

Perancangan *Housing* Antena *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* Model *Mikrostrip Blade* pada Pesawat Piper Warrior-III

Andyo Reynaldy¹ Ego Widoro² Muhamad Faridh Al Farisy³ Nurdin⁴

Program Studi Diploma IV Teknik Pesawat Udara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug,
Tangerang, Banten, Indonesia^{1,2,3,4}

Email: reynaldyandyo159@gmail.com¹ ego.widoro@ppicurug.ac.id²
faridhalfarisy@ppicurug.ac.id³ nurdin@ppicurug.ac.id⁴

Abstrak

Pesawat latih Piper PA-28-161 Warrior III yang dioperasikan Politeknik Penerbangan Indonesia (PPI) Curug telah dilengkapi sistem *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B) hasil modifikasi non-pabrikan yang menurut laporan teknisi dan penerbang kerap mengalami *malfunction*, sementara rancangan *housing* antena yang spesifik bagi karakteristik *fuselage* pesawat tersebut belum tersedia. Penelitian ini dilakukan karena penambahan komponen eksternal pada permukaan pesawat menuntut perlindungan mekanik tanpa mendegradasi pancaran sinyal pada frekuensi kerja 1090 MHz, sekaligus berpotensi menambah gaya hambat aerodinamis. Tujuan penelitian adalah menentukan lokasi pemasangan yang paling sesuai, merancang geometri *housing* tipe *blade*, dan menguji kelayakan aerodinamis rancangan tersebut. Penelitian menggunakan metode *Research and Development* dengan model pengembangan ADDIE. Penentuan lokasi dilakukan melalui triangulasi kualitatif atas kajian manual instalasi Avidyne AXP340, observasi struktur *belly fuselage*, dan wawancara tiga ahli avionik, sedangkan kelayakan aerodinamis diuji melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) ANSYS Fluent dengan model turbulensi SST k- ω . Metode tersebut dipilih karena memungkinkan evaluasi kuantitatif medan aliran tanpa pengujian fisik yang mahal dan memakan waktu. Hasil triangulasi menetapkan lokasi pemasangan pada *belly fuselage* sedekat mungkin dengan *centerline*. Simulasi pada kecepatan 68,333 m/s menunjukkan varian *swept angle* 45° menghasilkan *drag force* 0,9189 N dengan *drag coefficient* 1,5002 atau 1,61% lebih rendah daripada varian 30° (0,9339 N; 1,5247), disertai *wall shear stress* dan *skin friction coefficient* 7,37% lebih rendah serta tekanan maksimum permukaan 1.307,83 Pa berbanding 1.584,31 Pa. Varian 45° karenanya ditetapkan sebagai rancangan akhir yang direkomendasikan. Penelitian lanjutan disarankan mencakup analisis struktural, pengujian karakteristik elektromagnetik, dan validasi terowongan angin.

Kata Kunci: ADS-B, *Housing* Antena, NACA 0018, Simulasi CFD, *Swept Angle*



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Sistem pengawasan lalu lintas udara terus bergerak dari ketergantungan pada radar konvensional menuju sistem yang lebih presisi dan berkesinambungan. Radar sekunder memerlukan siklus interogasi–balasan antara stasiun darat dan transponder pesawat sehingga ketersediaan datanya terikat pada laju putaran antena serta garis pandang (*line of sight*) terhadap objek, dan ketelitian posisinya menurun seiring bertambahnya jarak (Nurhayati & Susanti, 2014). Teknologi *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B) menjawab keterbatasan tersebut dengan memancarkan identitas, posisi, ketinggian, dan kecepatan pesawat secara otomatis dan periodik kepada stasiun darat maupun pesawat lain dalam jangkauan (Dermawan dkk., 2023). Federal Aviation Administration (2025) menempatkan ADS-B sebagai elemen inti modernisasi *surveillance* karena mendukung peningkatan keselamatan, efisiensi ruang udara, dan *shared situational awareness* antara penerbang dan pengendali lalu lintas udara. Kajian ADS-B di Indonesia sejauh ini didominasi pengembangan pada sisi penerima di darat. Fatonah dkk. (2016) merancang antena *monopole* untuk *receiver*

ADS-B sebagai media pembelajaran, Azis dan Setiawan (2019) menyusun rancangan penerima 1090 MHz berbasis RTL820T, Diraputra dan Soim (2021) mengembangkan sistem pemantauan berbasis RTL-SDR dan Raspberry Pi, sedangkan Maharani dkk. (2022) meningkatkan jumlah pesawat terdeteksi melalui penggunaan antena *ground plane*. Keempat penelitian tersebut menempatkan antena pada instalasi darat sehingga tidak berhadapan dengan persoalan integrasi antena pada struktur pesawat, baik dari sisi kelaikan pemasangan maupun konsekuensi aerodinamisnya.

Pada sisi wahana, lokasi pemasangan terbukti memengaruhi kinerja radiasi antena. Labun dkk. (2021) menunjukkan bahwa karakteristik radiasi antena pada pesawat kecil berubah akibat posisi pemasangan dan pengaruh *airframe*, sementara Oz dkk. (2026) membuktikan bahwa optimasi posisi antena dengan mempertimbangkan kendala instalasi nyata mampu menurunkan *mutual coupling* secara signifikan. Pelindung antena juga menjadi objek kajian tersendiri. Aamir dkk. (2023) menegaskan bahwa perancangan *radome* harus mengakomodasi kebutuhan struktural dan elektromagnetik secara simultan; Haider dkk. (2024, 2025) memperlihatkan pengaruh penuaan lingkungan terhadap konstanta dielektrik, *dielectric loss*, dan sifat mekanik komposit *radome*; Ali dan Ahmed (2021) mengarakterisasi kelayakan sifat listrik komposit *glass fiber reinforced polymer* (GFRP); dan Oh dkk. (2026) membuktikan bahwa *radome* GFRP berkonfigurasi *sandwich* mampu menjaga *insertion loss* di bawah 0,4 dB pada aplikasi *airborne*. Dari sisi aerodinamika, karakteristik profil simetris NACA 0018 telah terdokumentasi luas baik secara eksperimental maupun numerik (Hassan dkk., 2014; Rogowski dkk., 2021), dan penggunaan simulasi CFD berbasis model turbulensi SST k- ω untuk komponen pesawat juga telah diterapkan pada konteks nasional (Alfaridzi & Kurniawan, 2022).

Rangkaian penelitian tersebut berdiri secara terpisah. Kajian ADS-B berhenti pada perangkat penerima, kajian penempatan antena berfokus pada pola radiasi tanpa menyentuh rancangan pelindungnya, kajian *radome* menekankan material dan sifat elektromagnetik tanpa mengevaluasi konsekuensi aerodinamis geometri, sedangkan kajian aerodinamika NACA 0018 dilakukan pada konteks sudu turbin angin, bukan komponen eksternal pesawat. Akibatnya belum tersedia penelitian yang mengintegrasikan persyaratan instalasi ADS-B, penetapan lokasi pada *airframe*, dan rancang bangun *housing* berbahan tepat untuk pesawat ringan kategori latih. Kesenjangan kedua bersifat geometris: *housing* tipe *blade* pada praktik penerbangan umumnya diadopsi apa adanya tanpa pengujian pengaruh sudut sapuan (*swept angle*) terhadap performa hambatnya. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemaduan ketiga aspek tersebut dalam satu alur perancangan yang utuh, sekaligus pada evaluasi kuantitatif pengaruh variasi *swept angle* 30° dan 45° pada *housing* berprofil NACA 0018 melalui simulasi CFD terhadap pesawat Piper PA-28-161 Warrior III. Penelitian ini penting karena armada latih PPI Curug saat ini mengandalkan instalasi ADS-B hasil modifikasi non-pabrikan yang kerap mengalami *malfunction*, sehingga dibutuhkan rujukan teknis rancangan yang layak secara instalasi sekaligus efisien secara aerodinamis.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk (1) menentukan lokasi pemasangan *housing* antena ADS-B yang paling sesuai dengan kondisi *airframe* dan pedoman instalasi pada pesawat Piper PA-28-161 Warrior III; (2) merancang geometri *housing* tipe *blade* yang sesuai bagi antena mikrostrip berfrekuensi kerja 1090 MHz; serta (3) menguji kelayakan rancangan tersebut secara operasional melalui validasi ahli dan secara aerodinamis melalui simulasi CFD.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/Tahun	Judul	Tujuan	Metode	Hasil	Kontribusi dan relevansi
1	Labun dkk. (2021)	Airport Spatial Usability in Measuring the Spherical Antenna Properties on Small Aircraft	Mengukur properti radiasi antena bola pada pesawat kecil di lingkungan bandar udara	Pengukuran lapangan properti antena disertai analisis pengaruh struktur pesawat	Karakteristik radiasi antena berubah akibat lokasi pemasangan dan pengaruh airframe	Menjadi dasar bahwa lokasi pemasangan wajib diperlakukan sebagai bagian dari lingkungan elektromagnetik antena
2	Oz dkk. (2026)	Algorithm-Driven Placement Optimization of Aircraft-Mounted VHF Antennas for Mutual Coupling Reduction	Mengoptimalkan posisi antena VHF pada pesawat guna menekan mutual coupling	Optimasi berbasis algoritma dengan kendala instalasi nyata dan simulasi elektromagnetik	Optimasi posisi menurunkan mutual coupling secara signifikan	Menguatkan pentingnya pemetaan koordinat antena dan zona bebas interferensi sebelum pemasangan
3	Oh dkk. (2026)	A Compact Broadband Omnidirectional Top-Loaded UHF Antenna with Integrated Ground Wall and GFRP Radome for Conformal Airborne Applications	Merancang paket antena-radome UHF yang kompak dan tahan lingkungan untuk aplikasi airborne	Perancangan CST, optimasi algoritma genetika, fabrikasi radome GFRP sandwich, pengukuran anechoic chamber	Bandwidth 32,7%, gain puncak $\pm 2,6$ dBi, dan insertion loss radome kurang dari 0,4 dB	Membuktikan GFRP layak sebagai material pelindung antena airborne tanpa degradasi sinyal berarti
4	Aamir dkk. (2023)	Multi-Disciplinary Optimization of Hybrid Composite Radomes for Enhanced Performance	Mengoptimalkan rancangan radome komposit hibrida pada aspek struktur dan elektromagnetik	Optimasi multidisiplin terhadap konfigurasi laminat dan parameter transmisi	Rancangan radome perlu menyeimbangkan kekuatan struktur dan transparansi gelombang secara simultan	Menjadi kerangka penetapan kriteria material dan dinding housing pada penelitian ini
5	Hassan dkk. (2014)	Numerical Investigation of Medium Range Re Number Aerodynamics Characteristics for NACA 0018 Airfoil	Menguji akurasi berbagai model turbulensi pada aerodinamika airfoil NACA 0018	Simulasi CFD dua dimensi dengan beberapa model turbulensi, dibandingkan data eksperimen acuan	Model SST k- ω paling akurat memprediksi koefisien angkat, koefisien hambat, dan sudut stall	Menjadi justifikasi pemilihan profil NACA 0018 dan model turbulensi SST k- ω pada penelitian ini

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model pengembangan ADDIE yang terdiri atas tahap *analysis, design, development, implementation, dan evaluation*. Metode R&D dipilih karena luaran penelitian berupa produk rancangan yang dikembangkan atas kebutuhan praktis di lapangan (Sugiyono, 2013; Rachman dkk., 2024), sedangkan model ADDIE memberi alur perancangan yang terstruktur dari identifikasi kebutuhan hingga penilaian hasil. Pendekatan yang digunakan bersifat gabungan: pendekatan kualitatif diterapkan untuk menetapkan lokasi pemasangan dan menilai kelayakan operasional rancangan, sedangkan pendekatan kuantitatif diterapkan untuk mengukur pengaruh geometri *housing* terhadap gaya hambat aerodinamis.

Penelitian dilaksanakan di Hangar 01 Program Studi Diploma IV Teknik Pesawat Udara dan Hangar AMO 145-910 Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, kawasan Bandar Udara Budiarto, Curug, Kabupaten Tangerang, Banten, pada rentang Maret sampai dengan Agustus 2026. Objek penelitian adalah pesawat latih Piper PA-28-161 Warrior III beserta antenna mikrostrip ADS-B berfrekuensi kerja 1090 MHz yang dikembangkan Program Studi Teknik Navigasi Udara. Data kualitatif dikumpulkan melalui tiga teknik yang ditriangulasikan. Teknik pertama berupa studi dokumen terhadap pedoman instalasi antenna transponder ADS-B/Mode S Avidyne AXP340 Rev. 05 dan Advisory Circular 43.13-2B, yang digunakan untuk mengidentifikasi persyaratan permukaan pemasangan, orientasi antenna, kontinuitas *ground plane*, dan zona bebas interferensi. Teknik kedua berupa observasi fisik langsung terhadap struktur *belly fuselage* pesawat guna memetakan zona bebas dari kompartemen roda pendarat, panel akses, dan tonjolan mekanis. Teknik ketiga berupa wawancara terstruktur dengan tiga ahli avionik di Bengkel Pesawat Udara PPI Curug, yaitu seorang *engineer* pada 18 Juni 2026, seorang *engineer* pada 25 Juni 2026, dan Kepala Unit Laboratorium sekaligus Kepala AMO 145-910 pada 20 Juli 2026. Wawancara mencakup delapan aspek penilaian, yakni fungsi perlindungan, bentuk dan profil aerodinamis, dimensi dan ruang batas pemasangan, metode pemasangan pada *fuselage*, keamanan struktur dan ketahanan getaran, pemilihan material, efisiensi aerodinamika, serta integritas *ground plane* dan mitigasi interferensi. Transkrip wawancara direduksi menjadi pernyataan inti per aspek, lalu disandingkan antarnarasumber dalam matriks triangulasi untuk memperoleh simpulan kelayakan tiap aspek. Peralatan utama yang digunakan pada tahap perancangan dan pengujian adalah perangkat lunak *Computer-Aided Design SolidWorks* untuk pemodelan tiga dimensi dan perangkat lunak ANSYS Fluent 2025 R1 sebagai *solver* CFD berbasis metode volume hingga. Simulasi dijalankan pada mode presisi ganda (*double precision*) dengan komputasi paralel empat inti prosesor. Bentuk dasar *housing* mengadopsi profil airfoil simetris NACA 0018, sedangkan materialnya ditetapkan berupa komposit GFRP tipe *E-glass/epoksi*. Dua varian rancangan dibedakan hanya oleh sudut sapuan tepi depan, yaitu 30° dan 45°, dengan spesifikasi geometris dan kualitas *mesh* sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Geometris dan Kualitas Mesh Kedua Varian Housing

Parameter	Varian 30°	Varian 45°
Sudut sapuan leading edge	30°	45°
Panjang dasar (base length)	180,00 mm	236,00 mm
Lebar dasar (base width)	66,00 mm	66,00 mm
Tinggi total (overall height)	144,00 mm	144,00 mm
Tinggi bodi ke bahu profil	135,00 mm	135,00 mm
Tebal base plate	7,20 mm	7,20 mm
Diameter lubang baut	6,40 mm	6,40 mm
Jarak lubang baut (longitudinal × lateral)	138,00 × 42,00 mm	200,00 × 42,00 mm
Jenis elemen mesh	Polyhedral + lapisan prisma	Polyhedral + lapisan prisma
Ukuran elemen permukaan (min–maks)	1–10 mm	1–10 mm
Panjang sel volume maksimum	20 mm	20 mm
Jumlah elemen (cells)	391.614	444.385
Maximum skewness	0,79 (good)	0,87 (acceptable)

(Sumber: Pengolahan Data)

Sebelum disimulasikan, kedua model disederhanakan dengan menghilangkan baut, *chamfer*, *fillet* kecil, dan lubang pemasangan yang tidak memengaruhi pola aliran eksternal, kemudian dikonversi menjadi kolom fluida (*fluid enclosure*) berdimensi 800 × 1.400 × 500 mm. Rasio blokase yang dihasilkan berada pada kisaran 1,3%, jauh di bawah ambang 3% yang direkomendasikan bagi simulasi aliran eksternal (Tominaga dkk., 2008). Permukaan domain

dikelompokkan melalui *named selection* menjadi lima kelompok, yaitu *inlet*, *outlet*, *wall air*, *wall plane*, dan *wall housing*. Seluruh parameter *solver* dan kondisi batas ditetapkan identik pada kedua varian sebagaimana dirangkum pada Tabel 2, sehingga perbedaan hasil dapat diatribusikan sepenuhnya kepada perbedaan geometri sudut sapuan.

Tabel 2. Parameter Simulasi dan Kondisi Batas ANSYS Fluent

Parameter	Nilai/Pengaturan	Keterangan
Perangkat lunak	ANSYS Fluent, alur kerja Fluid Flow with Fluent Meshing, presisi ganda, paralel 4 inti	Solver CFD metode volume hingga
Jenis analisis	Steady-state, 3D, pressure-based	Kondisi tunak pada kecepatan konstan
Fluida kerja	Udara inkompresibel; $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$	ISA permukaan laut (Anderson, 2017)
Velocity inlet	68,333 m/s (246 km/jam $\approx$ 133 knot)	Kecepatan maksimum Warrior III (Piper Aircraft Corporation, 1994)
Pressure outlet	0 Pa (gauge)	Tekanan operasi 101.325 Pa
Wall housing dan wall plane	Stationary wall, no-slip; kekasaran $1,5 \times 10^{-6} \text{ m}$ dan $2 \times 10^{-5} \text{ m}$	Permukaan housing dan bidang pesawat
Wall air	Specified shear = 0 (dinding slip)	Mendekati aliran bebas pada batas jauh
Model turbulensi	SST k- ω	Menter (1994)
Bilangan Reynolds	$\approx 8,4 \times 10^5$ ($c = 0,18 \text{ m}$)	Turbulen; Re kritis $\approx 5 \times 10^5$ (Anderson, 2017)
Bilangan Mach	$\approx 0,20$	Kurang dari 0,3 sehingga asumsi inkompresibel valid
Report definition	Drag force, drag coefficient, wall shear stress, dan skin friction coefficient (area-weighted average)	Parameter keluaran yang dipantau tiap iterasi
Inisialisasi dan iterasi	Hybrid initialization; 200 iterasi	Dijalankan hingga seluruh parameter stabil
Kriteria konvergensi	Residual $\leq 10^{-3}$ dan kestabilan parameter monitor	ANSYS, Inc. (2013)

(Sumber: Pengolahan Data)

Tolok ukur kinerja rancangan diukur melalui empat parameter keluaran, yaitu *drag force* dalam satuan newton, *drag coefficient* sebagai indeks tak berdimensi, *wall shear stress* rata-rata dalam satuan pascal, dan *skin friction coefficient*. Dua parameter terakhir dihitung dengan metode *area-weighted average* pada permukaan *housing* karena distribusi gaya gesek tidak seragam di sepanjang permukaan. Nilai koefisien dihitung terhadap nilai referensi bawaan *solver* sehingga difungsikan sebagai indeks pembandingan relatif antarvarian, sedangkan perbandingan besaran fisik mengacu pada nilai *drag force*. Perbandingan antarvarian dinyatakan dalam persentase selisih terhadap varian 30° sebagai acuan. Kelayakan solusi numerik diverifikasi lebih dahulu melalui pemeriksaan penurunan residual dan kestabilan parameter monitor sebelum hasil diinterpretasikan. Tahap *evaluation* kemudian merangkum bukti dari validasi ahli dan simulasi CFD untuk menetapkan rancangan akhir.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Politeknik Penerbangan Indonesia Curug. Berdasarkan triangulasi atas kajian manual instalasi, observasi fisik, dan wawancara ahli, lokasi pemasangan *housing* antenna ADS-B ditetapkan pada area *belly fuselage* yang sejajar atau berdekatan dengan *centerline* pesawat, tepatnya pada koordinat *Fuselage Station* 112.50, *Buttock Line* 0.00, dan *Water Line* 12.00. Kajian manual menetapkan tiga syarat, yaitu pemasangan pada permukaan

bawah badan pesawat dengan orientasi vertikal pada kondisi terbang mendarat, posisi sedekat mungkin dengan garis tengah badan pesawat, serta jarak minimal tiga kaki dari antena COMM/ADF dan enam kaki dari antena DME. Observasi fisik menunjukkan area tersebut bebas dari kompartemen roda pendarat, panel akses, dan tonjolan mekanis, serta menyediakan penampang permukaan yang paling datar dan simetris. Ketiga ahli avionik menyatakan penempatan pada *belly fuselage* di bagian dasar *centerline* aman secara struktural dan ideal bagi pesawat bersayap rendah, dengan catatan bahwa pemetaan koordinat longitudinal terhadap antena navigasi lain wajib dilakukan sebelum pelubangan.

Rancangan *housing* yang dihasilkan tersusun atas penutup luar,udukan antena, *base plate*, lubang pengikat, ruang konektor, dan kontur *streamline*. Bentuk dasarnya mengadopsi profil airfoil simetris NACA 0018 dengan material komposit GFRP tipe *E-glass/epoksi*, sedangkan pemasangan pada kulit pesawat didukung *doubler plate* di bagian dalam struktur. Dua varian rancangan yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 1.



(a) Varian swept angle 30° (b) Varian swept angle 45°

Gambar 1. Rancangan Housing Antena ADS-B Kedua Varian

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, SolidWorks)

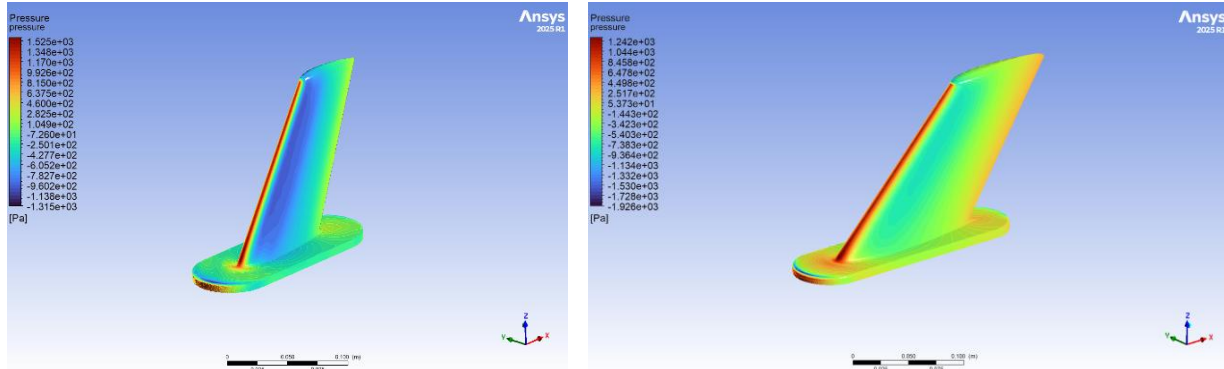
Hasil validasi tiga ahli avionik terhadap delapan aspek penilaian dirangkum pada Tabel 3. Seluruh aspek dinyatakan layak.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Validasi Ahli terhadap Rancangan Housing

No.	Aspek penilaian	Ringkasan tanggapan ahli	Kesimpulan
1	Fungsi perlindungan dan aerodinamika	Desain memenuhi standar perlindungan sirkuit dari air, kelembapan, dan erosi udara; geometri blade lazim digunakan dan optimal secara aerodinamis.	Layak
2	Bentuk, dimensi, dan ruang batas	Dimensi penampang internal menyediakan jarak aman dari kontak fisik akibat getaran dan kelengkungan bagian bawah sesuai kontur <i>belly fuselage</i> .	Layak
3	Metode pemasangan pada fuselage	Penggunaan plate, gasket, dan konektor twist-lock TNC/BNC dinilai aman, tidak memicu konsentrasi tegangan, serta memudahkan bongkar-pasang.	Layak
4	Keamanan struktur dan ketahanan getaran	Ketebalan dinding mampu menahan beban getaran mesin dan beban aerodinamis; risiko fatigue dikendalikan melalui kedudukan pengencang standar penerbangan.	Layak
5	Pemilihan material komponen penerbangan	Komposit GFRP sesuai karena konstanta dielektrik dan loss tangent-nya rendah sehingga optimal pada frekuensi tinggi.	Layak
6	Integritas struktural	Penempatan antena tambahan tepat di <i>centerline fuselage</i> bawah dipastikan tidak melemahkan struktur utama.	Layak
7	Efisiensi aerodinamika	Posisi <i>centerline</i> bawah paling ideal bagi pesawat bersayap rendah karena menjaga keseimbangan gaya yaw dan menekan penambahan gaya hambat.	Layak
8	Integritas ground plane dan mitigasi interferensi	<i>Belly fuselage</i> memiliki luasan ground plane memadai tanpa celah; zona bebas interferensi terpenuhi melalui pemetaan koordinat spasial sebelum pemasangan.	Layak

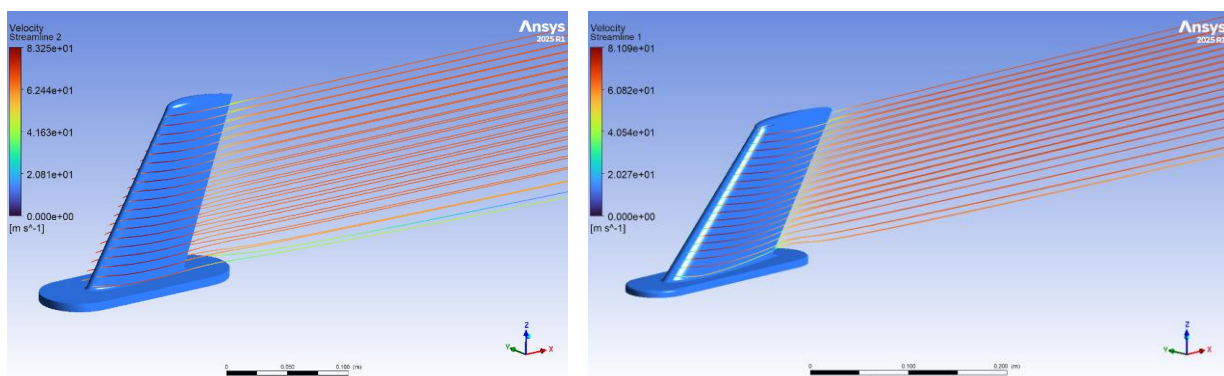
(Sumber: Pengolahan Data)

Simulasi CFD dijalankan hingga 200 iterasi pada kedua varian. Residual komponen kecepatan arah x, y, dan z turun hingga orde 10^{-7} sampai 10^{-8} , residual parameter turbulensi ω berada pada kisaran 10^{-6} , residual energi kinetik turbulen k mencapai kisaran 10^{-5} , sedangkan residual kontinuitas bertahan pada orde 10^{-3} dengan pola stabil. Seluruh parameter keluaran mencapai kondisi konstan sebelum iterasi ke-200. Distribusi tekanan permukaan kedua varian ditunjukkan pada Gambar 2.



(a) Varian swept angle 30° (b) Varian swept angle 45°
Gambar 2. Kontur Tekanan Permukaan Housing Kedua Varian
 (Sumber: Dokumentasi Pribadi, ANSYS)

Pada varian 30°, tekanan maksimum permukaan mencapai 1.584,31 Pa dan tekanan minimum $-1.315,28$ Pa. Pada varian 45°, tekanan maksimum tercatat 1.307,83 Pa dan tekanan minimum $-1.926,45$ Pa. Tekanan maksimum kedua varian berada di daerah depan dekat *leading edge*, sedangkan tekanan minimum berada di bagian belakang. Kecepatan minimum permukaan kedua varian bernilai 0 m/s, dengan kecepatan maksimum 78,7579 m/s pada varian 30° dan 80,0908 m/s pada varian 45°. Pola aliran di sekitar *housing* ditunjukkan pada Gambar 3.



(a) Varian swept angle 30° (b) Varian swept angle 45°
Gambar 3. Streamline Aliran di Sekitar Housing Kedua Varian
 (Sumber: Dokumentasi Pribadi, ANSYS)

Garis aliran pada kedua varian mengikuti kontur *housing* secara halus, tetap menempel di sepanjang permukaan hingga *trailing edge*, kemudian kembali sejajar dengan arah aliran utama. Identifikasi vorteks melalui *isosurface Q-criterion* menghasilkan rentang kecepatan 0 sampai 82,5943 m/s pada varian 30° dan 0 sampai 80,7398 m/s pada varian 45°. Rekapitulasi seluruh parameter keluaran simulasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Simulasi CFD Kedua Varian Housing

Parameter pengujian	Varian 30°	Varian 45°	Selisih	Varian unggul
Tekanan maksimum permukaan (Pa)	1.584,31	1.307,83	21,14%	45°
Tekanan minimum permukaan (Pa)	-1.315,28	-1.926,45	46,46%	30°
Kecepatan maksimum permukaan (m/s)	78,7579	80,0908	1,69%	Setara
Kecepatan maks. isosurface Q-criterion (m/s)	82,5943	80,7398	2,25%	Setara
Drag force (N)	0,9339	0,9189	1,61%	45°
Drag coefficient (indeks relatif)	1,5247	1,5002	1,61%	45°
Wall shear stress rata-rata (Pa)	11,0215	10,2089	7,37%	45°
Skin friction coefficient (indeks relatif)	17,9944	16,6676	7,37%	45°
Hasil validasi ahli	Layak	Layak	–	45°

(Sumber: Pengolahan Data)

Berdasarkan Tabel 4, varian 45° menghasilkan *drag force* 0,9189 N dengan *drag coefficient* 1,5002, sedangkan varian 30° menghasilkan 0,9339 N dengan *drag coefficient* 1,5247. Selisihnya sebesar 0,0150 N atau 1,61%. Nilai *wall shear stress* rata-rata varian 45° tercatat 10,2089 Pa berbanding 11,0215 Pa pada varian 30°, dan *skin friction coefficient*-nya 16,6676 berbanding 17,9944, keduanya lebih rendah 7,37%. Keunggulan tersebut tercapai meskipun panjang dasar varian 45° lebih besar, yaitu 236,00 mm berbanding 180,00 mm, dengan jumlah sel domain 444.385 berbanding 391.614.

Pembahasan

Data yang disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4 merupakan data hasil olahan, bukan data mentah. Tanggapan ahli diperoleh melalui reduksi transkrip wawancara menjadi pernyataan inti per aspek yang kemudian disandingkan antarnarasumber, sedangkan angka pada Tabel 4 merupakan nilai konvergen parameter *report definition* ANSYS Fluent pada akhir iterasi, dengan *wall shear stress* dan *skin friction coefficient* dihitung menggunakan metode *area-weighted average*. Selisih antarvarian dinyatakan dalam persentase terhadap varian 30° sebagai acuan agar perbandingan dapat dibaca secara langsung. Keunggulan varian 45° dapat dijelaskan melalui teori sudut sapuan. Peningkatan sudut sapuan memperkecil komponen kecepatan yang tegak lurus terhadap *leading edge* sehingga perubahan arah aliran berlangsung lebih bertahap. Konsekuensinya, distribusi tekanan di sepanjang permukaan menjadi lebih merata, gradien tekanan yang tajam berkurang, kecenderungan separasi di bagian belakang menurun, dan energi yang hilang untuk membentuk *wake* dapat ditekan. Mekanisme ini konsisten dengan data yang diperoleh: tekanan maksimum permukaan varian 45° lebih rendah 21,14% karena perlambatan aliran pada titik stagnasi berlangsung lebih landai, sementara gaya hambatnya lebih kecil 1,61%. Magnitudo tekanan minimum varian 45° yang justru 46,46% lebih besar tidak menandakan kerugian aerodinamis, melainkan konsekuensi percepatan aliran yang tetap melekat pada permukaan sesuai prinsip Bernoulli (Anderson, 2017); interpretasi ini diperkuat oleh kecepatan maksimum permukaan varian 45° yang sedikit lebih tinggi, yaitu 80,0908 m/s berbanding 78,7579 m/s, serta oleh gaya hambat dan gaya geseknya yang justru lebih kecil.

Penurunan *wall shear stress* dan *skin friction coefficient* sebesar 7,37% melengkapi penjelasan tersebut pada tataran lapisan batas. Tegangan geser permukaan timbul dari gradien kecepatan di dekat dinding sebagai konsekuensi kondisi *no-slip*. Pada varian 30°, tekanan

stagnasi yang lebih tinggi di bagian depan membuat perlambatan dan percepatan ulang aliran berlangsung lebih tajam sehingga gradien kecepatan di dekat permukaan membesar. Pada varian 45° , pembebanan aliran tersebar pada bidang permukaan yang lebih panjang sehingga gradien kecepatan rata-rata justru menurun. Konsistensi arah perubahan kedua parameter gesekan menunjukkan bahwa perubahan geometri memberikan pengaruh yang seragam terhadap perkembangan lapisan batas, bukan efek lokal yang terisolasi. Temuan ini sekaligus menjelaskan mengapa penambahan luas permukaan akibat panjang dasar yang lebih besar pada varian 45° tetap terkompensasi: penurunan intensitas pembebanan aliran per satuan luas lebih dominan daripada pertambahan luas basah itu sendiri.

Hasil penelitian ini sejalan dengan sejumlah temuan peneliti lain. Kesesuaian pertama terlihat pada pemilihan model turbulensi. Hassan dkk. (2014) menyimpulkan bahwa model SST $k-\omega$ paling akurat dalam memprediksi karakteristik aerodinamika NACA 0018 pada rentang bilangan Reynolds menengah, dan Rogowski dkk. (2021) memperoleh kesimpulan serupa pada bilangan Reynolds rendah. Bilangan Reynolds penelitian ini sebesar $\pm 8,4 \times 10^5$ berada pada rentang yang berdekatan, sehingga pemilihan model SST $k-\omega$ memiliki dasar yang kuat. Kesesuaian kedua terlihat pada aspek material: Oh dkk. (2026) membuktikan *radome* GFRP berkonfigurasi *sandwich* mampu menjaga *insertion loss* di bawah 0,4 dB pada aplikasi *airborne*, dan Ali dan Ahmed (2021) mengonfirmasi kelayakan sifat listrik komposit GFRP. Kedua temuan tersebut menguatkan penetapan GFRP *E-glass*/epoksi sebagai material *housing*, yang pada penelitian ini juga dinyatakan layak oleh ketiga ahli avionik. Kesesuaian ketiga terlihat pada aspek penempatan: Labun dkk. (2021) dan Oz dkk. (2026) menegaskan bahwa lokasi pemasangan dan kendala instalasi nyata menentukan kinerja antenna, sejalan dengan penekanan para ahli pada penelitian ini bahwa pemetaan koordinat spasial harus mendahului pelubangan.

Perbedaan penelitian ini terhadap penelitian terdahulu terletak pada objek dan cara pandangnya. Aamir dkk. (2023) melakukan optimasi *radome* pada sumbu struktur dan elektromagnetik tanpa mengevaluasi konsekuensi aerodinamis geometri, sedangkan Hassan dkk. (2014) dan Rogowski dkk. (2021) menguji NACA 0018 sebagai sudu turbin angin dua dimensi pada berbagai sudut serang, bukan sebagai komponen eksternal tiga dimensi yang terpasang pada permukaan pesawat. Penelitian ini menempatkan profil NACA 0018 pada konteks *housing* antenna *airborne* dan memperlakukan sudut sapuan sebagai variabel rancangan yang diuji secara kuantitatif. Perbedaan lain muncul pada besaran efek. Alfaridzi dan Kurniawan (2022) memperoleh perbedaan performa yang mencolok antarvariasi jarak *propeller*, sedangkan penelitian ini memperoleh selisih *drag force* hanya 1,61%. Selisih yang kecil tersebut bukan kelemahan hasil, melainkan konsekuensi bahwa kedua varian telah sama-sama menggunakan profil dasar yang efisien, sehingga variasi sudut sapuan berperan sebagai penyempurnaan (*fine tuning*) performa, bukan sebagai penentu utama karakter aliran.

Temuan penelitian ini menjawab ketiga rumusan masalah yang diajukan pada bagian pendahuluan. Lokasi pemasangan terjawab melalui triangulasi tiga sumber data yang menghasilkan koordinat pemasangan spesifik, rancangan desain terjawab melalui dua varian model tiga dimensi berprofil NACA 0018 berbahan GFRP, dan kelayakan rancangan terjawab melalui validasi ahli serta simulasi CFD. Secara teoretis, penelitian ini menunjukkan bahwa pada *housing* antenna berprofil simetris, penambahan sudut sapuan dapat menurunkan gaya hambat sekaligus gaya gesek permukaan meskipun luas permukaan bertambah, sehingga panjang dasar bukan penentu tunggal performa hambat. Secara praktis, penelitian ini menghasilkan rujukan teknis rancangan *housing* antenna ADS-B yang dapat menjadi dasar pengembangan instalasi avionik pada armada pesawat latih.

KESIMPULAN

Lokasi pemasangan *housing* antenna ADS-B pada pesawat Piper PA-28-161 Warrior III ditetapkan pada area *belly fuselage* yang sejajar atau berdekatan dengan *centerline*, yaitu pada koordinat *Fuselage Station* 112.50, *Buttock Line* 0.00, dan *Water Line* 12.00. Lokasi tersebut memenuhi persyaratan pemasangan antenna transponder berupa permukaan bawah dengan orientasi vertikal, posisi sedekat mungkin dengan garis tengah badan pesawat, serta pemenuhan zona bebas interferensi minimal tiga kaki dari antenna COMM/ADF dan enam kaki dari antenna DME, sekaligus terbebas dari kompartemen roda pendarat dan panel akses. Rancangan *housing* yang dihasilkan berbentuk *blade* berprofil airfoil simetris NACA 0018 dengan material komposit GFRP tipe *E-glass*/epoksi, diwujudkan dalam dua varian yang dibedakan oleh sudut sapuan tepi depan sebesar 30° dan 45°. Kedua varian memiliki lebar dasar 66,00 mm, tinggi total 144,00 mm, dan tebal *base plate* 7,20 mm yang identik, sedangkan panjang dasarnya menyesuaikan sudut menjadi 180,00 mm pada varian 30° dan 236,00 mm pada varian 45°.

Pengujian kelayakan menunjukkan bahwa kedua varian dinyatakan layak oleh tiga ahli avionik pada seluruh delapan aspek penilaian dan menghasilkan karakteristik aliran yang stabil tanpa separasi masif maupun pembentukan vorteks besar. Varian dengan sudut sapuan 45° unggul secara konsisten pada parameter utama, yaitu *drag force* 0,9189 N berbanding 0,9339 N atau lebih rendah 1,61%, *drag coefficient* 1,5002 berbanding 1,5247, *wall shear stress* rata-rata 10,2089 Pa berbanding 11,0215 Pa, dan *skin friction coefficient* 16,6676 berbanding 17,9944 atau keduanya lebih rendah 7,37%, serta tekanan maksimum permukaan 1.307,83 Pa berbanding 1.584,31 Pa. Temuan barunya adalah bahwa penambahan sudut sapuan pada *housing* antenna berprofil simetris menurunkan gaya hambat sekaligus gaya gesek permukaan meskipun panjang dasar dan luas permukaannya bertambah, sehingga varian 45° ditetapkan sebagai rancangan akhir yang direkomendasikan.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan. Analisis dibatasi pada aspek aerodinamika sehingga tidak mencakup analisis struktural berupa tegangan, deformasi, dan umur lelah material, maupun pengujian karakteristik elektromagnetik *housing* terhadap kinerja antenna. Simulasi juga dijalankan pada satu konfigurasi *mesh* dengan strategi identik pada kedua varian tanpa pengujian independensi *mesh*, dan rancangan belum diuji secara fisik melalui terowongan angin maupun uji terbang. Perbandingan antarvarian turut mengandung pengaruh perbedaan panjang dasar yang menyertai perubahan sudut. Penelitian selanjutnya disarankan melengkapi bukti kelayakan melalui analisis struktural, pengujian parameter elektromagnetik seperti VSWR, *gain*, dan pola radiasi, pengujian fisik di terowongan angin, serta kajian sudut sapuan lebih dari 45° dengan panjang dasar dan luas permukaan yang dikendalikan agar pengaruh sudut dapat diisolasi. Setiap implementasi modifikasi pada pesawat udara wajib mengikuti regulasi kelaikan udara yang berlaku dan memperoleh persetujuan otoritas yang berwenang.

Uapan terima kasih disampaikan kepada Direktur Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Ketua Program Studi Teknik Pesawat Udara, kedua dosen pembimbing, para *engineer* Bengkel Pesawat Udara dan AMO 145-910 PPI Curug yang bersedia menjadi narasumber validasi ahli, serta Program Studi Teknik Navigasi Udara atas kerja sama penyediaan rancangan antenna mikrostrip yang menjadi objek perlindungan pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Aamir, M. T., Nasir, M. A., Iqbal, Z., Khan, H. A., & Muneer, Z. (2023). Multi-disciplinary optimization of hybrid composite radomes for enhanced performance. *Results in Engineering*, 20, 101547. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101547>



- Abbott, I. H., & Von Doenhoff, A. E. (1959). *Theory of wing sections: Including a summary of airfoil data*. Dover Publications.
- Alfaridzi, A. Y., & Kurniawan, A. (2022). Analisis computational fluid dynamic pengaruh jarak propeller pada contra rotating propeller terhadap gaya dorong pesawat tanpa awak. *Jurnal Teknik Mesin ITI*, 6(2), 87–97.
- Ali, A. K. M. S., & Ahmed, I. (2021). Electrical characterization of glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites for future metasurface antenna applications. *Materials Research Express*, 8(6). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac02fe>
- Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of aerodynamics* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- ANSYS, Inc. (2013). *ANSYS Fluent theory guide*. ANSYS, Inc.
- Avidyne Corporation. (2013). *AXP340 transponder installation manual* (Rev. 05). Avidyne Corporation.
- Azis, A., & Setiawan, R. (2019). Rancangan antenna penerima automatic dependent surveillance broadcast dengan frekuensi 1090 MHz menggunakan RTL820T. *Airman: Jurnal Teknik dan Keselamatan Transportasi*, 2(1), 8–11.
- Dermawan, D., Setiawan, P., Suwarti, D. W., & Wahyudin. (2023). Rancang bangun receiver automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) menggunakan RTL-SDR R820T2 flight aware. *Jurnal Teknologi Elektro*, 14(3), 156–165. <https://doi.org/10.22441/jte.2023.v14i3.006>
- Diraputra, M. Y. A., & Soim, S. (2021). Rancang bangun monitoring lokasi pesawat menggunakan ADS-B dengan RTL-SDR dan Raspberry Pi. *PROtek: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 8(2), 8995
- Fatonah, F., Hardjono, D. S., & Pranata, I. G. M. W. (2016). Rancangan antenna monopole peralatan receiver automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) sebagai alat bantu pembelajaran. *Jurnal Ilmiah Aviasi Langit Biru*, (3), 43–58.
- Federal Aviation Administration. (2008). *Acceptable methods, techniques, and practices—Aircraft alterations* (Advisory Circular No. 43.13-2B). U.S. Department of Transportation.
- Federal Aviation Administration. (2025). *Automatic dependent surveillance–broadcast operations* (Advisory Circular No. 90-114C). U.S. Department of Transportation.
- Haider, I., Gul, I. H., Aziz, S., Faraz, M. I., Khan, M. A., Jaffery, S. H. I., & Jung, D. W. (2024). Environmental aging of reinforced polymer composite radome: Reliability and performance investigation. *Frontiers in Materials*, 11, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1427541>
- Haider, I., Khan, M. A., Aziz, S., Jaffery, S. H. I., Faraz, M. I., Gul, I. H., Jung, D. W., Saidani, T., & Shewakh, W. M. (2025). Exploring the weathering and accelerated environmental aging of wave-transparent reinforced composites. *Polymers*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/polym17030357>
- Hassan, G. E., Hassan, A., & Youssef, M. E. (2014). Numerical investigation of medium range Re number aerodynamics characteristics for NACA 0018 airfoil. *CFD Letters*, 6(4).
- Hoerner, S. F. (1965). *Fluid-dynamic drag: Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance*. Published by the author.
- Kozakoff, D. J. (2010). *Analysis of radome-enclosed antennas* (2nd ed.). Artech House.
- Labun, J., Kurdel, P., Češkovič, M., Nekrasov, A., Gamcová, M., & Gecejová, N. (2021). Airport spatial usability in measuring the spherical antenna properties on small aircraft. *Sensors*, 21(23), 7920. <https://doi.org/10.3390/s21237920>
- Maharani, F. A. P., Soim, S., & Fadhli, M. (2022). Rancang bangun sistem pemantau penerima sinyal automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) berbasis Raspberry Pi dan antenna ground plane sebagai antenna penerima. *PROtek: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 9(2), 111–118. <https://doi.org/10.33387/protk.v9i2.4690>



- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Nurhayati, Y., & Susanti. (2014). Implementasi automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) di Indonesia. *Warta Ardhia: Jurnal Perhubungan Udara*, 40(3), 147–162.
- Oh, J., Kang, M., Jo, J., Bang, S., Choe, H. S., Ha, S. H., Park, S., Kim, J., Kim, S., Oh, J., & Jang, H. K. (2026). A compact broadband omnidirectional top-loaded UHF antenna with integrated ground wall and GFRP radome for conformal airborne applications. *Aerospace*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/aerospace13030227>
- Oz, E., Hakanoglu, B. G., Dalveren, Y., Kara, A., & Derawi, M. (2026). Algorithm-driven placement optimization of aircraft-mounted VHF antennas for mutual coupling reduction. *Applied Sciences*, 16(6), 1–29. <https://doi.org/10.3390/app16062718>
- Piper Aircraft Corporation. (1994). *Warrior III PA-28-161 pilot's operating handbook*. Piper Aircraft Corporation.
- Rachman, A., Yochanan, C. E., Samanlangi, A. I., & Purnomo, H. (2024). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. CV Saba Jaya Publisher.
- Raymer, D. P. (2018). *Aircraft design: A conceptual approach* (6th ed.). American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/4.104909>
- Rogowski, K., Królak, G., & Bangga, G. (2021). Numerical study on the aerodynamic characteristics of the NACA 0018 airfoil at low Reynolds number for Darrieus wind turbines using the transition SST model. *Processes*, 9(3), 477. <https://doi.org/10.3390/pr9030477>
- Sugiyono. (2013). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10–11), 1749–1761. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed.). Pearson Education.