

# Analisis Numerik Pengaruh Gasket pada Windshield Pesawat Komuter 19 Penumpang Terhadap Fenomena *Bird Strike*

**Agung Laksono<sup>\*,1</sup>, Sahril Afandi Sitompul<sup>2</sup>, Agus Suprianto<sup>3</sup>, Rizky Fitriansyah<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Fakultas Teknologi Kedirgantaraan, Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma, Indonesia

<sup>4,5</sup>Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, Indonesia

\*Korespondensi Penulis. agunglaksono8154@gmail.com

**Abstrak** - Pesawat terbang saat ini sudah menjadi moda transportasi yang cukup populer, dikarenakan kemampuannya dalam memanfaatkan ruang udara sebagai jalur penerbangan, sehingga dapat mengefisiensi jarak tempuh. Untuk menunjang keselamatan penumpang pesawat terbang, setiap komponen pada pesawat harus lulus uji. Salah satunya pada bagian *windshield* pesawat yang rentan terjadinya tumbukan terhadap benda lain. Sesuai dengan regulasi pada Civil Aviation Safety Regulation (CASR) *windshield* harus menahan beban dampak dari burung dengan berat 0,91 kg. Pada simulasi ini, bentuk material dari burung menggunakan jenis EOS Tabular. Untuk pemodelan *windshield*, *frame*, gasket dan burung menggunakan metode umum untuk solid material, yaitu metode *Lagrangian*. *Rubber* digunakan sebagai material gasket dengan *mooney rivlin* untuk pemodelan perilaku material. Sedangkan material polimetil metakrilat dan aluminium alloy 7075 T6 digunakan pada bagian *windshield* dan *frame*. Pemodelan numerik divalidasi dengan menggunakan hasil analitik. Ketebalan gasket 2 mm menghasilkan penyerapan energi yang paling optimum. Penggunaan gasket pada *windshield* tidak menimbulkan efek yang signifikan pada *windshield* karena gasket rata-rata hanya mampu menyerap 5% dari total energi yang diserap seluruh *part windshield*. Parameter tumbukan yang menghasilkan kegagalan paling besar terjadi pada kecepatan 87,5 m/s dengan sudut  $-15^\circ$ . Daerah yang paling rawan terjadinya kegagalan material terletak pada area lubang baut bagian atas.

Kata kunci: Tabrak burung, metode *Lagrangian*, *Windshield*, Gasket, *Mooney rivlin model*.

**Abstract** - Aircraft are currently quite popular transportation, due to its ability to utilize air space as a flight path, so that it can be efficient in mileage. To support the safety of airplane passengers, every component on the aircraft must pass the test. One of them in the aircraft *windshields* that are prone to collisions with other objects. In accordance with the regulations in the Civil Aviation Safety Regulation (CASR) the *windshield* must withstand the impact load of a 0,91 kg bird. In this simulation, the material shape of the bird uses the EOS Tabular type. For modeling *windshields*, *frame*, *gaskets* and *birds* use a general method for solid materials, namely the *Lagrangian* method. *Rubber* used as gasket material with *mooney rivlin* for modeling material behavior. the polymethyl methacrylate and aluminum alloy 7075 T6 material is used in the *windshield* and *frame*. Numerical modeling is validated using analytical results. The gasket thickness of 2 mm produces the most optimum energy absorption. The use of gaskets on the *windshield* does not have a significant effect on the *windshield* because the gasket on average is only able to absorb 5% of the total energy absorbed by all *windshield* parts. The collision parameter that produces the greatest failure occurs at a speed of 87,5 m/s with  $-15^\circ$  angle. The area that is most prone to material failure is in the area of the upper bolt hole.

Keywords: Bird strike, Metode *Lagrangian*, *Windshield*, Gasket, *Mooney rivlin model*.

## I. Pendahuluan

Pesawat terbang saat ini sudah menjadi moda transportasi yang cukup populer, dikarenakan kemampuannya dalam memanfaatkan ruang udara sebagai jalur penerbangan, sehingga dapat mengefisiensi jarak tempuh. Pesawat terbang dituntut untuk memenuhi persyaratan sebelum ia dibolehkan digunakan masyarakat luas ataupun keperluan lain. Pada pesawat komersil, pesawat terbang diwajibkan untuk memenuhi persyaratan yang dibuat oleh lembaga tertentu, untuk di Indonesia lembaga yang mengatur regulasi untuk pesawat terbang adalah DKPPU dengan peraturan yang diterbitkan yaitu CASR.

Untuk menunjang keselamatan penumpang pesawat terbang, setiap komponen pada pesawat harus lulus uji. Salah satunya pada bagian *windshield* yang terletak pada bagian *cockpit*. *Windshield* pada pesawat berpenumpang harus bisa menahan beban impak dari hal-hal yang tidak diinginkan ketika sedang mengudara. Pada perjalanan pesawat terbang, *Bird strike* merupakan suatu ancaman terhadap keamanan perjalanan udara. Faktanya kurang lebih 90% dari *foreign object damage* diakibatkan oleh unggas [1]. Berdasarkan database FAA, 13.244 kasus *bird strike* dilaporkan pada tahun 2014, dengan 581 menyebabkan kerusakan yang signifikan. Angka-angka ini berarti bahwa ada 1.5 *bird strike* per jam dalam sepanjang tahun. Mayoritas *bird strike* terjadi di ketinggian rendah (kurang dari 3000 kaki).

Agar mengurangi dampak dari *bird strike* dibuatlah simulasi untuk mengetahui dampaknya, setelah itu data dari hasil simulasi dapat digunakan untuk mengembangkan struktur pada pesawat terbang. Eksperimen adalah metode terbaik untuk menganalisis serangan burung secara realistis. Namun, metode ini kurang efektif (tidak dapat memberikan hasil yang dapat diulang karena perbedaan spesies burung) dan kurang efisien (membutuhkan waktu dan biaya dalam proses pembuatan target atau piring). Pada tahun 1970, metode yang lebih efektif dan efisien ditemukan, yaitu

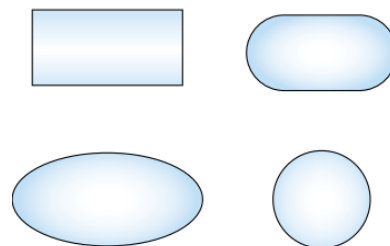
aplikasi perangkat lunak numerik (finite element).

Dalam tugas akhir ini, simulasi *bird strike* dilakukan untuk menentukan ketebalan gasket pada *windshield* yang optimum, untuk mengurangi dampak yang terjadi pada bagian *windshield*. selain itu juga dilakukan variasi parameter tumbukan untuk mengetahui respon dinamik setiap bagian *windshield*. Simulasi dilakukan menggunakan metode *Lagrangian*, dan dengan menggunakan perangkat lunak simulasi numerik Abaqus.

## II. Pemodelan Numerik

### 2.1 Model Material Burung

Bentuk geometri dari burung merupakan hal yang penting dalam simulasi *bird strike*, dikarenakan bentuk dari burung sangat mempengaruhi nilai *hugoniot pressure* dan respon dinamik dari target. Merujuk pada beberapa studi, model burung pada simulasi biasanya menggunakan empat tipe, seperti pada Gambar 1 [2]. *Hemispherical-ended cylinder* adalah geometri burung yang paling umum digunakan untuk simulasi. Sementara *straight-ended cylinder* adalah geometri yang paling jarang digunakan untuk simulasi. Distribusi tekanan yang didapat dari geometri *straight-ended cylinder*, menghasilkan nilai distribusi tekanan puncak yang paling mendekati hasilnya dengan eksperimen yang telah dilakukan oleh Wilbeck (1978) [2]. Hemisphere yang direkomendasikan oleh Airoidi (2006) adalah hemisphere yang memiliki nilai  $L/D = 1,6$ , karena menghasilkan kontak gaya puncak yang mendekati dengan nilai eksperimen [3]. Namun, umumnya nilai  $L/D$  yang paling sering digunakan memiliki nilai 2.



Gambar 1 Bentuk geometri burung, *straight-ended cylinder*, *hemispherical-ended cylinder*, *ellipsoid*, *sphere* [2]

Untuk memodelkan material burung, dilakukan pendekatan secara sifat material burung, yaitu material burung memiliki sifat *isotropic elastic plastic hydrodynamics* (IEPH). Material burung berperilaku elastis-plastis pada tekanan rendah dan hidrodinamika pada tekanan tinggi. Hidrodinamika digambarkan oleh hubungan tekanan terhadap rasio kepadatan zat atau yang dikenal dengan istilah *Equation Of State* (EOS) [2]. EOS adalah persamaan yang menghubungkan variabel material fluida, seperti tekanan, densitas, regangan, dan energi internal [2]. EOS tabular dalam abaqus merepresentasikan secara langsung kurva tekanan hugoniot [4]. EOS tabular dibentuk menggunakan persamaan 1. Dimana  $f_1(\varepsilon_{vol})$  dan  $f_2(\varepsilon_{vol})$  adalah fungsi dari regangan volume logaritmik  $\varepsilon_{vol}$ . Dengan  $\varepsilon_{vol}$  diperoleh dari nilai logaritma natural antara densitas sebelum dan sesudah tumbukan ( $\ln(\frac{\rho_1}{\rho_2})$ ).

$$p = f_1(\varepsilon_{vol}) + \rho_0 f_2(\varepsilon_{vol}) E_m \quad (1)$$

porositas (rongga internal) merupakan bagian terpenting untuk memodelkan burung agar sesuai dengan keadaan aslinya. Dikarenakan rongga antara organ - organ tubuh burung dapat mempengaruhi tekanan yang dihasilkan oleh model burung. Nilai porositas yang menghasilkan nilai tekanan yang mendekati burung asli adalah 10-15% [4]. Properti material yang digunakan pada material burung tersaji pada Tabel 1.

## 2.2 Model Material Windshield

Material polimetil metakrilat digunakan pada *windshield*, karena kemampuannya untuk menerima cahaya hingga 92%, Selain itu juga karena

properti mekanik material polimetil metakrilat yang sangat cocok untuk dijadikan sebagai *windshield* pada pesawat terbang, karena tahan terhadap beban tumbukan, tidak menimbulkan warna kekuningan jika terpapar sinar *ultraviolet*, dan serpihan material tidak tajam ketika material mengalami kegagalan.

$$\sigma_y = (\sigma_{y0} + B\varepsilon_{pl}^n) \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{D} \right)^{1/q} \right] \quad (2)$$

Dalam persamaan 2, nilai  $\sigma_y$  adalah tegangan luluh material,  $\sigma_{y0}$  adalah tegangan luluh pada awal regangan plastis, B adalah koefisien pengerasan regangan, D dan q adalah koefisien laju regangan, dan n adalah eksponen pengerasan regangan. Kriteria kegagalan regangan utama maksimum (*maximum principle strain failure criterion*) dapat digunakan untuk memprediksi kegagalan pada material polimetil metakrilat. Properti material yang digunakan pada material *Windshield* tersaji pada Tabel 2.

## 2.3 Model Material Windshield Frame

*Windshield frame* adalah struktur pesawat yang biasanya berbahan aluminium, yang berguna untuk menopang *Windshield*. Dalam kasus tabrak burung *windshield frame* memiliki peranan yang sangat penting, terutama dalam hal penyerapan energi. Properti material yang digunakan pada material burung tersaji pada Tabel 3. Pemilihan material dan bentuk *windshield frame* yang digunakan sangat mempengaruhi nilai penyerapan energi, karena apabila material yang digunakan *windshield frame* terlalu kaku akan menyebabkan tegangan yang berlebihan pada area sambungan *windshield* dengan *windshield frame*. Tegangan yang berlebihan pada area *windshield* bisa menyebabkan kegagalan struktur pada *windshield* apabila tegangan melebihi nilai *ultimate tensile strength windshield*.

Tabel 1. Properti material model burung [4]

Densitas (kg.m <sup>-3</sup> )	Tegangan luluh (MPa)	Tegangan hidrostatis (MPa)	Regangan elastis	Modulus geser	Porositas (%)
938	0,1	2,75	0.01	10	10

Tabel 2. Properti material model *windshield* [5]

Densitas (kg.m <sup>-3</sup> )	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Failure strain
1186	3.2	0,4	68	78	,067

Tabel 3. Properti material model *windshield frame* [6]

Densitas (kg.m <sup>-3</sup> )	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Failure strain
2796	71,7	0,33	503	2796	,11

Tabel 4. Properti material model gasket [7]

Densitas (kg.m <sup>-3</sup> )	C10 (MPa)	C01 (MPa)
1060	0,378	997

## 2.4 Model Material Gasket

Perilaku material gasket dengan bahan dasar *rubber* mempunyai sifat material *hyperelastic*. Untuk memodelkan material *hyperelastic* ada berbagai cara, diantaranya bisa menggunakan model *Neo-Hookean*, model *Mooney-Rivlin*, dan model *Yeoh*. Model *mooney-rivlin* digunakan untuk memodelkan gasket pada *windshield*, karena hanya perlu dua parameter untuk memodelkan perilaku gasket [8]. Model *money-rivlin* menyatakan energi regangan mekanik sebagai jumlah dari invarian dalam persamaan sebagai berikut.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (3)$$

Dimana,  $W$  adalah nilai dari energi regangan dari material gasket. Sedangkan  $C_{10}$  dan  $C_{01}$  adalah material konstan [9]. Sedangkan  $I_1$  dan  $I_2$  adalah invarian regangan, yang mana adalah fungsi dari tiga regangan prinsipal, dengan  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , dan  $\lambda_3$  sejajar dengan arah regangan  $x$ ,  $y$ ,  $z$  [9].

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= (\lambda_1\lambda_2)^2 + (\lambda_2\lambda_3)^2 + (\lambda_1\lambda_3)^2 \quad (4) \\ I_3 &= \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 \end{aligned}$$

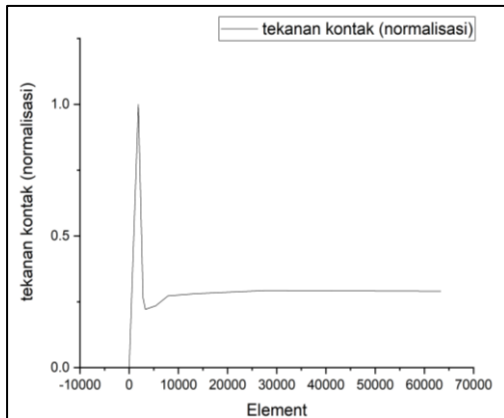
## 2.5 Verifikasi Model Numerik

Pada penelitian ini, verifikasi model dilakukan dengan menggunakan *Mesh* konvergensi pada setiap bagian

struktur yang bertujuan untuk menghasilkan simulasi yang akurat. Konvergensi yang dilakukan pada penelitian ini dimulai menggunakan jenis *coarse mesh* hingga *fine mesh*, hal ini dilakukan untuk menghasilkan grafik yang jelas. Jenis *mesh coarse mesh* dapat memberikan hasil yang kurang akurat jika dibandingkan dengan jenis *finer mesh* [10].

### 2.5.1 Model Burung

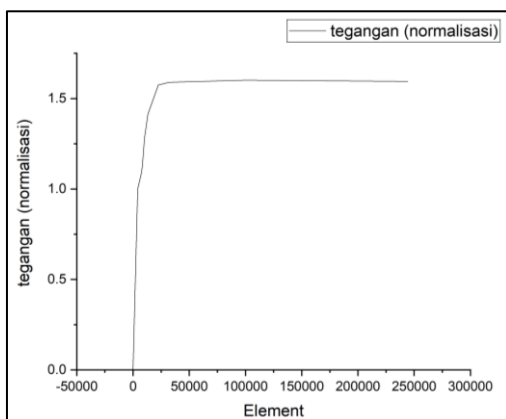
Konvergensi Burung dilakukan dengan cara menabrakan burung dengan plat datar yang sudah konvergen. konvergensi burng dimulai dari ukuran elemen 10 mm hingga 3 mm, dimulai dari ukuran mesh 10 mm dikarenakan sudah menghasilkan jenis *coarse mesh*. Pengaruh perbedaan ukuran mesh dibandingkan berdasarkan nilai tekanan kontak maksimum yang terjadi pada pelat. Nilai tekanan kontak maksimum dijadikan sebagai nilai perbandingan pada burung karena nilai tersebut bisa mewakili respon dinamik burung. Nilai tekanan kontak maksimum dengan perbedaan ukuran mesh dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2 jumlah elemen 1000 – 6000 mm menghasilkan nilai tekanan kontak maksimum yang konvergen, Sehingga ukuran mesh 4 mm dengan jumlah elemen 27744 dapat digunakan sebagai jumlah elemen burung.



Gambar 2 Grafik konvergensi *mesh* pada burung dengan menggunakan perbedaan nilai tekanan kontak maksimum.

### 2.5.2 Model *Windshield*

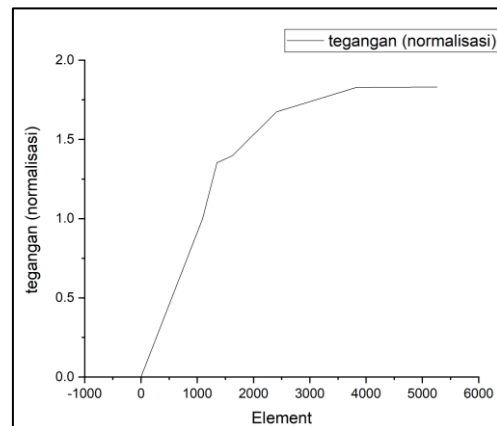
Konvergensi *windshield* dilakukan dimulai dari ukuran elemen 20 mm hingga 3 mm, dikarenakan ukuran *mesh* 20 mm sudah menghasilkan jenis *coarse mesh*. Setelah itu model *windshield* ditumbukan oleh burung dengan kecepatan tumbukan 62 m/s dan sudut 0 derajat. *Windshield* ditahan menggunakan kondisi batas yang diletakan pada area lubang baut dengan jenis kondisi batas *pinned* agar area lubang *windshield* tidak bergerak. Berdasarkan Gambar 3 jumlah 25000 – 250000 elemen menghasilkan nilai perpindahan maksimum yang konvergen, Sehingga ukuran *mesh* 5 mm dengan jumlah elemen 32006 dapat digunakan sebagai jumlah elemen pada *windshield*.



Gambar 3 Grafik konvergensi *mesh* pada *windshield* dengan menggunakan perbedaan nilai tegangan normalisasi

### 2.5.3 Model *Windshield Frame*

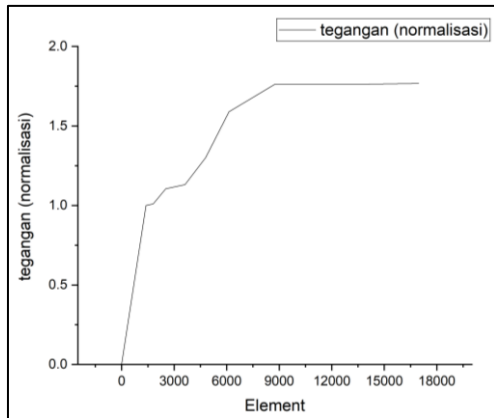
Konvergensi *windshield frame* dimulai dari ukuran *mesh* 7 mm hingga 2 mm, dikarenakan ukuran *mesh* 7 mm sudah menghasilkan jenis *coarse mesh*. Pengaruh perbedaan ukuran *mesh* dibandingkan berdasarkan nilai tegangan maksimum. Nilai tegangan maksimum dijadikan sebagai nilai perbandingan pada *frame* karena nilai tersebut mewakili respon dinamik pada *frame*. Berdasarkan gambar grafik konvergensi pada Gambar 4, dimulai dari jumlah elemen 3800 sudah mulai menghasilkan nilai tegangan maksimum yang konvergen, Sehingga jumlah 5261 elemen digunakan sebagai jumlah minimum elemen yang dapat digunakan untuk simulasi.



Gambar 4 Grafik konvergensi *mesh* pada *windshield frame* dengan menggunakan perbedaan nilai tegangan normalisasi

### 2.5.4 Model *Gasket*

Konvergensi *gasket* dilakukan dengan cara menumbukkan burung pada bagian *gasket* dengan parameter burung yang digunakan sesuai dengan regulasi. *Gasket* diletakkan pada bagian *frame* agar bisa menumbuk dengan burung. Konvergensi *gasket* dimulai dari ukuran elemen 6 mm hingga 2 mm. Berdasarkan Gambar 5 jumlah elemen 8758 – 16968 menghasilkan nilai tegangan maksimum yang konvergen, Sehingga jumlah elemen 8758 dapat digunakan untuk memodelkan *gasket*.

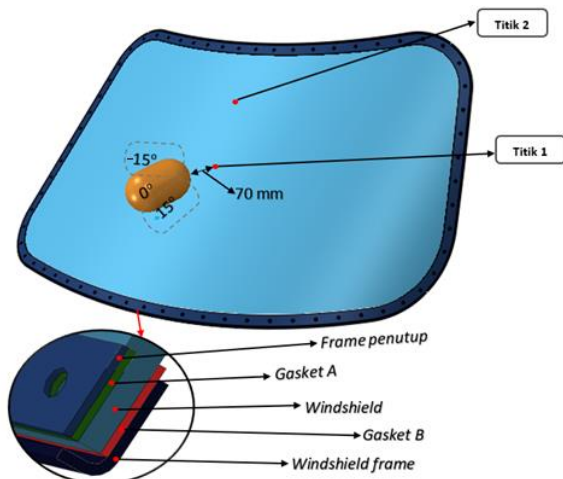


Gambar 5 Grafik konvergensi *mesh* pada gasket dengan menggunakan perbedaan nilai tegangan normalisasi.

## 2.6 Set-Up Simulasi

### 2.6.1 Penggabungan Model

Penggabungan model (*Assembly*) dilakukan untuk menggabungkan beberapa model yang telah di-*setup* dan mengatur tata letaknya agar sesuai dengan penelitian. Dalam penelitian ini sudut tumbukkan antara burung dengan *windshield* divariasikan dengan nilai  $-15^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ , dan  $15^{\circ}$  untuk lebih jelasnya ditampilkan pada Gambar 6.

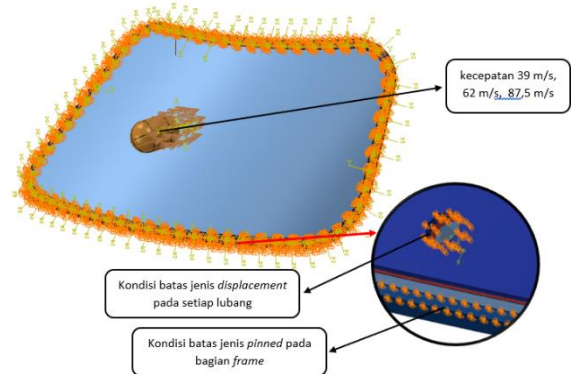


Gambar 6 Penggabungan seluruh model

### 2.6.2 Pembebanan dan Kondisi Batas

Dalam simulasi tabrak burung agar simulasi sesuai dengan keadaan aslinya maka perlu diberikan pembebanan dan kondisi batas yang sesuai. Untuk beban yang digunakan adalah jenis kecepatan, dengan mengatur kecepatan yang terjadi pada model burung, untuk kecepatan yang digunakan dalam simulasi adalah

39, 62, dan 87,5 m/s. Dapat dilihat pada Gambar 7 kondisi batas digunakan pada area *frame* bagian penutup dengan tipe *pinned* yang ditempatkan pada sisi lubang baut bagian atas.



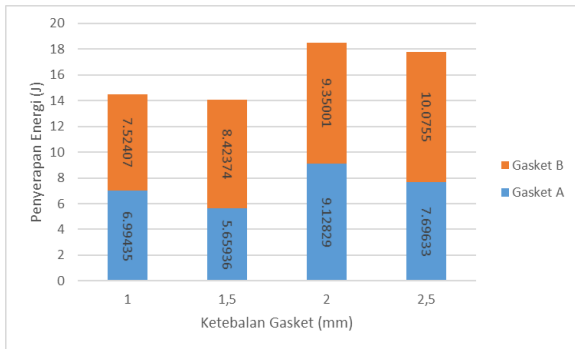
Gambar 7 Pembebanan dan kondisi batas pada model

## III. Hasil dan Diskusi

### 3.1 Simulasi Dengan Variasi Ketebalan Gasket

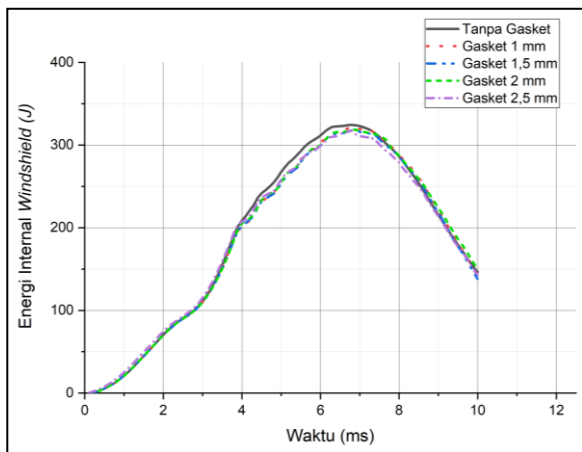
Simulasi dengan variasi ketebalan gasket dilakukan dengan parameter yang digunakan berdasarkan CASR 23.775. Ketebalan gasket divariasikan mulai dari 1 – 2,5 mm dengan interval ketebalan 0,5 mm. Hasil simulasi dengan variasi ketebalan gasket menyebabkan dampak kerusakan yang tidak signifikan. Area disekitar lubang bagian atas *windshield* mengalami dampak yang paling parah jika dibandingkan area *windshield* yang lain. Hal ini dikarenakan arah tegangan yang disebabkan oleh tumbukan burung mengarah kebagian atas. Mengakibatkan area atas *windshield* menerima tegangan paling besar. Pada bagian lubang *windshield* bagian atas juga mengalami kegagalan struktur. Penyerapan energi paling maksimum terjadi pada ketebalan gasket 2 mm yang dapat dilihat pada Gambar 8. Oleh karena itu ketebalan gasket 2 mm dijadikan sebagai ketebalan gasket yang akan digunakan untuk variasi parameter tumbukan.

Terlihat pada gambar di atas gasket bagian bawah mengalami penyerapan energi yang lebih besar jika dibandingkan pada gasket bagian atas. Hal ini dikarenakan gasket bagian bawah secara langsung ikut menerima beban impact



Gambar 8 Penyerapan energi maksimum oleh gasket bagian atas dan bawah dengan variasi ketebalan

oleh burung, yang disalurkan oleh *windshield*. Untuk penyerapan pada gasket belakang yang paling besar terdapat pada gasket dengan ketebalan 2,5 mm. Sedangkan untuk penyerapan yang optimum pada gasket belakang dan depan terjadi pada ketebalan gasket 2 mm, dengan total penyerapan energi 18,478. Untuk lebih memperjelas dampak pada *windshield* terhadap variasi ketebalan gasket dapat dilihat pada Gambar 9 grafik penyerapan energi pada *windshield*



Gambar 9 Penyerapan energi oleh *windshield* dengan variasi ketebalan gasket

Tegangan yang terjadi pada gasket dan *frame* ditampilkan pada Gambar 10. Terlihat dengan jelas bahwa tegangan yang diterima oleh gasket B terkonsentrasi pada sisi bagian atas dan bawah, hal ini disebabkan oleh tegangan yang terjadi pada bagian *windshield* terkonsentrasi pada sisi bagian atas dan bawah sehingga tegangan ini secara langsung diterima dari *windshield* ke arah

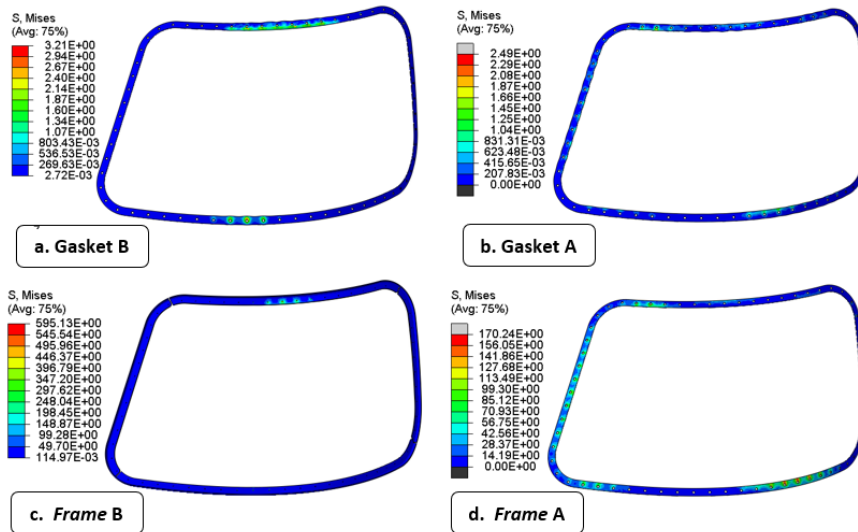
gasket B. Oleh karena itu tegangan yang diterima oleh gasket B jauh lebih besar jika dibandingkan dengan gasket bagian A.

Sedangkan pada gasket bagian atas tegangan terjadi merata diseluruh bagian, namun tegangan maksimum terjadi pada sisi gasket bagian atas dengan besar 2,49 MPa. Tegangan yang diterima oleh gasket setelah itu disalurkan ke bagian *frame*. *Frame* bagian bawah menerima tegangan yang paling besar karena bagian ini merupakan tempat yang menyangga *windshield* agar tetap bertahan pada tempatnya, oleh karena itu pada bagian ini menghasilkan nilai tegangan yang tertinggi hingga 595 MPa.

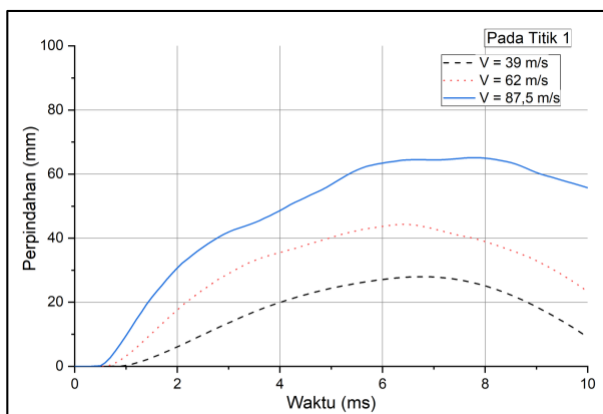
### 3.2 Simulasi Dengan Variasi Kecepatan Burung

Simulasi dengan variasi kecepatan tumbukan burung dilakukan untuk mengetahui respon dinamik *windshield* terhadap perbedaan kecepatan tumbukan. Parameter tumbukan yang digunakan sesuai dengan regulasi dimana berat burung adalah tetap 0,91 kg, dan sudut tumbukan antara burung dengan pesawat adalah tetap 0 derajat, sedangkan parameter kecepatan divariasikan nilainya menjadi 39 m/s (take off), 62 m/s (landing), dan 87,5 m/s (cruising).

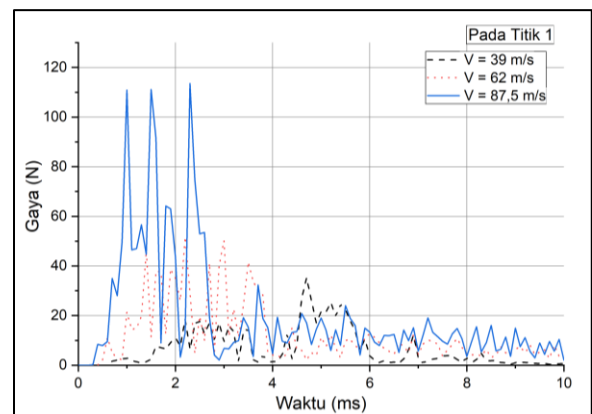
Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa nilai dari perpindahan pada titik satu meningkat seiring bertambahnya kecepatan tumbukan burung. Gaya yang diterima oleh *windshield* ditampilkan dalam Gambar 12. Gaya yang ditampilkan oleh grafik dihasilkan oleh lokasi titik 1. Dapat dilihat bahwa gaya yang dihasilkan oleh burung pada *windshield* meningkat seiring bertambahnya kecepatan. Gaya puncak pada kecepatan 39 m/s terjadi pada waktu 4,7 ms. Untuk kecepatan 87,5 m/s gaya puncak terjadi lebih cepat 2,4 ms jika dibandingkan dengan kecepatan 39 m/s. Hal ini dikarenakan perbedaan kecepatan pergerakan material burung.



Gambar 10 Tegangan yang terjadi pada gasket dengan ketebalan 2 mm dan pada *frame* dengan komposisi: a. Gasket B (Gasket yang letaknya di bagian *bawah windshield*); b. Gasket A (Gasket yang letaknya di bagian atas *windshield*); c. *Frame B* (*Frame* bagian belakang yang menopang *windshield*); d. *Frame A* (*Frame* bagian depan yang menutup *windshield*)



Gambar 11 Perpindahan yang terjadi pada *windshield* dengan variasi kecepatan dengan berat 0,91 kg dan sudut 0°

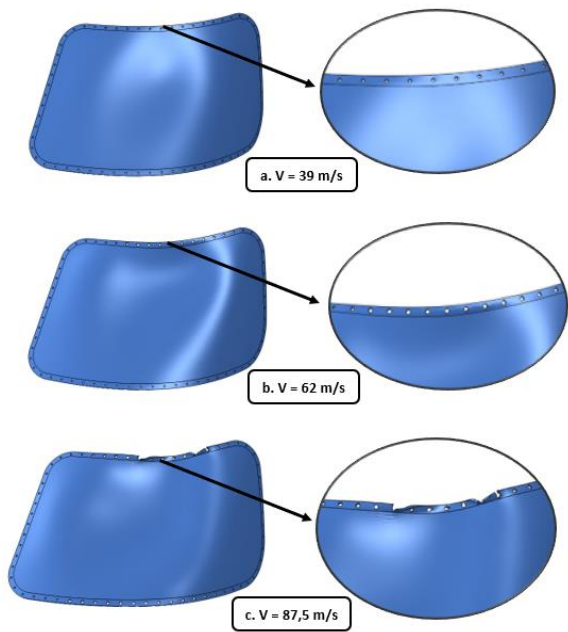


Gambar 12 Gaya yang diterima oleh *windshield* dengan variasi kecepatan dengan berat 0,91 kg dan sudut 0°

Efek deformasi dan kegagalan struktur yang terjadi akibat variasi kecepatan ditampilkan pada Gambar 13. Efek variasi kecepatan tumbukan menimbulkan dampak yang cukup signifikan, hal ini terlihat pada bentuk deformasi yang dihasilkan. Pada kecepatan 39 m/s struktur *windshield* masih bisa menahan beban dampak dari burung, dan pada kecepatan ini struktur tidak mengalami kegagalan. Pada kecepatan 62 m/s dan 87,5 m/s kegagalan struktur telah terjadi, kegagalan struktur terjadi pada area lubang baut. Namun kegagalan struktur paling parah terjadi pada kecepatan 87,5

m/s, dampak kerusakannya membuat kegagalan struktur skala besar yang menyebabkan struktur *windshield* bagian atas tersobek hingga bagian *windshield* atas keluar dari area penyangga. Kegagalan struktur pada *windshield* dapat terjadi karena tegangan yang terjadi pada area tersebut melebihi 78 MPa yang merupakan batas tegangan maksimum yang mampu diterima oleh material PMMA.

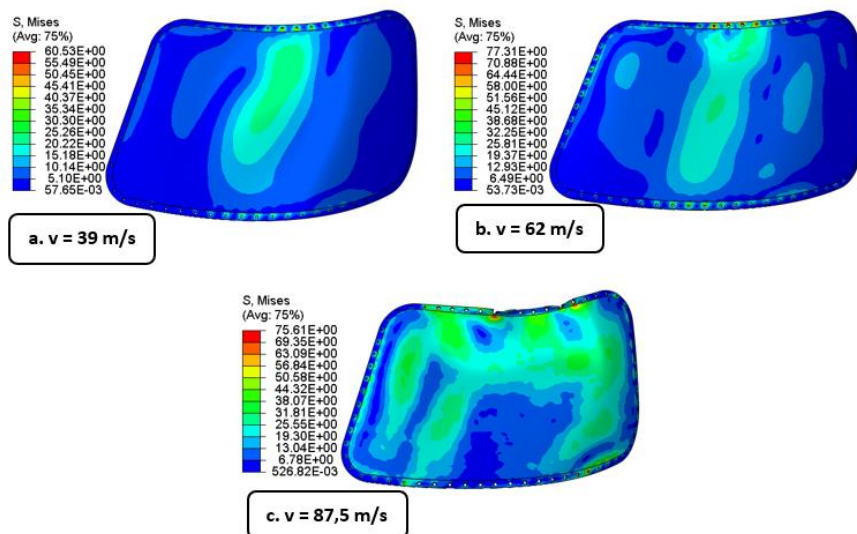
Pada Tabel 5 tersaji data energi yang terjadi pada seluruh bagian *windshield* dengan variasi kecepatan. Penyerapan energi yang paling besar



Gambar 13 Deformasi yang terjadi pada *windshield* dengan variasi kecepatan tumbukan

terjadi pada saat kecepatan 87,5 m/s dengan penyerapan energi yang diterima oleh gasket sebesar 62 J. Dapat dilihat juga pada kecepatan 62 m/s penyerapan energi pada seluruh bagian *windshield* yang paling dominan diterima oleh *windshield* dengan presentase penyerapan 89,4 %. Sedangkan presentase penyerapan energi yang dilakukan oleh gasket ketika kecepatan burung 62 m/s adalah 6 %.

Arah pergerakan aliran tegangan yang terjadi pada *windshield* disajikan



Gambar 14 Distribusi tegangan yang terjadi pada *windshield* dengan variasi kecepatan tumbukan

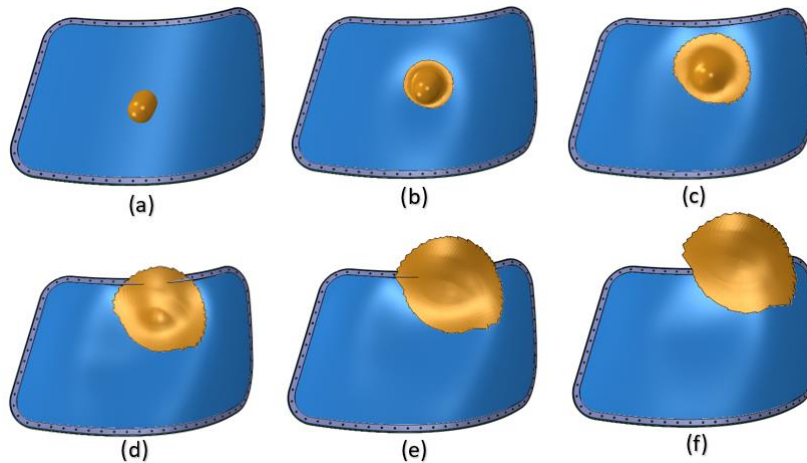
pada Gambar 14. Terlihat dengan jelas bahwa distribusi yang terjadi semakin luas seiring dengan meningkatnya kecepatan tumbukan. Hal ini disebabkan oleh gaya kinetik yang diberikan oleh burung semakin besar seiring bertambahnya kecepatan.

Tabel 5. Energi yang terjadi ketika simulasi variasi kecepatan tabrak burung dengan massa burung 0,91 kg, dan sudut tumbukan  $0^\circ$

Kecepatan (m/s)	Energi Internal Maksimum (J)			
	Wind shield	Burung	Frame	Gasket
39	90,8	161,67	2,74	1,93
62	293,88	283,49	19,94	18,07
87,5	714,75	416,38	86,94	62,14

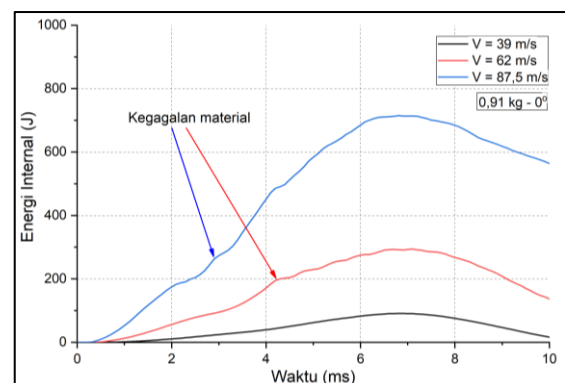
Kecepatan (m/s)	Energi Kinetik Maksimum (J)			
	Wind shield	Burung	Frame	Gasket
39	48,35	690,40	0,04	0,027
62	148,86	174,44	0,133	0,75
87,5	314,36	347,528	0,42	2,51



Gambar 15 Proses terjadinya tumbukan pada simulasi *bird strike* untuk kecepatan tumbukan 62 m/s, sudut tumbukan 0°, dan massa burung 0,91 kg berdasarkan interval waktu: (a) 0; (b) 2; (c) 4; (d) 6; (e) 8; (f) 10 ms

Tegangan pada *windshield* yang tidak melebihi tegangan maksimum material (78 MPa) terjadi ketika kecepatan tumbukan 39 m/s. Pada kecepatan 39 m/s tegangan maksimum yang diterima oleh *windshield* hanya mencapai 60,68 MPa. Sedangkan pada kecepatan 62 dan 87,5 m/s nilai tegangan yang dihasilkan sudah melebihi tegangan maksimum material sehingga kegagalan material terjadi. Kegagalan material terjadi pada area lubang baut yang menyambungkan antara *windshield*, gasket, dengan *frame*. Namun tegangan yang terjadi pada area lubang baut terkonsentrasi pada bagian atas, hal ini dikarenakan bentuk dari *windshield* yang memiliki kemiringan, sehingga model burung bergerak keatas seiring bertambahnya waktu.

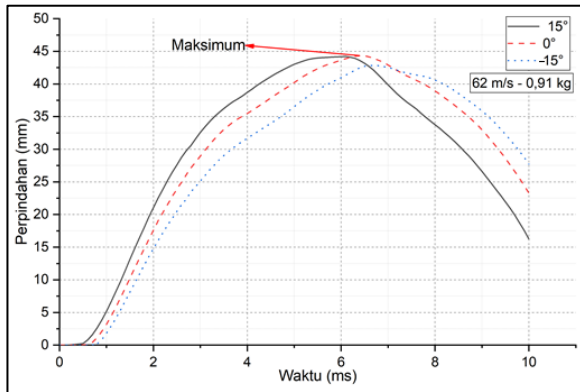
Proses terjadinya tumbukan antara burung dengan bagian *windshield* ditampilkan pada Gambar 15. Pergerakan model burung terlihat dengan jelas mengarah ke bagian atas *windshield* yang selanjutnya akan meninggalkan area *windshield*, yang disebabkan oleh bentuk geometri *windshield* yang mengalami kemiringan. Berdasarkan Gambar 16, meningkatnya kecepatan tumbukan mengakibatkan penyerapan energi oleh *windshield* yang semakin besar. Hal ini disebabkan oleh energi kinetik burung yang ikut meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan tumbukan.



Gambar 16 Penyerapan energi yang terjadi oleh *windshield* dengan variasi kecepatan tumbukan

### 3.3 Simulasi Dengan Variasi Kecepatan Burung

Simulasi dilakukan pada variabel kecepatan 62 m/s dan massa burung 0,91 kg yang tetap. Dimana variabel tetap ini dipertimbangkan sesuai regulasi pada CASR 23.775 yang menjadi acuan dalam proses simulasi ini. Variasi sudut tumbukan yang digunakan merujuk pada penelitian yang telah dilakukan oleh Uzair ahmed dar [11]. Pada Gambar 17, tersaji grafik perpindahan pada titik 1 yang menunjukkan bahwa sudut tumbukan 0° menghasilkan nilai perpindahan paling besar jika dibandingkan dengan sudut 15° dan -15°. Sedangkan nilai perpindahan pada sudut -15° menghasilkan nilai perpindahan yang terkecil jika dibandingkan dengan sudut 15° dan 0°.

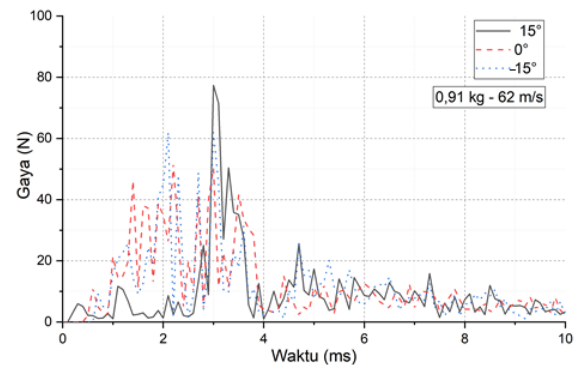


Gambar 17 Perpindahan yang terjadi pada titik 1 dengan variasi kecepatan tumbukan

Gaya kontak yang terjadi antara *windshield* dengan burung yang divariasikan sudutnya ditampilkan pada Gambar 18 Gaya kontak yang dihasilkan oleh sudut  $15^\circ$  menghasilkan gaya kontak maksimum terbesar dengan besar gaya 77,39 N. Sudut  $15^\circ$  menghasilkan gaya kontak maksimum yang lebih besar karena area kontak yang berinteraksi antara burung dengan *windshield* jauh lebih luas, hal ini mengakibatkan gaya yang diterima oleh *windshield* ikut meningkat. sedangkan untuk sudut  $0^\circ$  menghasilkan gaya kontak maksimum yang relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan sudut  $15^\circ$  dan  $-15^\circ$ .

Pergerakan aliran tegangan yang terjadi pada seluruh bagian *windshield* ditampilkan pada Gambar 19. Pergerakan aliran regangan terlihat dengan jelas, pada awal mula (1 ms) tegangan terkonsentrasi pada area bagian tengah *windshield* dengan nilai tegangan tertinggi mencapai 33,99 MPa. Kemudian tegangan menyebar ke arah bagian atas dan bawah *windshield* dan juga menyebar menuju bagian gasket dan *frame* terlihat pada waktu 2 ms pada Gambar 19. Setelah itu pada waktu 4 ms tegangan menemui titik maksimumnya hingga mencapai 506,7 MPa yang terjadi pada *frame* belakang bagian atas. Pada waktu 6 ms tegangan sudah mulai menurun, hal ini dapat dilihat pada tegangan maksimum yang sudah menurun dari waktu sebelumnya 506,7 hingga 342,92 MPa, penurunan tegangan yang terjadi ini mencapai 32,3 %. Sedangkan pada waktu 8 dan 10 ms

tegangan yang terjadi pada *part windshield* sudah mulai menurun hingga 97,15 MPa.



Gambar 18 Gaya kontak yang dihasilkan pada titik 1 dengan variasi sudut tumbukan

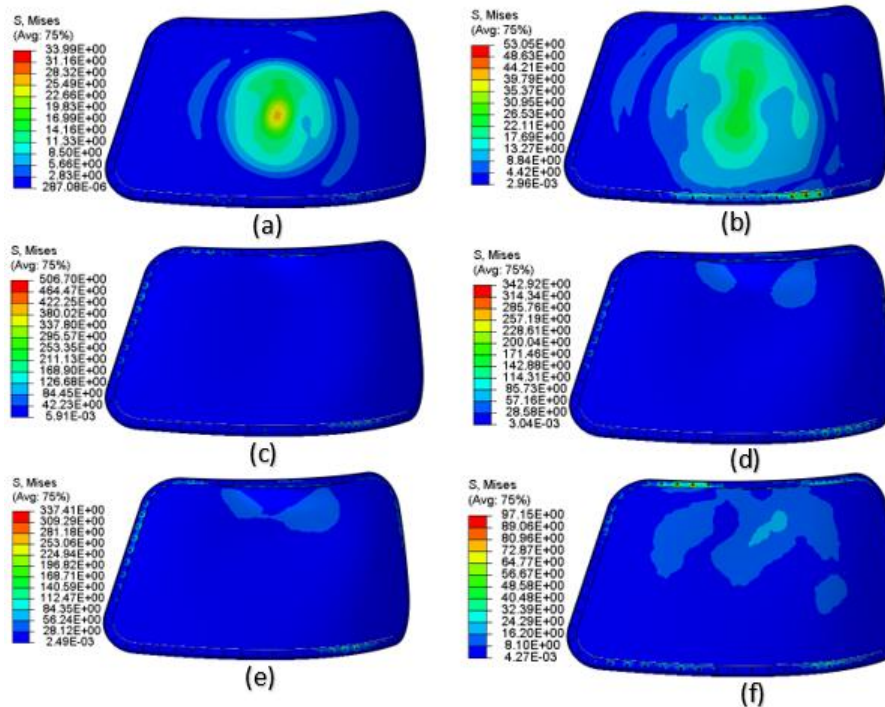
Gambar 20 menampilkan daerah yang telah memasuki sifat plastis material pada bagian *windshield* dengan variasi sudut tumbukan. Daerah plastis terjadi pada seluruh variasi sudut tumbukan ( $-15^\circ$ ,  $0^\circ$ , dan  $15^\circ$ ). Daerah plastis terjadi karena tegangan yang diterima melebihi 68 MPa, yaitu nilai tegangan luluh dari material PMMA. Energi yang terjadi pada seluruh bagian *windshield* dan burung disajikan dalam Tabel 5. Perbedaan variasi sudut tumbukan tidak terlalu berdampak terhadap energi yang dihasilkan oleh setiap bagian *windshield* dan burung. Namun energi internal dan energi kinetik paling besar pada *windshield* dihasilkan oleh sudut  $15^\circ$ . Pada Gasket penyerapan energi paling besar juga dihasilkan oleh sudut tumbukan  $15^\circ$ .

Tabel 5. Energi yang terjadi pada seluruh bagian *windshield* dan burung dengan variasi sudut tumbukan

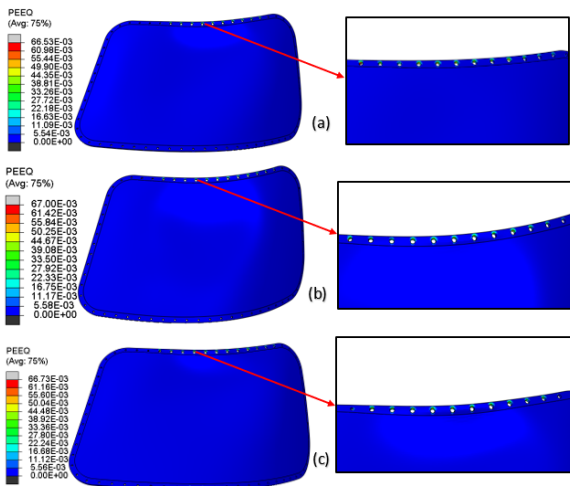
Sudut ( $^\circ$ )	Energi Internal Maksimum (J)			
	<i>Windshield</i>	Burung	<i>Frame</i>	Gasket
-15	291,32	289,85	20,30	18,30
0	293,88	283,49	19,94	18,07
15	294,14	285,77	20,69	18,93

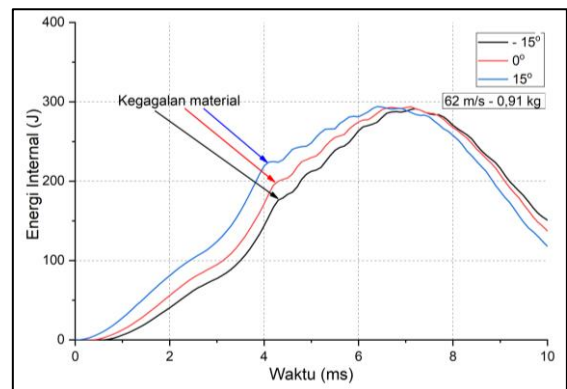
Sudut ( $^\circ$ )	Energi Kinetik Maksimum (J)			
	<i>Windshield</i>	Burung	<i>Frame</i>	Gasket
-15	129,73	1744,84	0,11	0,673
0	148,86	1744,84	0,13	0,75
15	166,02	1744,84	0,15	0,75



Gambar 19 Pergerakan aliran tegangan yang terjadi pada seluruh bagian *windshield* dengan sudut  $15^\circ$  dan kecepatan  $62 \text{ m/s}$  pada waktu: (a) 1 ms; (b) 2 ms; (c) 4 ms; (d) 6 ms (e) 8 ms (f) 10 ms



Gambar 20 Regangan plastis yang terjadi pada *windshield* dengan sudut: (a) sudut  $15^\circ$ ; (b) sudut  $0^\circ$ ; (c) sudut  $-15^\circ$



Gambar 21 Penyerapan energi yang terjadi oleh *windshield* dengan variasi sudut tumbukan

Grafik penyerapan energi yang dilakukan oleh *windshield* ditampilkan pada Gambar 21. Penyerapan energi *windshield* terbesar terjadi pada variasi sudut  $15^\circ$ . Pengaruh variasi sudut menyebabkan perbedaan penyerapan energi yang dilakukan oleh *windshield*,

hal ini disebabkan oleh perbedaan luasnya permukaan burung yang menyentuh area permukaan *windshield*. Dalam grafik penyerapan energi kenaikan dan penurunan energi yang secara tiba-tiba menandakan telah terjadinya kegagalan material pada bagian *windshield*.

#### IV. KESIMPULAN

Dari hasil analisis yang telah dilakukan menghasilkan data bahwa gasket pada *windshield* pesawat komuter dengan kapasitas 19 penumpang dengan ketebalan 2 mm menghasilkan penyerapan energi yang optimum dengan rata-rata penyerapan 5% dari seluruh energi yang diserap bagian *windshield*. Namun bagian *windshield* belum memenuhi persyaratan CASR sub bagian 23.775. Penggunaan gasket pada *windshield* menghasilkan efek yang tidak terlalu signifikan karena penyerapan energi yang paling besar dilakukan oleh *windshield* itu sendiri. Tetapi penggunaan gasket pada *windshield* perlu dipertimbangkan karena dapat menyebarkan tegangan yang terkonsentrasi pada sisi lubang penghubung antara *windshield* dengan *frame*. Sehingga kerusakan tidak terpusat pada satu tempat. Parameter tumbukan yang menyebabkan kegagalan material paling besar disebabkan oleh kecepatan 87,5 m/s dengan sudut tumbukan  $-15^\circ$ . Sedangkan pada variasi kecepatan 39 m/s kegagalan material tidak terjadi, baik dengan sudut  $-15^\circ$ ,  $0^\circ$ , ataupun  $15^\circ$ . Bagian yang paling rentan terhadap kegagalan material adalah bagian *windshield* lebih spesifiknya pada wilayah lubang baut sisi atas. Hal ini disebabkan oleh pergerakan aliran tegangan yang mengarah ke sisi atas, sesuai dengan pergerakan material burung. Presentase penyerapan energi maksimum yang dilakukan oleh bagian *windshield* adalah 88,56% sedangkan penyerapan pada *frame* 6,22% dan pada gasket 5,22%.

#### REFERENSI

- [1] Mao, R. H., Meguid, S. A., & Ng, T. Y. (2008). Transient three dimensional finite element analysis of a bird striking a fan blade, *Nanyang Technological University*, Singapore.
- [2] Hedayati, R., Mojtaba, S., 2016, Bird Strike An Experimental, Theoretical, and Numerical Investigation, Woodhead Publishing, UK.
- [3] Airoidi, A., and Cacchione, B, 2006, Modelling of Impact Forces and Pressures in Lagrangian Bird Strike Analyses, *International Journal of Impact Engineering*, Italy.
- [4] Dassault Systemes, 2011, A Strategy for Bird Strike Simulations using Abaqus-Explicit, SIMULIA.
- [5] Wilbeck, J. S., 1978, Impact Behavior of Low Strength Projectiles, *Technical Reports AFML-TR-77-134*, Air Force Materials Laboratory, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Air Force Systems Command, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- [6] Rahman Arif Budihanifa, 2020, Numerical Simulation Of a Bird-Strike On An N219 Aircraft Windshield For Various Condition, *Skripsi*, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [7] Zhou. J, Liu. J, Zhang. X, 2019, Experimental and numerical investigation of high velocity soft impact loading on aircraft materials, *Beijing Institute of Aeronautical Materials*, China.
- [8] Wang, F. S., Yue, Z.F, Yan, W.Z., 2009, Factors Study Influencing on Numerical Simulation of Aircraft *Windshield* Against Bird Strike, *Northwestern Polytechnical University*, China.
- [9] Sasso M, 2008, Characterization of hyperelastic rubber like materials by biaxial and uniaxial stretching tests based on optical methods. *Marche Polytechnic University*, Italy.
- [10] Prasad. C. S, 2009, Finite element modeling to verify residual stress in orthogonal machining, *Department of Mechanical Engineering*, Institute of Technology Karlskrona, Sweden.
- [11] Dar, U.A., Zhang, W., Xu, Y., 2013, FE Analysis of Dynamic Response of Aircraft *Windshield* against Bird Impact, *International Journal of Aerospace Engineering*, China