

## Analisis Numerik Penyerapan Energi pada Sabot untuk Pengujian *Bird Strike*

Riskha Agustianingsih<sup>\*1</sup>, Sahril Afandi<sup>2</sup>, Rizky Fitriansyah<sup>3</sup>, Agus Bayu<sup>4</sup>, Endah Yuniarti<sup>5</sup>

<sup>1,2,5</sup>Prodi Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Kedirgantaraan, Universitas Suryadarma

<sup>3,4</sup>Pusat Teknologi Penerbangan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

<sup>\*</sup>Corresponding Author: [ikaikariskha@gmail.com](mailto:ikaikariskha@gmail.com)

**Abstrak** - Pengujian Bird Strike dilakukan menggunakan alat SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) yang menembakkan sabot (wadah burung). Pada ujung alat SHPB, sabot akan dihentikan oleh stopper sehingga burung akan terlepas dan meluncur dengan bebas hingga mengalami tumbukan dengan komponen uji. Sabot harus memaksimalkan kecepatan burung ketika keluar (terlepas dari sabot). Berdasarkan persamaan impuls dan momentum, hal ini dapat diperoleh dengan meminimalkan waktu tumbukan sehingga gaya impulsnya akan meningkat. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui waktu tumbukan, pola grafik Energy Absorption (EA), Peak Crushing Force (PCF), dan Mean Crushing Force (MCF). Dari parameter tersebut, maka diperoleh sabot yang diinginkan berdasarkan waktu tumbukan tersingkat, PCF dan MCF tertinggi, serta EA terendah. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak elemen hingga (Abaqus CAE) berdasarkan variasi material (AA6061-T6, S355, dan AISI 1340) sabot. Berdasarkan hasil dan pembahasan, diperoleh bahwa waktu tumbukan paling singkat dimiliki variasi material AISI 1340 dengan nilai 0.00071 s. EA terendah untuk variasi material dimiliki oleh AISI 1340, yaitu sebesar 2.51 kJ. PCF tertinggi untuk variasi material dimiliki oleh material AISI 1340, yaitu 466 kN. Ditentukan bahwa berdasarkan nilai waktu (t) paling singkat, PCF, MCF paling tinggi, dan EA paling rendah, maka diperoleh material AISI 1340 sebagai material yang diinginkan karena paling berpengaruh terhadap peningkatan kecepatan burung setelah keluar dari sabot.

**Kata Kunci:** *Bird Strike, Sabot, Energy Absorber, Impact, AA6061-T6, S355, AISI 1340.*

**Abstract** - *Bird Strike testing is carried out using a SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) tool that fires sabot (bird containers). At the end of the SHPB tool, the sabot will be stopped by the stopper so that the bird will be released and glide freely until it collides with the test component. Sabot must maximize the speed of the bird when it comes out (apart from sabot). Based on the impulse and momentum equation, this can be obtained by minimizing the collision time so that the impulse force will increase. The purpose of this study was to determine the collision time, graphic patterns of Energy Absorption (EA), Peak Crushing Force (PCF), and Mean Crushing Force (MCF). From these parameters, the desired sabotage is obtained based on the shortest collision time, highest PCF and MCF, and lowest EA. Simulations were carried out using finite element software (Abaqus CAE) based on material variations (AA6061-T6, S355, and AISI 1340) sabot. Based on the results and discussion, it was found that the shortest collision time possessed AISI 1340 material variations with a value of 0.00071 s. The lowest EA for material variation is owned by AISI 1340, which is 2.51 kJ. The highest PCF for material variation is owned by AISI 1340 material, which is 466 kN. It was determined that based on the shortest time value (t), the highest PCF, MCF, and lowest EA, the AISI 1340 material was obtained as the desired material because it most affected the increase in bird speed after exiting the sabot.*

**Keywords:** *Bird Strike, Sabot, Energy Absorber, Impact, AA6061-T6, S355, AISI 1340.*

## I. PENDAHULUAN

*Bird strike* adalah tabrakan antara hewan terbang dan kendaraan yang umumnya terjadi pada pesawat. Berdasarkan laporan dari *Federal Aviation Administration* (FAA), terhitung dari tahun 2015 sampai 2019 telah terjadi *bird strike* lebih dari 60.663 pada pesawat komersial. *Bird strike* sering terjadi pada ketinggian di bawah 3.000 kaki dengan persentase lebih dari 95% yang mengakibatkan kerusakan besar sehingga fase penerbangan lepas landas (*take-off*), pendakian (*climb*), pendekatan (*approach*), dan pendaratan (*landing*) menjadi fase kritis<sup>[1]</sup>.

Fenomena ini masih menjadi salah satu penyebab dari kerusakan komponen pesawat. Untuk memperhitungkan kerusakan tersebut, maka diperlukan pengujian *bird strike* yang bertujuan mengetahui kekuatan suatu komponen. Pengujian ini mensimulasikan fenomena *bird strike* yang dialami suatu komponen ketika beroperasi dalam penerbangan.

Pengujian *bird strike* dilakukan menggunakan alat yang dikenal dengan istilah *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) (lihat **Gambar 1.2**). Peran alat ini adalah untuk meluncurkan burung yang diletakkan pada wadah silinder tipis (dikenal dengan istilah sabot yang ditampilkan pada **Gambar 1.1**) sebelum akhirnya meluncur ke komponen uji. Sabot diletakkan pada pipa panjang yang kemudian diberikan tekanan sehingga mampu meluncur dengan kecepatan tertentu. Pada ujung pipa, sabot akan dihentikan oleh *stopper* sehingga burung akan terlepas dan meluncur dengan bebas hingga mengalami tumbukan dengan komponen uji. Akibat dari penghentian oleh *stopper*, sabot akan mengalami deformasi berupa *progressive buckling*.

Sabot harus memaksimalkan kecepatan burung ketika keluar (terlepas dari sabot). Berdasarkan persamaan impuls dan momentum, hal ini dapat diperoleh dengan meminimalkan waktu tumbukan sehingga gaya impulsnya akan meningkat. Menurut hipotesis, waktu tumbukan yang minimal dapat diperoleh apabila deformasi (*progressive buckling*) dari sabot memiliki nilai rendah. Tinggi dan rendahnya proses deformasi disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya material

yang digunakan dan kecepatan tumbukan (antara sabot dan *stopper*).

Keterkaitan penelitian ini dengan pesawat terbang adalah untuk memaksimalkan penggunaan alat SHPB yang digunakan dalam pengujian *bird strike*. Maksud dari memaksimalkan adalah ketika diperoleh kecepatan burung yang lebih tinggi dari pengujian sebelumnya. Harapannya dengan tekanan yang sama, maka dapat diperoleh peningkatan kecepatan luncur pada burung setelah sabot mengalami tumbukan dengan *stopper* (burung lepas dari sabot). Dengan kata lain, ketika tekanan yang digunakan untuk menghasilkan kecepatan yang sama lebih kecil, maka dapat diperoleh efisiensi penggunaan tekanan dari alat SHPB.

Berdasarkan *Civil Aviation Safety Regulation* (CASR), alat ini harus mampu meluncurkan burung bermassa 2, 4, dan 8 pon. CASR juga mengatur kecepatan yang dimiliki burung ketika tumbukan dengan komponen uji, yaitu sama dengan kecepatan maksimum *approach* (CASR 23) dari suatu pesawat<sup>[11]</sup>.

Eksperimen merupakan metode terbaik untuk menganalisis kasus pada penelitian ini. Namun, metode ini kurang efektif (tidak dapat memberikan hasil yang berulang karena perbedaan geometri sabot dari manufaktur) dan efisien (perlu waktu dan biaya dalam proses manufaktur). Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan metode numerik untuk mengatasi kekurangan dari metode eksperimen. Namun, eksperimen tetap diperlukan untuk melakukan validasi metode numerik.

Pada penelitian ini, simulasi tumbukan antara sabot dan *stopper* dilakukan untuk memperoleh waktu deformasi terkecil dari variasi material (didukung oleh variabel-variabel penyerapan energi) dan membuktikan efek waktu terhadap penyerapan energi. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak elemen hingga Abaqus. Abaqus adalah salah satu aplikasi yang secara luas digunakan untuk melakukan proses desain, analisis, dan optimasi. Untuk penelitian impak, Abaqus mampu memberikan kemudahan dalam memahami mekanisme deformasi dan respon struktur penyerap energi ketika menerima beban impak.



Gambar 1.1 Alat SHPB milik PUSTEKBANG LAPAN



Gambar 1.2 Sabot sebagai wadah burung milik PUSTEKBANG LAPAN

## II. METODE PENELITIAN

### 2.1 Parameter Indikator

Beberapa parameter indikator untuk penyerapan energi adalah sebagai berikut:

- **Energy Absorption, EA**

Adapun perhitungan untuk mengetahui nilai energi yang diserap pada suatu struktur, yaitu dengan mengintegrasikan area dibawah kurva *force vs displacement* yang dirumuskan pada persamaan sebagai berikut:

$$EA(d) = \int_0^d F(x) dx \quad (1)$$

$F(x)$  adalah *instantaneous force* dan  $(x)$  adalah deformasi yang terjadi pada struktur.

- **Peak Crushing Force, PCF**

*Peak Crushing Force* adalah gaya penghancur maksimum yang dialami oleh benda selama mengalami beban aksial. Gaya ini biasanya terjadi pada awal tumbukan untuk mengakibatkan struktur engalami *buckling*.

- **Mean Crushing Force, MCF**

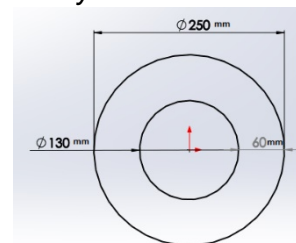
*Mean Crushing Force* biasa disebut gaya penghancur rata-rata yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$MCF = \frac{E_A}{x_{max}} \quad (2)$$

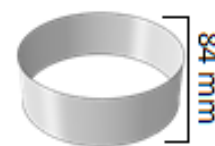
Gaya rata-rata dapat dihitung dengan membagi penyerapan energi terhadap jarak deformasi maksimum struktur.

### 2.2 Geometri

Geometri pada sabot untuk simulasi untuk penampangnya berbentuk lingkaran memiliki diameter luar 25 cm dan diameter dalam 13 cm seperti pada **Gambar 2.1** dengan ketinggian 84 mm dan tebal 1.1 mm seperti pada **Gambar 2.2**. Ruang antara diameter luar dan diameter dalam diisi dengan *filler*/pengisi yaitu berbentuk lembaran *honeycomb*.

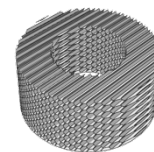


Gambar 2.1 Dimensi sabot



Gambar 2.2 Sabot pemodelan numerik dengan ketinggian 84 mm

Lembaran *honeycomb* merupakan *filler* / pengisi sabot yang berfungsi untuk menahan burung (lihat **Gambar 2.3**). Lembaran ini memiliki ukuran sel 4.8 mm dengan ketebalan sel 0.0051 mm.



Gambar 2.3 Honeycomb pemodelan numerik dengan tinggi sabot 84 mm

*Stopper* berfungsi sebagai target dari sabot yang ditembakkan oleh alat SHPB

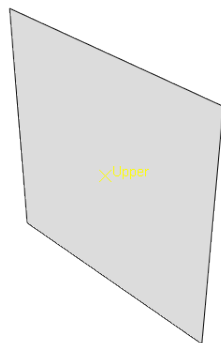
dengan berisikan burung. *Stopper* ini memiliki bentuk persegi dengan ukuran seperti panjang 0.3 m dan lebar 0.3 m.

**Tabel 2.1** Properti Mekanik Material<sup>[2],[3],[4]</sup>

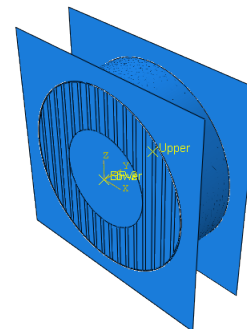
Material	Massa Jenis (kg/m <sup>3</sup> )	Modulus Young (GPa)	Yield Stress (MPa)	Poisson Ratio
AA 6061-T6	2700	68.28	337.687	0.3
St 355	7800	210	355	0.3
AISI 1340	7800	200	434	0.29

**Tabel 2.2** Properti Mekanik Material *Aramid Ox-core* 4.8-48<sup>[5]</sup>

Massa Jenis (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>12</sub>	V <sub>13</sub>	V <sub>23</sub>	E <sub>1</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)	E <sub>3</sub> (MPa)	G <sub>12</sub> (MPa)	G <sub>13</sub> (MPa)	G <sub>23</sub> (MPa)
48	0.2606	0.2240	0.0219	128.7	12.6	229.8	1.6	42.4	25



**Gambar 2.4** Pemodelan numerik *stopper*



**Gambar 2.5** Assembly Sabot

### 2.3 Properti Material

Material tabung adalah *Aluminium Alloy* 6061-T6, Steel 355, dan AISI 1340. Properti mekanik ketiga material tersebut ditampilkan pada **Tabel 2.1**. Selain itu, properti mekanik dari material yang digunakan untuk *filler* / pengisi (lembaran *honeycomb*), yaitu *Aramid Ox Core* 4.8-48 ditampilkan pada **Tabel 2.2**.

### 2.4 Assembly

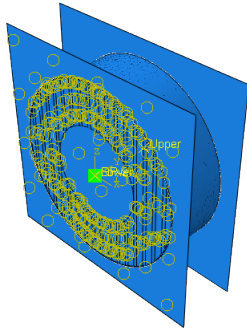
Setiap *part* yang terdapat pada Subbab 2.1 dilakukan penggabungan hingga menjadi kesatuan seperti pada **Gambar 2.5**. *Part* tersebut adalah tabung, *honeycomb*, dan *stopper*.

### 2.5 Step

Waktu simulasi memiliki nilai 0.003 s. Waktu tersebut dipertimbangkan karena model sabot telah mengalami deformasi secara keseluruhan akibat tumbukan yang terjadi. Jumlah *frame* yang dihasilkan sebanyak 300 dengan interval waktu sebesar  $1 \times 10^{-5}$  s.

### 2.6 Interaksi

Tipe kontak yang digunakan adalah *General contact* karena mewakili keseluruhan model untuk dianalisis. Selanjutnya, digunakan keefisien gesekan dengan nilai 0.2. Selain itu, digunakan juga interaksi *constraint tie* pada alas sabot yang ditunjukkan dengan simbol lingkaran berwarna kuning pada **Gambar 2.6**.



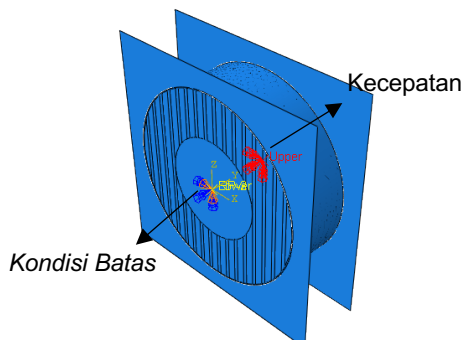
**Gambar 2.6** Interaksi pada Sabot

## 2.7 Pembebanan dan Kondisi Batas

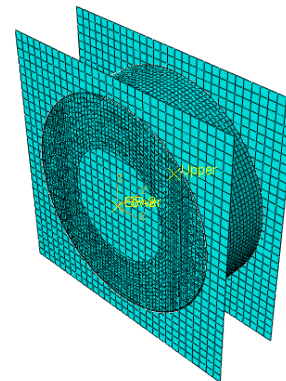
Kecepatan merupakan pembebanan yang diaplikasikan pada sabot dengan kecepatan 62 m/s (CASR 23.775). Adapun kondisi batas (*Boundary Condition*) pada *setup*, yaitu diaplikasikan pada *stopper* seperti ditampilkan **Gambar 2.7** berjenis *fixed* (menahan pergerakan sumbu translasi dan rotasi).

**Tabel 2.3** *Setup Meshing*

Part	Ukuran Mesh per element	Jumlah Noda	Jumlah Elemen			
			Total	Jenis Elemen		
				S4R	S3	R3D4
Sabot 84 mm	5 mm	2826	2669	2669	-	-
Honeycomb 84 mm	5 mm	23105	29737	28835	902	-
Stopper	10 mm	961	900	-	-	900
Alas	10 mm	961	900	-	-	900



**Gambar 2.7** Pembebanan kecepatan dan kondisi batas pada sabot



**Gambar 2.8** Mesh pada sabot

## 2.8 Mesh

Ukuran mesh per elemen, jumlah noda, jumlah dan jenis elemen ditampilkan pada **Tabel 2.5**. Masing-masing part yang telah di-*meshing* ditampilkan pada **Gambar 2.8**.

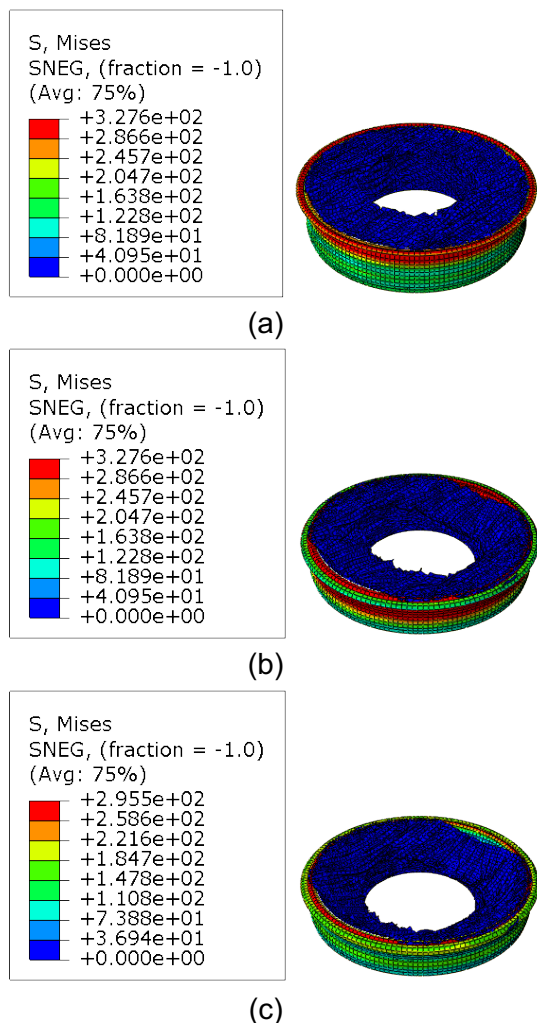
## 2.9 Data Keluaran (Output)

Variabel keluaran pada penelitian ini berupa gaya (force) dan perpindahan (displacement). Gaya diperoleh dari titik referensi yang terletak pada pusat alas (titik yang diberi keterangan “Lower” pada **Gambar 2.5** sampai **2.7**), sedangkan perpindahan diperoleh dari titik referensi yang terletak pada pusat stopper (titik yang diberi keterangan “Stopper” pada **Gambar 2.5** sampai **2.7**). Selanjutnya, untuk memperoleh nilai parameter indikator sesuai Bagian 2.1 (EA, PCF, dan MCF), variabel gaya dan perpindahan tersebut dihitung menggunakan persamaan (1) dan (2).



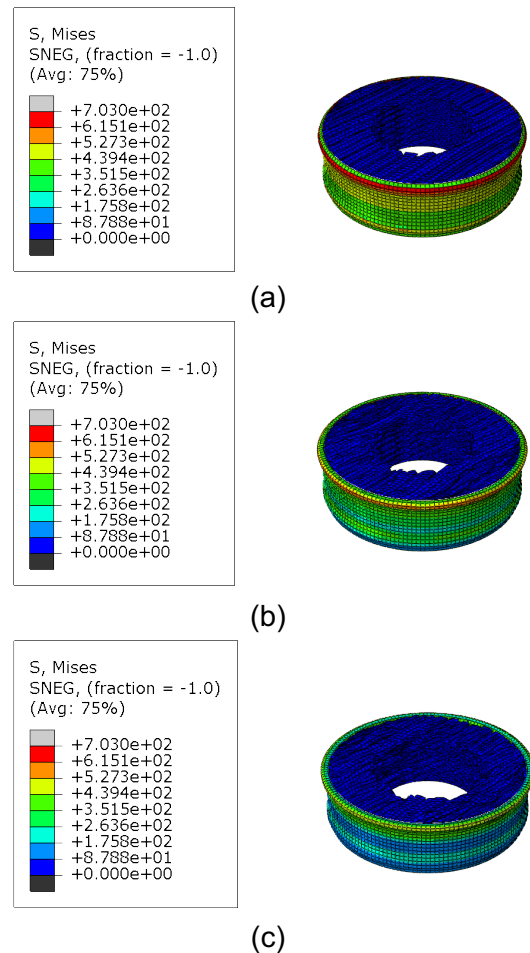
### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi berdasarkan variasi material ini menggunakan sabot jenis 2 lb dengan kecepatan yang sama, yaitu 62 m/s. Kecepatan 62 m/s didasarkan pada pengujian *bird strike* sesuai dengan CASR 23.775, yaitu pengujian pada pesawat komuter 19 penumpang<sup>[6]</sup>. Variasi material yang digunakan hanya pada selimut sabot, yaitu Aluminium Alloy 6061 T6, Steel 355, dan AISI 1340, sedangkan untuk *filler* / pengisi *honeycomb* masih sama, yaitu Aramid Ox-Core. Proses deformasi pada sabot 2 lb yang berbahan Aluminium Alloy 6061-T6 ditunjukkan pada **Gambar 3.1**. Sabot 2 lb yang berbahan Steel 355 ditunjukkan pada **Gambar 3.2**. Sabot 2 lb yang berbahan AISI 1340 ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.

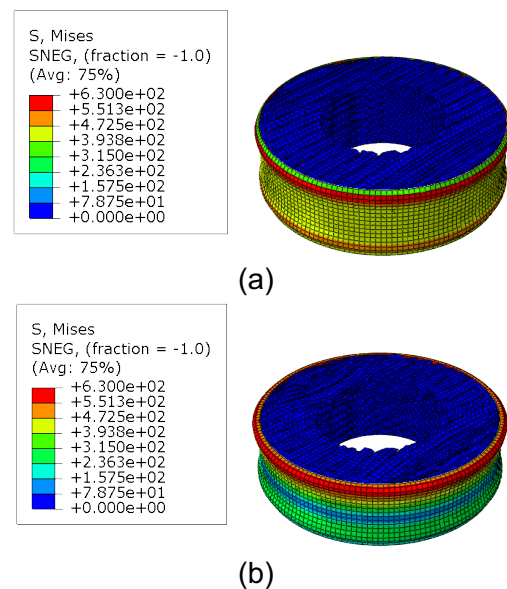


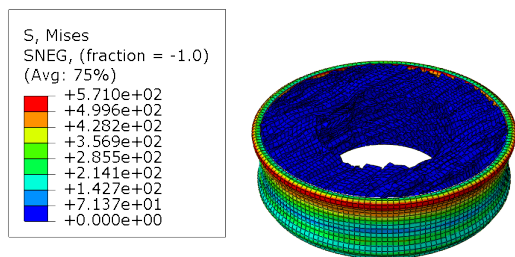
**Gambar 3.1** Deformasi pada sabot 2 lb dengan tinggi 84 mm berbahan AA6061-T6

ketika tumbukan pada waktu: (a) 0.6; 1.2; dan 1.78 ms



**Gambar 3.2** Deformasi pada sabot 2 lb dengan tinggi 84 mm berbahan Steel 355, ketika tumbukan pada waktu: (a) 0.23; (b) 0.47; dan (c) 0.76 ms

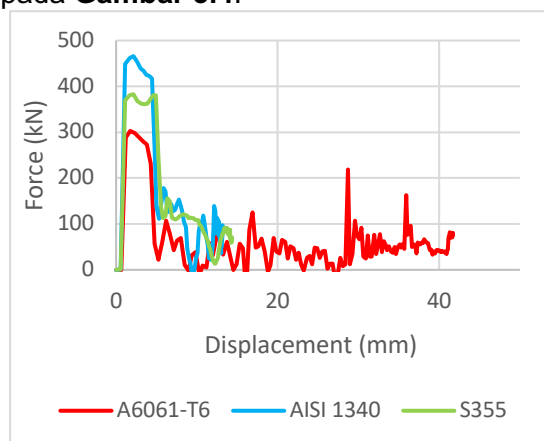




(c)

**Gambar 3.3** Deformasi pada sabot 2 lb dengan tinggi 84 mm berbahan AISI 1340, ketika tumbukan pada waktu: (a) 0.23; (b) 0.47; dan (c) 0.76 ms

Pada hasil simulasi menghasilkan *output*, yaitu nilai *force* terhadap *displacement* yang ditampilkan dalam bentuk kurva *instantaneous force* seperti pada **Gambar 3.4**.



**Gambar 3.4** *Instantaneous Force* dalam variasi material pada sabot 2 lb

Dari **Gambar 3.4** dapat diperoleh beberapa variable seperti, EA (*Energy Absorption*), PCF (*Peak Crushing Force*), dan MCF (*Mean Crushing Force*). Setiap variabel tersebut diperoleh nilai dengan hasil seperti pada **Tabel 3.1**.

**Tabel 3.1** Hasil analisis parameter berdasarkan variasi material pada sabot 2 lb

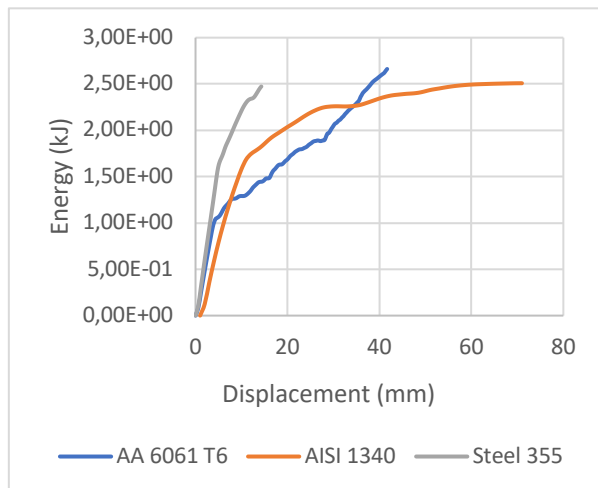
Parameter	Sabot 2lb		
	AA6061T6	Steel 355	AISI 1340
EA (kJ)	2.66	2.47	2.51
PCF (kN)	303	383	466
MCF (kN)	64.2	173	190
t (s)	0.00157	0.00076	0.00071

Dari **Gambar 3.4**, pola kurva menampilkan nilai puncak (*peak crushing force*) pada awal tumbukan disebabkan karena tumbukan awal, kemudian menurun

dikarenakan energi yang berkurang. Luasan dibawah kurva tersebut merupakan energi yang diserap oleh sabot. Nilai EA, PCF, MCF, dan nilai *stress/tegangan* maksimum memiliki nilai yang berbeda-beda karena pada setiap sabot ini memiliki variasi material yang berbeda dengan kekuatan yang berbeda walaupun memiliki nilai pembebanan yang sama yaitu kecepatan tumbukan sebesar 62 m/s. Dengan beban yang sama, nilai yield stress pada material alumunium lebih rendah dibandingkan steel. Dengan kata lain, ketika tegangan yang terjadi pada kedua material sama, maka akan menyebabkan nilai regangan yang berbeda, yaitu alumunium mengalami regangan lebih besar dari steel. Deformasi (regangan) plastis ditandai dengan tegangan yang melebihi nilai yield stress.

Oleh karena itu, pada variasi material menunjukkan bahwa EA dengan material AA 6061 T6 memiliki nilai paling besar, yaitu 2.66 kJ. Hal ini disebabkan oleh kekuatan dari material ini tidak lebih kuat dari material *Steel* terutama pada material AISI 1340 yang memiliki nilai EA sebesar 2.51 kJ sehingga deformasi pada alumunium lebih tinggi ini disebabkan karena nilai yield stress. Untuk nilai PCF terbesar dimiliki oleh material AISI 1340, yaitu sebesar 466 kN karena memiliki kekuatan yang sangat tinggi, maka dibutuhkan PCF yang besar untuk mengakibatkan struktur mengalami deformasi awal, sedangkan PCF terkecil dimiliki oleh material AA 6061 T6 sebesar 303 kN. Untuk MCF yang dialami oleh AA 6061 T6 lebih kecil karena kekuatan material tersebut lebih rendah, sedangkan MCF yang terbesar dimiliki oleh material AISI 1340.

Dari **Tabel 3.1**, nilai waktu tumbukan pada material A6061-T6 lebih besar (0.00157 s) karena kekuatan material tersebut tidak lebih kuat dari material S355 (0.00076 s) dan AISI 1340 (0.00071 s). Kekuatan tersebut ditinjau dari properti mekanik setiap material tersebut, misalnya *yield strength* yang merupakan batas maksimum suatu struktur mengalami deformasi elastis. Dengan kata lain, nilai *yield strength* material A6061-T6 (337.687 MPa) lebih rendah dari S355 (355 MPa) dan AISI 1340 (434 MPa).



**Gambar 3.5** Energy vs Displacement dalam variasi material pada sabot 2 lb

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada Bab IV, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Waktu tumbukan yang paling singkat untuk memaksimalkan kecepatan pada burung (setelah keluar dari sabot) untuk variasi material dimiliki oleh sabot dengan material AISI 1340, yaitu 0.00071s.
2. EA pada material AA 6061 T6 memiliki nilai paling besar, yaitu 2.66 kJ karena kekuatan dari material ini tidak lebih kuat dari material Steel terutama pada material AISI 1340 yang memiliki nilai EA sebesar 2.51 kJ sehingga deformasi pada aluminium lebih tinggi.
3. PCF pada variasi material, PCF terbesar dimiliki oleh AISI 1340, yaitu senilai 466 kN dikarenakan material ini memiliki kekuatan yang tinggi sehingga gaya untuk menghasilkan deformasi (*buckling*) pertama juga besar dibandingkan dengan material AA 6061 T6 yang bernilai 303 kN. Begitu juga MCF pada variasi material dengan alasan yang sama, yaitu kekuatan material *steel*, maka MCF terbesar dimiliki oleh AISI 1340, yaitu sebesar 190 kN dibandingkan yang dimiliki oleh AA 6061 T6 sebesar 64.2 kN.
4. Berdasarkan nilai waktu (t) paling singkat, PCF dan MCF paling tinggi, serta EA paling rendah, maka

diperoleh material AISI 1340 sebagai material yang diinginkan karena paling berpengaruh terhadap peningkatan kecepatan burung setelah keluar dari sabot.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Federal Aviation Administration, 2019, FAA Wildlife Strike Database, <https://wildlife.faa.gov/home>, diakses tanggal 26 Januari 2020.
- [2] Lee SH, Saito Y, Sakai T., 2002, Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding.; 325: 228–235.
- [3] Agus Choiron., Djarot B., Anwari R Bintang., 2015. Analisis Penyerapan Energi dan Pola Deformasi Crash Box dengan variasi Sudut Tirus Dinding Crash Box pada Uji Simulasi Tabrakan Arah frontal. Jurnal Rekaya Mesin Vol. 6. No 1, 75-83.
- [4] Heimbs, S., 2011, Bird Strike Simulations on Composite Aircraft Structures, European Aeronautic Defence and Space Company, Innovation Works, 81663 Munich, Germany.
- [5] Nagel, Gregory, 2005, *Impact and Energy Absorption of Straight and Tapered Rectangular Tubes*, Queensland University of Technology.
- [6] Keputusan Menteri Perhubungan tentang Civil Aviation Safety Regulation (CASR). Kepmenhub Nomor 25 tahun 2001. Part 23. *Airworthiness Standards: Normal, Utility, Acrobatic, and Commuter Category Airplane*.