

PENGARUH MODEL BURUNG SILINDER DAN SILINDER DENGAN KEDUA UJUNG SETENGAH BOLA DENGAN PEMODELAN ELEMEN HINGGA KASUS TABRAK BURUNG (EFFECT OF FLAT AND HEMISPHERICALLY ENDED CYLINDER BIRD MODEL WITH FINITE ELEMENT MODELLING OF BIRD STRIKE)

Endah Yuniarti¹, Sahril Afandi Sitompul²

^{1,2}Prodi Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Kedirgantaraan
Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma
Komplek Bandara Halim Perdanakusuma, Jakarta 13610, Indonesia
¹Email : endah.yuniarti13@gmail.com

Diterima: 16 November 2018; Direvisi: 22 Februari 2019; Disetujui: 04 April 2019

ABSTRACT

This research studies influence of bird model on impact pressures during bird strike, namely Hugoniot and Stagnation pressure through initial modelling by numerical simulations using finite element method. Finite element simulation of bird strike have primarily modelled the bird as either a flat or hemispherically ended cylinder. The geometry is simulated with different L/D ratio, 1.4, 1.6, 1.8 and 2.0. Elastic-plastic hydrodynamic material model is used in simulation. Bird model simulation are using lagrangian method and initial velocities are 100, 200 and 300 m/s. Simulation results of hemispherically ended cylinder bird models show variation of L/D ratio provide Hugoniot pressure 10-19 times higher than stagnation pressure in L/D = 1.4, 8-18 times in L/D = 1.6, 9-17 times in L/D = 1.8 and 4-16 times in L/D = 2. The Hugoniot pressure shows a lower value at an L/D ratio of 1.6 compared to other ratios and the Stagnation pressure is higher at L/D ratio 2. As for cylindrical bird model show variation of L/D ratio provide Hugoniot pressure 35-38 times higher than stagnation pressure in L/D = 1.4, 30-47 times in L/D = 1.6, 31-52 times in L/D = 1.8 and 28-48 times in L/D = 2. The Hugoniot pressure shows a lower value at an L/D ratio of 1.4 and 1.6 compared to other ratios and the Stagnation pressure is higher at L/D ratio 2.

Keyword: *Bird strike, bird models, Lagrangian method, ratio of L/D*

ABSTRAK

Penelitian ini mempelajari pengaruh model burung terhadap tekanan impak pada kasus tabrak burung, yaitu tekanan hugoniot dan stagnasi, melalui pemodelan awal dengan simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga. Simulasi metode elemen hingga kasus tabrak burung mempunyai model burung utama yaitu silinder dan silinder dengan kedua ujung setengah bola. Geometri disimulasikan dengan rasio L/D yang berbeda yaitu 1,4; 1,6; 1,8 dan 2. Model material elastis, plastis, hidrodinamik digunakan pada simulasi. Simulasi model burung dilakukan dengan metode *Lagrangian* dan kecepatan awal 100, 200 dan 300 m/s. Hasil simulasi model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola menunjukkan nilai tekanan Hugoniot jauh lebih tinggi sekitar 10-19 kali lipat tekanan stagnasi pada $L/D = 1,4$, 8-18 kali pada $L/D = 1,6$, 9-17 kali pada $L/D = 1,8$ dan 4-16 kali pada $L/D = 2$. Tekanan *Hugoniot* menunjukkan nilai yang lebih rendah pada rasio L/D 1,6 dibanding rasio lainnya dan tekanan stagnasi lebih tinggi pada rasio L/D 2. Sedangkan untuk model burung berbentuk silinder menunjukkan nilai tekanan *Hugoniot* jauh lebih tinggi sekitar 35-38 kali lipat tekanan stagnasi pada $L/D = 1,4$, 30-47 kali pada $L/D = 1,6$, 31-52 kali pada $L/D = 1,8$ dan 28-48 kali pada $L/D = 2$. Nilai tekanan *Hugoniot* menunjukkan nilai yang lebih rendah pada rasio L/D 1,4 dan 1,6 dibanding rasio lainnya dan tekanan stagnasi lebih tinggi pada rasio L/D 2.

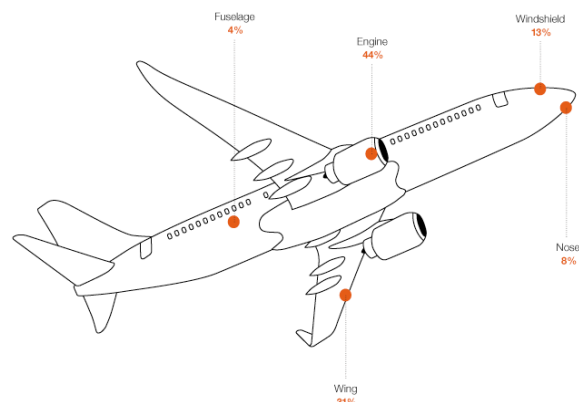
Kata kunci: *Tabrak burung, model burung, metode Lagrangian, rasio L/D*

1 PENDAHULUAN

Fenomena tabrak burung sering terjadi pada saat operasi pesawat terbang yang dapat menyebabkan kerusakan fatal pada struktur pesawat dan mengancam keselamatan operasi penerbangan. Kerusakan struktur pesawat udara dapat menyebabkan kecelakaan dan korban jiwa. Serta kegagalan pada struktur pesawat komersial akibat tabrak burung menyebabkan kerugian ekonomi bagi pelaku industri penerbangan. Hal tersebut berupa biaya langsung perbaikan struktur pesawat dan kerugian penundaan operasi penerbangan.

Berdasarkan data yang tersedia, industri penerbangan komersial telah mengalami kerugian besar akibat kejadian tabrak burung. Perkiraan total biaya tahunan yang dikeluarkan untuk kasus tabrak burung untuk seluruh dunia penerbangan komersial adalah 1,28 miliar AS. *International Bird Strike Committee* percaya bahwa jumlah total warga sipil yang tewas dalam kecelakaan yang

secara langsung disebabkan oleh kasus tabrak burung setidaknya 242 orang pada tahun 2005 (Thorpe, 2005).



Gambar 1-1: Ilustrasi komponen struktur pesawat yang rentan terhadap tabrak burung (Nicholson, et al, 2011)

Terkait kerusakan atau kegagalan struktur akibat fenomena tabrak burung rentan terjadi pada struktur permukaan luar pesawat udara. Komponen struktur tersebut berupa nose (8%), *windshield* (13%), *engine* (44%), *wings* (31%), maupun *fuselage* (4%), seperti ditunjukkan pada Gambar 1-1. Tiga perempat lokasi

komponen *bird strike* melibatkan *wing* dan *engine*, tetapi *bird strike* ini dapat merusak hampir seluruh bagian pesawat (Nicholson, et al, 2011).

Perancangan yang tahan terhadap *bird strike* awalnya dilakukan dengan metode eksperimen dan analitik agar dapat memprediksi beban dan tekanan impak burung dan kemungkinan kerusakan atau kegagalan pada beberapa komponen struktur pesawat. Metode eksperimen yang berbiaya besar dan membutuhkan waktu yang lama menjadi tidak praktis bagi pelaku industri pembuatan pesawat. Beberapa penelitian telah mencoba mendekati permasalahan tabrak burung secara analitik, namun memiliki keterbatasan untuk aplikasi geometri yang kompleks dan model material yang nonlinier sehingga jarang digunakan. Perkembangan teknologi komputer yang begitu pesat memudahkan mempelajari fenomena tabrak burung secara numerik (komputasi) sehingga dapat dianalisis secara cepat dan efisien. Oleh karena itu, metode numerik dikembangkan dan diaplikasikan sejak tahun 1970-an dengan tujuan optimasi rancangan guna memastikan sertifikasi uji berhasil dilakukan. Pemodelan material burung sering menjadi permasalahan utama untuk simulasi numerik tabrak burung. Hal ini karena perilaku material burung yang nonlinear dan geometri yang kompleks ketika terjadi kontak dengan komponen struktur.

Kasus tabrak burung diklasifikasikan dalam *high-velocity soft body impact* karena tekanan yang dihasilkan pada daerah kontak, yang secara signifikan lebih besar dari kekuatan burung dan lebih rendah dari kekuatan struktur material yang bertabrakan dengan burung. Ekperimen menunjukkan bahwa fenomena tabrak burung dikarakterisasi oleh tiga fase

yaitu: *shock wave stage*, *pressure release stage*, dan *steady-state flow pressure stage*.

Oleh karena dalam eksperimen tabrak burung, sulit dilakukan pengulangan, maka diperlukan adanya burung pengganti. Burung pengganti membuat test tabrak burung dapat dilakukan berulang-ulang dan tentunya burung pengganti tersebut haruslah mudah untuk dimodelkan. Wilbeck pada tahun 1977 melalui percobaannya menunjukkan bahwa tabrak burung dengan kecepatan tinggi terhadap struktur yang *rigid* atau *deformable* akan berperilaku seperti fluida. Oleh karena itu, dalam memodelkan kasus tabrak burung, disarankan penggunaan material *hydrodynamic* sebagai pendekatan yang sesuai untuk perilaku burung yang kompleks.

Meskipun burung pengganti sudah banyak digunakan dalam *bird strike test* dan simulasi, tetapi belum ada standard bentuk burung yang dimodelkan. Geometri biasanya dipilih untuk mencerminkan massa utama dan bentuk batang tubuh burung yang sesungguhnya. Ada 4 (empat) bentuk geometri burung yang paling banyak digunakan dalam *bird strike test* dan simulasi yaitu silinder, silinder dengan kedua ujung setengah bola, elipsoid dan bola. Ekperimen pertama mengenai *bird strike* dilakukan oleh Wilbeck dan Barber (1977-1978) dengan geometri burung berbentuk silinder, dan ini menjadi dasar dalam pengembangan model numerik *bird strike*. Dalam simulasi kasus *bird strike*, geometri burung yang digunakan tidak hanya terdiri dari bentuk burung tetapi juga rasio length/diameter (L/D), karena eksistensi dari *steady-state flow stage* bergantung pada rasio L/D impaktor atau burung itu sendiri (Heimbs, 2011).

Airoldi dan Cacchione (2006) dalam *Modelling of Impact Forces and*

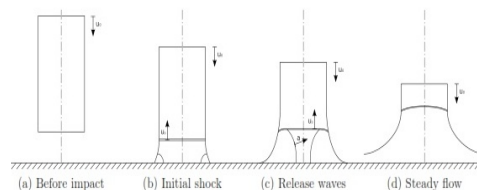
Pressures in Lagrangian Bird Strie Analyses menyatakan bahwa penggunaan model burung bentuk silinder dengan rasio length/diameter (L/D) 1,6 lebih disarankan daripada rasio L/D 2. Hal ini karena, model burung dengan rasio L/D 1,6 menghasilkan puncak gaya kontak yang mendekati rata-rata hasil ekperimen yang dilakukan oleh Wilbeck dan Barber (1977-1978). Sedangkan Blair (2008) dalam *Aeroengine Fan Blade Design Accounting For Bird Strike* menyatakan bahwa model burung bentuk silinder dengan kedua ujung setengah bola dengan rasio L/D 2 merupakan yang terbaik merepresentasikan bentuk tubuh burung pada kasus *bird strike* pada *fan blade*.

Tujuan penelitian ini adalah melakukan simulasi numerik pada kasus *bird strike* dengan variasi geometri burung berupa bentuk burung (silinder dan silinder dengan kedua ujung setengah bola), serta variasi ukuran burung (ratio length/diameter atau L/D dari 1,4; 1,6; 1,8; 2). Simulasi numerik tersebut akan menunjukkan respon dinamik model burung pada kecepatan tinggi berupa gaya impact yang dihasilkan oleh tumbukan burung. Hasilnya akan menjadi jadi acuan dalam perancangan komponen struktur pesawat yang rentan *bird stike* agar memenuhi standard dan persyaratan yang digunakan pada dunia penerbangan. Pemodelan yang sesuai dengan kondisi fisik akan digunakan selanjutnya dalam simulasi tabrak burung pada komponen struktur pesawat yang rentan terhadap kasus *bird strike*, seperti *windshield*, *radome*, *engine inlet*, *leading edge*. Sehingga proses desain struktur yang tahan terhadap impact dapat dilakukan dengan cepat, akurat serta efisien.

2 METODOLOGI

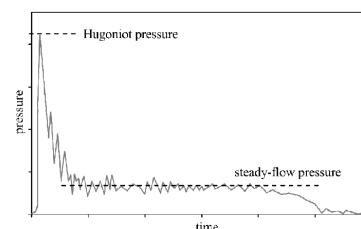
2.1 Teori Hidrodinamika

Wilbeck pada tahun 1978 menggabungkan teori analitik tentang persamaan Rankine-Hugoniot, dihubungkan dengan impact pada air dan dengan bukti dari studi eksperimen kasus tabrak burung, sehingga menghasilkan teori fluida pertama tentang tabrak burung secara komprehensif. Gambar 2-1 menggambarkan empat fase impact dari sebuah silinder fluida terhadap rigid wall. Geometri yang lebih kompleks seperti silinder dengan kedua ujung berupa setengah bola memerlukan teori yang lebih lengkap tetapi pada dasarnya mempunyai perilaku yang sama. Perilaku tumbukan terdiri dari empat tahap: a) sebelum tumbukan b) *initial shock* saat kontak tumbukan awal, c) *release wave*, d) aliran deformasi steady.



Gambar 2-1: Ilustrasi gelombang *shock* dan *release* pada tumbukan *soft body* dengan *rigid wall* (Blair, 2008)

Grafik tekanan tiap saat pada kasus tumbukan antara *soft body* dan permukaan *rigid* ditunjukkan oleh Gambar 2-2.



Gambar 2-2: Kurva tekanan terhadap waktu pada tumbukan *soft body* dengan permukaan *rigid* (Heimbs, 2011)

Tekanan puncak awal pada saat kontak kasus tumbukan tegak lurus bidang disebut dengan *Hugoniot Pressure* (P_H).

$$P_H = \rho_0 u_0 u_s \quad (2-1)$$

dengan ρ_0 kerapatan awal impaktor. Tekanan stagnasi (P_s) dapat diformulasikan dengan persamaan Bernoulli:

$$P_s = \frac{1}{2} \rho_0 u_0^2 \quad (2-2)$$

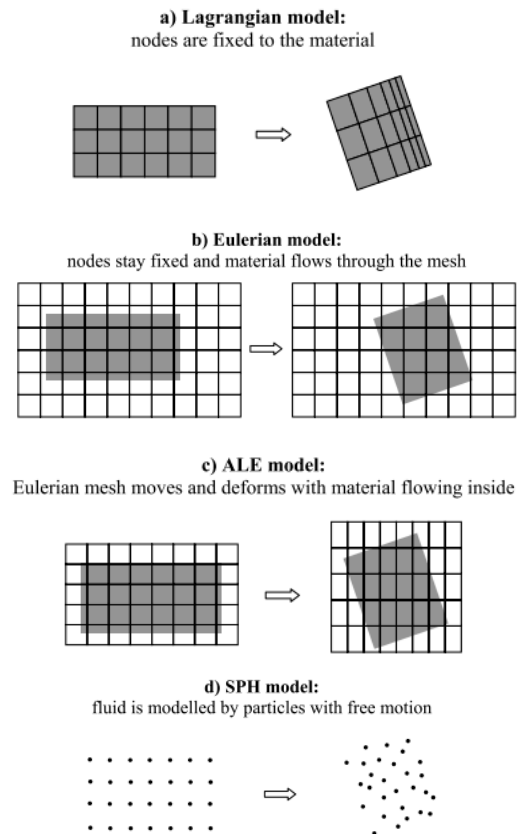
Total durasi saat tumbukan, t_D , diperoleh dengan pendekatan waktu yang dibutuhkan impaktor mengalir sepanjang dimensi L impaktor tersebut:

$$t_D = \frac{L}{u_0} \quad (2-3)$$

2.2 Metode Elemen Hingga Kasus Tabrak Burung

Metode numerik yang umum digunakan berbasis metode elemen hingga. Pendekatan simulasi untuk tabrak burung yang dilakukan menggunakan *Lagrangian Modeling Method*, *Eulerian Modeling Method*, *Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method (ALE)* dan *Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)*. Pada penelitian ini metode numerik dengan pemodelan *lagrangian* dipelajari lebih lanjut.

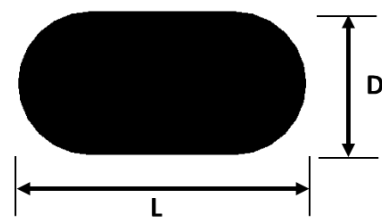
Karakteristik metode *Lagrangian* merupakan salah satu teknik standard pendekatan berbasis metode elemen hingga pada kasus analisis struktur. Nodal pada *Lagrangian mesh* mewakili material/struktur sehingga masing-masing nodal mengikuti respon struktur ketika terjadi pembebanan, baik berupa gerak maupun deformasi.



Gambar 2-3: Pendekatan metode elemen hingga kasus tabrak burung (Heimbs, 2011)

2.3 Geometri dan Meshing

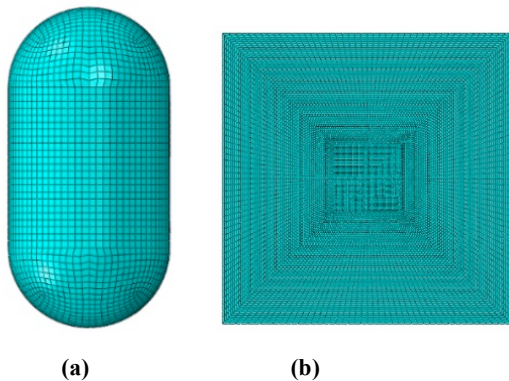
Pada simulasi tabrak burung digunakan pemodelan burung dengan definisi rasio dimensi panjang dan diameter seperti pada Gambar 2-4 dan nilai dimensi ditunjukkan pada Tabel 2-1. Pelat memiliki ukuran 1 m x 1 m dipilih dan deformasi burung masih terjadi pada pelat hingga simulasi berakhir.



Gambar 2-4: Definisi geometri model

Tabel 2-1. VARIASI DIMENSI

Ratio (L/D)	Panjang, L (m)	Diameter, D (m)
1.4	0.185	0.132
1.6	0.200	0.125
1.8	0.214	0.119
2	0.228	0.114



Gambar 2-5: Meshing model (a) burung dan (b) pelat

Meshing pada model burung menggunakan jenis elemen *linear hexahedral C3D8R* dan model pelat dengan jenis elemen *Shell Quad S4R*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2-5. Ukuran meshing yang digunakan rata-rata 5 mm, digunakan juga pengaturan *distortion control* dan *enhanced hourglass control* menggunakan software Abaqus, Simulia.

Airoldi dan Cacchione (2006) melakukan simulasi numerik *bird strike* dengan metode *Lagrangian* untuk geometri burung berupa silinder dengan $L=200$ mm dan $D=125$ mm dan meshing 162.716 *linear hexahedral C3D8R* element, dan untuk $L=212$ mm, $D=108$ mm, meshing 54.718 *linear hexahedral C3D8R*. Hasilnya adalah meshing jenis ini lebih sesuai untuk analisis kasus *bird strike*, dibandingkan dengan C3D8 dan C3D8I yang merupakan jenis elemen komputasi yang lebih terintegrasi.

2.4.Data Material

Properti material burung yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2-2. Digunakan massa material model burung yaitu 1,8 kg, hal ini sesuai dengan aturan badan regulasi penerbangan yang mengharuskan seluruh komponen yang akan mengalami impak agar memenuhi ketahanan struktur terhadap impak burung dengan melalui uji sertifikat sebelum diijinkan operasional. Persyaratan kelaikan terhadap *bird strike* diterbitkan dalam *Federal Aviation Regulation (FAR)* dan *European Joint Aviation Regulations (JAR)*. Windshields atau kanopi pesawat militer yang terbuat dari material glass dan material yang lebih *ductile* PC, PMMA merupakan komponen utama untuk menjamin keselamatan penerbangan. FAR/JAR 25.775 mengharuskan struktur tersebut tidak mengalami penetrasi pada kecepatan jelajah dengan massa burung 1,8 kg. Kriteria persyaratan untuk *leading edges* sayap mengharuskan pada saat penetrasi skin leading edge tidak mengalami kerusakan fatal pada bagian *front spar* atau tanki sayap sehingga bisa tetap dilanjutkan penerbangan dengan aman. Pengujian dilakukan dengan berat burung 1,8 kg dan 3,6 kg untuk *empenage leading edge* pada kecepatan operasional sesuai FAR/JAR 25.571, 25.631. Seluruh *gas turbine engines* dan khususnya *turbofan engines* harus tahan terhadap burung yang masuk ke dalam engine. Untuk ukuran burung kecil dan sedang, regulator mensyaratkan kemampuan integritas struktur dan mampu menghasilkan gaya dorong pada level 75%. Jika burung dengan berat 1,8 kg harus dibuktikan bahwa engine dapat dimatikan dengan terkontrol tanpa ada kebakaran. Persyaratan harus ditunjukkan pada sertifikat uji pada keseluruhan engine, walaupun

manufaktur telah melakukan uji tabrak burung pada fan blades untuk keperluan studi. Engine inlet juga harus mampu menahan beban impak burung 1,8 kg tanpa menyebabkan kerusakan kritikal pada komponen tersebut sesuai dengan ketentuan di FAR/JAR 25.571, 33.76 (Heimbs, 2011).

Untuk uji sertifikasi pada komponen pesawat, burung asli harus digunakan, biasanya digunakan ayam yang sudah mati. Namun penggunaan burung asli tidak ideal karena *bird strike* sesungguhnya terjadi diantara sebaran banyak burung. Peraturan sertifikasi hanya menyebutkan massa burung, sedangkan spesies dapat bervariasi, dimana tentunya densitas juga bervariasi. Hal inilah yang berpengaruh pada beban impak. Bentuk burung yang tidak beraturan dapat menimbulkan kesulitan untuk menentukan titik serang pada struktur. Untuk alasan ini dan alasan lainnya seperti kebersihan, banyak perusahaan menggunakan burung pengganti untuk pengujian impak pra-sertifikasi. Burung pengganti tidak harus seperti burung asli yang terdiri dari daging dan tulang, melainkan harus menghasilkan beban tekanan yang sama seperti burung asli saat terjadi *bird strike* (Heimbs, 2011).

Beberapa tes impak berhubungan dengan wax, foam, emulsion, beef, rubber, neoprene dan gelatin sebagai material burung pengganti. Dari beberapa jenis material burung pengganti tersebut, ditemukan bahwa material burung pengganti harus mempunyai gravitasi spesifik dari air yang dihasilkan sama seperti burung asli. Gelatin dan gelatin berpori dengan gravitasi spesifik dari air yang dihasilkan mempunyai profil yang sama seperti burung asli dengan tingkat keakuratan yang tinggi (Heimbs, 2011). Gelatin yang digunakan harus mempunyai densitas $\pm 950 \text{ kg/m}^3$

(Wilbeck, 1978; Airoidi & Cacchione, 2006). Sedangkan pada software simulasi Abaqus digunakan densitas material burung pengganti 938 kg/m^3 .

Menurut Wilbeck (1977), material burung dapat dimodelkan dengan material *elastic-plastic hydrodynamics*. Pada tekanan tinggi, perilaku *hydrodynamics pressure-volume* dari burung dapat dimodelkan menggunakan tabulasi *Equation of State* (EOS) untuk menjelaskan perilaku *pressure-volume* dari burung, dimana energi internal diabaikan.

$$\rho = \sum_{k=0}^3 C_k \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^k \quad (2-4)$$

dimana ρ adalah tekanan, C_k ($k = 0 - 3$) adalah koefisien polinomial, ρ_0 dan ρ adalah densitas material pada tekanan atmosfer dan pada saat tumbukan. Gambaran polinomial EOS adalah pendekatan yang terbangun dari observasi eksperimen perilaku *hydrodynamics pressure-volume* dari berbagai jenis material. Ketika $C_0 = C_2 = C_3 = 0$, maka hukum dilatasi untuk material elastis dengan modulus bulk C_1 akan tereduksi (Johnson dan Holzapfel, 2003). Koefisien polinomial C_k pada Persamaan 2-4 menggambarkan respon impak dari burung pengganti, dimana hal ini sulit diukur secara langsung. Maka sebagai gantinya, pendekatan yang dilakukan adalah untuk mengkalibrasi koefisien polinomial ini melalui hasil perbandingan dari simulasi *soft impact* dan data eksperimen. Oleh karena itu, pendekatan yang digunakan adalah menggunakan tabulasi EOS Abaqus, yang diberikan oleh:

$$p = f_1(\epsilon_{vol}) + \rho_0 f_2(\epsilon_{vol}) E_m \quad (2-5)$$

dimana, $f_1(\epsilon_{vol})$ dan $f_2(\epsilon_{vol})$ adalah fungsi dari regangan volumetrik logaritmik ϵ_{vol} , dengan $\epsilon_{vol} = \ln \rho_0 / \rho$ dan

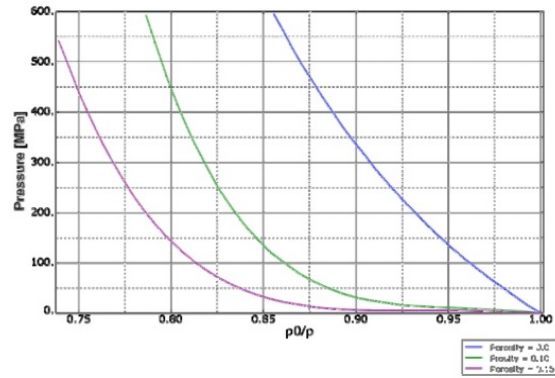
E_m adalah energi internal per unit massa. Kontribusi energi internal terhadap tekanan dalam hal ini biasanya diabaikan ketika berhubungan dengan daerah hidrodinamik dari impact, sehingga $f_2(\epsilon_{vol}) = 0$ dan $p = f_1(\epsilon_{vol})$. Nilai $\epsilon_{vol} = \ln \rho_0/\rho$ diambil dari kurva tabulasi Abaqus pada Gambar 2-6 dan untuk kasus zero porosity dirangkum pada Tabel 2-3.

Tabel 2-2: DATA MATERIAL (Simulia, 2011)

Mass (kg)	Density (kg/m ³)	Shear Modulus (GPa)	Yield Stress (MPa)	Hydrostatic Cut-off Stress (MPa)
1,8	938	0,01	0,1	2,75

Tabel 2-3. EOS (Simulia, 2011)

f1 (MPa)	f2	ϵ_{vol}
0	0	0
15.82	0	-0.0073
32.56	0	-0.0139
51.17	0	-0.0209
68.85	0	-0.0280
87.45	0	-0.0347
106.06	0	-0.0415
127.46	0	-0.0487
147.93	0	-0.0551
168.40	0	-0.0616
191.66	0	-0.0681
213.98	0	-0.0746
238.17	0	-0.0812
263.29	0	-0.0878
289.34	0	-0.0945
315.39	0	-0.1003
342.37	0	-0.1071
370.29	0	-0.1134
399.13	0	-0.1194
429.83	0	-0.1258
460.53	0	-0.1318
493.09	0	-0.1383
526.59	0	-0.1444
561.01	0	-0.1500
595.43	0	-0.1562



Gambar 2-6: Hugoniot curves of water-like homogenized bird materials (Simulia, 2011)

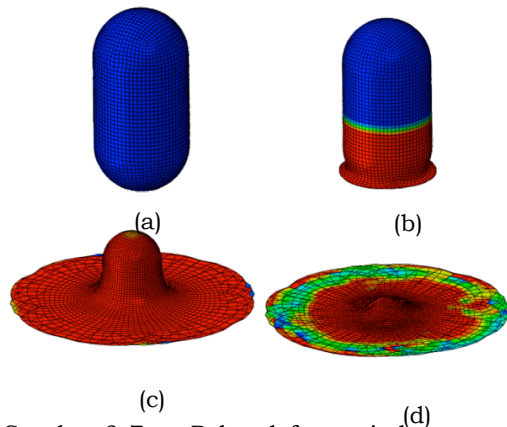
2.5 Kondisi Pembebanan dan Kondisi Batas

Beban impact diberikan dengan variasi kecepatan awal tumbukan pada burung sebesar 100, 200 dan 300 m/s. Kondisi batas/tumpuan ditentukan pada bagian sisi-sisi ujung pelat dengan kondisi ditahan (*fixed*).

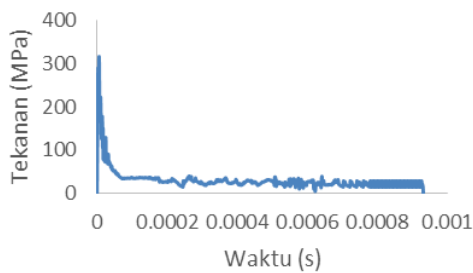
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil deformasi dengan model material yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2-6. Nilai tekanan yang diperoleh dengan cara mengambil data gaya kontak antara burung dan pelat tiap saat dan dibagi dengan area kontak tiap saat. Sementara, nilai tekanan stagnasi diperoleh dengan cara mengintegrasikan nilai tekanan pada selang $1/3 t_D$ hingga $2/3 t_D$ kemudian dibagi dengan $1/3 t_D$. Keluaran simulasi tabrak burung berupa grafik tekanan tiap saat ditunjukkan pada Gambar 2-8 sampai dengan 2-19 untuk geometri burung berupa silinder dengan kedua ujung setengah bola, dan Gambar 2-20 sampai dengan 2-31 untuk geometri burung berupa silinder. Dimana rata-rata menunjukkan hasil hampir sama yaitu memiliki pola grafik tekanan Hugoniot di awal impact dan tekanan stagnasi. Hasil tekanan Hugoniot dan tekanan stagnasi dirangkum pada Tabel 2-4 dan 2-5

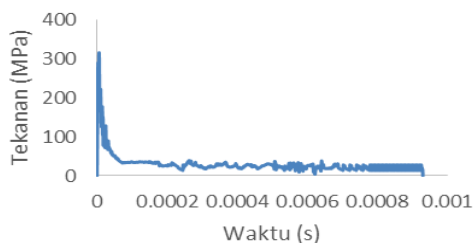
untuk geometri burung berupa silinder dengan kedua ujung setengah bola (*capsule*), dan Tabel 2-6 dan 2-7 untuk geometri burung berupa silinder.



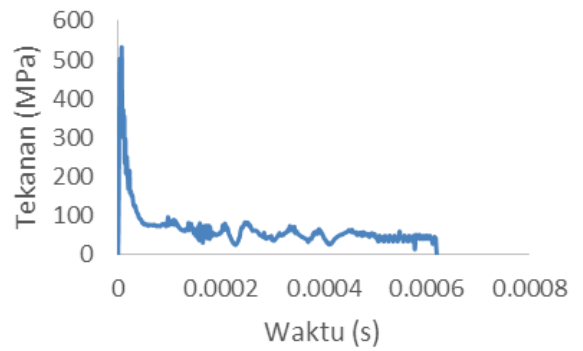
Gambar 2-7: Pola deformasi burung rasio $L/D = 2$ pada kecepatan 200 m/s tiap waktu berikut: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 6e-05$ s, (c) $t = 2,8e-04$ s, (d) $t = 5,6e-04$ s



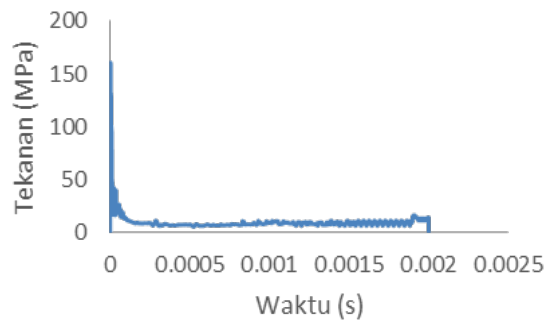
Gambar 2-8: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,4$ pada $v=100$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola



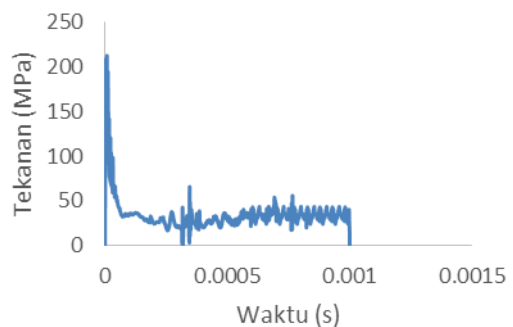
Gambar 2-9: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,4$ pada $v=200$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola



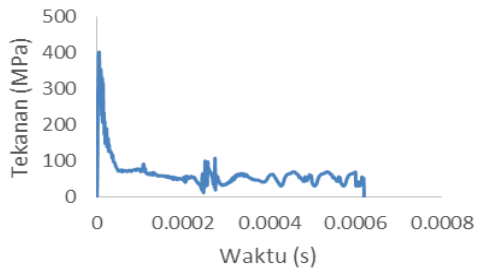
Gambar 2-10: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,4$ pada $v=300$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola



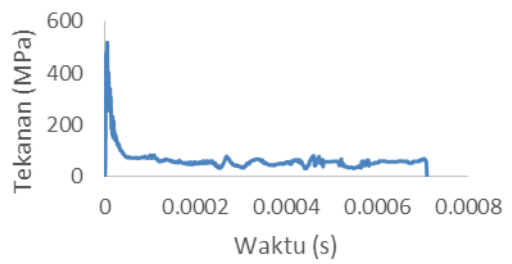
Gambar 2-11: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,6$ pada $v=100$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola



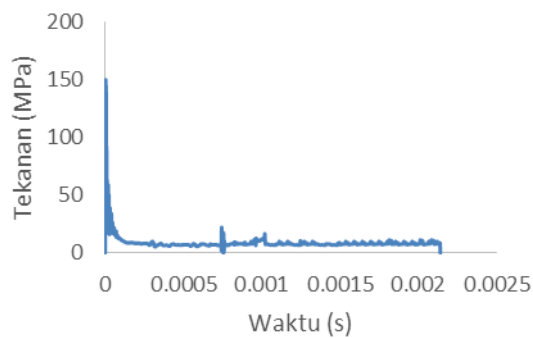
Gambar 2-12: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,6$ pada $v=200$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola



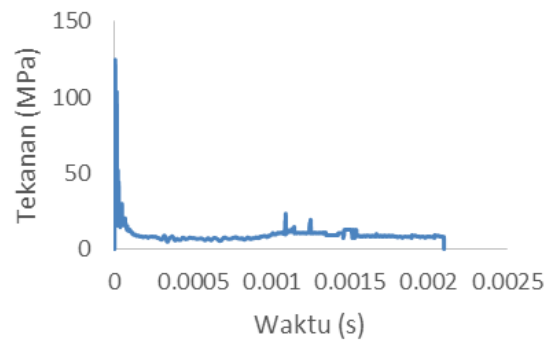
Gambar 2-13: Tekanan impak terhadap waktu pada rasio $L/D=1,6$ pada $v=300$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola



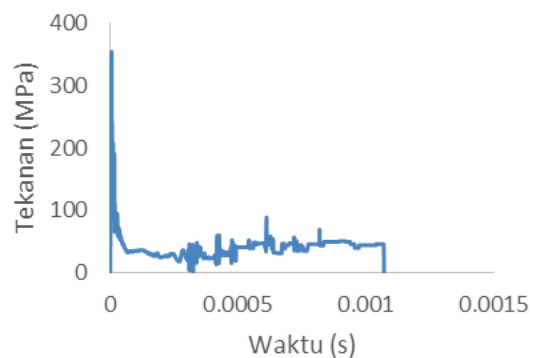
Gambar 2-16: Tekanan impak terhadap waktu pada rasio $L/D=1,8$ pada $v=300$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola



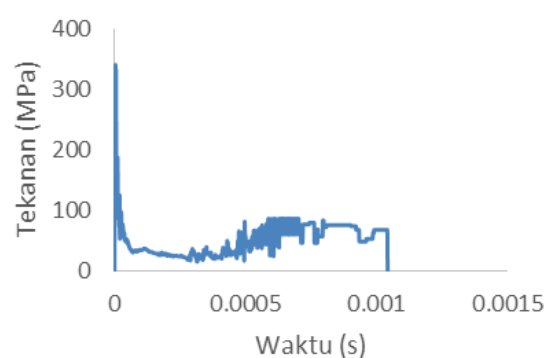
Gambar 2-14: Tekanan impak terhadap waktu pada rasio $L/D=1,8$ pada $v=100$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola



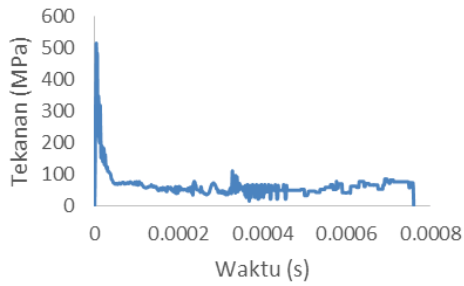
Gambar 2-17: Tekanan impak terhadap waktu pada rasio $L/D=2$ pada $v=100$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola.



Gambar 2-15: Tekanan impak terhadap waktu pada rasio $L/D=1,8$ pada $v=200$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola



Gambar 2-18: Tekanan impak terhadap waktu pada rasio $L/D=2$ pada $v=200$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola



Gambar 2-19: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=2$ pada $v=300$ m/s untuk model burung silinder dengan kedua ujung setengah bola

Tabel 2-4: HASIL TEKANAN HUGONIOT UNTUK GEOMETRI BURUNG BERUPA SILINDER DENGAN KEDUA UJUNG SETENGAH BOLA

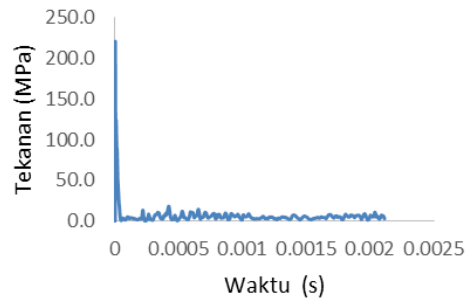
L/D	Tekanan Hugoniot (MPa)		
	100 m/s	200 m/s	300 m/s
1.4	147	317	531
1.6	159	212	402
1.8	149	355	517
2	125	341	516
Rata-rata	145	306	491

Tabel 2-5: HASIL TEKANAN STAGNASI UNTUK GEOMETRI BURUNG BERUPA SILINDER DENGAN KEDUA UJUNG SETENGAH BOLA

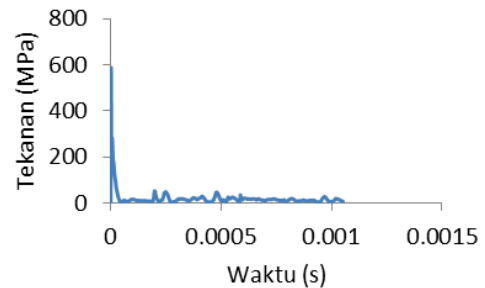
L/D	Tekanan Stagnasi (MPa)		
	100 m/s	200 m/s	300 m/s
1.4	7.95	24.85	51.16
1.6	8.60	28.71	48.86
1.8	8.55	40.39	52.38
2	7.93	82.08	59.80
Rata-rata	8.26	44.01	53.05

Berdasarkan grafik tekanan pada Gambar 2-8 sampai dengan 2-19 serta Tabel 2-4 terlihat bahwa tekanan impact tertinggi pada variasi $L/D=1,4$ dan kecepatan 300 m/s yaitu 531 MPa.

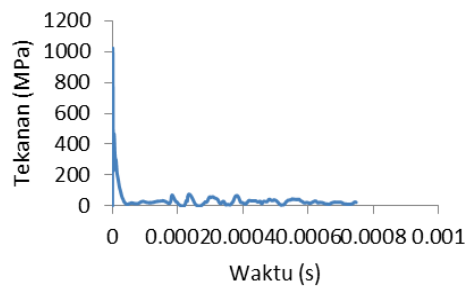
Sedangkan tekanan impact terkecil pada variasi $L/D=2$ dengan kecepatan 100 m/s yaitu 125 MPa. Respon waktu menunjukkan bahwa tekanan impact sangat tinggi pada saat awal tumbukan kemudian menurun secara drastis rata-rata mulai dari waktu ke 0,0001 sekon dan seterusnya.



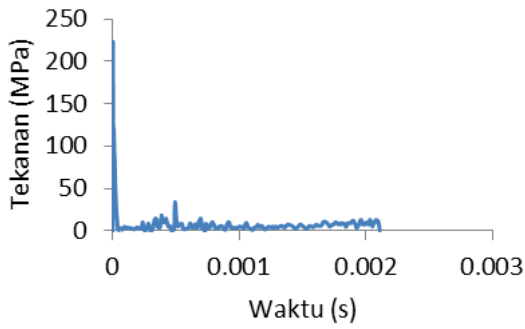
Gambar 2-20: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,4$ pada $v=100$ m/s untuk model burung silinder



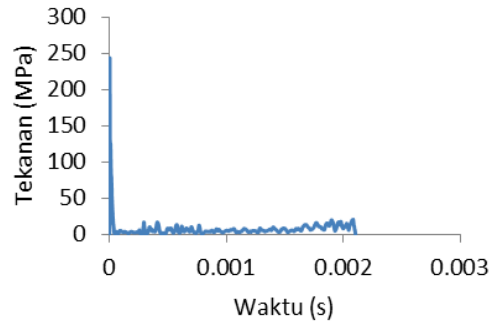
Gambar 2-21: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,4$ pada $v=200$ m/s untuk model burung silinder



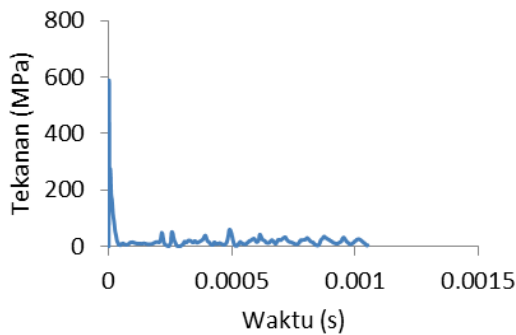
Gambar 2-22: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,4$ pada $v=300$ m/s untuk model burung silinder



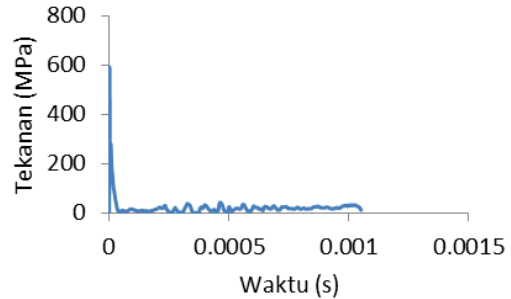
Gambar 2-23: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,6$ pada $v=100$ m/s untuk model burung silinder



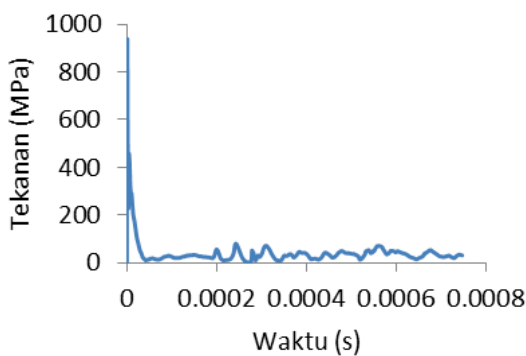
Gambar 2-26: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,8$ pada $v=100$ m/s untuk model burung silinder



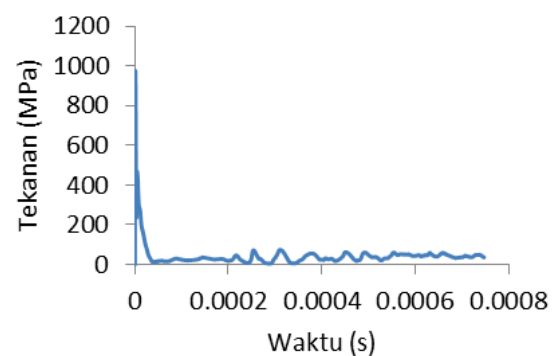
Gambar 2-24: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,6$ pada $v=200$ m/s untuk model burung silinder



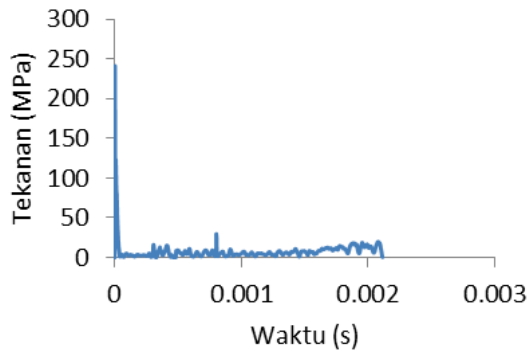
Gambar 2-27: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,8$ pada $v=200$ m/s untuk model burung silinder



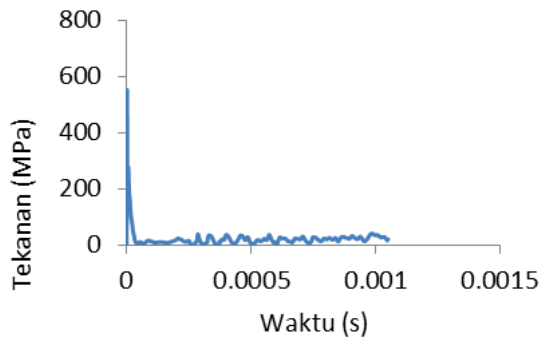
Gambar 2-25: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,6$ pada $v=300$ m/s untuk model burung silinder



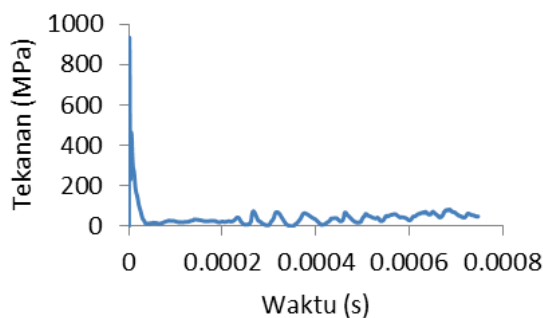
Gambar 2-28: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio $L/D=1,8$ pada $v=300$ m/s untuk model burung silinder



Gambar 2-29: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio L/D=2 pada v=100 m/s untuk model burung silinder



Gambar 2-30: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio L/D=2 pada v=200 m/s untuk model burung silinder



Gambar 31: Tekanan impact terhadap waktu pada rasio L/D=2 pada v=300 m/s untuk model burung silinder

Berdasarkan grafik tekanan pada Gambar 2-20 sampai dengan 2-31 serta Tabel 2-6 terlihat bahwa tekanan impact

tertinggi pada variasi L/D=1,4 dan kecepatan 300 m/s yaitu 1010 MPa. Sedangkan tekanan impact terkecil pada variasi L/D=1,4 dan 1,6 dengan kecepatan 100 m/s yaitu 219 MPa. Respon waktu menunjukkan bahwa tekanan impact sangat tinggi pada saat awal tumbukan kemudian menurun secara drastis rata-rata mulai dari waktu kurang dari 0,0001 sekon dan seterusnya.

Tabel 2-6: HASIL TEKanan HUGONIOT UNTUK GEOMETRI BURUNG BERUPA SILINDER

L/D	Tekanan Hugoniot (MPa)		
	100 m/s	200 m/s	300 m/s
1.4	219	573	1010
1.6	219	575	924
1.8	239	581	960
2	236	546	918
Rata-rata	228	569	953

Tabel 2-7: HASIL TEKanan STAGNASI UNTUK GEOMETRI BURUNG BERUPA SILINDER

L/D	Tekanan Stagnasi (MPa)		
	100 m/s	200 m/s	300 m/s
1.4	5.8	16.3	28
1.6	4.7	17.4	30.3
1.8	4.6	16.9	30.2
2	4.9	17.6	31.7
Rata-rata	5.0	17.0	29.9

Nilai tekanan impact menunjukkan jauh lebih tinggi pada variasi geometri burung berupa silinder daripada geometri burung berupa silinder dengan kedua ujung setengah lingkaran (*capsule*). Nilai tekanan impact pada geometri silinder hampir dua kali lipat nya nilai tekanan impact pada geometri silinder dengan kedua ujung setengah lingkaran.

4 KESIMPULAN

Hasil simulasi pada geometri burung berbentuk silinder dengan kedua ujung setengah lingkaran menunjukkan nilai tekanan *Hugoniot* jauh lebih tinggi sekitar 10-19 kali lipat tekanan stagnasi pada $L/D = 1,4$, 8-18 kali pada $L/D = 1,6$, 9-17 kali pada $L/D = 1,8$ dan 4-16 kali pada $L/D = 2$. Sedangkan untuk variasi kedua yaitu geometri burung berbentuk silinder menunjukkan nilai tekanan *Hugoniot* jauh lebih tinggi sekitar 35-38 kali lipat tekanan stagnasi pada $L/D = 1,4$, 30-47 kali pada $L/D = 1,6$, 31-52 kali pada $L/D = 1,8$ dan 28-48 kali pada $L/D = 2$.

Nilai tekanan impak pada geometri silinder hampir dua kali lipat lebih tinggi daripada nilai tekanan impak pada geometri silinder dengan kedua ujung setengah lingkaran.

Kelemahan *Lagrangian modelling* adalah distorsi *mesh* saat penyebaran material akibat awal impak. Nodal pada *Lagrangian mesh* mewakili material/struktur sehingga masing-masing nodal mengikuti respon struktur ketika terjadi pembebanan. Saat terjadi impak, maka akan terjadi penyebaran material burung yang cukup besar, dimana memungkinkan adanya *secondary impact* dari beberapa material burung yang terpisah setelah penetrasi struktural. Sehingga perlu dikaji lebih lanjut mengenai simulasi *bird strike* dengan pendekatan yang lain yaitu *Eulerian Modeling Method*, *Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method (ALE)* dan *Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)* yang *meshless* sehingga hasil yang diperoleh dapat lebih mendekati keadaan sebenarnya untuk kasus tabrak burung.

UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan ini, peneliti ingin mengucapkan terima kasih kepada

berbagai pihak yang telah membantu terwujudnya penelitian ini, yaitu:

1. DRPM Ditjen Penguatan Risbang yang telah memberikan bantuan dana kepada tim peneliti untuk melaksanakan penelitian
2. Marsda TNI (purn.) Potler Gultom, SH, MM selaku Rektor Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma atas ijin dan dukungan yang diberikan
3. Drs. Sarwoko, MM selaku Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) atas dukungan yang diberikan
4. Ir. Freddy Franciscus, MM selaku Dekan Fakultas Teknologi Kedirgantaraan atas dukungan dan bimbingan yang diberikan
5. Aprilia Sakti K., S.Si., M.Si. selaku Wakil Dekan I Fakultas Teknologi Kedirgantaraan atas dukungan dan bimbingan yang diberikan
6. Bismil Rabeta, ST, MT dan Simon Sindhu H., ST, MT selaku rekan dosen atas bantuan dan dukungan yang diberikan
7. Tim Redaksi Jurnal Teknologi Dirgantara LAPAN.

DAFTAR RUJUKAN

- Airoidi, A. dan Cacchione, B., 2006, Modelling of Impact Forces and Pressures in Lagrangian Bird Strike Analyses, *International Journal of Impact Engineering*, 32, pp. 1651-1677
- Barber, J.P., Taylor, H.R., dan Wilbeck, J.S., (1978), Bird Impact Force and Pressures on Rigid and Compliant Target, *Technical Report AFFDL-TR-77-60*, Air Force Flight Dynamics Laboratory
- Blair, A., (2008), Aeroengine Fan Blade Desain Accounting For Bird Strike, *Thesis*, Departmen Aeronautical and Industrial Engineering, The University of Toronto

- Heimbs, S., (2011), Bird Strike Analysis in Aircraft Engineering: An Overview. *Advances in Mechanical Engineering Research*, Vol 3. Nova Science Publishers, Inc.
- Johnson, A.F., dan Holzapfel, M., 2003, Modelling Soft Body Impact on Composite Structure, *Composite Structure*, 61, pp. 103-113
- Nicholson, R dan Reed, William, S., (2011), Strategis For Prevention of Bird Strike Events, *Aero Magazine*, QTR_03, 11, page 17-24,
https://www.boeing.com/commercial/aero_magazine/articles/2011_q3/4/
- Dassault Systems SIMULIA Corp, 2011, *A strategy for bird strike simulations using Abaqus/Explicit*. Simulia Online Support Document, Answer ID-4493 (Best Practices for Bird Strike Analysis)
- Thorpe, J., 2005, Fatalities and Destroyed Civil Aircraft Due To Bird Strikes 2002-2004, *Technical Report IBSC27/WP II-3*, International Bird Strike Committee, Athens
- Wilbeck, J.S., 1977, Impact Behavior of Low Strength Projectiles, *Technical Report AFML-TR-77-134*, Air Force Materials Laboratories, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Wright Patterson Air Force Base, Ohio 45433
- Wilbeck, J.S., Barber, J.P. (1978), Impact Bird Loading, *The Shock and Vibration Bulletin* 48, 2, 115-122.

