

Perancangan dan Simulasi Struktural Simulator Flap pada Sistem Flap/Slat Electronics Unit (FSEU) di PT Batam Aero Technic

Mutia Muchtar^{1*}, Hery Irwan²

¹⁻²Program Studi Teknik Industri, Universitas Riau Kepulauan, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : e-mail : mutiamuchtar122@gmail.com



e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 10 Oktober, 2026

Page: 6426-6434

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i10.4329>

Article History:

Received: Agustus 22, 2026

Revised: September 11, 2026

Accepted: Oktober 19, 2026

Abstract : The flap simulator was developed as an interactive learning medium to represent the mechanical functions and control system of the Flap/Slat Electronics Unit (FSEU) in controlling aircraft flap movement. This study aims to design a flap simulator prototype with adequate structural strength and a movement mechanism capable of replicating the basic characteristics of a Fowler flap. The research methods include literature review, three-dimensional modelling using Autodesk Fusion, material selection, finite element-based static stress simulation, and motion evaluation based on the Aircraft Maintenance Manual (AMM) Boeing 737 NG Chapter 27-51-00. The simulator structure was constructed using a combination of multiplex wood, PVC pipes, acrylic panels, and 3D-printed components. The testing results showed a maximum Von Mises stress of 0.461 MPa, a maximum displacement of 18.646 cm, and a safety factor value of 15.00 based on Autodesk Fusion simulation. Theoretical calculations produced a safety margin of 86.77. The servo motor-based rack and pinion mechanism successfully generated flap translational movement of 52.87 mm and a deflection angle of up to 10°. The results demonstrate that the simulator meets the initial structural strength and mechanical function requirements, making it a potential practical learning medium for aircraft control system education.

Keywords : Flap simulator, FSEU, Fowler flap, Rack and Pinion, Autodesk Fusion, Structural Simulation

Abstrak : Simulator flap dikembangkan sebagai media pembelajaran interaktif untuk merepresentasikan fungsi mekanis dan sistem kendali Flap/Slat Electronics Unit (FSEU) dalam mengendalikan pergerakan flap pesawat. Penelitian ini bertujuan merancang prototipe simulator flap dengan kekuatan struktur yang memadai serta mekanisme gerak yang mampu mereplikasi karakteristik dasar Fowler flap. Metode penelitian meliputi studi literatur, pemodelan tiga dimensi menggunakan Autodesk Fusion, pemilihan material, simulasi *static stress* berbasis metode elemen hingga, serta evaluasi gerakan berdasarkan Aircraft Maintenance Manual (AMM) Boeing 737 NG Chapter 27-51-00. Struktur simulator menggunakan kombinasi material kayu multiplex, pipa PVC, panel akrilik, dan komponen cetak 3D. Hasil pengujian menunjukkan tegangan Von Mises maksimum sebesar 0,461 MPa, *displacement* maksimum 18,646 cm, serta nilai *safety factor* sebesar 15,00 berdasarkan simulasi Autodesk Fusion. Perhitungan teoritis menghasilkan margin keamanan sebesar 86,77. Mekanisme *rack and pinion* berbasis servo motor mampu



menghasilkan gerak translasi flap sejauh 52,87 mm dan defleksi hingga 10° . Hasil penelitian menunjukkan bahwa simulator memenuhi kriteria awal kekuatan struktur dan fungsi mekanis, sehingga berpotensi digunakan sebagai media praktikum sistem kendali pesawat udara.

Kata Kunci : *Simulator Flap*, FSEU, *Fowler Flap*, *Rack and Pinion*, *Autodesk Fusion*, Simulasi Struktur.

PENDAHULUAN

Keselamatan penerbangan merupakan salah satu aspek fundamental dalam industri transportasi udara yang sangat bergantung pada keandalan sistem pesawat, kualitas pemeliharaan, serta kompetensi sumber daya manusia yang terlibat dalam operasional dan perawatan pesawat udara. Seiring meningkatnya kompleksitas teknologi penerbangan modern, sistem kendali pesawat tidak hanya dituntut memiliki tingkat keandalan tinggi, tetapi juga membutuhkan teknisi yang mampu memahami karakteristik mekanis, elektronik, dan integrasi antar sistem secara komprehensif. Salah satu sistem penting yang berkontribusi terhadap keselamatan dan performa penerbangan adalah sistem *high-lift device*, khususnya *flap*, yang berfungsi mengubah karakteristik aerodinamika sayap untuk meningkatkan gaya angkat (*lift*) pada kondisi penerbangan dengan kecepatan rendah seperti fase lepas landas dan pendaratan (Sadraey, 2013). Penggunaan perangkat *high-lift* memungkinkan pesawat menghasilkan gaya angkat yang lebih besar tanpa meningkatkan ukuran sayap secara signifikan, sehingga menjadi bagian penting dalam desain dan pengoperasian pesawat modern (Anderson, 2017).

Flap merupakan perangkat aerodinamika yang terletak pada bagian *trailing edge* sayap dan bekerja dengan memperbesar luas efektif serta kelengkungan (*camber*) profil sayap. Perubahan konfigurasi tersebut memungkinkan pesawat mencapai koefisien gaya angkat yang lebih tinggi pada kondisi operasi tertentu, terutama ketika kecepatan pesawat relatif rendah (Gudmundsson, 2022). Pada pesawat komersial modern seperti Boeing 737 Next Generation (NG), sistem pergerakan *flap* tidak hanya bergantung pada mekanisme mekanis, tetapi juga dikendalikan oleh sistem elektronik terintegrasi melalui *Flap/Slat Electronics Unit* (FSEU). FSEU berfungsi sebagai pusat pengendalian dan pemantauan sistem *flap/slat* dengan menerima masukan dari *flap lever*, sensor posisi, serta berbagai parameter penerbangan untuk memastikan pergerakan perangkat *high-lift* berlangsung secara sinkron dan aman (Moir & Seabridge, 2019). Selain mengatur pergerakan, FSEU juga memiliki fungsi diagnostik untuk mendeteksi kondisi abnormal seperti ketidaksinkronan (*asymmetry*), kegagalan aktuator, maupun gangguan sistem lainnya yang dapat memengaruhi keselamatan penerbangan (Federal Aviation Administration [FAA], 2023).

Kompleksitas sistem *flap* dan FSEU menyebabkan pemahaman terhadap sistem tersebut menjadi kompetensi penting dalam pendidikan dan pelatihan bidang teknik penerbangan. Mahasiswa dan calon teknisi pesawat tidak hanya dituntut memahami konsep teoritis, tetapi juga harus mampu menginterpretasikan hubungan antara sistem kendali elektronik, mekanisme aktuasi, dan perubahan konfigurasi aerodinamika secara visual maupun praktis. Namun, proses pembelajaran sistem avionik dan mekanisme pesawat masih menghadapi berbagai kendala, terutama keterbatasan akses terhadap komponen pesawat asli. Komponen penerbangan memiliki harga yang relatif tinggi, membutuhkan prosedur keselamatan khusus, serta tidak selalu tersedia untuk kegiatan praktikum pendidikan (Kumar & Singh, 2021). Penggunaan langsung komponen pesawat aktif juga memiliki risiko kerusakan dan keterbatasan operasional sehingga kurang efektif apabila diterapkan sebagai media pembelajaran rutin.

Salah satu pendekatan yang berkembang untuk mengatasi keterbatasan tersebut adalah penggunaan simulator sebagai media pembelajaran berbasis rekayasa (*engineering learning media*). Simulator memungkinkan mahasiswa memperoleh pengalaman praktis melalui representasi sistem nyata dengan biaya yang lebih rendah, risiko yang lebih kecil, dan fleksibilitas penggunaan yang lebih tinggi dibandingkan perangkat asli (Chapman, 2015). Dalam bidang pendidikan teknik penerbangan, simulator juga berperan dalam meningkatkan pemahaman konseptual karena mampu menghubungkan teori dengan visualisasi mekanisme kerja suatu sistem secara langsung. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan simulator berbasis

perangkat keras (*hardware-based simulator*) mampu meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap sistem kompleks karena menyediakan interaksi langsung antara pengguna dan objek pembelajaran (Putra & Firmansyah, 2018).

Perkembangan penelitian mengenai simulator penerbangan saat ini banyak berfokus pada simulasi perangkat lunak (*software simulation*) dan visualisasi virtual, seperti *flight simulator*, *virtual reality*, serta sistem pelatihan berbasis komputer. Meskipun pendekatan tersebut efektif dalam merepresentasikan lingkungan operasi pesawat, beberapa aspek mekanis seperti gerakan aktual komponen, hubungan kinematika, dan respons struktur fisik masih memiliki keterbatasan dalam memberikan pengalaman pembelajaran secara nyata. Penelitian terkait pengembangan simulator mekanis *flap* yang mengintegrasikan aspek struktur, mekanisme gerak, serta sistem kendali FSEU masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada analisis aerodinamika *flap*, simulasi kontrol penerbangan, atau pengembangan perangkat lunak simulasi, sedangkan kajian mengenai prototipe fisik yang mampu mereplikasi karakteristik gerak *Fowler flap* sekaligus mempertimbangkan aspek kekuatan struktur masih belum banyak dilakukan.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat celah penelitian (*research gap*) berupa kebutuhan terhadap media pembelajaran berbasis simulator fisik yang mampu mengintegrasikan representasi mekanis dan sistem kendali *flap* secara sederhana namun tetap memiliki kesesuaian dengan karakteristik sistem pesawat sebenarnya. Penelitian ini menawarkan kebaruan (*novelty*) melalui pengembangan prototipe simulator *flap* yang menggabungkan desain struktur fisik, mekanisme *rack and pinion*, aktuator servo motor, serta evaluasi kekuatan struktur menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*) pada Autodesk Fusion. Selain itu, kesesuaian gerakan mekanis simulator dievaluasi berdasarkan referensi teknis industri penerbangan, yaitu *Aircraft Maintenance Manual* (AMM) Boeing 737 NG Chapter 27-51-00, sehingga rancangan yang dihasilkan tidak hanya berorientasi pada aspek visual, tetapi juga mempertimbangkan karakteristik operasional sistem pesawat.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi prototipe simulator *flap* sebagai media pembelajaran sistem kendali pesawat udara. Secara khusus, penelitian dilakukan untuk menganalisis kekuatan struktur simulator terhadap pembebanan statis, mengevaluasi kemampuan mekanisme penggerak dalam menghasilkan gerakan translasi dan rotasi seperti karakteristik dasar *Fowler flap*, serta menilai kesesuaian rancangan terhadap standar teknis sistem *flap/slat* pesawat Boeing 737 NG. Penelitian ini menjadi penting karena pengembangan media pembelajaran berbasis simulator dapat menjadi solusi alternatif dalam meningkatkan kualitas pembelajaran teknik penerbangan, khususnya pada pemahaman sistem kendali pesawat yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi. Dengan adanya simulator yang ekonomis, aman, dan representatif, institusi pendidikan dapat menyediakan pengalaman praktikum yang lebih efektif sekaligus mendukung peningkatan kompetensi calon teknisi penerbangan sesuai kebutuhan industri.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan sistematis yang diawali dengan studi literatur mengenai prinsip aerodinamika, mekanika *Fowler flap*, serta arsitektur sistem FSEU. Tahapan kemudian dilanjutkan dengan pembuatan desain konseptual awal, pemilihan jenis material dan komponen elektronika, serta penentuan dimensi geometris detail dari seluruh bagian simulator. Setelah model digital matang, dilakukan pengujian mekanis berupa simulasi *static stress* untuk mengevaluasi faktor keamanan struktur. Proses diakhiri dengan perhitungan kinematika gerak *flap*, verifikasi kesesuaian gerak terhadap manual pesawat, serta penyusunan gambar kerja teknis untuk kebutuhan manufaktur fisik. Seluruh proses pemodelan tiga dimensi (3D) dan visualisasi mekanis diselesaikan dengan memanfaatkan perangkat lunak *Autodesk Fusion*.

Secara arsitektural, simulator ini dibagi menjadi tiga kelompok modular utama, yaitu *wing assembly*, *flap assembly*, dan *stand support*. Komponen *wing* dirancang menyerupai struktur sayap asli yang terdiri atas penguat depan, spar (balok utama sayap) sebagai penerima beban utama, rib (rusuk) tengah dan rusuk ujung untuk membentuk profil aerodinamis, penguat belakang, skin (kulit sayap), serta rib pangkal yang terhubung langsung dengan stand penopang. Pada bagian *trailing edge*, *flap assembly* dipasang lengkap dengan komponen pendukung seperti *flap track* (lintasan), pengunci, dan batang penghubung (*linkage*). Untuk sistem aktuasi, motor servo 360°

MG996 diintegrasikan dengan mekanisme roda gigi *rack and pinion* guna mengubah input gerak rotasi menjadi output gerak linear (translasi) yang berfungsi mendorong atau menarik flap di sepanjang lintasan track.

Material dan Komponen

Konstruksi simulator ini menggunakan pendekatan material hibrida untuk menyeimbangkan faktor kekuatan, efisiensi bobot, serta kemudahan fabrikasi. Struktur luar dan penopang utama memanfaatkan papan kayu *multiplex/plywood* dengan variasi ketebalan 15 mm dan 18 mm. Panel indikator serta komponen penutup transparan menggunakan lembaran akrilik agar pergerakan internal mekanis dapat terpantau dengan jelas. Saluran struktural tambahan memanfaatkan pipa PVC berdiameter 32 mm. Sementara itu, untuk komponen-komponen dengan tingkat kompleksitas geometri yang tinggi seperti roda gigi *pinion*, *rack*, dan komponen *linkage* pengoperasian *flap*, diproduksi menggunakan teknologi aditif (*3D printing*) dengan material berbasis filamen PETG serta resin *photopolymer* cair.

Tabel 1. Spesifikasi Material dan Komponen Mekanis Simulator Flap

Jenis Material / Komponen	Dimensi / Spesifikasi	Jumlah	Fungsi Operasional Struktur
Multiplex / Plywood	Tebal 18 mm; 122 x 44 cm	1 lembar	Rangka platform utama & wing
Multiplex / Plywood	Tebal 15 mm; 122 x 44 cm	1 lembar	Struktur kaki & stand penopang
Lembaran Akrilik	Dimensi 120 x 25 cm	1 lembar	Panel monitoring & casing luar
Pipa PVC	Diameter Ø32 mm; pjg 80 cm	1 pcs	Pengaku internal poros silinder
Filamen Cetak 3D PETG	Konstruksi aditif densitas tinggi	2 pcs	Komponen roda gigi rack & pinion
Liquid Resin Photopolymer	Hasil cetak 3D resolusi tinggi	499 g	Komponen engsel & mata linkage
Linear Servo Actuator	34,6 x 26 x 21,86 mm	2 pcs	Driver utama translasi slide

Sumber: Olah Data Peneliti, 2026

Analisis kekuatan struktur dilakukan melalui fitur *static stress simulation* pada *Autodesk Fusion* dengan memberikan pembebanan statis terpusat sebesar 10 N (Autodesk, 2022). Beban ini ditentukan sebagai representasi matematis dari total akumulasi berat *engine mock-up*, *wing*, serta komponen elektronika terpasang. Parameter performa struktural yang dianalisis meliputi sebaran tegangan Von Mises, faktor keamanan (*safety factor*), dan tingkat perpindahan tempat (*displacement*) akibat deformasi elastis. Properti mekanis material yang dimasukkan ke dalam sistem mengacu pada data teoretis standar, yaitu yield strength kayu sebesar 40 MPa dan yield strength PVC sebesar 11 Mpa (Megson, 2016). Selain mengandalkan kalkulasi otomatis dari perangkat lunak, verifikasi manual terhadap faktor keamanan dilakukan menggunakan persamaan dasar mekanika teknik:

$$aSF = \frac{\sigma_y}{\sigma} \quad (1)$$

Sumber: H. G. Megson (2016)

Di mana σ_y adalah *yield strength material* dan σ adalah tegangan kerja maksimum yang terjadi pada struktur. Selanjutnya dilakukan pengujian fungsional kinematika untuk menganalisis pergerakan geometri flap saat meluncur di atas flap track. Pergerakan ini kemudian dikomparasikan secara langsung dengan spesifikasi teknis perpindahan serta sudut defleksi yang tercantum pada dokumen Aircraft Maintenance Manual (AMM) Boeing 737 NG Chapter 27-51-00 (Federal Aviation Administration, 2023). Evaluasi difokuskan pada pengukuran dua parameter utama, yakni jarak perpindahan horizontal (ekstensi) dan sudut defleksi vertikal (kemiringan)

ketika simulator dioperasikan dari posisi penuh ke atas (*retracted/cruise mode*) hingga posisi penuh ke bawah (*extended/landing mode*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Desain

Luaran dari tahap perancangan ini adalah satu kesatuan unit simulator *flap* utuh yang ergonomis dan fungsional. *Wing* bertindak sebagai platform struktural utama yang menampung seluruh instalasi mekanis. Penempatan flap pada bagian *trailing edge* dikombinasikan dengan geometri khusus pada *flap track* agar gerakan yang dihasilkan tidak hanya berupa rotasi sederhana pada satu titik engsel tetap (Lima et al., 2021). Penerapan mekanisme ini terbukti mampu mereplikasi karakteristik sejati dari *Fowler flap*, yaitu menghasilkan pergerakan translasional (memperluas luas efektif permukaan sayap) yang terjadi secara simultan dengan pergerakan rotasional (meningkatkan kelengkungan atau camber sayap) guna memaksimalkan gaya angkat pada kecepatan rendah.

Hasil Simulasi Struktural

Berdasarkan visualisasi kontur tegangan dari simulasi elemen hingga, nilai tegangan *Von Mises* maksimum yang terjadi pada area kritis akibat pembebanan 10 N hanya mencapai 0,461 MPa. Nilai tegangan ini berada jauh di bawah batas elastisitas (*yield strength*) material kayu yang bernilai 40 MPa, yang mengindikasikan bahwa seluruh komponen berada dalam kondisi aman dan terhindar dari risiko kegagalan statik atau patah struktural. Meskipun demikian, indikator displacement maksimum menunjukkan nilai deformasi sebesar 18,646 cm pada ujung struktur yang menggantung. Angka deformasi yang cukup signifikan ini menjadi catatan evaluasi penting, karena kekakuan (*stiffness*) struktur yang rendah dapat memengaruhi tingkat akurasi posisi mekanis serta presisi pembacaan sensor pada sistem FSEU. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa analisis kelayakan simulator tidak boleh hanya terpaku pada indikator *safety factor* yang tinggi, melainkan harus mempertimbangkan aspek pembatasan deformasi geometri demi menjaga stabilitas fungsional alat peraga.

Tabel 2. Rekapitulasi Parameter Kerja dan Output Hasil Simulasi Statis

No	Parameter Pengujian Struktural	Nilai Parameter Kinerja	Catatan Evaluasi Teknis
1	Input Pembebanan Statis	10 N	Representasi total komponen
2	Tegangan Von Mises Maksimum	0,461 MPa	Di bawah yield kayu (40 MPa)
3	Safety Factor (Sistem CAD)	15,00	Batas tampilan visual tertinggi
4	Safety Factor (Kalkulasi Manual)	86,77	Margin keamanan statis tinggi
5	Deformasi Elastis (Displacement)	18,646 cm	Ujung kantilever butuh bracing

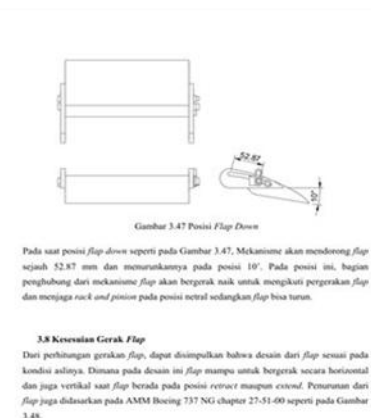
Sumber: Olah Data Peneliti, 2026

Hasil Gerak Flap

Ketika sistem simulator diaktifkan menuju mode operasional penuh (*flap down*), motor servo secara presisi memutar pinion untuk mendorong rack, yang kemudian menggerakkan linkage pengikat. Mekanisme ini berhasil mendorong flap meluncur secara horizontal sejauh 52,87 mm dan menurunkan sudut kemiringannya hingga membentuk defleksi sebesar 10°. Pola gerakan trans-rotasional ini membuktikan keberhasilan fungsi mekanis dalam meniru karakteristik fisik *Fowler flap*. Sistem aktuasi ini juga dirancang secara modular agar mampu memfasilitasi simulasi pengujian pada delapan posisi detent lever standar pesawat Boeing 737 NG, mulai dari posisi 0 (*cruise mode*) dengan sudut 0°, posisi take-off (1°, 5°, 15°), posisi transisi (10°), hingga konfigurasi pendaratan penuh pada posisi 25°, 30°, dan 40° (*full landing configuration*).

Gambar 1. Judul

Posisi flap	Defleksi	Keterangan
0	0°	Flap tertutup (cruise mode)
1	1°	Take-off ringan/pendek
5	5°	Take-off normal
10	10°	Transisi ke climb
15	15°	Approach awal
25	25°	Approach akhir
30	30°	Landing
40	40°	Full landing configuration



Sumber: 14.Federal Aviation Administration (2023)

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa simulator *flap* yang dikembangkan berhasil menghasilkan rancangan prototipe yang mampu merepresentasikan prinsip kerja sistem *high-lift device*, khususnya karakteristik mekanisme *Fowler flap*. Berbeda dengan konfigurasi *flap* konvensional yang hanya menghasilkan pergerakan rotasi terhadap satu titik engsel, rancangan simulator ini menerapkan mekanisme *flap track* yang memungkinkan terjadinya kombinasi gerakan translasi dan rotasi secara bersamaan. Pergerakan tersebut menghasilkan perpindahan flap menjauhi permukaan sayap sebelum mengalami defleksi ke bawah, sehingga terjadi peningkatan luas efektif permukaan sayap dan perubahan *camber* yang menjadi karakteristik utama *Fowler flap*. Mekanisme ini sesuai dengan prinsip aerodinamika perangkat *high-lift* modern yang dirancang untuk meningkatkan gaya angkat pada fase penerbangan berkecepatan rendah, terutama saat lepas landas dan pendaratan (Anderson, 2017; Gudmundsson, 2022). Hasil tersebut menunjukkan bahwa rancangan simulator tidak hanya berfungsi sebagai representasi visual, tetapi juga telah mempertimbangkan aspek kinematika yang mendekati sistem pesawat sebenarnya.

Kemampuan simulator dalam mereplikasi karakteristik gerakan *Fowler flap* memberikan nilai tambah dibandingkan beberapa pendekatan simulator sebelumnya yang lebih banyak berfokus pada simulasi berbasis perangkat lunak atau visualisasi digital. Meskipun simulasi komputer mampu memberikan gambaran mengenai perilaku sistem penerbangan, pendekatan tersebut memiliki keterbatasan dalam memberikan pengalaman interaksi langsung terhadap mekanisme fisik. Penelitian mengenai media pembelajaran berbasis prototipe fisik menunjukkan bahwa model nyata dapat meningkatkan pemahaman mahasiswa karena memberikan hubungan langsung antara konsep teoritis, pergerakan mekanis, dan fungsi sistem yang dipelajari (Chapman, 2015). Oleh karena itu, pengembangan simulator *flap* dalam penelitian ini memberikan kontribusi dalam menghadirkan media pembelajaran berbasis *hands-on learning* yang dapat membantu mahasiswa memahami hubungan antara sistem kendali elektronik, aktuasi mekanis, dan respons komponen pesawat.

Berdasarkan hasil simulasi struktur menggunakan metode elemen hingga, rancangan simulator menunjukkan tingkat keamanan yang baik terhadap pembebanan statis. Nilai tegangan Von Mises maksimum sebesar 0,461 MPa akibat pembebanan 10 N masih berada jauh di bawah nilai *yield strength* material kayu yang digunakan sebesar 40 MPa. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa struktur simulator masih berada dalam batas elastis material dan memiliki kemampuan menahan beban tanpa mengalami kegagalan permanen. Nilai *safety factor* sebesar 15,00 yang

diperoleh dari simulasi Autodesk Fusion juga memperlihatkan bahwa struktur memiliki margin keamanan yang tinggi terhadap potensi kerusakan akibat pembebanan statis. Hasil ini sejalan dengan prinsip analisis struktur menggunakan metode elemen hingga, yaitu pemodelan numerik dapat digunakan untuk mengetahui distribusi tegangan, deformasi, serta potensi area kritis sebelum suatu produk diproduksi atau diuji secara fisik (Logan, 2017).

Meskipun hasil tegangan menunjukkan kondisi struktur yang aman, penelitian ini menemukan bahwa nilai *displacement* maksimum sebesar 18,646 cm pada bagian ujung struktur perlu menjadi perhatian dalam pengembangan lebih lanjut. Deformasi tersebut tidak menyebabkan kegagalan struktural, tetapi dapat memengaruhi tingkat presisi mekanisme, terutama apabila simulator digunakan untuk demonstrasi sistem kendali yang membutuhkan akurasi posisi. Temuan ini menunjukkan bahwa evaluasi kelayakan struktur tidak dapat hanya didasarkan pada kekuatan material (*strength*), tetapi juga harus mempertimbangkan aspek kekakuan (*stiffness*) struktur. Struktur yang memiliki nilai *safety factor* tinggi belum tentu menghasilkan performa mekanis optimal apabila deformasi yang terjadi cukup besar. Oleh karena itu, pengembangan berikutnya perlu mempertimbangkan penambahan elemen pengaku (*bracing*), optimasi desain penyangga, atau penggunaan material dengan modulus elastisitas lebih tinggi pada bagian yang mengalami deformasi terbesar. Pendekatan tersebut sesuai dengan prinsip desain mekanik yang menekankan keseimbangan antara kekuatan, kekakuan, berat, dan kemudahan manufaktur (Budynas & Nisbett, 2020).

Hasil pengujian mekanisme gerak menunjukkan bahwa sistem aktuasi berbasis servo motor dan mekanisme *rack and pinion* berhasil menghasilkan pergerakan flap sesuai konsep dasar sistem *Fowler flap*. Ketika sistem diaktifkan menuju konfigurasi *flap down*, putaran servo diterjemahkan menjadi gerakan linear melalui mekanisme pinion yang menggerakkan rack, kemudian diteruskan menuju linkage penghubung flap. Mekanisme tersebut menghasilkan perpindahan horizontal sebesar 52,87 mm dan sudut defleksi hingga 10°. Keberhasilan menghasilkan pola gerak translasi dan rotasi secara bersamaan menunjukkan bahwa sistem mekanis yang dirancang telah mampu meniru prinsip kerja mekanisme flap pesawat modern. Pada sistem aktual pesawat seperti Boeing 737 NG, pergerakan flap memang dirancang melalui mekanisme *track* tertentu agar flap dapat bergerak keluar dari kontur sayap sebelum mengalami penurunan sudut, sehingga peningkatan gaya angkat dapat dicapai secara optimal (Federal Aviation Administration, 2023).

Selain validasi mekanisme gerak, kemampuan simulator dalam mendukung beberapa konfigurasi posisi *detent lever* Boeing 737 NG memberikan nilai penting dalam aspek pembelajaran. Sistem yang dikembangkan memungkinkan pengguna memahami perubahan posisi flap mulai dari kondisi *cruise mode*, konfigurasi *take-off*, hingga konfigurasi *landing*. Hal tersebut memberikan pemahaman yang lebih komprehensif dibandingkan media pembelajaran yang hanya menampilkan bentuk fisik komponen tanpa memperlihatkan hubungan antara input kendali dan respons mekanis. Dalam pendidikan teknik penerbangan, pemahaman terhadap suatu sistem tidak hanya membutuhkan pengetahuan mengenai komponen penyusun, tetapi juga pemahaman mengenai bagaimana komponen tersebut bekerja sebagai suatu kesatuan sistem. Oleh karena itu, simulator ini berpotensi menjadi media praktikum yang mendukung pendekatan pembelajaran berbasis rekayasa (*engineering design learning*).

Dari perspektif implementasi pendidikan, penelitian ini memberikan kontribusi dalam menyediakan alternatif media pembelajaran sistem kendali pesawat yang lebih ekonomis, aman, dan mudah digunakan dibandingkan penggunaan komponen pesawat asli. Komponen penerbangan memiliki biaya pengadaan yang tinggi serta membutuhkan prosedur keselamatan khusus sehingga tidak selalu tersedia untuk kegiatan praktikum akademik. Pengembangan simulator berbasis prototipe fisik dapat menjadi solusi untuk memberikan pengalaman belajar yang lebih aplikatif tanpa mengurangi aspek teknis yang ingin dipahami. Integrasi antara desain CAD, simulasi elemen hingga, mekanisme aktuasi, dan validasi berdasarkan standar teknis penerbangan juga memberikan nilai tambah karena mahasiswa dapat memahami proses pengembangan produk teknik secara menyeluruh, mulai dari tahap desain hingga evaluasi kinerja.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, evaluasi struktur masih dilakukan melalui simulasi numerik sehingga diperlukan pengujian eksperimental menggunakan alat ukur deformasi atau pembebanan langsung untuk

memvalidasi hasil simulasi. Kedua, sistem yang dikembangkan masih berfokus pada representasi mekanisme dasar flap dan belum sepenuhnya mengintegrasikan seluruh fungsi elektronik FSEU seperti sensor posisi, sistem deteksi *asymmetry*, dan logika kontrol sebagaimana sistem pesawat sebenarnya. Ketiga, penelitian ini belum melakukan evaluasi terhadap efektivitas simulator sebagai media pembelajaran melalui pengujian pengguna secara langsung terhadap mahasiswa atau teknisi. Namun, keterbatasan tersebut tidak mengurangi kontribusi utama penelitian karena simulator yang dikembangkan telah berhasil memenuhi tahap awal validasi struktur dan fungsi mekanis. Penelitian lanjutan dapat diarahkan pada integrasi sistem kontrol berbasis mikrokontroler, penambahan sensor posisi, pengembangan antarmuka digital, serta evaluasi tingkat pemahaman pengguna untuk meningkatkan fungsi simulator sebagai media pembelajaran sistem kendali pesawat udara.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa simulator *flap* yang dikembangkan mampu menjadi representasi fisik yang mendekati prinsip kerja sistem *high-lift device* pada pesawat udara. Kombinasi antara desain mekanis, analisis struktur, dan validasi gerakan berdasarkan standar teknis penerbangan menunjukkan bahwa simulator memiliki potensi untuk digunakan sebagai media pembelajaran praktikum teknik penerbangan. Pengembangan lebih lanjut dengan peningkatan aspek kekakuan struktur dan integrasi sistem elektronik FSEU akan semakin memperkuat kemampuan simulator sebagai sarana pembelajaran yang mendukung peningkatan kompetensi mahasiswa dan calon teknisi penerbangan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Simulator flap berbasis sistem FSEU telah berhasil dirancang dan diverifikasi secara mekanis, dengan pembagian struktur modular yang terdiri dari unit *wing*, *flap*, *stand support*, serta sistem aktuasi *rack and pinion* berpenggerak motor servo. Hasil analisis statis dengan pembebanan 10 N menunjukkan kekuatan struktur yang aman dengan tegangan *Von Mises* maksimum sebesar 0,461 MPa, batas *safety factor Fusion* mencapai nilai 15,00 (perhitungan manual bernilai 86,77), namun memiliki nilai *displacement* maksimum yang perlu dioptimasi sebesar 18,646 cm. Dari aspek pengujian gerak, simulator mampu mendemonstrasikan karakteristik gerak *Fowler flap* secara konsisten dengan pencapaian jarak horizontal 52,87 mm dan defleksi sudut 10° pada kondisi *flap down*, serta memiliki rentang kapasitas desain operasional penuh dari sudut 0° hingga 40° sesuai standar industri. Prototipe ini dinilai sangat prospektif untuk diaplikasikan sebagai media pembelajaran praktikum yang efektif dalam memvisualisasikan sistem kontrol dan pemantauan avionik.

Melakukan validasi eksperimental secara fisik melalui pengujian laboratorium pasca-manufaktur untuk mengukur nilai aktual dari stress, *displacement*, gaya dorong aktuator, serta tingkat *repeatability* (keterulangan) dari posisi pemberhentian *flap*. Melakukan optimasi kekakuan struktural (*structural stiffening*) pada komponen yang mengalami *displacement* tinggi guna meminimalisasi defleksi berlebih. Mengembangkan sistem kelistrikan tingkat lanjut dengan mengintegrasikan sensor posisi linear (LVDT/potensio), sensor kecepatan, serta layar indikator *digital real-time* guna memperkaya visualisasi fitur monitoring pada FSEU. Mengembangkan desain versi lanjutan menggunakan material komposit ringan namun memiliki modulus elastisitas tinggi guna mengevaluasi efisiensi massa dan rigiditas struktur secara komparatif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah memberi dukungan baik moril maupun materil terhadap pelaksanaan kegiatan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aerodynamic optimization of a high-lift system with adaptive dropped hinge flap. (2022). *Chinese Journal of Aeronautics*.
- Anderson, J. D. (2017). *Aircraft performance and design*. McGraw-Hill Education.
- Autodesk. (2022). *Fusion 360 user guide*. Autodesk.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's mechanical engineering design* (11th ed.). McGraw-Hill Education.

- Chapman, D. (2015). *Flight simulation and training systems: Principles and applications*. Aviation Training Publications.
- Chapman, J. R. (2015). *Principles of aircraft flight simulation*. John Wiley & Sons.
- Federal Aviation Administration. (2023). *Airplane flying handbook*. U.S. Department of Transportation.
- Federal Aviation Administration. (2023). *Airplane flying handbook (FAA-H-8083-3C)*. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- Federal Aviation Administration. (2023b). *Pilot's handbook of aeronautical knowledge (FAA-H-8083-25C)*.
- Federal Aviation Administration. (2026). *Aviation handbooks & manuals*.
- Gudmundsson, S. (2022). *General aviation aircraft design: Applied methods and procedures* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01234-5>
- Jeppesen. (2016). *Aircraft systems for pilots*. Jeppesen Sanderson, Inc.
- Kroes, M. C., Wild, T., & Delp, J. R. (2013). *Aircraft maintenance and repair* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
- Kumar, R., & Singh, P. (2021). Simulation-based learning approaches in engineering education: Applications and challenges. *Education and Information Technologies*, 26, 5671–5690.
- Lima, M. R., Silva, A. P., & Santos, J. C. (2021). Design and aerodynamic analysis of Fowler flap mechanisms for improved aircraft high-lift performance. *Aerospace Science and Technology*, 118, 107023. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107023>
- Logan, D. L. (2017). *A first course in the finite element method* (6th ed.). Cengage Learning.
- Mechanism/structure/aerodynamic multidisciplinary optimization of flexible high-lift devices for transport aircraft. (2019). *Aerospace Science and Technology*.
- Megson, T. H. G. (2016). *Aircraft structures for engineering students* (6th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Moir, I., & Seabridge, A. (2008). *Aircraft systems: Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration* (3rd ed.). Wiley.
- Moir, I., & Seabridge, A. (2019). *Aircraft systems: Mechanical, electrical and avionics subsystems integration* (4th ed.). Wiley.
- Monte, A. D., Castelli, M. R., & Benini, E. (2012). A retrospective of high-lift device technology. *International Journal of Aerospace Mechanical Engineering*, 6(11), 2561–2566.
- Numerical study on technical and conceptual improvements to a civil aircraft trailing-edge flap using passive/active flow control. (2021).
- Prasetyo, B. (2020). Perancangan sistem elektronika pada prototipe sayap pesawat terbang. *Jurnal Teknik Dirgantara*, 12(2), 45–52.
- Prince, M. (2020). Does active learning work? A review of the research. *Journal of Engineering Education*, 93(3), 223–231. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2004.tb00809.x>
- Putra, A., & Firmansyah, R. (2018). Development of aircraft system simulator as an instructional media for aviation engineering education. *Journal of Aviation Technology Education*.
- Putra, R. A., & Firmansyah, A. (2018). Simulasi pergerakan flap pesawat menggunakan mikrokontroler berbasis Arduino Uno. *Prosiding Seminar Nasional Aircraft Design*.
- Raymer, D. P. (2018). *Aircraft design: A conceptual approach* (6th ed.). American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA).
- Roskam, J. (2018). *Airplane design: Part I–VIII*. DARcorporation.
- Sadraey, M. H. (2013). *Aircraft design: A systems engineering approach*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118352700>
- Stinton, D. (2021). *The design of the aeroplane* (2nd ed.). Wiley.
- Torenbeek, E. (2019). *Synthesis of subsonic airplane design*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1543-5>
- Zhang, X., Qiao, Z., & Wang, Y. (2022). Numerical investigation of high-lift aerodynamic devices and flap configuration effects on aircraft performance. *Aerospace*, 9(8), 421. <https://doi.org/10.3390/aerospace9080421>