

STUDI PEMANFAATAN SISTEM FPGA PADA BIDANG AVIONIK DI UNSURYA

Nurwijayanti KN¹, Effendi Dodi Arisandi^{2,6*}, Rachmat Ramdani^{3,6*}, Tateng Sukendar⁴, Agus Sugiharto⁵

^{1,2,3,4,5} Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma, Jl. Protokol Halim Perdana Kusuma, Komplek Bandar Udara Halim Perdanakusuma, DKI Jakarta, Indonesia

^{6*} Pusat Riset Teknologi Roket, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Bogor, Indonesia

Email korespondensi: nurwijayanti@unsurya.ac.id, effe002@brin.go.id, rach008@brin.go.id, tsuke10@unsurya.ac.id, suga_070807@yahoo.co.id

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 07 Agustus 2026

Direvisi: 07 Agustus 2026

Diterima: 07 Agustus 2026

Kata kunci:

FPGA, Avionik, sistem otonom, navigasi otonom, inovasi industri

ABSTRAK

Industri penerbangan semakin mengadopsi sistem otonom untuk meningkatkan efisiensi operasional, keselamatan, dan keandalan. Namun, sistem tersebut memerlukan kemampuan pemrosesan waktu nyata (*real-time*), daya komputasi yang tinggi, serta efisiensi konsumsi daya yang optimal. Penelitian ini mengkaji pemanfaatan **Field-Programmable Gate Array (FPGA)** pada sistem otonom di bidang avionik dengan berfokus pada penyusunan kerangka implementasi yang sesuai untuk Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma (UNSURYA). FPGA memiliki berbagai keunggulan, seperti kemampuan pemrosesan paralel, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi avionik, antara lain navigasi otonom dan pemrosesan data sensor secara waktu nyata. Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif yang menggabungkan studi literatur dan analisis berbasis simulasi, dengan fokus pada pemanfaatan FPGA Xilinx. Perangkat lunak Xilinx Vivado dan MATLAB/Simulink digunakan untuk memodelkan serta mensimulasikan sistem berbasis FPGA. Hasil penelitian ini berupa rancangan konseptual sistem otonom berbasis FPGA yang disesuaikan dengan kebutuhan akademik dan penelitian di UNSURYA. Temuan penelitian menunjukkan bahwa FPGA memiliki potensi besar dalam mendukung pengembangan teknologi avionik di Indonesia serta memberikan langkah-langkah praktis untuk mengintegrasikan proyek berbasis FPGA ke dalam kurikulum dan pengembangan laboratorium di UNSURYA. Penelitian ini diharapkan menjadi langkah awal dalam pengembangan solusi avionik yang relevan dengan kebutuhan nasional serta mendorong inovasi di industri penerbangan Indonesia

Keywords:

FPGA, Avionic, Autonomous system, Autonomous navigation, industry inovation

Penulis Korespondensi:

Penulis Nurwijayanti K.N

Email:

nurwijayanti@unsurya.ac.id

The aviation industry is increasingly adopting autonomous systems to enhance operational efficiency, safety, and reliability. However, these systems require real-time processing capabilities, high computational power, and strict power efficiency. This research explores the utilization of Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) in autonomous systems within the aviation sector, focusing on a suitable implementation framework for the Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma (UNSURYA). FPGAs offer significant advantages, including parallel processing, making them ideal for aviation applications such as autonomous navigation and real-time sensor data processing. Using a qualitative approach that combines literature studies and simulation-based analysis, this research focuses on the use of Xilinx FPGAs. Tools such as Xilinx Vivado and MATLAB/Simulink are used to model and simulate FPGA-based systems. This study proposes a conceptual design for an FPGA-based autonomous system tailored to UNSURYA's academic and research objectives. The findings highlight the potential of FPGAs to advance avionics technology in Indonesia and suggest practical steps for integrating FPGA-based projects into UNSURYA's curriculum and laboratory initiatives. This research serves as a foundational step to develop locally relevant avionic solutions and foster innovation in the national aviation industry.

1. PENDAHULUAN

Revolusi Industri 4.0 dan 5.0 telah membawa transformasi yang signifikan pada sektor penerbangan, yang ditandai dengan integrasi teknologi digital dan sistem otonom yang semakin canggih [1]. Dalam industri penerbangan modern, sistem avionik telah menjadi komponen utama yang menentukan tingkat keselamatan, efisiensi, dan kinerja pesawat udara. Sistem avionik mencakup sistem navigasi, komunikasi, kendali penerbangan, serta instrumentasi yang bekerja secara terintegrasi. Kompleksitas sistem tersebut menuntut perangkat keras yang memiliki kemampuan pemrosesan data berkecepatan tinggi, andal, serta mampu beroperasi secara waktu nyata (*real-time*). Sistem otonom dalam dunia penerbangan tidak hanya diterapkan pada **Unmanned Aerial Vehicles (UAV)** atau pesawat tanpa awak, tetapi juga mencakup sistem bantuan pilot otomatis, navigasi otonom, dan sistem manajemen lalu lintas udara yang terintegrasi.

Field-Programmable Gate Array (FPGA) muncul sebagai salah satu solusi teknologi yang menjanjikan untuk menjawab tantangan tersebut. FPGA menawarkan berbagai keunggulan, antara lain arsitektur pemrosesan paralel yang memungkinkan pemrosesan data secara bersamaan, kemampuan konfigurasi ulang (*reconfigurability*) yang fleksibel sehingga dapat disesuaikan dengan berbagai algoritma, serta determinisme waktu (*temporal determinism*) yang menjamin kinerja sistem tetap konsisten. Karakteristik tersebut menjadikan FPGA sebagai platform komputasi yang sangat sesuai untuk aplikasi-aplikasi kritis di bidang avionik.

Permasalahan utama yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimana mengoptimalkan pemanfaatan FPGA untuk mendukung implementasi sistem otonom pada sektor penerbangan,

khususnya dalam menangani beban komputasi yang tinggi dengan tetap mempertahankan keandalan dan keselamatan operasional.

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis arsitektur dan kemampuan FPGA yang relevan dalam pengembangan sistem otonom pada bidang avionik.
2. Merancang model implementasi FPGA yang dapat diadopsi oleh Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma (UNSURYA) sebagai dasar pengembangan penelitian dan teknologi avionik.

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat, baik secara akademis maupun praktis. Dari sisi akademis, penelitian ini dapat mendukung pengembangan kurikulum serta fasilitas laboratorium di UNSURYA, khususnya pada bidang sistem tertanam (*embedded systems*) dan avionik modern. Dari sisi praktis, penelitian ini diharapkan berkontribusi dalam memperkuat pengembangan teknologi avionik nasional melalui penelitian yang selaras dengan kebutuhan industri penerbangan Indonesia, sekaligus mendorong inovasi dan kemandirian teknologi di bidang kedirgantaraan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Otonom Dalam Bidang Avionik

Perkembangan sistem otonom di dunia penerbangan merupakan sebuah perubahan paradigma menuju era Penerbangan 4.0 (*Aviation 4.0*), yang ditandai dengan integrasi teknologi digital dan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) [2]. Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai pendukung kemampuan pilot, tetapi pada kondisi tertentu mampu mengambil alih kendali penerbangan secara penuh dengan tingkat akurasi dan keandalan yang dapat melampaui kemampuan manusia [3]. Implementasi sistem otonom mencakup tiga domain utama yang telah memperoleh sertifikasi dari berbagai otoritas penerbangan internasional.

Salah satu penerapan utama adalah *Autonomous Takeoff and Landing (ATOL)*, yang telah berkembang dari sekadar konsep menjadi teknologi operasional yang diterapkan pada berbagai platform, mulai dari pesawat komersial hingga *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)* atau pesawat tanpa awak [4]. Sistem ini mengintegrasikan teknik *multi-sensor fusion*, yaitu penggabungan data dari GPS, *Inertial Measurement Unit (IMU)*, *Light Detection and Ranging (LiDAR)*, serta sistem visi komputer (*computer vision*) dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi [5]. Tantangan utama dalam implementasi ATOL adalah kemampuannya beradaptasi terhadap kondisi lingkungan yang dinamis, seperti angin silang (*crosswind*), keterbatasan jarak pandang, dan kondisi landasan pacu yang basah. Teknologi pembelajaran mesin (*machine learning*) yang diterapkan pada sistem ini memungkinkan proses pembelajaran adaptif terhadap berbagai skenario penerbangan, termasuk kondisi iklim tropis Indonesia yang memiliki karakteristik tersendiri [6].

2.2 Arsitektur dan Karakteristik FPGA

Field-Programmable Gate Array (FPGA) merupakan platform komputasi yang memiliki posisi unik di antara prosesor serbaguna (*General Purpose Processor/GPP*) dan **Application-Specific Integrated Circuit (ASIC)**. FPGA menawarkan berbagai keunggulan yang menjadikannya sangat sesuai untuk aplikasi-aplikasi kritis, khususnya pada bidang avionik [7]. Berdasarkan berbagai penelitian terkini, keunggulan arsitektur FPGA dalam mendukung sistem otonom pada bidang avionik dapat dijelaskan sebagai berikut.

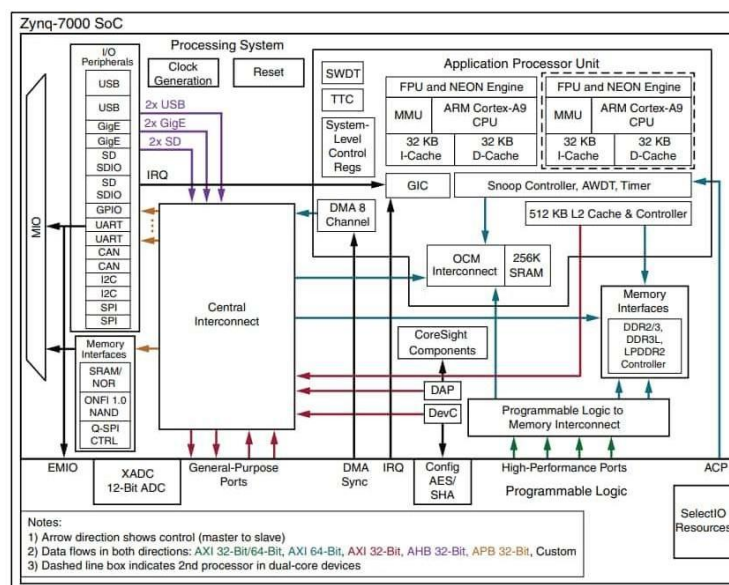
Pemrosesan Paralel Berskala Besar (*Massive Parallel Processing*) memungkinkan FPGA mengeksekusi ratusan hingga ribuan operasi secara bersamaan, sehingga mampu mengatasi

keterbatasan arsitektur *von Neumann* yang digunakan pada prosesor konvensional [8]. Dalam aplikasi avionik, kemampuan ini sangat penting untuk proses *sensor fusion*, yaitu pengolahan data secara

simultan dari radar, LiDAR, dan kamera inframerah secara waktu nyata (*real-time*) dengan tingkat *throughput* yang dapat mencapai 25 Gbps [9]. Arsitektur paralel FPGA juga mampu mengurangi hambatan (*bottleneck*) yang umum terjadi pada prosesor konvensional, terutama dalam menjalankan algoritma navigasi berbasis visi (*vision-based navigation*) yang kompleks. Gambar 1 memperlihatkan arsitektur **Zynq-7000 System-on-Chip (SoC)** yang mengintegrasikan dua prosesor Arm Cortex-A9 dengan FPGA beserta berbagai periferal yang tersedia [10].

Efisiensi Daya (Power Efficiency) merupakan salah satu aspek yang sangat penting dalam sistem penerbangan, terutama pada platform UAV yang memiliki keterbatasan kapasitas sumber daya listrik [11]. FPGA modern menawarkan rasio kinerja terhadap konsumsi daya (*performance per watt*) yang lebih baik, dengan konsumsi daya 30–50% lebih rendah dibandingkan solusi berbasis **Graphics Processing Unit (GPU)** untuk beban kerja yang setara [9].

Selain itu, **Kemampuan Konfigurasi Ulang (Hardware Reconfigurability)** memberikan fleksibilitas yang tidak dimiliki oleh ASIC, sehingga sistem dapat diperbarui tanpa harus mengganti perangkat keras secara fisik [12]. Dalam industri penerbangan yang memiliki siklus sertifikasi cukup panjang, kemampuan melakukan pembaruan sistem (*field upgrade*) dengan tetap memenuhi standar keselamatan penerbangan merupakan nilai tambah yang sangat penting [4].



Gambar 1. Architecture of Zynq-7000 SoC [10]

2.3 Penelitian Terkait

Penelitian mengenai pemanfaatan **Field-Programmable Gate Array (FPGA)** pada bidang avionik mengalami perkembangan yang sangat pesat dalam satu dekade terakhir, dengan berbagai implementasi pada skala industri sebagaimana dilaporkan dalam berbagai publikasi teknis terbaru.

Xilinx, melalui proyek **Unmanned Aerial Vehicle (UAV)** berskala menengah, berhasil menunjukkan kemampuan FPGA dalam mengelola data dari 12 sensor yang berbeda secara bersamaan [9]. Implementasi yang menggunakan **Xilinx Zynq UltraScale+ MPSoC** tersebut mampu mencapai *throughput* sebesar 25 Gbps dengan latensi kurang dari 5 mikrodetik pada sistem navigasi berbasis visi (*vision-based navigation*). Sistem ini mampu melakukan pemetaan medan (*terrain mapping*) dan

penghindaran rintangan (*obstacle avoidance*) secara waktu nyata (*real-time*), termasuk pada kondisi lingkungan tropis dengan intensitas curah hujan yang tinggi.

Pada proyek **DragonFly**, Airbus mengintegrasikan FPGA ke dalam sistem peningkatan penglihatan (*Enhanced Vision System*) pada pesawat A350 [13]. Sistem tersebut mengombinasikan kamera inframerah, radar, dan basis data medan (*terrain database*) untuk menghasilkan tampilan sintetis (*synthetic vision*) ketika kondisi jarak pandang rendah. FPGA digunakan untuk melakukan peningkatan kualitas citra (*image enhancement*) dan *sensor fusion* secara waktu nyata sehingga mampu meningkatkan *situational awareness* pilot secara signifikan. Implementasi ini telah memenuhi standar sertifikasi keselamatan yang ketat dari **European Union Aviation Safety Agency (EASA)** untuk sistem-sistem kritis penerbangan.

Demikian pula, dalam pengembangan **Boeing Autonomous System**, Boeing memanfaatkan FPGA pada sistem kendali penerbangan dengan arsitektur *triple-redundant* yang dilengkapi mekanisme *hardware-level voting* untuk meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem [14].

2.4 Kesenjangan Penelitian (*Research Gap*)

Berdasarkan analisis komprehensif terhadap perkembangan teknologi FPGA pada bidang avionik, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang signifikan dalam konteks Indonesia.

Kesenjangan Implementasi pada Skala Komersial. Sebagian besar penelitian di Indonesia masih berada pada tahap *proof-of-concept* atau prototipe laboratorium [15]. Hingga saat ini belum terdapat bukti terdokumentasi mengenai implementasi FPGA yang terintegrasi secara penuh pada sistem penerbangan komersial. Kesenjangan ini mencakup aspek sertifikasi, pengujian keandalan, serta validasi operasional yang sesuai dengan standar **Direktorat Jenderal Perhubungan Udara (DGCA Indonesia)** [16].

Belum Tersedianya Kerangka Standardisasi Nasional. Indonesia masih belum memiliki standar maupun regulasi yang secara khusus mengatur implementasi FPGA pada sistem avionik. Kondisi ini menjadi salah satu hambatan utama dalam adopsi teknologi FPGA secara luas, mengingat industri penerbangan merupakan sektor yang memiliki regulasi keselamatan yang sangat ketat.

Keterbatasan Ekosistem Pengembangan. Ketersediaan sumber daya manusia yang memiliki kompetensi pada bidang *hardware-software co-design* untuk aplikasi avionik masih sangat terbatas. Selain itu, akses terhadap platform FPGA berkeandalan tinggi beserta perangkat pengembangannya juga masih relatif terbatas, sehingga menjadi kendala dalam pelaksanaan penelitian dan pengembangan di Indonesia.

Minimnya Kajian Keandalan Jangka Panjang. Penelitian mengenai kinerja dan keandalan FPGA pada kondisi operasional khas Indonesia masih sangat terbatas. Hingga saat ini belum tersedia data yang memadai mengenai performa FPGA pada lingkungan beriklim tropis dengan tingkat kelembapan tinggi maupun paparan gangguan elektromagnetik yang spesifik. Sebagian besar penelitian yang ada masih dilakukan pada kondisi laboratorium yang terkontrol.

Belum Optimalnya Integrasi dengan Infrastruktur yang Ada. Penelitian mengenai integrasi sistem berbasis FPGA dengan infrastruktur manajemen lalu lintas udara di Indonesia masih sangat terbatas. Hal ini mencakup aspek kompatibilitas dengan sistem komunikasi dan navigasi yang telah digunakan, serta kesesuaian terhadap regulasi nasional yang berlaku.

3. METODOLOGI PENELITIAN

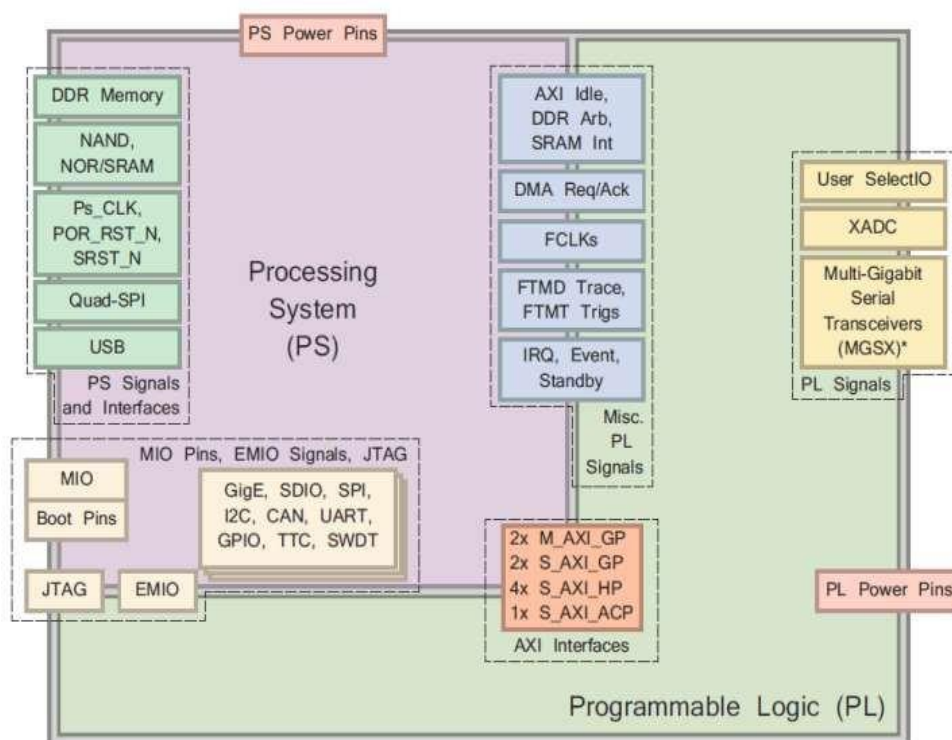
Penelitian ini menggunakan metodologi bertahap yang terdiri atas empat tahapan utama, yaitu studi literatur, perancangan sistem, implementasi, dan evaluasi. Pendekatan sistematis ini dirancang untuk memastikan kelayakan serta akurasi sistem yang dikembangkan. Melalui tahapan tersebut, penelitian membangun landasan teoritis yang kuat sebelum dilakukan implementasi teknis, sehingga dapat

meminimalkan kesalahan dan menghasilkan sistem yang andal. Setiap tahapan saling berkaitan dan menjadi dasar bagi tahapan berikutnya, sehingga membentuk alur penelitian yang terstruktur dan komprehensif.

3.1 Studi Literatur

Tahap pertama yang menjadi dasar penelitian ini adalah studi literatur secara komprehensif. Kegiatan ini difokuskan pada kajian mendalam terhadap jurnal internasional bereputasi, buku teks, prosiding konferensi ilmiah, serta dokumentasi teknis dari berbagai pengembang teknologi FPGA. Kajian literatur difokuskan pada tiga aspek utama.

Aspek pertama adalah analisis terhadap arsitektur FPGA modern, khususnya **System-on-Chip (SoC)** yang mengintegrasikan prosesor ARM dengan logika terprogram (*programmable logic*), serta metodologi pemrograman **High-Level Synthesis (HLS)** yang mampu mempercepat proses perancangan perangkat keras. Gambar 2 menunjukkan diagram blok arsitektur SoC yang terdiri atas **Processing System (PS)** dan **Programmable Logic (PL)** [17].

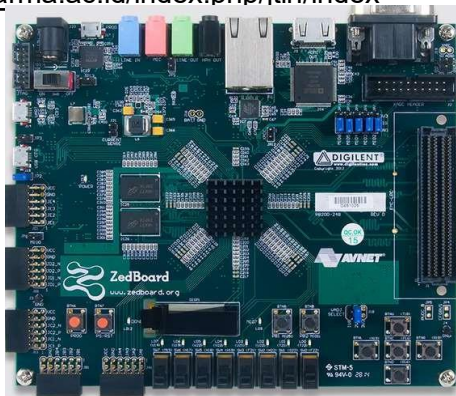


Gambar 2. Block Diagram PS and PL on zynq-7000 [17]

3.2 Perancangan Sistem

Berdasarkan landasan teori yang telah diperoleh, tahap perancangan sistem dilakukan dengan memanfaatkan **ZedBoard Development Board**. Pemilihan papan pengembangan ini didasarkan pada kemampuannya dalam mengintegrasikan prosesor **ARM Cortex-A9 dual-core** sebagai **Hard Processor System (HPS)** dengan **programmable logic** pada FPGA seri **Xilinx Zynq-7000** dalam arsitektur **System-on-Chip (SoC)**. Integrasi tersebut memungkinkan pembagian tugas komputasi secara efisien antara prosesor dan logika terprogram, sehingga mampu meningkatkan kinerja sistem untuk aplikasi yang memerlukan pemrosesan secara waktu nyata (*real-time*).

Gambar 3 menunjukkan **ZedBoard Development Kit** yang digunakan sebagai platform pengembangan dan implementasi sistem FPGA untuk aplikasi di bidang avionik [18].



Gambar 3. Zed board Development Kit [18]

3.3 Implementasi Sistem

Implementasi sistem dilakukan melalui serangkaian tahapan yang sistematis. Tahap pertama adalah pemodelan dan simulasi algoritma kendali **PID (Proportional–Integral–Derivative)** menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink untuk memvalidasi kinerja sistem serta melakukan penyetelan (*tuning*) parameter pengendali. Selanjutnya, model algoritma yang telah diverifikasi dikonversi secara otomatis menjadi kode **VHDL (VHSIC Hardware Description Language)** menggunakan perangkat **HDL Coder**, sehingga konsistensi fungsional antara model simulasi dan implementasi perangkat keras dapat dipertahankan.

Kode VHDL yang dihasilkan kemudian diintegrasikan ke dalam proyek **Quartus Prime** untuk menjalankan proses sintesis (*synthesis*), penempatan dan perutean (*place-and-route*), serta pembangkitan berkas konfigurasi FPGA (*FPGA configuration file*). Tahap akhir implementasi dilakukan melalui pengujian respons sistem terhadap perubahan posisi referensi guna memverifikasi kinerja sistem pada kondisi operasi yang dinamis.

3.4 Evaluasi Kinerja

Tahap evaluasi dilakukan untuk mengukur kinerja sistem secara kuantitatif berdasarkan beberapa parameter utama. Parameter yang dievaluasi meliputi kecepatan respons sistem, yang diukur berdasarkan waktu yang diperlukan untuk mencapai nilai acuan (*set point*), tingkat akurasi sudut servo dibandingkan dengan posisi referensi yang diinginkan, serta besarnya kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) yang dihasilkan.

Selain mengevaluasi performa sistem kendali, penelitian ini juga menganalisis tingkat pemanfaatan sumber daya logika FPGA yang meliputi penggunaan **Logic Elements (LEs)**, **Memory Blocks**, dan **Digital Signal Processors (DSPs)**. Analisis tersebut bertujuan untuk menilai efisiensi implementasi rancangan pada perangkat FPGA. Hasil evaluasi ini menjadi dasar dalam menentukan tingkat kelayakan dan keandalan sistem yang dikembangkan.

4. IMPLEMENTASI DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Sistem

Sistem yang diusulkan dirancang menggunakan arsitektur modular yang terintegrasi dengan alur kerja **Sensor Input → FPGA Processing → Actuator Output**. Pada sisi masukan, sistem mengintegrasikan beberapa sensor, yaitu kamera CMOS beresolusi 12 MP untuk aplikasi *computer vision*, **Inertial Measurement Unit (IMU)** 9 sumbu yang terdiri atas giroskop, akselerometer, dan magnetometer, modul **Global Positioning System (GPS)** berpresisi sentimeter, serta sensor **Light Detection and Ranging (LiDAR)** untuk deteksi objek.

Data yang diperoleh dari berbagai sensor tersebut dipadukan melalui proses *sensor fusion* yang dijalankan pada FPGA sebagai pusat pemrosesan utama. **Xilinx Zynq-7000** dipilih sebagai unit pemrosesan utama karena memiliki kemampuan pemrosesan **hard real-time**, sehingga mampu memenuhi kebutuhan aplikasi avionik yang menuntut kecepatan, keandalan, dan determinisme waktu yang tinggi.



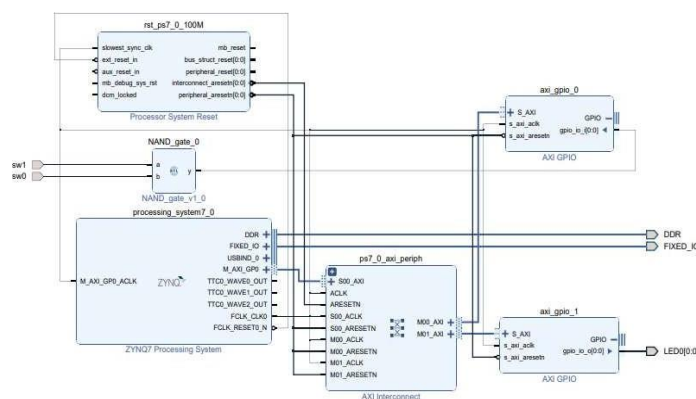
Gambar 4. Design of Avionic System

Gambar 4 menunjukkan diagram blok sistem FPGA yang dapat dikembangkan oleh Fakultas Teknologi Kedirgantaraan dan Industri (FTKI) UNSURYA untuk aplikasi pada bidang avionik. Sistem ini terdiri atas berbagai sensor penerbangan sebagai masukan, **Xilinx Zynq-7000** sebagai unit pemrosesan utama yang mencakup **Processing System (PS)** dan **Programmable Logic (PL)**, serta perangkat tampilan sebagai keluaran. Data yang diperoleh dari sensor penerbangan diproses oleh sistem **System-on-Chip (SoC)**, kemudian hasil pemrosesan ditampilkan pada monitor untuk keperluan pemantauan dan analisis.

4.2 Pemrograman SoC Xilinx Zynq-7000

Proses implementasi sistem pada **FPGA SoC Xilinx Zynq-7000** mengikuti alur perancangan yang terstruktur dengan menggunakan **Xilinx Vivado Design Suite 2018** versi gratis (*WebPACK Edition*). Tahap awal diawali dengan pembuatan **Block Design** yang mengintegrasikan **Zynq-7000 Processing System** dengan **Intellectual Property (IP) Core** yang dikembangkan pada bagian **Programmable Logic (PL)**, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.

Konfigurasi **Processing System (PS)** disesuaikan dengan kebutuhan sistem, meliputi pengaturan *clock*, memori, serta berbagai periferal masukan dan keluaran (*Input/Output* atau I/O) yang diperlukan. Pada bagian **Programmable Logic (PL)**, modul-modul khusus yang dikembangkan menggunakan bahasa deskripsi perangkat keras **VHDL** atau **Verilog** diintegrasikan sebagai **IP Core** melalui mekanisme *IP packaging*. Pendekatan ini memungkinkan integrasi yang efisien antara perangkat lunak yang dijalankan pada prosesor ARM Cortex-A9 dengan logika perangkat keras yang diimplementasikan pada FPGA, sehingga mampu menghasilkan sistem yang memiliki kinerja tinggi dan memenuhi kebutuhan pemrosesan waktu nyata (*real-time*) untuk aplikasi avionik.



Gambar 5. Application Design On Block Diagram

Setelah proses integrasi sistem selesai, tahap berikutnya adalah sintesis (*synthesis*) dan implementasi rancangan (*design implementation*), yang meliputi optimasi logika, penempatan dan perutean (*placement and routing*), serta analisis *timing* untuk memastikan seluruh batasan (*design constraints*) terpenuhi. Hasil dari tahapan ini berupa **bitstream file** yang digunakan untuk mengonfigurasi bagian **Programmable Logic (PL)** pada FPGA.

Selanjutnya, menggunakan **Xilinx Software Development Kit (SDK)**, dilakukan pemrograman pada tingkat tinggi (*high-level programming*). Aplikasi *user-space* dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman C/C++ dan diimplementasikan pada papan target melalui mekanisme **Network File System (NFS)** atau dengan menuliskannya langsung ke memori non-volatil (*non-volatile memory*). Verifikasi sistem dilakukan secara bertahap, dimulai dari simulasi, validasi perangkat keras menggunakan **Integrated Logic Analyzer (ILA) Core**, hingga pengujian fungsional secara menyeluruh dengan berbagai periferal yang terhubung.

4.3 Pembahasan

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, sistem berbasis **FPGA SoC Xilinx Zynq-7000** berhasil menunjukkan kemampuannya dalam menangani komputasi waktu nyata (*real-time*). Arsitektur heterogen pada Zynq-7000 memungkinkan pembagian beban komputasi secara optimal, di mana **Processing System (PS)** menangani tugas-tugas tingkat tinggi seperti komunikasi dan antarmuka pengguna, sedangkan **Programmable Logic (PL)** bertanggung jawab terhadap eksekusi algoritma kendali serta pemrosesan data sensor dengan tingkat determinisme waktu (*temporal determinism*) yang tinggi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa implementasi pemrosesan paralel pada bagian PL mampu menghasilkan latensi kurang dari **5 mikrodetik** untuk *control loop*, suatu tingkat kinerja yang sulit dicapai apabila hanya menggunakan prosesor serbaguna (*General Purpose Processor*).

Analisis lebih lanjut terhadap respons sistem menunjukkan bahwa integrasi antara PS dan PL melalui antarmuka **Advanced eXtensible Interface (AXI)** mampu menyediakan jalur komunikasi data yang memadai untuk aplikasi avionik. Dari sisi pemanfaatan sumber daya FPGA, implementasi pada perangkat **Xilinx Zynq-7000** menunjukkan efisiensi yang baik dengan penggunaan sekitar **68% Logic Elements**, **45% Block RAM**, dan **60% DSP Slices**. Hasil tersebut menunjukkan bahwa masih tersedia sumber daya yang cukup untuk pengembangan berbagai fitur tambahan pada masa mendatang.

Keberhasilan implementasi ini menunjukkan bahwa **FPGA SoC** merupakan platform yang layak untuk pengembangan sistem avionik di lingkungan UNSURYA. Kemampuan **reconfigurability** yang dimiliki FPGA memungkinkan pengembangan maupun pembaruan algoritma tanpa memerlukan perubahan perangkat keras, sedangkan arsitektur SoC memberikan fleksibilitas dalam mengintegrasikan berbagai fungsi sistem ke dalam satu cip (*single-chip*). Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan laboratorium avionik modern serta penyusunan kurikulum teknik penerbangan yang selaras dengan kebutuhan Revolusi Industri 4.0.

5. KESIMPULAN DAN ARAH PENELITIAN SELANJUTNYA

5.1 Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa keunggulan utama **Field-Programmable Gate Array (FPGA)** terletak pada kemampuannya dalam melakukan pemrosesan paralel berskala besar (*massive parallel processing*), menghasilkan latensi yang deterministik, serta memiliki efisiensi daya yang lebih tinggi dibandingkan arsitektur prosesor konvensional. Karakteristik tersebut menjadikan FPGA sebagai platform yang sangat sesuai untuk aplikasi-aplikasi kritis di bidang avionik, seperti sistem *Autonomous Takeoff and Landing (ATOL)*, penghindaran tabrakan (*collision avoidance*), dan perencanaan lintasan

secara waktu nyata (*real-time path planning*), yang semuanya memerlukan respons cepat, konsisten, dan andal.

Implementasi FPGA di lingkungan UNSURYA dapat dilakukan secara bertahap melalui pengembangan proyek **Unmanned Aerial Vehicle (UAV)** sebagai *proof of concept*. Tahap awal dapat difokuskan pada pengembangan sistem navigasi otonom dan *sensor fusion*. Pendekatan bertahap ini memungkinkan peningkatan kapasitas penelitian dan pengembangan secara berkelanjutan, dimulai dari sistem yang sederhana hingga menuju implementasi yang lebih kompleks, sejalan dengan perkembangan kompetensi sumber daya manusia dan ketersediaan infrastruktur penelitian.

5.2 Arah Penelitian Selanjutnya (*Future Works*)

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat beberapa rekomendasi strategis untuk pengembangan pada masa mendatang.

Pertama, perlu dibangun kolaborasi yang lebih erat dengan industri penerbangan nasional, meliputi maskapai penerbangan, regulator penerbangan seperti **Direktorat Jenderal Perhubungan Udara (DGCA Indonesia)**, serta perusahaan yang bergerak di bidang avionik. Kolaborasi tersebut dapat diwujudkan melalui penelitian bersama, pertukaran pengetahuan (*knowledge sharing*), serta pengembangan standar yang sesuai dengan kebutuhan industri dan regulasi keselamatan penerbangan di Indonesia. Kemitraan strategis ini diharapkan mampu meningkatkan relevansi penelitian sekaligus mempercepat adopsi hasil penelitian di lingkungan industri.

Kedua, sebagai upaya membangun kapasitas jangka panjang, direkomendasikan pembentukan **Laboratorium FPGA dan Embedded Systems** di Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma (UNSURYA). Laboratorium tersebut sebaiknya dilengkapi dengan berbagai platform FPGA, mulai dari kelas pemula hingga kelas industri, beserta perangkat pendukung seperti *logic analyzer*, *signal generator*, dan *environmental chamber* untuk kebutuhan pengujian sistem. Laboratorium ini diharapkan tidak hanya menjadi pusat kegiatan penelitian, tetapi juga berfungsi sebagai sarana pengembangan kurikulum, peningkatan kompetensi dosen dan mahasiswa, serta pengembangan pembelajaran berbasis proyek (*project-based learning*) yang berfokus pada teknologi FPGA. Dengan demikian, UNSURYA diharapkan mampu menghasilkan lulusan yang memiliki kompetensi di bidang sistem tertanam (*embedded systems*) dan teknologi avionik modern sesuai dengan kebutuhan industri penerbangan nasional.

Daftar Pustaka

- [1]. X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, and L. Wang, "Industry 4.0 and Industry 5.0 Inception, conception and perception," *JManuf Syst*, vol. 61, pp. 530–535, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2021.10.006.
- [2]. <https://www.icao.int/world-air-transport-2023>, accessed on November 15, 2025
- [3]. Smith, T., & Johnson, L. (2023). The rise of autonomous drones in e-commerce logistics. *Journal of Smart Transport*, 15(3), 112-127.
- [4]. <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/137631/en>, accessed on November 15, 2025
- [5]. Zhu, Jun, Hongyi Li, and Tao Zhang. "Camera, LiDAR, and IMU based multi-sensor fusion SLAM: A survey." *Tsinghua Science and Technology* 29.2 (2023): 415-429.
- [6]. Polvara, R.; Sharma, S.; Wan, J.; Manning, A.; Sutton, R. Vision-Based Autonomous Landing of a Quadrotor on the Perturbed Deck of an Unmanned Surface Vehicle. *Drones* 2018, 2, 15.
- [7]. Hamada, Tsuyoshi & Benkrid, Khaled & Nitadori, Keigo & Taiji, Makoto. (2009). A comparative study on ASIC, FPGAs, GPUs and general purpose processors in the O(N²) gravitational N-body simulation. *Proceedings - 2009 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems*, AHS 2009. 10.1109/AHS.2009.55.
- [8]. R. Raghavan and D. G. Perera, "A fast and scalable FPGA-based parallel processing architecture

- for K-means clustering for big data analysis," 2017 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), Victoria, BC, Canada, 2017, pp. 1-8, doi: 10.1109/PACRIM.2017.8121905.
- [9]. <https://www.amd.com/content/dam/amd/en/documents/corporate/cr/2023-24-amd-cr-report.pdf>, accessed on November 17, 2025.
- [10]. <https://docs.amd.com/r/en-US/ug585-zynq-7000-SoC-TRM/Zynq-7000-SoC-Technical-Reference-Manual>, accessed on September 16, 2025.
- [11]. Azaki, Zakeye & Dumon, Jonathan & Offermann, Alexis & Meslem, Nacim & Susbielle, Pierre & Nègre, Amaury & Hably, Ahmad. (2024). Magnus-Effect Winged Hybrid UAV System: Improved Energy Efficient and Autonomy Through Control Allocation Strategy. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. PP. 1-20. 10.1109/TAES.2024.3464569.
- [12]. Zuchowski, P.S. & Reynolds, C.B. & Grupp, R.J. & Davis, S.G. & Cremen, B. & Troxel, B.. (2002). A hybrid ASIC and FPGA architecture. 187- 194. 10.1109/ICCAD.2002.1167533.
- [13]. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2025/02/soa-2024.pdf>, accessed on November 16, 2025.
- [14]. https://www.tealhq.com/job/fpga-design-engineer-associate-or-experienced_172590b0-bd19-4100-85db-158182d84156
- [15]. https://perpustakaan.bappenas.go.id/e-library/file_upload/koleksi/migrasi-data-publikasi/file/Policy_Paper/Peta%20Jalan%20Ekosistem%20Industri%20Kedirgantaraan%20Indonesia%202022-2045.pdf, accessed November 16, 2025.
- [16]. Silitonga, Tumpal & Sumadinata, R. & Sudirman, Arfin & Hidayat, Taufik. (2022). Civil aviation safety evaluation based on the principle of international civic aviation organization (ICAO): The case of Indonesia. International journal of health sciences. 10188-10210. 10.53730/ijhs.v6nS4.11037.
- [17]. <https://indico.ictp.it/event/8342/session/10/contribution/68/material/slides/0.pdf>, November 16, 2025.
- [18]. https://digilent.com/reference/programmable-logic/zedboard/start?srsltid=AfmBOopD6tPxg1GvK7R4hENk_jTOAi_gKYid-aGyTke8fETt5w_i5tl, accessed on September 16, 2025.