struktur pesawat terbang menggunakan material aluminium 2024-T3 pada *skin aileron* Cessna-150 dengan mengasumsikan dengan bentuk spesimen bersegi panjang. Metode *stop-drilling* adalah teknik perbaikan yang digunakan untuk mengurangi perambatan crack pada struktur pesawat. Analisis yang digunakan pada penelitian ini menggunakan analisis numerik yaitu *Finite Element Analysis* (FEA) dilakukan untuk menentukan hasil Von-Mises *stress* pada spesimen untuk mengetahui konsentrasi tegangan pada *crack tip*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa diameter lubang 3,454 mm menghasilkan konsentrasi tegangan terendah dengan nilai 18,1, sedangkan diameter lubang 3,048 mm menghasilkan konsentrasi tegangan tertinggi dengan nilai 19,0. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panjang crack 50,8 mm menghasilkan konsentrasi tegangan tertinggi dengan nilai 18,5. Dari hasil penelitian menunjukkan penempatan *stop-drilling* tipe C memiliki konsentrasi tegangan tertinggi dengan nilai 20,6. Sedangkan penempatan stop drilling tipe A memiliki konsentrasi tegangan terendah dengan nilai 10,5.



Corresponding Author:

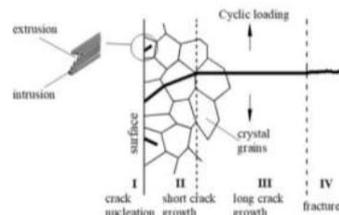
Irfan Wibowo,
Department of Aerospace Engineering,
ITD Adisutjipto,
Jl. Raya Janti Blok R, Banguntapan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia
Email: irfanwibowo320@gmail.com

1. PENGANTAR

Pada perusahaan pesawat terbang pada umumnya, ketika *fatigue crack* diamati pada komponen yang tidak dapat segera diganti atau diperbaiki, metode yang dapat diterapkan untuk memperpanjang umur kelelahan komponen secara aman salah satunya yaitu menggunakan teknik *stop-drilling*. *Stop-Drilling* (SD) adalah cara yang sederhana dan ekonomis untuk memperlambat crack dengan mengebor lubang di *crack tip* dan mengurangi konsentrasi tegangan. Teknik perbaikan ini masuk kedalam *Negligible Damage* atau diartikan sebagai kerusakan ringan yang tidak berpengaruh terhadap keutuhan *structure* secara keseluruhan, atau tidak mempengaruhi integritas struktural komponen yang terlibat. beberapa tindakan perbaikan harus diambil untuk menjaga agar kerusakan tidak menyebar atau merambat lebih panjang, dan harus sering diperiksa untuk memastikan kerusakannya terjadi tidak menyebar. Batasan yang diperbolehkan untuk *negligible damage* bervariasi untuk komponen yang berbeda dari pesawat yang berbeda dan seharusnya diteliti dengan cermat secara individual [1].

Salah satu mekanisme kegagalan yang utama dalam aplikasi teknik atau komponen mesin adalah penjalaran *fatigue crack*. Penjalaran *crack* ini dimulai dari titik-titik pada daerah yang mengalami tegangan terkonsentrasi. Konsentrasi tegangan yang lebih tinggi dari nilai kritis materialnya menyebabkan *crack* terus tumbuh sehingga menyebabkan kegagalan pada komponen mesin. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang efektif untuk menahan pertumbuhan *crack* sebelum kegagalan terjadi pada komponen mesin [2].

Gambar 1 menunjukkan representasi skema proses *fatigue* di bawah pembebanan siklik di mana *crack nucleation* (tahap I) dimulai sepanjang *persistent slip band*. Tahap berikutnya dalam proses *fatigue* adalah pertumbuhan *crack*, yang bisa saja terjadi dibagi menjadi pertumbuhan *crack short* (tahap II) dan *long* (tahap III). *Crack nucleation* dan pertumbuhan *crack short* (tahap I dan II) dipertimbangkan sebagai perambatan *crack* pada beberapa butir kristal pada bidang maksimum tegangan geser. Di sini, plastisitas *crack tip* sangat dipengaruhi oleh *slip band characteristics*, ukuran butir dan orientasinya, karena panjang *crack* sebanding dengan struktur mikro material. Tahap III sesuai dengan panjang pertumbuhan *crack* dalam arah normal terhadap tegangan tarik utama. Panjang pertumbuhan *crack* kurang dipengaruhi oleh struktur mikro material karena Zona plastis *crack tip* jauh lebih besar jika dibandingkan dengan mikrostruktur sifat (ukuran butiran kristal). Proses *fatigue* selesai ketika *crack* mencapai panjang kritis dan terjadi *crack* akhir (tahap IV pada Gambar 1) [3].



Gambar 1. Proses kelelahan pada pembebanan siklik [4].

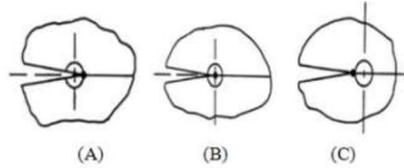
Metode *Stop-Drilling* merupakan teknik perbaikan yang sederhana dan ekonomis yang banyak digunakan untuk memperlambat atau bahkan menghentikan perambatan *fatigue crack* pada komponen struktur yang rusak atau tidak dapat diganti segera setelah ditemukannya *crack*. Prinsipnya adalah mengebor lubang pada atau dekat *crack tip* untuk mengubah *crack* menjadi *notch*, sehingga dapat mengurangi efek konsentrasi tegangan. Peningkatan umur kelelahan dapat dicapai dengan *Stop-Drilling hole method* dapat dimodelkan dengan mengasumsikan bahwa jumlah tersebut sama dengan jumlah siklus yang diperlukan untuk memulai kembali *crack* pada akar *notch* yang dihasilkan, yang setidaknya bergantung pada ukuran *crack* dan diameter lubang [5].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan kajian dan pengetahuan tentang konsentrasi tegangan pada sebuah *crack* dan dilakukan perawatan menggunakan metode *Stop-Drilling* pada aluminium 2024-T3 yang digunakan pada material *skin* di beberapa pabrikan pesawat. Selain itu tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari metode *stop-drilling* dengan memodifikasi ukuran dan penempatan lubang. Metode ini bertujuan untuk mereduksi konsentrasi tegangan pada sisi lubang, sehingga *crack* tidak menjalar lebih panjang selama pengoperasian yang diizinkan. Dan menyelidiki bagaimana peningkatan diameter *stop-drilling* terhadap konsentrasi tegangan yang terjadi dengan membandingkan *crack original*.

2. METODE PENELITIAN

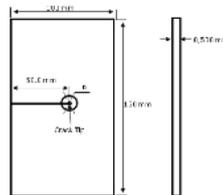
Penelitian ini akan menganalisis tentang konsentrasi tegangan pada sebuah *crack* yang disimulasikan terjadi pada *skin* aileron pesawat Cessna-150 dengan material aluminium 2024-T3. Selanjutnya *crack* tersebut dilakukan *maintenance* menggunakan metode *stop-drilling* untuk dapat mengurangi konsentrasi tegangan pada *crack* tersebut. Apakah metode *stop-drilling* yang dimodifikasi dapat mengurangi konsentrasi tegangan pada *crack* yang terjadi. Analisis konsentrasi tegangan pada *crack* menggunakan *stop drilling* adalah metode yang efektif dalam mengurangi konsentrasi tegangan dan memperpanjang umur dari material, parameter penting pada *stop drilling* yaitu diameter, penempatan *stop drilling* dan panjang *crack* yang akan dilakukan *stop drilling* harus dipertimbangkan dalam analisis ini. Analisis numerik menggunakan FEA dapat membantu dalam menentukan parameter yang tepat untuk dapat mengurangi konsentrasi tegangan. Pada simulasi numerik akan dibuat *crack* dengan *type crack single edge cracked plate tension specimen* dengan variasi ukuran lubang, panjang *crack* dan penempatan lubang untuk dilakukan *stop-drilling*. Modifikasi yang dilakukan pada *stop-drilling* ini akan menggunakan batasan pada *Structure Repair Manual Cessna-150* [6].

Sejauh ini, berbagai metode telah diperkenalkan untuk menghentikan pertumbuhan *crack* dan salah satunya adalah dengan membuat *stop-drilling hole*. *Crack* perlu diinisiasi lagi dibagian lubang untuk tumbuh yang meningkatkan umur struktur. Seperti Gambar 3, terdapat 3 metode berbeda untuk menggunakan *stop-drilling hole* pada *crack tip* yang pertama kali dipresentasikan oleh Qi, dimana terdapat 3 jenis letak *stop-drilling* yang berbeda A, B, dan C. Posisi stop drilling pada tipe A terletak di belakang crack tip, untuk *stop-drilling* tipe B terletak pada tengah *crack-tip*, sedangkan pada *stop-drilling* tipe C terletak pada crack tip. Karena lokasi *stop-drilling* yang akurat diperlukan dalam desain lubang stop drilling [7][8].



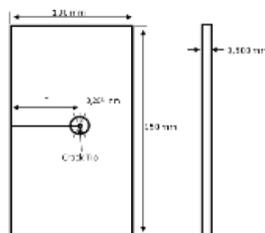
Gambar 2. Jenis letak *Stop-Drilling* A,B,C [7]

Pada *specimen* A pada Gambar 3 ini memiliki geometri dengan panjang 150 mm, lebar 100 mm dan ketebalan 0,020 inch atau 0,508 mm sesuai dengan ketebalan pada skin aileron Cessna-150. Serta memiliki panjang *crack* tetap sebesar 50,8 mm, Pada *specimen* 1 tipe A ini akan memvariasikan 3 diameter lubang *drill* yaitu 3,048 mm, 3,264 mm dan 3,454 mm.



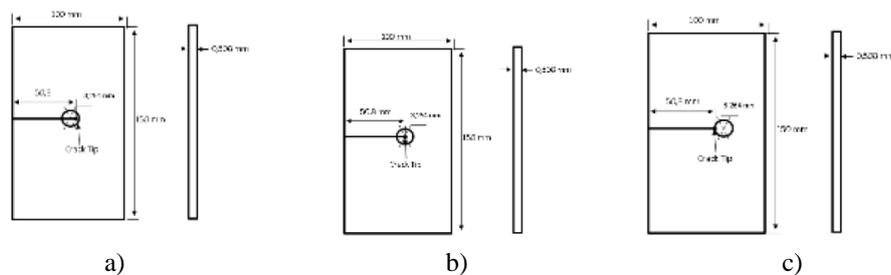
Gambar 3. *Specimen* 1 Tipe A *Stop Drilling*

Pada *specimen* 2 (Gambar 4) ini memiliki geometri dengan panjang 150 mm, lebar 100 mm dan ketebalan 0,020 inch atau 0,508 mm sesuai dengan ketebalan pada *skin* aileron Cessna-150. Serta memiliki panjang *crack* yang divariasikan sebesar 25,4 mm, 38,1 mm dan 50,8 mm. Pada *specimen* 2 tipe A ini memiliki diameter tetap lubang *drill* sebesar 3,264 mm.



Gambar 4. *Specimen* 2 Tipe A *Stop Drilling*

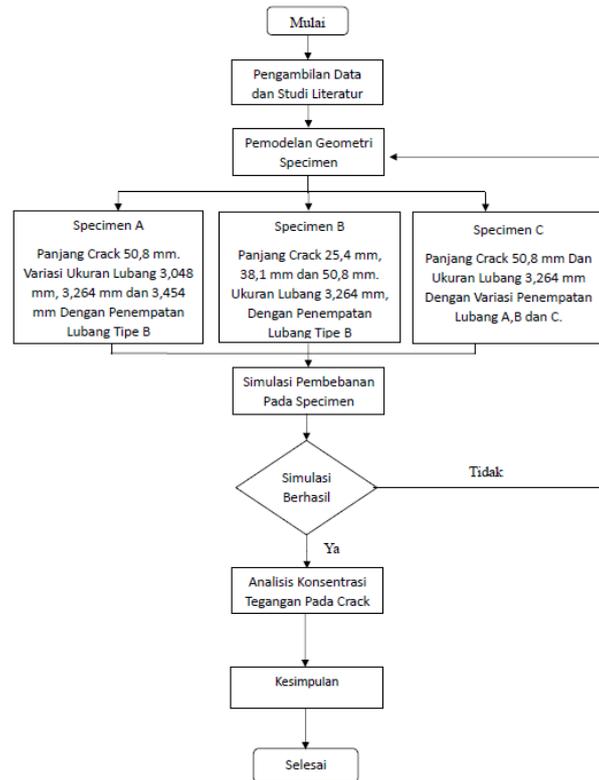
Pada *specimen* 5 ini memiliki geometri dengan panjang 150 mm dan lebar 100 mm, Adapun panjang *crack* tetap yang digunakan yaitu dengan panjang 50,8 mm serta diameter lubang *stop-drill* yang diterapkan yaitu sebesar 3,264 mm. Dalam *specimen* 3 ini akan divariasikan penempatan *stop-drilling* dengan 3 tipe.



Gambar 5. *Specimen* 3 a) Tipe A, b) Tipe B, c) Tipe C

Pemodelan *specimen* menggunakan Catia V5 R21 adalah proses pembuatan geometri *specimen* dengan terdapat *crack* serta pada *crack tip* terdapat *hole* dalam satu geometri *specimen*. Pemodelan *specimen* ini melibatkan tahap penggambaran bentuk dasar *specimen*, penambahan detail ketebalan dari *specimen* itu sendiri, memberikan *detail crack* dan lubang pada *crack tip*.

Pada analisis struktur penelitian ini akan menggunakan software ANSYS 2021R2. Proses analisis struktur pada ANSYS meliputi beberapa tahap yang perlu dilakukan, hal yang pertama yaitu memilih analisis apa yang dilakukan pada Workbench. Pada penelitian ini analisis yang dilakukan menggunakan *static structural*, setelah memilih analisis yang digunakan maka akan muncul *project schematic*. Pada *project schematic* terdapat komponen yang perlu di input untuk dapat melakukan analisis, yang pertama terdapat *engineering data*, yang kedua yaitu *geometry*, ketiga yaitu *model*, keempat yaitu *setup*, dan yang terakhir yaitu *solution*. Secara garis besar, penelitian ini dapat dilihat dalam diagram alir pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram Alir penelitian

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1. Pembebanan pada *skin aileron*

Pada penelitian ini pembebanan yang diterapkan pada aileron mengacu pada Federal Aviation Administration FAR 23 bagian *Aileron Loads* [9]. Pembebanan ini akan diterapkan pada *specimen* dengan pendekatan beban yang terjadi pada *skin aileron cessna 150*, Dimana pada *total area aileron Cessna-150* yaitu 18,3 ft², kecepatan pada saat kondisi manuver 163,718 ft/sec, *deflection maximum aileron* sebesar 20°, didapatkan beban yang terjadi pada aileron sebesar 36,2 N. Berikut adalah perhitungan *Lail* (*load on the aileron*):

$$L_{ail} = C_{L-ail} q S_{ail}$$

$$L_{ail} = 0,0139626 \times 31,85472 \times 18,3$$

$$L_{ail} = 8,1394 \text{ lbf} = 36,2 \text{ N}$$

Dimana :

$$C_{L-ail} = 0,04 \delta_{ail}$$

$$C_{L-ail} = 0,04 \times 20^\circ$$

$$C_{L-ail} = 0,8^\circ = 0,0139626$$

$$q = \frac{1}{2} \rho_0 v^2$$

$$q = \frac{1}{2} \times (2,3769 \times 10^{-3}) \times (163,7182)$$

$$q = 31,85472 \text{ lb/ft}^2$$

3.2. Hasil Convergent Mesh

Meshing yang memiliki jumlah elemen yang tepat dan orientasi yang baik dapat meningkatkan akurasi hasil, namun jika jumlah elemen *mesh* terlalu sedikit, hasil analisis tidak akan akurat. Apabila jumlah *meshing* yang lebih banyak atau kerapatan *meshing* yang lebih tinggi dapat meningkatkan kualitas *meshing* serta meningkatkan akurasi hasil analisis, akan tetapi waktu komputasi akan meningkat [10]. Pada Penelitian ini tegangan maksimum Von-Mises yang dihasilkan akibat dari kerapatan *meshing* yang disebabkan oleh jumlah elemen dan nodal akan dikatakan kualitas baik apabila persentase dibawah 5% [11], berikut ini hasil *convergent* dari perbedaan kerapatan mesh pada 9 *specimen*.

Tabel 1. Nilai Convergen Specimen A Variasi Diameter Lubang 3,048 mm

NO	Jumlah Element	Stress (MPa)	Convergen Mesh (%)
1	11667	27,765	-
2	12808	26,155	6
3	14925	27,225	3
4	21041	27,448	0,8
5	34128	27,611	0,6
6	56864	27,570	0,1

Tabel 2. Nilai Convergen Specimen A Variasi Diameter Lubang 3,264 mm

NO	Jumlah Element	Stress (MPa)	Convergen Mesh (%)
1	20607	26,258	-
2	21642	26,101	0,6
3	23686	25,799	1
4	30006	26,591	2
5	42874	26,741	0,5
6	65605	26,815	0,2

Tabel 3. Nilai Convergen Specimen A Variasi Diamter Lubang 3,454 mm

NO	Jumlah Element	Stress (MPa)	Convergen Mesh (%)
1	20664	25,014	-
2	21701	25,157	0,5
3	23848	25,97	3,1
4	29344	25,911	0,2
5	42617	26,047	0,5
6	66085	26,268	0,8

Tabel 4. Nilai Convergen Specimen B Variasi Panjang 25,4 mm

NO	Jumlah Element	Stress (MPa)	Convergen Mesh (%)
1	20125	9,339	0
2	21202	9,822	5
3	23031	9,566	2,6
4	28750	9,792	2,3
5	42152	9,872	0,8
6	64988	9,994	1,2

Tabel 5. Nilai Convergen Specimen B Variasi Panjang 38,1 mm

NO	Jumlah Element	Stress (MPa)	Convergen Mesh (%)
1	19927	16,052	0
2	20937	15,533	3
3	23204	15,648	0,7
4	28752	16,042	2,4
5	42239	16,311	1,6
6	65270	16,169	0,8

Tabel 6. Nilai Convergen Specimen B Variasi Panjang 50,8 mm

NO	Jumlah <i>Element</i>	<i>Stress (MPa)</i>	<i>Convergen Mesh(%)</i>
1	20607	26,258	-
2	21642	26,101	0,6
3	23686	25,799	1
4	30006	26,591	2
5	42874	26,741	0,5
6	65605	26,815	0,2

Tabel 7. Nilai Convergen Specimen C tipe A

NO	Jumlah <i>Element</i>	<i>Stress (MPa)</i>	<i>Convergen Mesh(%)</i>
1	20189	23,985	-
2	21235	23,892	0,3
3	23201	24,235	1
4	29743	24,808	2
5	42475	24,864	0,2
6	65219	25,256	1,5

Tabel 8. Nilai Convergen Specimen C tipe B

NO	Jumlah <i>Element</i>	<i>Stress (MPa)</i>	<i>Convergen Mesh(%)</i>
1	20607	26,258	-
2	21642	26,101	0,6
3	23686	25,799	1
4	30006	26,591	2
5	42874	26,741	0,5
6	65605	26,815	0,5

Tabel 9. Nilai Convergen Specimen C tipe C

NO	Jumlah <i>Element</i>	<i>Stress (MPa)</i>	<i>Convergen Mesh(%)</i>
1	20497	27,618	-
2	21568	27,7	0,5
3	23493	28,892	3,8
4	30100	28,488	1,4
5	42722	28,697	0,7
6	65980	28,849	0,5

3.3. Hasil Analisis Konsentrasi Tegangan Terhadap Variasi Ukuran Lubang

Engineering stress merupakan beban (F) yang diaplikasikan tegak lurus terhadap luas penampang dari specimen ($\frac{F}{A_0}$) dengan satuan Mpa atau psi. Tegangan yang dihasilkan pada keseluruhan benda tergantung dari gaya yang bekerja. Pada saat benda menerima beban sebesar P kg, maka benda akan bertambah panjang. Saat itu pada material bekerja tegangan [12].

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

Dimana:

- F = Beban yang diberikan
- A = Luas penampang mula-mula

Tegangan akan semakin besar berpengaruh pada nilai konsentrasi tegangan. Untuk mengurangi fenomena ini dapat dilakukan perubahan pada bagian fillet agar aliran garis dibagian tersebut menjadi stabil sehingga menyebabkan konsentrasi tegangan yang lebih rendah. Konsentrasi tegangan (K_t) adalah rasio tegangan tertinggi σ_{max} ke tekanan nominal σ_{nom} dari penampang dan didefinisikan sebagai [17]:

$$K_t = \frac{\sigma_{maks}}{\sigma_{nom}} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} \sigma_{maks} &= \text{Tegangan maksimal} \\ \sigma_{nom} &= \text{Tegangan nominal} \end{aligned}$$

Tabel 10-12 adalah hasil perhitungan tegangan dan konsentrasi tegangan setelah mendapatkan hasil tegangan maksimal melalui Von-Mises stress yang dihitung dengan menggunakan FEA dan tegangan nominal didapatkan dengan melakukan hitungan menggunakan rumus (1).

Tabel 10. *Specimen 1* dengan variasi diameter *crack*

diameter (mm)	σ_{maks} (Mpa)	σ_{nom} (MPa)	K_t
3,048	27,57	1,448	19
3,264	26,815	1,448	18,5
3,454	26,268	1,448	18,1

Tabel 11. *Specimen 2* dengan variasi panjang *crack*

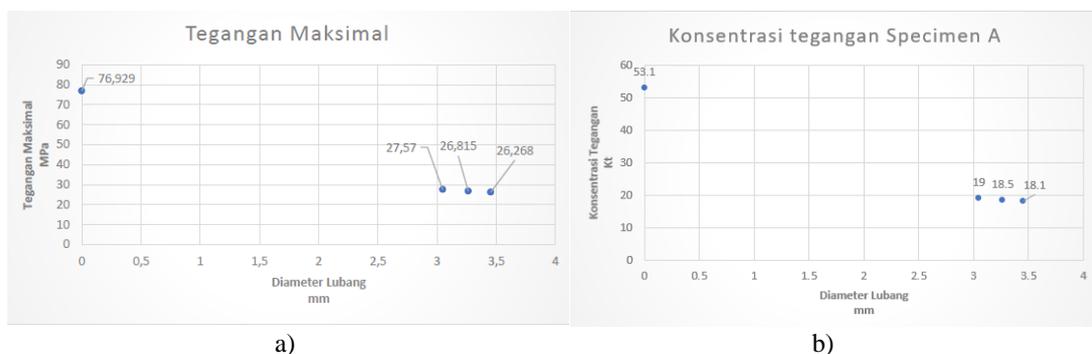
Panjang crack (mm)	σ_{maks} (Mpa)	σ_{nom} (MPa)	K_t
25,4	9,94	0,995	10
38,1	16,169	1,151	14
50,8	26,815	1,448	18,5

Tabel 12. *Specimen 3* dengan variasi penempatan *crack*

penempatan	σ_{maks} (Mpa)	σ_{nom} (MPa)	K_t
tipe A	25,256	1,498	16,9
tipe B	26,886	1,448	18,6
tipe C	28,848	1,448	20,6

3.4. Hasil Perbandingan Konsentrasi Tegangan dan Tegangan Maksimal Pada Specimen 1

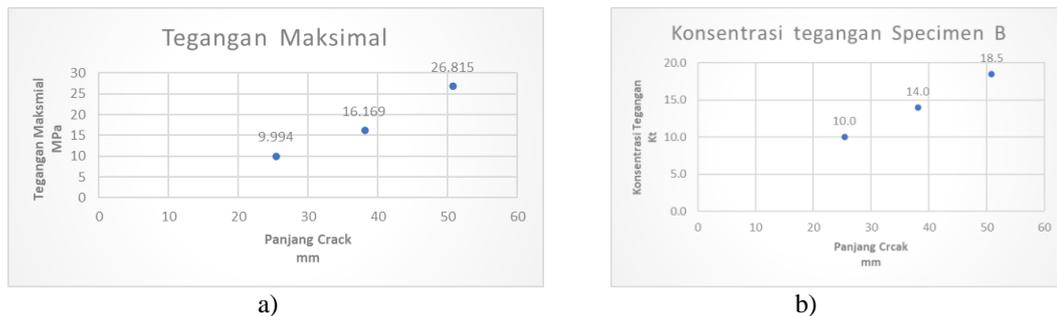
Dari hasil yang sudah dianalisis didapat bahwa nilai tegangan maksimal pada 3 variasi diameter lubang dengan ukuran 3,048 mm, 3,264 mm dan 3,454 mm didapat nilai tegangan maksimal sebesar 27,570 MPa, 26,815 MPa dan 26,268 MPa. Dari Gambar 6 terlihat peningkatan variasi diameter lubang berdampak pada penurunan nilai tegangan maksimal pada sisi lubang *stop drilling*. Untuk hasil perhitungan konsentrasi tegangan didapat 19,0, 18,5 dan 18,1. Sejalan dengan penelitian sebelumnya [13][14], dimana pada sebelumnya penelitian tersebut tentang penggunaan prosedur *stop drilling* untuk meningkatkan umur kelelahan pada *specimen* dari aluminium alloy 6061-T651 dan *stainless steel* AISI 304 menggunakan *stop drilling* dengan diameter 2, 2.5, dan 3 mm pada *specimen*, dan hasilnya dari *stop-hole* yang lebih besar menurunkan tegangan gradien dan konsentrasi tegangan. Dari grafik penelitian ini terlihat bahwa peningkatan diameter lubang *stop drilling* menurunkan nilai konsentrasi tegangan. Sedangkan untuk *crack* tanpa menggunakan stop drilling memiliki tegangan maksimal sebesar 76,929 MPa dan nilai konsentrasi tegangan sebesar 53,1 MPa.



Gambar 6. Perbandingan hasil pada Specimen 1 berupa a) Tegangan Maksimal, b) Konsentrasi Tegangan

3.5 Hasil Perbandingan Konsentrasi Tegangan dan Tegangan Maksimal Pada Specimen B

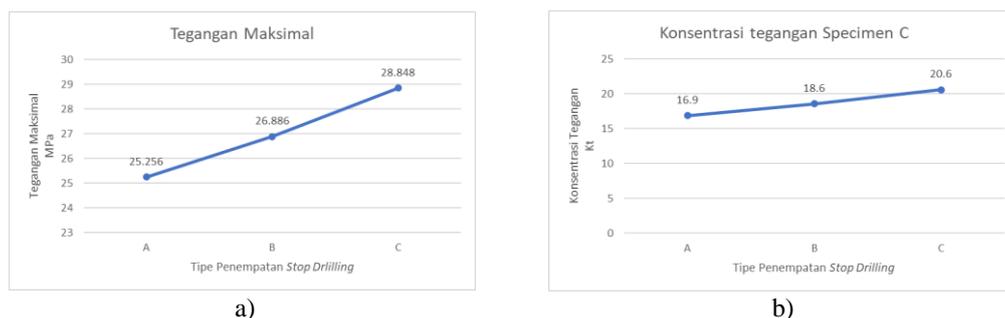
Dari hasil yang sudah dianalisis didapat bahwa nilai tegangan maksimal pada 3 variasi panjang *crack* dengan ukuran 25,4 mm, 38,1 mm dan 50,8 mm didapat nilai tegangan maksimal sebesar 9,994 MPa, 16,169 Mpa dan 26,815 MPa. Pengaruh panjang *crack* terhadap konsentrasi tegangan sangat signifikan, dengan bertambahnya panjang *crack*, faktor intensitas tegangan pada *crack tip* juga meningkat, sehingga menyebabkan konsentrasi tegangan yang lebih tinggi. Faktor intensitas tegangan merupakan ukuran konsentrasi tegangan pada *crack tip* dan berhubungan dengan langsung dengan *crack tip*. Dari grafik terlihat peningkatan variasi panjang *crack* berdampak pada kenaikan nilai tegangan maksimal pada sisi lubang *stop drilling*. Untuk hasil perhitungan konsentrasi tegangan didapat 10,0, 14,0 dan 18,5. Dari Gambar 7 terlihat bahwa peningkatan panjang *crack* sejalan dengan kenaikan nilai konsentrasi tegangan. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian sebelumnya [15][16], dimana pada hasil penelitian tersebut mempelajari tentang faktor intensitas tegangan *crack* pada plat dengan lebar terbatas dan *edge damage*, didapatkan bahwa faktor intensitas tegangan meningkat seiring dengan bertambahnya panjang *crack*.



Gambar 7. Perbandingan hasil pada Specimen 2 berupa a) Tegangan Maksimal, b) Konsentrasi Tegangan

3.6 Hasil Perbandingan Konsentrasi Tegangan dan Tegangan Maksimal Pada Specimen 3

Dari hasil yang sudah dianalisis didapat bahwa nilai tegangan maksimal pada 3 variasi penempatan stop drilling dengan tipe A, B dan C didapat nilai tegangan maksimal sebesar 25,256 MPa, 26,886 MPa dan 28,848 MPa. Seperti pada penelitian sebelumnya [8], dimana dalam penelitian tersebut mevariasikan 3 jenis tipe stop drilling, hasil dari ketiga jenis tipe stop drilling didapatkan bahwa tipe A sebagai yang terbaik dan tipe C sebagai metode stop drilling terburuk. Dari grafik penelitian ini terlihat peningkatan variasi penempatan stop drilling berdampak pada kenaikan nilai tegangan maksimal pada sisi lubang *stop-drilling*. Untuk hasil perhitungan konsentrasi tegangan didapat 16,9, 18,6 dan 20,6. Dari Gambar 8 terlihat bahwa variasi penempatan stop drilling sejalan dengan kenaikan nilai konsentrasi tegangan, dan pada tipe A memiliki konsentrasi tegangan yang terendah dan tipe C memiliki konsentrasi tegangan tertinggi.



Gambar 8. Perbandingan hasil pada Specimen 2 berupa a) Tegangan Maksimal, b) Konsentrasi Tegangan

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan pada penulis mengenai stop drilling yang diasumsikan pada *skin aileron* dapat menjadi 3 hal penting terkait dengan diameter *drilling* dan konsentrasi tegangan, panjang *crack* dan konsentrasi tegangan, serta penempatan *stop-drilling*. Dengan meningkatkan diameter lubang *stop-drilling*, konsentrasi tegangan disekitar area tersebut berkurang. Diameter lubang *stop-drilling* yang dianalisis adalah 3,048 mm, 3,264 mm dan 3,454 mm, dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa diameter lubang 3,454 mm menghasilkan konsentrasi tegangan terendah dengan nilai 18,1, sedangkan diameter lubang 3,048

mm menghasilkan konsentrasi tegangan tertinggi dengan nilai 19,0. Panjang *crack* yang lebih panjang dapat menghasilkan konsentrasi tegangan yang lebih tinggi diujung *crack*, sehingga *crack* tidak dapat dihentikan secara efektif dengan ukuran *stop-drilling* yang lebih kecil. Dalam penelitian ini panjang *crack* yang dianalisis adalah 25,4 mm, 38,1 mm dan 50,8 mm dari hasil penelitian menunjukkan bahwa panjang *crack* 50,8 mm menghasilkan konsentrasi tegangan tertinggi dengan nilai 18,5, sedangkan panjang *crack* 25,4 mm menghasilkan konsentrasi tegangan terendah dengan nilai 10,0. Penempatan *stop-drilling* yang tepat dapat mengurangi konsentrasi tegangan disekitar area stop drilling. Dari hasil menunjukkan penempatan *stop-drilling* tipe C memiliki konsentrasi tegangan tertinggi dengan nilai 20,6, sedangkan penempatan *stop-drilling* tipe A memiliki konsentrasi tegangan terendah dengan nilai 16,9.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] FAA, Aircraft Metal Structural Repair. 2012
- [2] Y. Dwianda, H. Dahlan, and M. Rusli, "Kaji Numerik Pencegahan Pertumbuhan Retak Dengan Menggunakan Metode Modifikasi Bentuk Stop-Drilled Hole (Sdh)," Media Mesin Maj. Tek. Mesin, vol. 18, no. 2, pp. 76–82, 2017, doi: 10.23917/mesin.v18i2.5239.
- [3] W. (Boeing) Rankin, "MEDA investigation process," Aeromagazine, vol. 2, no. 26, pp. 15–21, 2007, [Online]. Available: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_2_07/article_03_1.html
- [4] S. Glodež and B. Aberšek, "The life of cracks : theory and application," p. 165, 2020, [Online]. Available: <https://www.cambridgescholars.com/resources/pdfs/978-1-5275-5538-9-sample.pdf>
- [5] T. Fullerton, Team Structures. 2020. doi: 10.1201/b22309-24.
- [6] S. Manual, Model 150 SERIES 1969 THRU 1976 SERVICE MANUAL, no. 1. 1990.
- [7] H. A. F, "Evaluation of Different Types of Crack Stop Drill Hole by Extended Finite Element Method," no. February, pp. 16–17, 2016.
- [8] D. Thesis, S. F. Strength, and M. Material, "Evaluation of Fatigue Life based on Crack Growth Behavior Evaluation of Fatigue Life based on Crack Growth Behavior," Exp. Solid Mech. Dyn., vol. 2, no. September, p. 3, 2014.
- [9] F. Report, "User's Guide for FAR23 Loads Program," Security, no. March, 1997
- [10] M. G. F. G. Fajrin, H. Widianoro, and Z.- Zainuddin, "Analisis Elemen Hingga Bagian Penekuk pada Mesin Pembuat Begel Baja Tulangan 8 mm," Suara Tek. J. Ilm., vol. 13, no. 1, p. 6, 2022, doi: 10.29406/stek.v13i1.4222.
- [11] L. Gabrian Int., "2024 Aluminum Alloy Properties," vol. 40, no. 22, pp. 176–178, 2011.
- [12] M. D. Bestari, D. Setyawan, and M. N. Misbach, "Analisa SCF (Stress Concentration Factor) Menggunakan Pendekatan Numerik Pada Pelat dengan Fillet Asimetris Akibat Beban Tarik," J. Tek. ITS, vol. 10, no. 1, pp. 1–7, 2021, doi: 10.12962/j23373539.v10i1.59243.
- [13] P. S. Song and Y. L. Shieh, "Stop drilling procedure for fatigue life improvement," Int. J. Fatigue, vol. 26, no. 12, pp. 1333–1339, 2004, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2004.04.009.
- [14] Fracture Mechanics, "No Title Stress Concentrations at Holes," Stress Concentration. [Online]. Available: <https://www.fracturemechanics.org/hole.html>
- [15] H. Yuan and H. Zhang, "Research on the stress intensity factor of crack on the finite width plate with edge damage based on the finite element method," J. Phys. Conf. Ser., vol. 2493, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2493/1/012013.
- [16] M. T. Rita Zuana Qomariyah, S.Si, "Dapat Memperbaiki Sistem Pemeliharaan Struktur Pesawat Udara," J. Pendiidkan, vol. 3, no. 2, pp. 12–16, 2018.

