

Analisis Respon Dinamik Terhadap Tumbukan *Drone* Pada *Horizontal Stabilizer* Pesawat Terbang Menggunakan Metode Elemen Hingga

Siti Nur Nafisa^{*}, Sahril Afandi Sitompul, Agus Supriyanto

Prodi Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Kedirgantaraan, Universitas Suryadarma
Komplek Bandara Halim Perdanakusuma, Jakarta 13610, Indonesia

^{*}*Corresponding Author* : 17010142@students.unsurya.ac.id

Abstrak - Struktur pesawat udara sangat rentan terhadap benturan dari benda-benda asing seperti puing-puing, kristal es akibat hujan atau serangan dari hewan. Insiden ini berdampak serius dan menjadi ancaman terhadap keselamatan operasi pesawat sipil dan dapat menyebabkan bencana seperti kecelakaan pesawat. Saat ini, *Unmanned Aircraft Vehicle* (UAV) berkembang dengan sangat pesat. *Horizontal stabilizer* merupakan suatu part atau komponen pada pesawat terbang yang sangat penting. Struktur *horizontal stabilizer* pesawat dengan berpenumpang 189 orang harus bisa menahan serangan burung dengan massa 8 lb atau sekitar 3600 gr. Tujuan skripsi ini adalah untuk mengetahui respon dinamik pada *horizontal stabilizer* berdasarkan variasi parameter tumbukan dari drone. Simulasi ini dilakukan menggunakan perangkat lunak elemen hingga atau CAE Abaqus. Simulasi ini dilakukan dengan awalan simulasi tumbukan *drone* ke bagian *horizontal stabilizer* dan akan dibandingkan dengan simulasi *bird* ditumbukan ke bagian *horizontal stabilizer*. Tumbukan *drone* pada lokasi diantara *rib* pada *section 2* dengan sudut 0° pada kecepatan relatif 180 m/s *horizontal stabilizer* mengalami kerusakan yang serius. Tumbukan *drone* dengan massa yang lebih kecil dibandingkan pada *horizontal stabilizer* lebih serius kerusakannya dibandingkan dengan serangan burung, karena *drone* merusak *rib*, *spar* dan *skin* pada *horizontal stabilizer*.

Kata kunci : *Horizontal Stabilizer, Drone, Birdstrike, Metode Elemen Hingga.*

Abstract - Aircraft structures are very susceptible to impact from foreign objects such as debris, ice crystals from rain or attacks from animals. This incident has a serious impact and poses a threat to the safety of civilian aircraft operations and can lead to disasters such as plane crashes. Currently, Unmanned Aircraft Vehicle (UAV) is developing very rapidly. Horizontal stabilizer is a very important part or component on an airplane. The horizontal stabilizer structure of the aircraft with a passenger of 189 people must be able to withstand the attacks of birds with a mass of 8 lb or about 3600 gr. The purpose of this thesis is to determine the dynamic response of the horizontal stabilizer based on variations in the collision parameters of the drone. This simulation is performed using finite element software or CAE Abaqus. This simulation is carried out by prefixing a drone collision simulation on the horizontal stabilizer section and will be compared to the bird simulation being hit on the horizontal stabilizer section. Drone collision at the location between the ribs in section 2 with an angle of 0° at a relative speed of 151 m/s horizontal stabilizer suffered serious damage. Drone collisions with a smaller mass compared to the horizontal stabilizer are more seriously damaged than bird strikes, because the drones damage the ribs, spars and skins on the horizontal stabilizer.

Keywords: *Horizontal Stabilizer, Drone, Birdstrike, Finite Element Method.*

I. PENDAHULUAN

Struktur pesawat udara sangat rentan terhadap benturan dari benda-benda asing seperti puing-puing, kristal es akibat hujan atau serangan dari hewan. Insiden ini berdampak serius dan menjadi ancaman terhadap keselamatan operasi pesawat sipil dan dapat menyebabkan bencana seperti kecelakaan pesawat. Saat ini, *Unmanned Aircraft Vehicle* (UAV) berkembang dengan sangat pesat. Ekonomi di Amerika Serikat menunjukkan bahwa keuntungan ekonomi karena perusahaan pembuatan UAV bisa mencapai sekitar \$13,6 miliar dan akan terus bertambah dan mencapai \$82 miliar pada tahun 2025^[1]. Verifikasi kelayakan udara pesawat dalam menghadapi dampak UAV khususnya *drone* belum diperhitungkan dalam proses desainnya. Kemungkinan dampak antara pesawat dan UAV ada, sedangkan risiko keselamatannya tidak diketahui. Jadi, evaluasi tabrakan antara UAV dan pesawat komersial dianggap perlu untuk meminimalkan kerusakan di masa mendatang. Meskipun sekarang sudah ada regulasinya yaitu CASR (*Civil Aviation Safety Regulation*) 107 tentang Sistem Pesawat Udara Kecil Tanpa Awak tetapi karena minimnya edukasi ke masyarakat, tumbukan antara *drone* dengan pesawat sangat mungkin terjadi. Hingga saat ini, ada 28 kasus tabrakan antara UAV dengan pesawat sejak tahun 2014 dan akan terus bertambah setiap tahunnya^[2].

Horizontal stabilizer merupakan suatu *part* atau komponen pada pesawat terbang yang sangat penting. Struktur horizontal stabilizer pesawat dengan berpenumpang 189 orang harus bisa menahan serangan burung dengan massa 8 lb atau sekitar 3600 gr^[3]. Untuk ancaman yang terkait dengan tabrakan antara UAV khususnya *drone* dengan pesawat terbang belum sepenuhnya dipertimbangkan dari segi desainnya atau proses operasinya.

Tujuan skripsi ini adalah untuk mengetahui respon dinamik pada *horizontal stabilizer* berdasarkan variasi parameter tumbukan dari *drone*. Simulasi ini dilakukan menggunakan perangkat lunak elemen hingga atau CAE Abaqus. Simulasi ini dilakukan dengan awalan simulasi

tumbukan *drone* ke bagian *horizontal stabilizer* dan akan dibandingkan dengan simulasi *bird* ditumbukan ke bagian *horizontal stabilizer*

II. METODE PENELITIAN

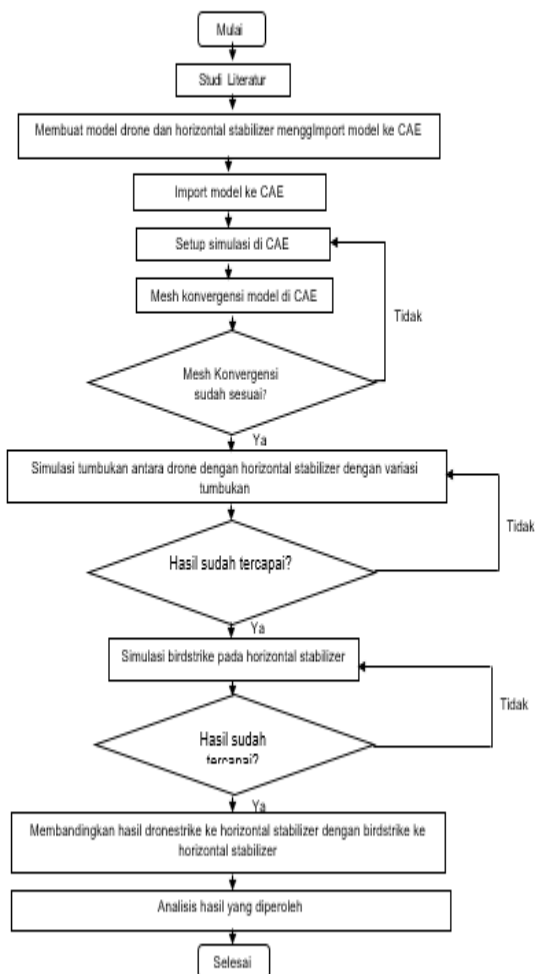
Dalam penelitian ini ada beberapa langkah yang dilakukan seperti pada flowchart penelitian **Gambar 2.1**. Pada **Gambar 2.1**, penelitian dimulai dengan mencari studi literatur mengenai analisis respon dinamik dan pemodelan *drone*, *horizontal stabilizer*, dan burung. Tahap selanjutnya adalah membuat model *drone* dan *horizontal stabilizer* menggunakan CAD. Setelah pembuatan model di CAD, model tersebut diimport ke dalam CAE untuk siap dianalisis.

Di dalam CAE, model di setup untuk mendapatkan hasil yang diinginkan dimulai dari memasukkan nilai material, *assembly*, penentuan *load* dan *boundary condition*, serta *history output* dan *field outputnya*. Sebelum model di mesh, terlebih dahulu model di *mesh* konvergensi untuk mendapatkan ukuran meshing yang sesuai. Setelah mendapatkan *mesh* konvergensi yang sesuai, tahap selanjutnya adalah simulasi impak antara *drone* dengan *horizontal stabilizer* sesuai dengan skenario yang telah dibuat. Setelah mendapatkan hasil dari simulasi antara *drone* dan *horizontal stabilizer*, tahap selanjutnya adalah mensimulasikan *birdstrike* lalu tahap terakhir adalah membandingkan hasil simulasi antara impak *drone* dengan impak *birdstrike* ke *horizontal stabilizer*, menganalisis data yang didapat kemudian selesai.

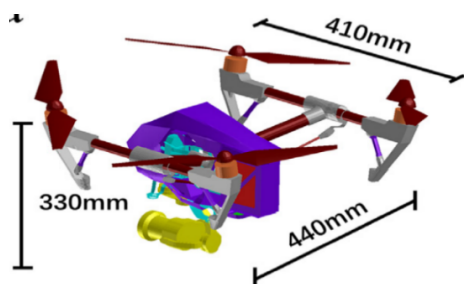
2.1.1 Drone

Model *drone* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki geometri dengan pendekatan *drone* dari DJI dengan type '*Inspire I*' yang terdapat pada **Gambar 2.2**. Ukuran *drone* yaitu 440 x 410 x 330 mm dan berat total (dengan kamera) adalah 3428 g. Massa ini mendekati massa burung yang dipersyaratkan oleh sertifikasi ketahanan serangan burung pada *empennage*, yaitu 3600 g. Pada *frame* dan *propeller*

dimodelkan oleh elemen *shell*, sedangkan baterai, *camera*, dan *motor* dimodelkan oleh elemen *solid*.



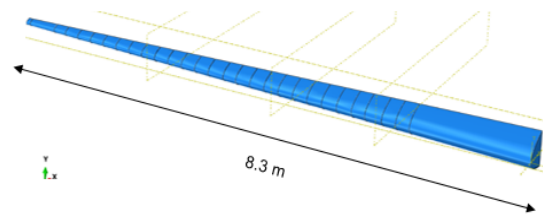
Gambar 2.1 Flowchart penelitian



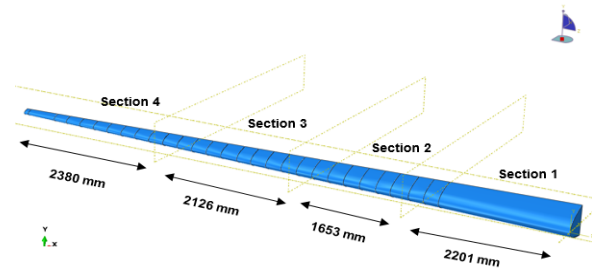
Gambar 2.2 Geometri Drone

2.1.2 Horizontal Stabilizer

Geometri *horizontal stabilizer* diperlihatkan pada **Gambar 2.3** yang dimodelkan dengan elemen 3D dan *deformable*. *Horizontal Stabilizer* dibuat dengan Panjang 8.3 m, 30 ribs serta 1 spar. Untuk pengujian bagian lokasi dibagi menjadi 4 section seperti **Gambar 2.4**.



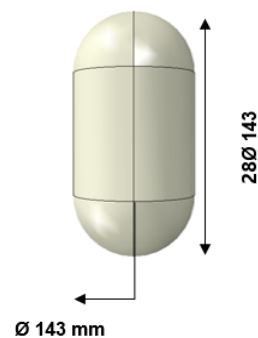
Gambar 2.3 Geometri Horizontal Stabilizer



Gambar 2.4 Ukuran per section Horizontal Stabilizer

2.1.3 Burung

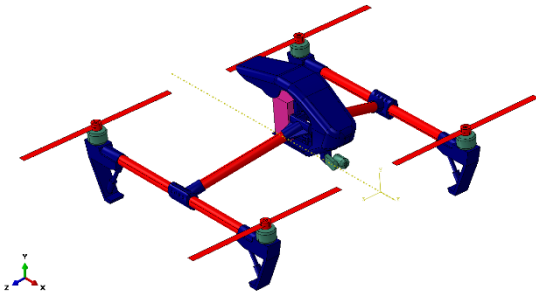
Untuk geometri burung, salah satu metode simulasi burung adalah *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH). Metode ini dikembangkan untuk mengatasi distorsi *mesh* dalam masalah tumbukan kecepatan tinggi. *Node* adalah simpul yang menghubungkan setiap elemen yang diperoleh dari mesh. SPH memiliki keunggulan dalam hal akurasi dan proses komputasi^[16]. Hasil yang sama juga diperoleh melalui perbandingan antara hasil simulasi dari model Lagrangian dan SPH yang mengalami *crash* pada pelat datar^[17]. Pengaruh geometri burung yang berbeda pada hasil tumbukan melalui metode numerik dan diperoleh silinder dengan ujung hemispherical dengan rasio panjang terhadap diameter direkomendasikan 2., seekor burung dengan massa 3600 gr. **Gambar 2.5** menampilkan geometri burung.



Gambar 2.5 Geometri burung

2.1.4 Properti Material Dan Distribusi Massa Drone

Pada **Gambar 2.6**, Merupakan visualisasi properti material yang digunakan pada setiap komponen *drone* dan nilai mekanika properti material dari setiap komponen seperti *Polycarbonate*, *Alumunium alloy 6061-T6*, dan *Lithium-ion* ditampilkan dalam **Tabel 2.1**, **Tabel 2.2**. **Tabel 2.3**, material model *horizontal stabilizer* adalah pada bagian *skin* menggunakan material *Alumunium Alloy 2024-T3* dan untuk *ribs* serta *spar* menggunakan material *Alumunium Alloy 7075-T6*. Untuk material pada burung ada pada **Tabel 2.4**



Gambar 2.6 Part Drone Sesuai dengan Warna

Tabel 3.1 Material Properties Drone Sesuai dengan Kode Warna

Kode Warna	Nama Part	Material
	Baterai	<i>Lithium-ion</i>
	Frame, Kaki Drone, Sambungan Selongsong Drone	<i>Polycarbonate</i>
	Kamera dan Propeller	<i>Alumunium Alloy 6061-T6</i>
	Blade dan Selongsong sambungan Drone	CFRP

Tabel 2.2 Mekanika Properti Material AA 6061-T6, AA 2024-T3, AA 7075 -T6 dan Polycarbonate

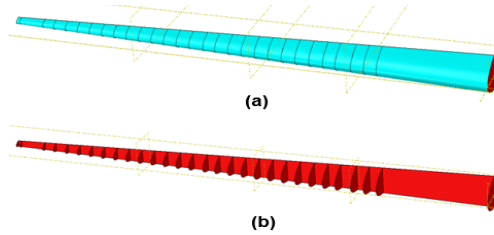
Material	Densitas ρ (kgm ⁻³)	Modulus elastisitas E (GPa)	Poisson's ratio ν	Tegangan luluh σ_y (MPa)	Tegangan maksimum σ_u (MPa)	Regangan gagal ϵ_{max}
AA 6061-T6	2700	68.9	0.33	276	310	0.12
AA 2024-T3	2780	73.1	0.33	345	483	0.18
AA 7075-T6	2823	71.7	0.33	572	572	0.11
PC	1180	6.2	0.3	62	75	0.2

Tabel 2.3 Mekanika Properti Material Lithium-ion

Densitas ρ (kgm ⁻³)	Modulus elastisitas E (GPa)	Poisson's ratio ν
1750	0.5	0.01

Tabel 2.4 Mekanika Properti Material CRFP

Densitas ρ (kgm ⁻³)	Modulus elastisitas E_1 (GPa)	Modulus elastisitas E_2, E_3 (GPa)	Modulus geser G_{12}, G_{13} (GPa)	Modulus geser G_{23} (GPa)	Poisson's ratio ν_{12}, ν_{13}	Poisson's ratio ν_{23}
3217	42.2	1.1	3.81	3.81	0.278	0.278



Gambar 2.7 Part Horizontal Stabilizer Sesuai dengan Kode Warna (a) Skin dan (b) Ribs dan Spar

Tabel 2.5 Mekanika Properti Material Horizontal Stabilizer Sesuai dengan Kode Warna

Kode Warna	Nama Part	Material
	Skin Horizontal Stabilizer	<i>Alumunium Alloy 2024-T3</i>
	Ribs dan Spar Horizontal Stabilizer	<i>Alumunium Alloy 7075-T6</i>

Tabel 2.7 Mekanika Properti Material Burung

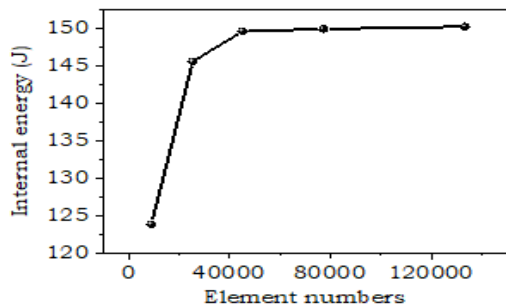
Densitas ρ (kgm ⁻³) (porositas)	Modulus geser (Mpa)	Regangan elastis	Tegangan Luluh (Mpa)	Tegangan hidrostatik (Mpa)	Kerusakan awal
938	10	0,01	0,1	2,75	4 ϵ_1

2.2 Mesh Konvergensi Pada Model

Mesh konvergensi bertujuan untuk memastikan bahwa simulasi memiliki hasil solusi yang tepat terhadap perubahan *mesh*. Untuk melakukan *mesh* konvergensi ini sebuah komponen *drone* yang digunakan yaitu motor di tumbukan ke skin horizontal stabilizer bermaterial *Alumunium Alloy 2024-T3* pada

kecepatan 151 m/s. Langkah waktu kenaikan yang digunakan adalah 1.10^{-5} detik sehingga dapat menangkap semua energi yang terkait dengan perambatan gelombang regangan plastis selama proses tumbukan. Ukuran *mesh* divariasikan menjadi 30 mm, 15 mm, 10 mm, 7 mm, and 5 mm. Pada kasus tumbukan motor dan skin horizontal stabilizer, energi internal skin digunakan sebagai kriteria yang digunakan untuk *mesh horizontal stabilizer*. Pada akhirnya, penelitian ini digunakan ukuran mesh yaitu rata-rata 10 mm sesuai dengan **Gambar 2.8**.^[15]

Untuk *mesh* konvergensi *drone*, komponen *drone* yang digunakan yaitu baterai ditumbukkan ke sebuah plat dengan ukuran plat 500 x 500 x 2 mm. Plat ini menggunakan material *Alumunium Alloy 2024-T3*. Baterai ditumbukkan dengan kecepatan 151 m/s. Ukuran *mesh* divariasikan menjadi 15 mm, 10 mm, 5 mm, 3mm dan 2 mm. Pada akhirnya, penelitian ini digunakan ukuran *mesh* yaitu 5 mm untuk *part drone* yang besar, sedangkan untuk *part drone* yang kecil menggunakan *mesh* ukuran 3 mm sesuai dengan **Gambar 2.9**.^[2]



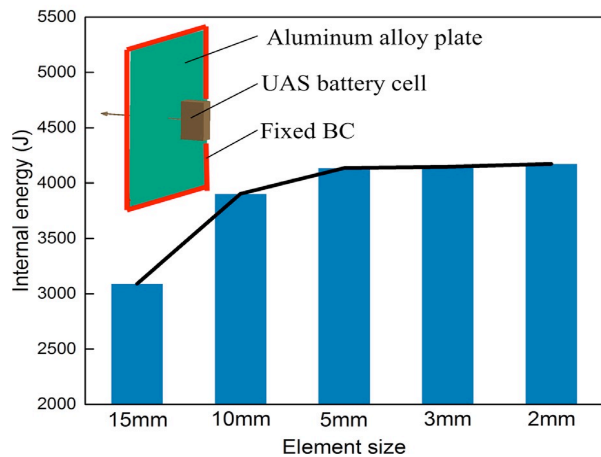
Gambar 2.8 Grafik Mesh Konvergensi Horizontal Stabilizer^[15]

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Respon Dinamik Tumbukan *Drone* Terhadap *Horizontal Stabilizer*

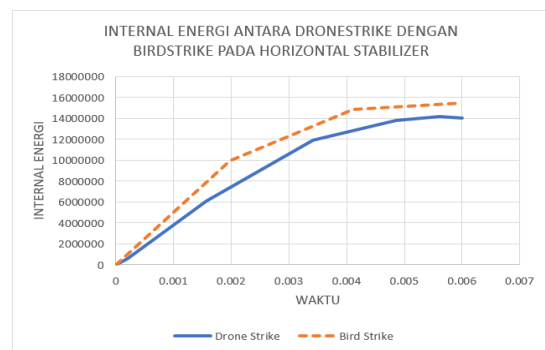
Pada **Sub Bab 3.1** akan menampilkan hasil respon dinamik dari drone yang menabrak horizontal stabilizer. Hasil ini menampilkan dari 4 skenario yaitu, posisi drone berada di antara rib dan di rib horizontal stabilizer, variasi sudut yaitu 0° ,

45° , dan -45° , variasi kecepatan yaitu 120 m/s, 151 m/s dan 180 m/s, dan variasi section yaitu section 1, section 2, section 3 dan section 4. Dari 4 skenario ini akan diambil data yang paling parah, lalu hasil ini akan dibandingkan dengan efek tabrak burung yang akan ditampilkan pada **Sub Bab 3.2** dengan mengikuti keparahan dari drone.



Gambar 2.9 Grafik Mesh Konvergensi *Drone*^[2]

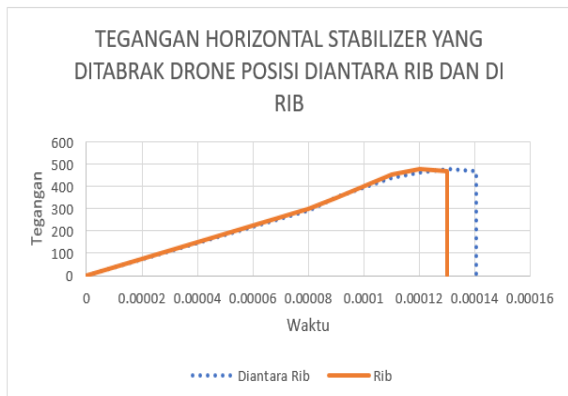
3.1.1 Respon Dinamik Di antara Rib Dan Di Rib Horizontal Stabilizer



Gambar 3.1 Grafik Internal Energi Horizontal Stabilizer Antara Rib dan di Rib

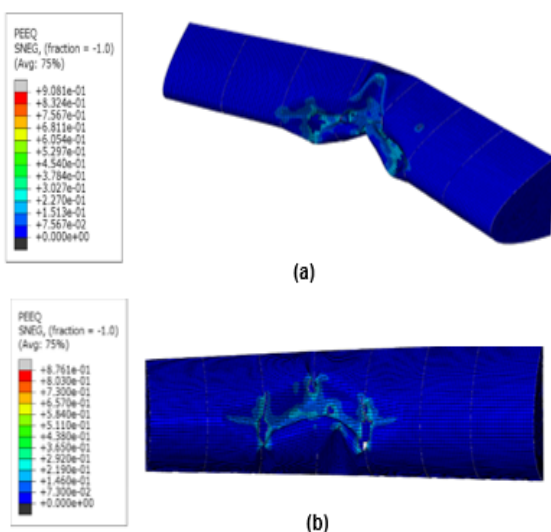
Penyerapan energi ditandai dengan adanya deformasi elastis dan plastis ketika tumbukan. Berdasarkan **Gambar 3.1**, penyerapan energi lokasi diantara rib lebih besar daripada lokasi pada rib. Hal ini dikarenakan deformasi yang dihasilkan pada lokasi antara rib lebih besar daripada lokasi di rib dengan masing masing nilai energi internal maksimalnya

adalah 1.5×10^7 mJ atau 15000 J dan 1.1×10^7 mJ atau 11000 J.



Gambar 3.2 Grafik Tegangan Horizontal Stabilizer Diantara Rib dan Di Rib

Pada **Gambar 3.2**, merupakan grafik tegangan horizontal stabilizer dengan posisi drone di antara rib horizontal stabilizer dan di rib horizontal stabilizer. Grafik diambil dari titik node awal kegagalan material dari skin horizontal stabilizer. Pada grafik, terlihat bahwa diantara rib mengalami tegangan maksimum pada waktu 14 ms dan mengalami kegagalan material karena telah melebihi tegangan maksimum dari skin horizontal stabilizer yaitu 480 MPa. Sementara untuk di rib horizontal stabilizer, pada waktu 13 ms, skin horizontal stabilizer baru mengalami kegagalan material

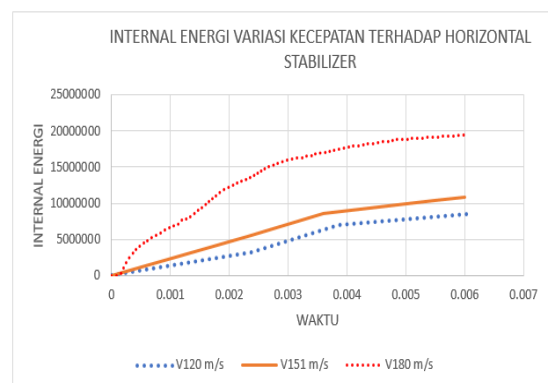


Gambar 3.3 Visualisasi Regangan Plastik Variasi Antara Rib (a) dan di Rib (b) pada Horizontal Stabilizer

Berdasarkan **Gambar 3.3 (a)** dan **(b)**, Area regangan plastis pada lokasi diantara rib lebih besar daripada lokasi di ribs karena tumbukan *drone* pada lokasi diantara ribs menyebabkan kerusakan pada 4 buah ribs sedangkan kerusakan yang terjadi di lokasi ribs terjadi pada 3 buah ribs. Untuk spar, tumbukan drone sampai merusak dan menembus spar pada lokasi diantara rib dan lokasi di rib. Hal ini dikarenakan nilai regangan plastis pada material sama atau melebihi nilai regangan gagal material yang masing-masing memiliki nilai 0.18 dan 0.11.

3.1.2 Respon Dinamik Terhadap Variasi Sudut Horizontal Stabilizer

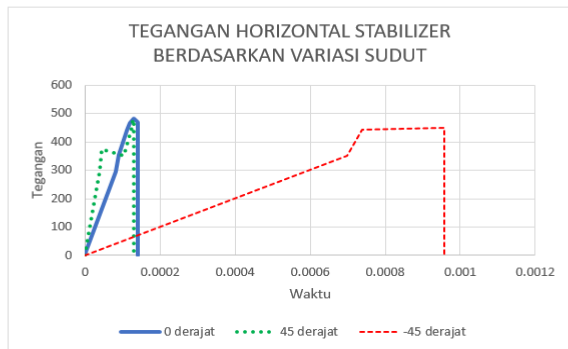
Berdasarkan **Gambar 3.4**, penyerapan energi dengan variasi sudut 0° , 45° dan -45° yang lebih besar adalah sudut 0° . Hal ini dikarenakan deformasi yang dihasilkan pada sudut 0° lebih besar dari pada dua sudut lainnya dengan masing masing nilai energi internal maksimumnya adalah pada 0° yaitu 14894731 mJ atau 14894.731 J, sudut 45° yaitu 13504518 mJ atau 13504.518 J dan sudut -45° yaitu 13351284 mJ atau 13351.284 J.



Gambar 3.4 Grafik Internal Energi Variasi Sudut pada Horizontal Stabilizer

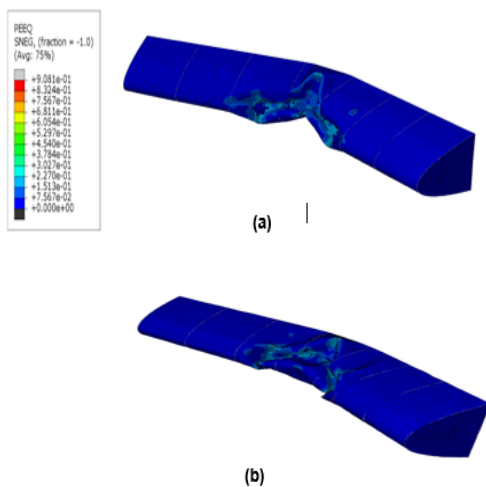
Berdasarkan **Gambar 3.4**, penyerapan energi dengan variasi sudut 0° , 45° dan -45° yang lebih besar adalah sudut 0° . Hal ini dikarenakan deformasi yang dihasilkan pada sudut 0° lebih besar daripada dua sudut lainnya dengan masing masing nilai energi internal maksimumnya

adalah pada 0° yaitu 14894731 mJ atau 14894.731 J, sudut 45° yaitu 13504518 mJ atau 13504.518 J dan sudut -45° yaitu 13351284 mJ atau 13351.284 J.



Gambar 3.5 Grafik Tegangan Horizontal Stabilizer berdasarkan variasi sudut

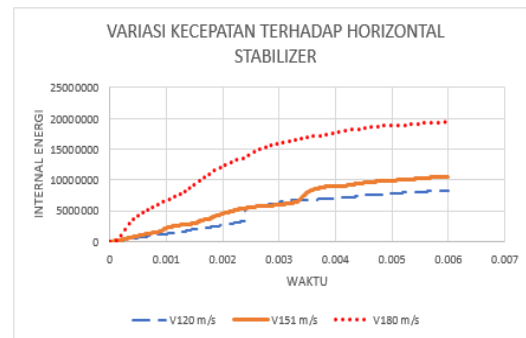
Pada **Gambar 3.5**, merupakan grafik tegangan horizontal stabilizer dengan variasi sudut yaitu 0° , 45° , dan -45° . Grafik diambil dari titik node awal kegagalan material dari skin horizontal stabilizer. Pada grafik, terlihat bahwa pada sudut 0° mengalami tegangan maksimum pada waktu 14 ms dan mengalami kegagalan material karena telah melebihi tegangan maksimum dari skin horizontal stabilizer yaitu 480 MPa. Sementara untuk di sudut 45° , pada waktu 13 ms, skin horizontal stabilizer baru mengalami kegagalan material dan pada sudut -45° skin horizontal stabilizer pada waktu 95 ms baru mengalami kegagalan skin horizontal stabilizer.



Gambar 3.6 Visualisasi Regangan Plastis

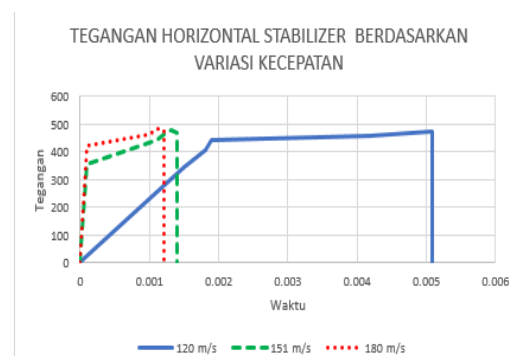
Horizontal Stabilizer terhadap Variasi Sudut

3.1.3 Respon Dinamik Terhadap Variasi Kecepatan Horizontal Stabilizer



Gambar 3.7 Internal Energi Variasi Kecepatan Terhadap Horizontal Stabilizer

Berdasarkan **Gambar 3.7**, Penyerapan energi meningkat seiring meningkatnya kecepatan. Nilai internal energi pada masing-masing kecepatan 120 m/s, 151 m/s dan 180 m/s adalah 83458125 mJ atau 8345.8125 J, 10525835 mJ atau 10525.835 J, dan 19443400 mJ atau 19443.400 J. Pola kurva untuk kecepatan 120 m/s dan 151 m/s tidak terlalu berbeda secara signifikan, sementara pola kurva energi pada kecepatan 180 m/s jauh lebih besar daripada kecepatan 120 m/s dan 151 m/s karena deformasi yang terjadi lebih besar.

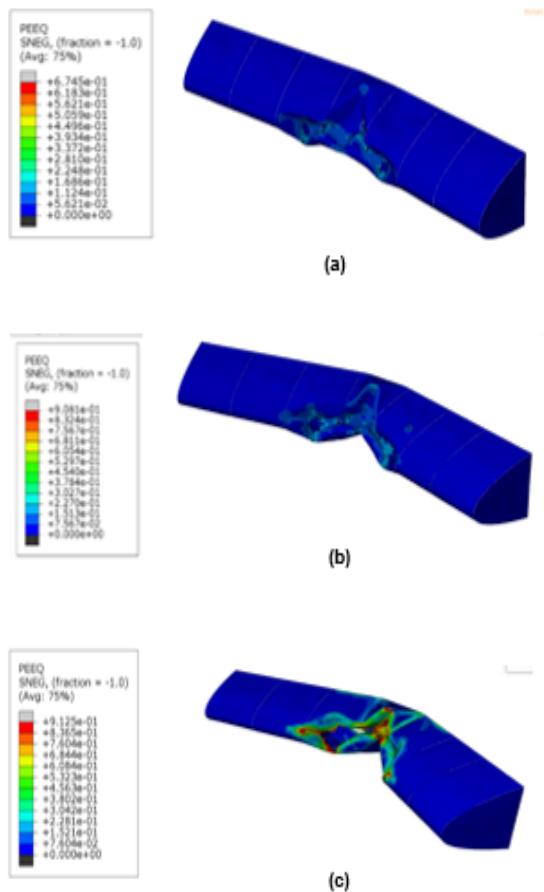


Gambar 3.8 Tegangan Horizontal Stabilizer Berdasarkan variasi kecepatan

Pada **Gambar 3.8**, merupakan grafik tegangan horizontal stabilizer dengan variasi kecepatan yaitu 120 m/s, 151 m/s, dan 180 m/s. Grafik diambil dari titik node awal kegagalan material dari skin horizontal stabilizer. Pada grafik, terlihat bahwa pada kecepatan 120 m/s mengalami tegangan maksimum pada

waktu 509 ms dan mengalami kegagalan material karena telah melebihi tegangan maksimum dari skin horizontal stabilizer yaitu 480 MPa. Sementara untuk di kecepatan 151 m/s, pada waktu 140 ms skin horizontal stabilizer baru mengalami kegagalan material dan pada kecepatan 180 m/s, skin horizontal stabilizer pada waktu 120 ms baru mengalami kegagalan skin horizontal stabilizer.

Berdasarkan **Gambar 3.9 (a), (b), dan (c)** pada variasi kecepatan tabrak *drone*, *drone* menembus skin Horizontal Stabilizer dan mengalami kerusakan yang serius. Hal ini disebabkan oleh setiap komponen telah mencapai kriteria kegagalannya.

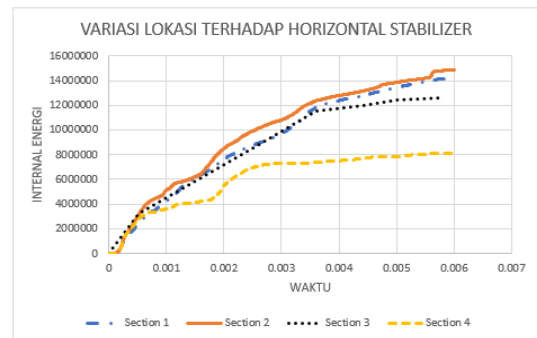


Gambar 3.9 Visualisasi Regangan Plastis (a) Kecepatan 120 m/s, (b) Kecepatan 151 m/s dan (c) Kecepatan 180 m/s

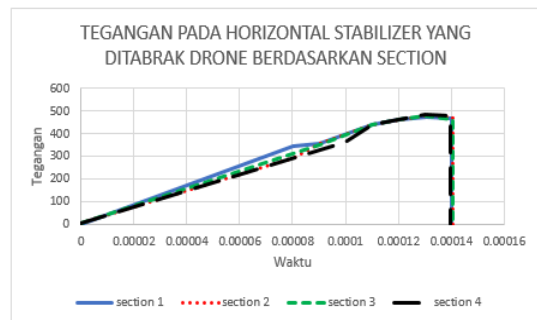
3.1.4 Respon Dinamik Terhadap Variasi Lokasi Horizontal Stabilizer

Pada **Gambar 3.10** menunjukkan nilai internal energi pada variasi lokasi

terhadap horizontal stabilizer. Variasi lokasi dilakukan untuk mengetahui respon struktur horizontal stabilizer dari tiap lokasi. Pada section 1, internal energi tertinggi adalah 14231280 mJ atau 14231.280 J. Pada section 2, internal energi tertinggi adalah 14894731 mJ atau 14894.731 J. Pada section 3, internal energi tertinggi adalah 12953822 mJ atau 12953.822 J. Pada section 4, internal energi tertinggi adalah 8118874 mJ atau 8118.874 J. Dari grafik diatas, section 2 memiliki internal energi tertinggi daripada section lainnya. Section 2 dipilih karena area horizontal stabilizer yang mengalami tumbukan dengan *drone* lebih luas dibandingkan section lainnya. Oleh karena itu, horizontal stabilizer menyebabkan penyerapan energi yang besar.



Gambar 3.10 Grafik Internal Energi Variasi Lokasi Terhadap Horizontal Stabilizer

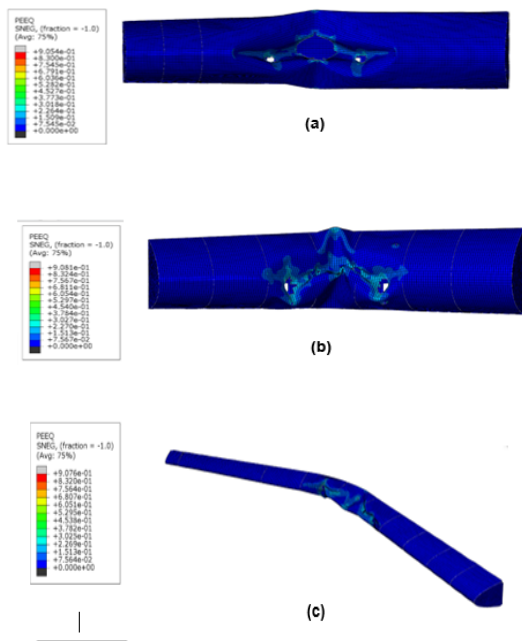


Gambar 3.11 Tegangan Horizontal Stabilizer Berdasarkan variasi section

Pada **Gambar 3.11**, merupakan grafik tegangan horizontal stabilizer dengan variasi section yaitu section 1, section 2, section 3, dan section 4. Grafik diambil dari titik node awal kegagalan material dari skin horizontal stabilizer. Pada grafik, terlihat bahwa pada section 1 sampai dengan section 4 mengalami

tegangan maksimum di waktu yang sama yaitu pada waktu 14 ms. Pada waktu tersebut, struktur dari skin horizontal stabilizer telah melebihi tegangan maksimumnya yaitu 480 MPa.

Berdasarkan **Gambar 3.12 (a), (b), (c), dan (d)** pada variasi section tabrak *drone*, *drone* menembus skin Horizontal Stabilizer dan mengalami kerusakan yang serius. Pada **Gambar 3.12**, terlihat bahwa kerusakan terparah terjadi pada section 2, dimana regangan plastis pada section 2 yaitu 1.842×10^{-1} . Dari visualisasi gambar horizontal stabilizer, skin pada section 1 merupakan komponen yang mengalami kerusakan terparah. Hal ini disebabkan oleh area pada section 1 paling besar daripada section lainnya. Sementara untuk bagian rib dan spar, pada section 2 yang mengalami kerusakan terparah.

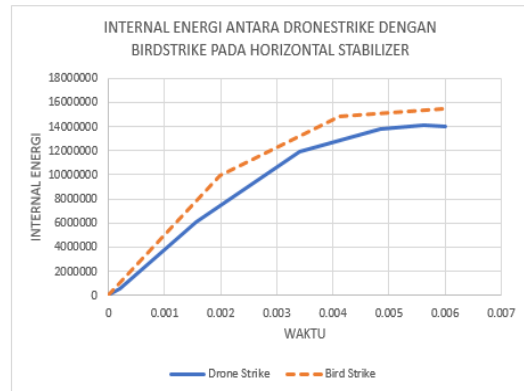


Gambar 3.12 Visualisasi Regangan Plastis Variasi Lokasi Terhadap Horizontal Stabilizer dengan (a) Section 1, (b) Section 2, (c) Section 3, (d) Section 4, dan (e) Pembagian Section pada Horizontal Stabilizer

4.2 Perbandingan Respon Dinamik Antara Tumbukan *Drone* Dengan Tumbukan Burung Pada *Horizontal Stabilizer*

Pada **Gambar 4.21**, menampilkan grafik internal energi perbandingan antara tumbukan drone dengan tumbukan burung

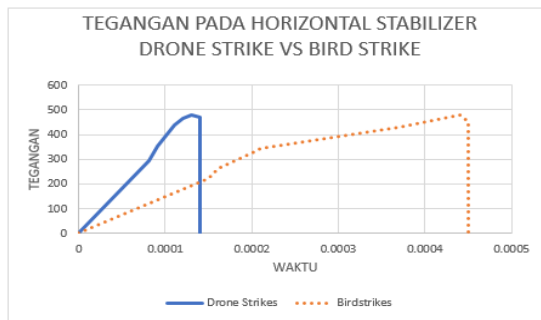
pada *horizontal stabilizer*. Pada grafik, terlihat bahwa energi yang diserap oleh horizontal stabilizer yang paling besar adalah tumbukan burung atau bird strike dengan nilai sebesar 15498684 mJ atau 15498.684 J. Sementara, internal energi karena tumbukan drone adalah 14894731 mJ atau 14894.731 J. Parameter tumbukan yang digunakan untuk membandingkan tumbukan *drone* dengan tumbukan burung diperoleh dari simulasi lokasi terparah, kecepatan terparah dan sudut terparah yaitu di antara rib pada section 2 dengan kecepatan 151 m/s dan sudut 0° . Penyerapan energi yang terjadi pada tumbukan drone lebih kecil daripada bird strike. Hal ini dikarenakan material *horizontal stabilizer* yang ditumbuk oleh *drone* sudah gagal dan sudah tidak bisa menyerap energi lagi, kemudian *drone* juga merusak *skin, spar* dan *rib horizontal stabilizer*. Pada kasus *bird strike*, *horizontal stabilizer* masih bisa menyerap energi dari burung, maka dari itu energi yang dihasilkan pada grafik menjadi lebih besar.



Gambar 3.13 Grafik Internal Energi Perbandingan Antara Tumbukan Drone Dengan Tumbukan Burung Pada Horizontal Stabilizer

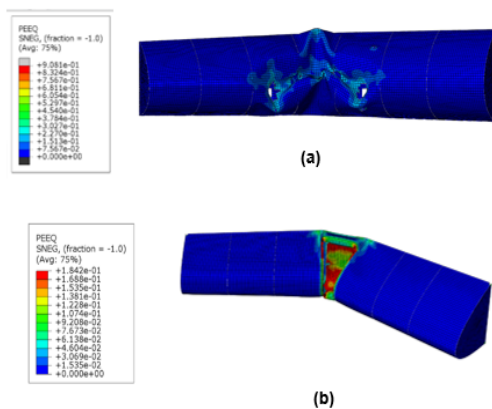
Ketika kecepatan tumbukan antara drone dan burung memiliki nilai yang sama, energi kinetik dari drone lebih rendah daripada burung. Namun kerusakan yang disebabkan tumbukan drone lebih berbahaya daripada burung. Hal ini dijelaskan dengan 2 alasan, pertama, material burung memiliki perilaku seperti fluida dan akan mengalami hamburan (*splash*) selama proses

tumbukan. Kedua, meskipun tubuh burung berisi tulang, darah, dan organ lainnya dengan perbedaan densitas, pada simulasi ini burung dimodelkan dengan material yang homogen. Namun, untuk drone dimodelkan dengan material yang heterogen dan komponen yang solid, seperti baterai, motor, dan kamera yang dapat menyebabkan pembebanan tumbukan yang tinggi.



Gambar 3.14 Grafik Tegangan Pada Horizontal Stabilizer Dronestrike vs Birdstrike

Pada **Gambar 3.14**, merupakan grafik tegangan horizontal stabilizer yang ditabrak oleh drone dan oleh burung. Grafik diambil dari titik node awal kegagalan material dari skin horizontal stabilizer. Pada grafik, terlihat bahwa pada horizontal yang ditabrak drone waktu untuk sampai material skin horizontal stabilizer menjadi gagal lebih cepat daripada horizontal stabilizer yang ditabrak oleh burung. Pada horizontal stabilizer yang ditabrak oleh drone sudah gagal materialnya pada waktu 14 ms, sementara kerusakan yang diakibatkan burung pada waktu 45 ms.



Gambar 3.15 Visualisasi Regangan Plastis Antara Tumbukan Drone Dengan Tumbukan Burung Pada Horizontal Stabilizer

Pada **Gambar 3.15**, area regangan plastis yang disebabkan oleh drone lebih luas daripada burung. Hal ini dikarenakan dimensi drone lebih besar daripada dimensi burung meskipun massa drone lebih ringan daripada massa burung. Pada kedua visualisasi horizontal stabilizer telah terjadi kegagalan karena nilai regangan plastis telah mencapai nilai kegagalan regangan dari material horizontal stabilizer.

IV KESIMPULAN

Berdasarkan analisis simulasi tumbukan *drone* pada *horizontal stabilizer* dengan variasi lokasi, sudut, kecepatan tumbukan dan dibandingkan dengan *bird strike* diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Simulasi *drone strike* dan *bird strike* telah berhasil dilakukan. Berdasarkan hasil simulasi semua skenario, diperoleh skenario tumbukan drone yang menyebabkan kerusakan paling serius dengan potensi kejadian paling tinggi adalah tumbukan di antara rib dengan section 2 dengan kecepatan 151 m/s. Skenario tersebut dipertimbangkan berdasarkan variabel tegangan, regangan, dan penyerapan energi.
2. Tumbukan drone pada *horizontal stabilizer* di udara dengan massa 3428 gr lebih kecil daripada massa burung 3600 gr lebih merusak. Hal ini karena bagian *skin*, *ribs* dan *spar horizontal stabilizer* mengalami kerusakan yang lebih parah daripada akibat tumbukan burung.

DAFTAR PUSTAKA

1. <https://www.auvsi.org/our-impact/economic-report> , diakses pada 9 April 2021.
2. Xianghao, Meng., Sun, Yingjun., Yu, Jingyu., Tang, Zhongbin., Liu, Jun., Suo, Tao., Li, Yulong., 2019, Dynamic response of the horizontal stabilizer during UAS airborne collision., *International Journal of Impact Engineering*.
3. Casr 25 subbagian 25.631
4. Darussalam, 2016, Drone Sebagai Pemantau Korban Bencana Menggunakan Sensor PIR

- (PASSIVE INFRARED RECEIVER)., *Skripsi*, Program Studi Teknik Elektronika, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang.
5. Michael c.y.niu., 1989., *Airframe Structural Design.*, California: Lockheed Aeronautical System Company Burbank.
 6. Structure Repair Manual 737-800 Chapter 55 Horizontal Stabilizer.
 7. Yuniarti, E., Sitompul, S.A., 2019, Pengaruh Model Burung Silinder dan Silinder Dengan Kedua Ujung Setengah Bola Dengan Pemodelan Elemen Hingga Kasus Tabrak Burung, *Jurnal Teknologi Dirgantara*, No. 1, Vol. 17, 41-56.
 8. Wibowo, A. T., Haryadi, G. D., 2014, Pengaruh *Heat Treatment T6* Pada Aluminium Alloy 6061-O Dan Pengelasan *Transversal Tungsten Inert Gas* Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro, *Jurnal Teknik Mesin (S-1)*, No 4, Vol. 2, 374-381.
 9. Reddy, T. B., Linden, D., 2011, *Linden's Handbook of Batteries. ed. ke-4*, New York: McGraw-Hill Education.
 10. Budiwirawan, A. P., Endah K., 2010, Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Plate Sebagai Bahan Komposit Eksternal Pada Struktur Balok Beton Bertulang, *Sainteknologi : Jurnal Sains dan Teknologi*, Vol. 8 No. 1.
 11. Nurtanto, D., Hasanuddin, A., 2014, Desain Pelat Beton Berpori Dengan Polikarbonat, *Skripsi*, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Jember, Jawa Timur.
 12. R.S. Khurmi, 2002, *Strength Of Material*, Chand & Company Ltd.
 13. Jenkins, D., & Vasigh, B., 2013, The Economic Impact of Unmanned Aircraft Systems Integration in the United States. *In Association for Unmanned Vehicle Systems International.*
 14. Kuntjoro, W., 2005, *An Introduction To The Finite Element Method*, *Universiti Teknologi MARA*, Malaysia.
 15. Warsiyanto, B.A., Widanto, M.H., Musthofa, I., Maulana, I., 2020, Dynamic Response of Commuter Category Aircraft Wing Against Drone Collision, *Jurnal Teknologi Dirgantara*, No. 2, Vol. 18, 81-92.
 16. Heimbs, S., 2011, Computational Methods for Bird Strike Simulations: A Review, *Computers and Structures*, Vol. 89, 2093-2112
 17. Liu, J., Li, Y., & Gao, X. (2014). Bird strike on a flat plate: Experiments and numerical simulations. *International Journal of Impact Engineering.*
 18. FAA, Small UAS, FAR 107, 2016.
 19. FAA, General Operation and Flight Rules, FAR 91.117, 2016.
 20. Warsiyanto, Budi Aji., 2019, Analisis Respon Dinamik Windshield Pesawat Komuter 19 Penumpang Terhadap Fenomena Bird Strike Menggunakan Metode Elemen Hingga, *Skripsi*, Program Studi Teknik Penerbangan, Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma, Jakarta.
 21. Lu, Xiaohua., Liu, X., Li, Yulong., Zhang, Yingchun., 2020, Simulations Of Airborne Collisions Between Drones and an Aircraft Windshield, *Aerospace Science and Technology.*
 22. Hibbeler, R.C, 2017, *Mechanic Of Materials*, Tenth Edition Pearson Education Ltd., London.
 23. <https://www.dji.com/id/inspire-1> , diakses pada 20 Maret 2021