



Evolusi Arsitektur Komputer Modern: Tinjauan Naratif terhadap Komputasi Paralel, *High-Performance Computing*, dan Integrasi Kecerdasan Buatan

Muhammad Arfan

Program Studi Ilmu Komputer, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Halu Oleo, Kota Kendari, Indonesia

*Email Korespondensi: muhammadarfanbandi@uho.ac.id

Diterima: 07-07-2026 | Disetujui: 14-07-2026 | Diterbitkan: 16-07-2026

ABSTRACT

Modern computer architecture has undergone significant transformation in response to the increasing demand for high-performance, energy-efficient, scalable computing systems capable of processing large-scale data. This study examines the evolution of modern computer architecture using the Narrative Literature Review (NLR) approach, focusing on architectural evolution, parallel computing, High-Performance Computing (HPC), heterogeneous computing systems, and the integration of Artificial Intelligence (AI). Relevant national and international scientific publications were analyzed to identify technological trends, architectural innovations, implementation challenges, and future research directions. The findings indicate that computer architecture has evolved from single-core processors to multi-core, many-core, Graphics Processing Units (GPUs), Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs), and heterogeneous computing architectures that enhance computational performance through parallel processing. Furthermore, AI has become an essential component for optimizing architectural design, memory management, resource allocation, and energy efficiency through hardware-software co-design. Despite these advances, challenges related to power consumption, design complexity, security, scalability, and system interoperability remain. This review provides a comprehensive reference for researchers, academics, and practitioners to better understand the evolution of modern computer architecture and support the development of next-generation computing technologies.

Keywords: AI; Computer Architecture; HPC; NLR; Parallel Computing.

ABSTRAK

Perkembangan arsitektur komputer modern mengalami transformasi yang signifikan seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem komputasi yang memiliki kinerja tinggi, efisiensi energi, skalabilitas, dan kemampuan memproses data dalam jumlah besar. Penelitian ini bertujuan mengkaji perkembangan arsitektur komputer modern menggunakan pendekatan *Narrative Literature Review* (NLR) dengan fokus pada evolusi arsitektur komputasi, komputasi paralel, *High-Performance Computing* (HPC), sistem komputasi heterogen, dan integrasi kecerdasan buatan. Kajian dilakukan melalui analisis berbagai publikasi ilmiah nasional dan internasional untuk mengidentifikasi tren teknologi, inovasi arsitektur, tantangan, dan arah pengembangan di masa depan. Hasil kajian menunjukkan bahwa evolusi arsitektur komputer ditandai oleh transisi dari prosesor *single-core* menuju *multi-core*, *many-core*, *Graphics Processing Unit* (GPU), *Field Programmable Gate Array* (FPGA), serta arsitektur komputasi heterogen yang meningkatkan performa melalui komputasi paralel. Integrasi kecerdasan buatan juga berperan penting dalam mengoptimalkan desain arsitektur, manajemen memori, alokasi sumber daya, dan efisiensi energi melalui pendekatan *hardware-software co-design*. Meskipun demikian, tantangan terkait konsumsi daya, kompleksitas desain, keamanan, skalabilitas, dan interoperabilitas sistem masih menjadi perhatian. Kajian ini

diharapkan menjadi referensi bagi pengembangan arsitektur komputer dan teknologi komputasi generasi berikutnya.

Katakunci: arsitektur komputer; HPC; kecerdasan buatan; komputasi paralel; NLR.

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:

Arfan, M. (2026). Evolusi Arsitektur Komputer Modern: Tinjauan Naratif terhadap Komputasi Paralel, High-Performance Computing, dan Integrasi Kecerdasan Buatan. *Journal of Literature Review*, 2(2), 762-774. <https://doi.org/10.63822/qtwf4s40>

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi saat ini mengalami perkembangan pesat sehingga arsitektur komputer terdorong untuk terus berevolusi. Hal tersebut memicu kebutuhan manusia dalam hal komputasi dengan kinerja yang maksimal menyesuaikan perkembangan sehingga arsitektur komputer modern menjadi fundamental dalam perkembangan teknologi ini. Berdasarkan kebutuhan manusia yang terus berkembang seiring perkembangan teknologi informasi dari mulai sistem komputasi konvensional hingga paralel, arsitektur komputer terus mengalami inovasi untuk terus berkembang dengan tuntutan masa kini. Selama kurang lebih satu dekade terakhir, arsitektur komputer terus berkembang baik dari segi *mainframe*, *cloud*, *edge*, *IoT* sehingga memberi peluang komputasi dapat menjangkau berbagai sektor kehidupan (Gill dkk., 2024). Terkait dengan hal itu, Abdi dkk. (2024) menegaskan jika berkembangnya arsitektur komputer merupakan pengaruh dari keterbatasan teknologi lama serta tuntutan adaptif, sehingga arsitektur komputer modern berfokus pada optimalisasi sistem secara menyeluruh bukan hanya pada peningkatan kecepatan prosesor semata.

Penelitian perkembangan arsitektur komputer modern, telah dilakukan oleh peneliti dengan beragam fokus yang dibahas seperti evolusi arsitektur, kinerja sistem hingga integrasi dengan kecerdasan buatan. Beragam penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengembangan arsitektur komputer tidak hanya berorientasi pada aspek perangkat keras, tetapi juga mencakup sinergi antara perangkat keras, perangkat lunak, dan algoritma untuk memenuhi kebutuhan komputasi modern. Kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu menjadi langkah penting untuk mengidentifikasi perkembangan, tren, serta kesenjangan penelitian (*research gap*) yang dapat menjadi landasan dalam penyusunan penelitian ini. Ringkasan penelitian terkait yang relevan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Penelitian Terkait

No.	Penulis (Tahun)	Judul	Kesimpulan
1	Gill dkk. (2024)	<i>Modern Computing: Vision and Challenges</i>	Perkembangan arsitektur komputer modern mengarah pada sistem yang terdesentralisasi, heterogen, serta berorientasi pada efisiensi energi dan performa tinggi melalui penerapan <i>cloud computing</i> , <i>edge computing</i> , dan Internet of Things (IoT).
2	Ederhion dkk. (2024)	<i>Evolution, Challenges, and Optimization in Computer Architecture: The Role of Reconfigurable Systems</i>	Integrasi sistem <i>reconfigurable</i> menjadi solusi potensial untuk meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi pemrosesan data dalam memenuhi kebutuhan komputasi modern yang dinamis.
3	Afif dkk. (2025)	Revolusi Teknologi dalam Arsitektur Komputer: Tantangan dan Peluang di Era Digital	Arsitektur komputer mengalami transformasi dari model Von Neumann menuju sistem <i>multi-core</i> , komputasi heterogen, dan akselerator khusus. Tantangan utama meliputi efisiensi energi, keamanan sistem, dan skalabilitas.
4	Vaithianathan	<i>Memory Hierarchy</i>	Optimasi hierarki memori, meliputi cache,

Evolusi Arsitektur Komputer Modern: Tinjauan Naratif terhadap Komputasi Paralel, High-Performance Computing, dan Integrasi Kecerdasan Buatan
(Arfan)

	(2025)	<i>Optimization Strategies for High Performance Computing Architectures</i>	memori utama, dan teknik manajemen memori, berperan penting dalam meningkatkan <i>throughput</i> dan efisiensi arsitektur komputer berkinerja tinggi.
5	Mammadov dkk. (2025)	<i>The Role of Artificial Intelligence in Modern Computer Architecture: From Algorithms to Hardware Optimization</i>	Integrasi kecerdasan buatan mendorong pengembangan akselerator khusus dan pendekatan <i>hardware-software co-design</i> , sehingga kecerdasan buatan tidak hanya menjadi beban komputasi, tetapi juga menjadi pendorong inovasi dalam arsitektur komputer modern.

Berdasarkan hasil kajian terhadap penelitian-penelitian terkait, sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek-aspek tertentu secara terpisah sehingga belum memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan arsitektur komputer modern secara menyeluruh. Oleh karena itu, diperlukan kajian literatur yang mengintegrasikan berbagai hasil penelitian tersebut untuk mengidentifikasi tren perkembangan, tantangan, serta arah inovasi arsitektur komputer modern. Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah yang memberikan pemahaman yang lebih utuh mengenai konsep, teknologi, dan perkembangan arsitektur komputer modern bagi peneliti, akademisi, maupun praktisi di bidang ilmu komputer.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Narrative Literature Review* (NLR), yaitu metode kajian literatur yang bertujuan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan menyintesis berbagai sumber ilmiah yang relevan sehingga diperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai suatu topik penelitian. Objek penelitian dalam kajian ini adalah perkembangan arsitektur komputer modern, sedangkan subjek penelitian meliputi berbagai teknologi dan konsep yang menjadi bagian dari evolusi arsitektur komputer, antara lain arsitektur *multi-core*, komputasi paralel, *Graphics Processing Unit* (GPU), *cloud computing*, *High-Performance Computing* (HPC), sistem *reconfigurable*, integrasi kecerdasan buatan dalam arsitektur komputer, serta tantangan dan tren perkembangannya. Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Tahapan penelitian diawali dengan pengumpulan literatur dari berbagai sumber ilmiah yang relevan, seperti artikel jurnal, prosiding konferensi, dan publikasi akademik lainnya. Selanjutnya dilakukan proses seleksi berdasarkan kesesuaian topik, tahun publikasi, serta relevansi terhadap fokus penelitian. Literatur yang terpilih kemudian dianalisis secara deskriptif melalui proses identifikasi konsep, perbandingan hasil penelitian, sintesis temuan, serta pengelompokan berdasarkan tema-tema utama perkembangan arsitektur komputer modern. Hasil sintesis literatur digunakan untuk mengidentifikasi arah perkembangan teknologi, tantangan yang dihadapi, serta peluang inovasi pada arsitektur komputer modern. Seluruh hasil analisis tersebut menjadi dasar dalam penyusunan pembahasan dan penarikan kesimpulan sehingga diperoleh pemahaman yang sistematis dan komprehensif mengenai perkembangan arsitektur komputer modern beserta implikasinya terhadap kemajuan teknologi komputasi.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evolusi Arsitektur Komputer

Arsitektur komputer menitik beratkan pada desain, struktur serta fungsi dari suatu komponen sistem komputer. Hal ini menjadi dasar pengembangan atau berkembangnya suatu sistem komputer modern. Perkembangan arsitektur komputer modern diawali oleh evolusi dari prosesor *single-core* menuju *multi-core* sebagai solusi atas keterbatasan peningkatan *clock speed*. Peralihan tersebut menjadi tonggak penting dalam arsitektur komputer modern karena memungkinkan pemrosesan paralel yang lebih efisien (Torphy, 2023). Pada tahap awal, sistem komputasi masih mengadopsi arsitektur Von Neumann, yaitu model yang menghubungkan prosesor, memori, serta perangkat masukan dan keluaran melalui satu jalur komunikasi. Meskipun efektif pada generasi awal komputer, model ini memiliki keterbatasan berupa Von Neumann Bottleneck, yaitu hambatan perpindahan data antara CPU dan memori yang membatasi kinerja sistem (Abdiddk., 2024). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, arsitektur komputer terus berkembang melalui

Evolusi Arsitektur Komputer Modern: Tinjauan Naratif terhadap Komputasi Paralel, High-Performance Computing, dan Integrasi Kecerdasan Buatan

(Arfan)

penerapan prosesor *multi-core*, peningkatan *instruction-level parallelism*, serta pengembangan teknik *pipeline*, *superscalar*, dan *out-of-order execution*. Selain itu, arsitektur *Reduced Instruction Set Computer* (RISC) dan *Complex Instruction Set Computer* (CISC) mengalami konvergensi sehingga mampu menghasilkan prosesor modern dengan performa yang lebih tinggi (Maulana dkk., 2025). Perkembangan ini juga diikuti oleh optimalisasi hierarki memori, yang meliputi *cache*, memori utama, dan mekanisme pengelolaan memori, untuk mengurangi kesenjangan kecepatan antara prosesor dan memori (*memory wall*) sehingga meningkatkan *throughput* dan efisiensi sistem komputasi (Ziliwu, 2025).

Transformasi arsitektur komputer modern selanjutnya ditandai dengan adopsi komputasi paralel, komputasi heterogen, dan sistem terdistribusi untuk memenuhi kebutuhan komputasi berskala besar. Integrasi *Central Processing Unit* (CPU), GPU, *Field Programmable Gate Array* (FPGA), serta akselerator khusus memungkinkan pemrosesan paralel secara masif dan menjadi dasar pengembangan sistem *High Performance Computing* (HPC) (Pacini dkk., 2024). Di sisi lain, perkembangan *cloud computing*, *edge computing*, dan *Internet of Things* (IoT) telah mengubah paradigma komputasi dari sistem terpusat menuju sistem terdistribusi yang mampu mengelola sumber daya secara fleksibel, skalabel, dan kolaboratif (Gill dkk., 2024). Evolusi tersebut semakin diperkuat oleh pemanfaatan teknologi *containerization* dan orkestrasi layanan yang meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya melalui integrasi erat antara perangkat keras dan perangkat lunak (Lumpp dkk., 2023). Selain itu, penerapan sistem *reconfigurable* berbasis FPGA memungkinkan konfigurasi arsitektur komputer disesuaikan secara dinamis dengan karakteristik beban kerja sehingga meningkatkan fleksibilitas, performa, dan efisiensi energi (Ederhion dkk., 2024). Perkembangan kecerdasan buatan juga menjadi salah satu pendorong utama inovasi arsitektur komputer modern melalui pendekatan *hardware-software co-design*, optimasi desain prosesor, pengelolaan memori, dan penjadwalan komputasi. Dengan demikian, kecerdasan buatan tidak hanya menjadi beban kerja baru bagi sistem komputasi, tetapi juga menjadi katalis dalam pengembangan arsitektur komputer yang lebih adaptif, efisien, dan berorientasi pada kinerja tinggi (Mammadov dkk., 2025).

Perkembangan Organisasi dan Komponen Arsitektur Komputer Modern

Organisasi arsitektur komputer modern mengalami transformasi yang signifikan seiring dengan evolusi teknologi komputasi dari sistem berbasis *single-core* menuju *multi-core processor*. Perkembangan tersebut dipengaruhi oleh keterbatasan fisik dalam peningkatan frekuensi *clock*, sehingga peningkatan kinerja sistem tidak lagi hanya bergantung pada kecepatan prosesor, tetapi juga pada optimalisasi organisasi komponen internal, seperti prosesor, memori, dan sistem interkoneksi (Abdi dkk., 2024). Dalam konteks ini, organisasi komputer berfokus pada pengelolaan dan interaksi antara CPU, memori utama, perangkat masukan/keluaran (*input/output*), serta *bus* komunikasi agar mampu mendukung kebutuhan komputasi modern yang semakin kompleks (Sulaeman dkk., 2023). Perubahan desain prosesor turut mendorong transformasi organisasi arsitektur melalui pendekatan hibrida yang menggabungkan keunggulan RISC dan CISC, sehingga mendukung implementasi *pipeline*, *superscalar*, dan *out-of-order execution* untuk meningkatkan *throughput* tanpa harus menaikkan frekuensi *clock* secara signifikan (Maulana dkk., 2025). Selain itu, organisasi hierarki memori yang terdiri atas *register*, *cache* (L1–L3), memori utama, dan penyimpanan sekunder dikembangkan untuk mengatasi kesenjangan kecepatan antara prosesor dan memori (*memory wall*), sehingga efisiensi dan kinerja sistem dapat terus ditingkatkan (Hayati dkk., 2024).

Perkembangan organisasi arsitektur komputer modern juga ditandai dengan penerapan komputasi

heterogen yang mengintegrasikan CPU, GPU, dan akselerator lainnya untuk mendukung pemrosesan paralel pada aplikasi komputasi intensif (Pacini dkk., 2024). Evolusi tersebut diikuti oleh adopsi *cloud computing*, sistem terdistribusi, dan otomatisasi yang menuntut organisasi sistem menjadi lebih fleksibel, skalabel, serta mampu menyesuaikan infrastruktur teknologi informasi dengan kebutuhan aplikasi dan proses bisnis (Satria dkk., 2023). Dengan demikian, organisasi arsitektur komputer tidak hanya berorientasi pada peningkatan performa perangkat keras, tetapi juga pada efisiensi operasional melalui pengelolaan sumber daya, integrasi sistem, dan optimalisasi perangkat keras secara menyeluruh (Hayati dkk., 2024). Di sisi lain, meningkatnya kompleksitas arsitektur modern memunculkan tantangan baru, seperti keamanan sistem, efisiensi energi, dan skalabilitas (Hanif & Sugiantoro, 2025). Untuk menjawab tantangan tersebut, kecerdasan buatan mulai diintegrasikan ke dalam proses perancangan arsitektur komputer, termasuk dalam optimasi desain prosesor, manajemen memori, dan penjadwalan komputasi, sehingga organisasi arsitektur menjadi lebih adaptif terhadap karakteristik beban kerja dan kebutuhan komputasi modern (Mammadov dkk., 2025).

High-Performance Computing

High-Performance Computing (HPC) merupakan salah satu implementasi utama arsitektur komputer modern yang dirancang untuk menyediakan kemampuan komputasi berperforma tinggi dalam menyelesaikan permasalahan ilmiah dan komputasi yang kompleks. Perkembangan HPC tidak lagi bergantung pada peningkatan kinerja prosesor tunggal, tetapi mengadopsi pendekatan komputasi paralel yang memanfaatkan jutaan unit pemrosesan secara bersamaan untuk meningkatkan efisiensi dan skalabilitas sistem (Muthusamy, 2025). Transformasi tersebut didukung oleh penggunaan arsitektur *multi-core* dan *many-core*, yang memungkinkan peningkatan *throughput* tanpa meningkatkan konsumsi daya secara signifikan. Pada implementasinya, CPU berfungsi sebagai pengendali utama dan menangani komputasi umum, sedangkan beban kerja komputasi intensif dialihkan kepada akselerator paralel, seperti GPU (Kania, 2021). Integrasi GPU dalam sistem HPC terbukti mampu meningkatkan performa secara signifikan pada aplikasi berbasis *data parallelism*, seperti *machine learning*, sekaligus meningkatkan efisiensi energi pada superkomputer modern (Pacini dkk., 2024). Selain itu, pemanfaatan FPGA sebagai sistem *reconfigurable* memberikan fleksibilitas dalam menyesuaikan konfigurasi perangkat keras dengan karakteristik aplikasi sehingga mampu mengoptimalkan performa dan konsumsi daya, terutama pada aplikasi komputasi khusus dan sistem *real-time* (Ederhion dkk., 2024).

Efektivitas arsitektur HPC modern juga sangat dipengaruhi oleh organisasi hierarki memori, karena perbedaan kecepatan antara prosesor dan memori (*memory wall*) masih menjadi salah satu tantangan utama dalam sistem komputasi berkinerja tinggi. Penerapan *cache multi-level*, memori berkecepatan tinggi, dan teknik *prefetching* mampu mengurangi latensi akses data serta meningkatkan *bandwidth*, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan kinerja sistem HPC secara keseluruhan (Vaithianathan, 2025). Seiring berkembangnya teknologi komputasi, arsitektur HPC juga berevolusi menuju lingkungan *cloud-based* HPC, *edge computing*, dan sistem terdistribusi yang memungkinkan sumber daya komputasi diakses secara fleksibel melalui mekanisme virtualisasi, tanpa bergantung pada infrastruktur superkomputer fisik (Gill dkk., 2024). Perkembangan tersebut semakin diperkuat oleh integrasi kecerdasan buatan yang dimanfaatkan untuk mengoptimalkan penjadwalan tugas, pengelolaan energi, serta alokasi sumber daya secara adaptif sesuai karakteristik beban kerja (Mammadov dkk., 2025). Dengan demikian, arsitektur HPC modern

dibangun berdasarkan kombinasi paralelisme masif, komputasi heterogen, optimalisasi hierarki memori, komputasi terdistribusi berbasis *cloud*, serta integrasi kecerdasan buatan, sehingga mampu memenuhi tuntutan komputasi modern yang memerlukan kinerja tinggi, efisiensi energi, skalabilitas, dan kemampuan adaptasi terhadap berbagai jenis aplikasi (Torphy, 2023).

Komputasi Paralel dan *Graphics Processing Unit*

Perkembangan arsitektur komputer modern ditandai oleh pergeseran paradigma dari pemrosesan sekuensial menuju komputasi paralel berbasis *multi-core processor*. Pergeseran ini dipicu oleh keterbatasan peningkatan frekuensi *clock*, sehingga peningkatan performa sistem lebih efektif dicapai melalui penambahan jumlah inti pemrosesan dalam satu chip dibandingkan dengan meningkatkan kecepatan prosesor (Kania, 2021). Pendekatan *multi-core* memungkinkan pembagian beban kerja secara paralel sehingga meningkatkan *throughput* tanpa menyebabkan peningkatan konsumsi energi yang signifikan. Selain itu, prosesor modern pada sistem desktop maupun server mengandalkan *paralelisme* dan *multithreading* sebagai fondasi utama untuk meningkatkan kinerja, sehingga fokus arsitektur komputer modern tidak lagi terletak pada penggunaan satu prosesor berperforma tinggi, melainkan pada koordinasi dan sinkronisasi banyak unit pemrosesan yang bekerja secara bersamaan (Abdi dkk., 2024). Perkembangan ini turut mendorong perubahan desain arsitektur komputer menuju sistem yang lebih skalabel, efisien, dan mampu menangani beban komputasi yang semakin kompleks.

Kemajuan *Graphics Processing Unit* (GPU) semakin memperkuat implementasi komputasi paralel dalam arsitektur komputer modern. GPU dirancang dengan ribuan inti pemrosesan sederhana yang mampu menangani komputasi berbasis *data parallelism* secara jauh lebih efisien dibandingkan CPU pada aplikasi komputasi intensif, seperti *machine learning* dan *deep learning*, sehingga menjadi salah satu komponen utama dalam sistem komputasi modern (Pacini dkk., 2024). Peningkatan kebutuhan terhadap kecerdasan buatan juga mendorong pengembangan GPU dan akselerator khusus sebagai solusi untuk meningkatkan performa komputasi sekaligus mengoptimalkan efisiensi energi (Wu & Xie, 2023). Di sisi lain, perkembangan *cloud computing* memungkinkan ribuan CPU dan GPU dimanfaatkan secara terdistribusi melalui infrastruktur komputasi global, sehingga sumber daya komputasi dapat dialokasikan secara dinamis sesuai kebutuhan aplikasi (Gill dkk., 2024). Pendekatan tersebut semakin diperkuat oleh penerapan *containerization* dan orkestrasi layanan yang mendukung pemrosesan paralel pada lingkungan *cloud* dan *edge computing*, sehingga mampu mengurangi latensi, meningkatkan skalabilitas, dan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya komputasi (Lumpp dkk., 2023). Dengan demikian, integrasi *multi-core*, GPU, komputasi paralel, dan komputasi awan membentuk fondasi utama arsitektur komputer modern yang mampu mendukung kebutuhan komputasi berkinerja tinggi pada berbagai aplikasi, termasuk kecerdasan buatan, analisis *big data*, dan sistem komputasi ilmiah.

Sistem *Reconfigurable* dan Arsitektur Komputer Fleksibel

Perkembangan arsitektur komputer modern menunjukkan pergeseran menuju sistem *reconfigurable* dan arsitektur komputer fleksibel sebagai respons terhadap meningkatnya kompleksitas aplikasi serta keragaman karakteristik beban kerja. Berbeda dengan arsitektur konvensional yang bersifat statis, sistem *reconfigurable* memungkinkan konfigurasi perangkat keras disesuaikan secara dinamis sesuai kebutuhan aplikasi sehingga mampu meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas komputasi (Ederhion dkk., 2024).

Implementasi yang paling banyak digunakan adalah *Field-Programmable Gate Array* (FPGA), yang memiliki kemampuan untuk mengonfigurasi ulang jalur logika sehingga memberikan keseimbangan antara performa dan efisiensi energi, terutama pada aplikasi *machine learning*, pemrosesan sinyal, *edge computing*, dan sistem *real-time* yang membutuhkan latensi rendah (Pacini dkk., 2024). Selain FPGA, pendekatan *Coarse-Grained Reconfigurable Architecture* (CGRA) juga berkembang sebagai alternatif arsitektur fleksibel yang beroperasi pada tingkat blok fungsional, sehingga mampu mengurangi *overhead* konfigurasi sekaligus meningkatkan performa dan efisiensi energi pada aplikasi tertentu (Muthusamy, 2025). Integrasi CPU, GPU, dan akselerator *reconfigurable* dalam satu sistem menjadi karakteristik penting arsitektur komputer modern karena memungkinkan pemetaan beban kerja secara adaptif ke unit pemrosesan yang paling sesuai (Kania, 2021).

Penerapan sistem *reconfigurable* juga berperan penting dalam mendukung *cloud computing* dan *edge computing*, di mana sumber daya komputasi dapat dikonfigurasi secara dinamis untuk menyesuaikan variasi beban kerja dan keterbatasan sumber daya pada lingkungan komputasi terdistribusi (Lumpp dkk., 2023). Meskipun menawarkan fleksibilitas dan skalabilitas yang tinggi, teknologi ini masih menghadapi sejumlah tantangan, antara lain kompleksitas desain, waktu konfigurasi ulang (*reconfiguration time*), serta kebutuhan terhadap perangkat lunak pemrograman yang lebih efisien (Ederhion dkk., 2024). Oleh karena itu, penelitian terkini lebih berfokus pada pengembangan *hardware-software co-design*, abstraksi pemrograman tingkat tinggi, serta otomatisasi proses konfigurasi untuk meningkatkan kemudahan implementasi sistem *reconfigurable*. Secara keseluruhan, sistem *reconfigurable* dan arsitektur fleksibel menjadi salah satu fondasi utama arsitektur komputer modern karena mampu beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan karakteristik beban kerja, sekaligus memenuhi kebutuhan komputasi berkinerja tinggi pada berbagai domain, termasuk kecerdasan buatan, HPC, dan sistem komputasi terdistribusi (Torphy, 2023).

Kecerdasan Buatan dalam Arsitektur Komputer Modern

Integrasi kecerdasan buatan menjadi salah satu faktor utama yang mendorong evolusi arsitektur komputer modern. Meningkatnya kompleksitas algoritma *machine learning* dan *deep learning* menuntut arsitektur komputer yang mampu menangani komputasi berbasis matriks dan vektor dalam skala besar secara efisien (Mammadov dkk., 2025). Kebutuhan tersebut mendorong pengembangan berbagai akselerator khusus, seperti GPU, *Tensor Processing Unit* (TPU), dan *Neural Processing Unit* (NPU), yang dirancang untuk mengoptimalkan operasi inferensi maupun pelatihan model kecerdasan buatan. Berbeda dengan CPU yang bersifat serbaguna, akselerator tersebut memiliki arsitektur yang dioptimalkan untuk pemrosesan paralel sehingga mampu memberikan peningkatan performa dan efisiensi energi pada aplikasi kecerdasan buatan. Dengan demikian, perkembangan kecerdasan buatan tidak hanya meningkatkan kebutuhan terhadap sumber daya komputasi, tetapi juga mendorong transformasi desain arsitektur komputer menuju sistem yang lebih heterogen dan berorientasi pada beban kerja kecerdasan buatan.

Hubungan antara kecerdasan buatan dan arsitektur komputer bersifat timbal balik, di mana perkembangan arsitektur komputer mendukung peningkatan kemampuan kecerdasan buatan, sementara kecerdasan buatan juga dimanfaatkan untuk mengoptimalkan perancangan dan pengelolaan arsitektur komputer itu sendiri (Wu & Xie, 2023). Pendekatan ini diwujudkan melalui penerapan *hardware-software co-design*, yaitu integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak yang dirancang secara bersamaan

untuk memperoleh kinerja yang optimal. Selain itu, implementasi kecerdasan buatan pada lingkungan komputasi heterogen menunjukkan bahwa pemanfaatan FPGA mampu memberikan fleksibilitas konfigurasi dan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan pendekatan konvensional berbasis CPU maupun GPU pada aplikasi tertentu (Pacini dkk., 2024). Integrasi kecerdasan buatan dengan arsitektur komputer modern juga membuka peluang pengembangan sistem komputasi yang lebih adaptif, otonom, dan mampu menyesuaikan alokasi sumber daya secara dinamis berdasarkan karakteristik beban kerja. Oleh karena itu, kecerdasan buatan tidak lagi hanya dipandang sebagai aplikasi yang dijalankan di atas sistem komputer, tetapi telah menjadi komponen fundamental yang membentuk arah perkembangan arsitektur komputer modern menuju sistem komputasi yang cerdas, efisien, dan berperforma tinggi (Mammadov dkk., 2025; Wu & Xie, 2023).

Tantangan Arsitektur Komputer di Era Digital

Perkembangan arsitektur komputer modern dihadapkan pada berbagai tantangan yang muncul seiring dengan meningkatnya kebutuhan komputasi berkinerja tinggi. Salah satu tantangan utama adalah efisiensi energi, terutama pada pusat data (*data center*), *cloud computing*, dan *edge computing*, yang mengalami peningkatan konsumsi daya akibat bertambahnya kompleksitas beban kerja (Afif dkk., 2025). Peningkatan jumlah transistor dan inti pemrosesan (*core*) tidak lagi mampu memberikan peningkatan performa secara proporsional karena dibatasi oleh fenomena *power wall* dan *thermal wall*, yang membatasi kemampuan sistem dalam meningkatkan frekuensi operasi prosesor. Selain itu, penerapan arsitektur *multi-core* juga menghadapi kendala yang dijelaskan melalui Hukum Amdahl (*Amdahl's Law*), yaitu keterbatasan paralelisme, kompetisi terhadap *memory bandwidth*, *cache coherence*, serta *overhead* komunikasi antar-*core*, sehingga peningkatan jumlah inti pemrosesan tidak selalu menghasilkan peningkatan kinerja secara linear (Gebremichael, 2024). Kondisi tersebut mendorong pengembangan arsitektur komputer yang lebih efisien melalui optimalisasi paralelisme, pengelolaan beban kerja, dan organisasi sumber daya komputasi.

Memory wall masih menjadi tantangan fundamental dalam arsitektur komputer modern selain efisiensi energi dan skalabilitas komputasi. Kesenjangan kecepatan antara prosesor dan memori menyebabkan akses data menjadi salah satu faktor pembatas kinerja, sehingga diperlukan optimalisasi hierarki memori, peningkatan *data locality*, serta pengurangan perpindahan data untuk mendukung aplikasi komputasi intensif, khususnya kecerdasan buatan dan HPC (Vaithianathan, 2025). Di sisi lain, meningkatnya integrasi perangkat, sistem terdistribusi, dan konektivitas jaringan turut memperluas permukaan serangan (*attack surface*), sehingga aspek keamanan menjadi komponen penting dalam perancangan arsitektur komputer modern (Rizky, 2024). Oleh karena itu, pendekatan *security-by-design*, seperti penerapan modul keamanan berbasis perangkat keras (*hardware security module*) dan *Trusted Execution Environment* (TEE), mulai diintegrasikan sejak tahap perancangan sistem untuk meningkatkan ketahanan terhadap ancaman siber. Dengan demikian, arah pengembangan arsitektur komputer modern tidak hanya berfokus pada peningkatan performa, tetapi juga pada pencapaian efisiensi energi, optimalisasi memori, skalabilitas, serta keamanan sistem agar mampu memenuhi kebutuhan komputasi di era digital yang semakin kompleks.

Tren dan Arah Masa Depan Arsitektur Komputer

Berdasarkan hasil sintesis berbagai penelitian, arah perkembangan arsitektur komputer modern

Evolusi Arsitektur Komputer Modern: Tinjauan Naratif terhadap Komputasi Paralel, High-Performance Computing, dan Integrasi Kecerdasan Buatan

(Arfan)

mengarah pada sistem komputasi yang heterogen, adaptif, dan cerdas. Arsitektur masa depan diproyeksikan mengintegrasikan CPU, GPU, akselerator kecerdasan buatan, serta sistem *reconfigurable* dalam satu platform komputasi untuk mengoptimalkan pemetaan beban kerja sesuai karakteristik aplikasi. Pendekatan tersebut memungkinkan setiap jenis pemrosesan dialokasikan kepada unit komputasi yang paling sesuai sehingga mampu meningkatkan performa, efisiensi energi, dan fleksibilitas sistem secara keseluruhan. Selain itu, perkembangan arsitektur komputer juga dipengaruhi oleh kemajuan teknologi komputasi generasi berikutnya, seperti komputasi kuantum (*quantum computing*) dan komputasi neuromorfik (*neuromorphic computing*), yang dipandang memiliki potensi besar dalam menyelesaikan permasalahan komputasi yang sulit ditangani oleh arsitektur konvensional. Meskipun implementasinya masih menghadapi berbagai tantangan teknis, kedua teknologi tersebut menawarkan peluang untuk meningkatkan kemampuan komputasi sekaligus mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi, terutama pada aplikasi berbasis optimasi, simulasi, dan pengenalan pola (Muthusamy, 2025).

Sejalan dengan perkembangan tersebut, pendekatan *hardware-software co-design* menjadi salah satu tren utama dalam pengembangan arsitektur komputer modern. Pendekatan ini menekankan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak secara terpadu agar mampu menghasilkan sistem komputasi yang lebih optimal, fleksibel, dan mudah dikembangkan sesuai kebutuhan aplikasi. Integrasi antara desain arsitektur, sistem operasi, *compiler*, serta algoritma aplikasi memungkinkan pemanfaatan sumber daya komputasi menjadi lebih efisien dibandingkan dengan pendekatan pengembangan yang dilakukan secara terpisah. Oleh karena itu, arah pengembangan arsitektur komputer di masa depan tidak hanya berorientasi pada peningkatan performa komputasi, tetapi juga pada pencapaian efisiensi energi, keamanan, skalabilitas, keberlanjutan (*sustainability*), dan kemampuan adaptasi terhadap perubahan karakteristik beban kerja. Dengan demikian, evolusi arsitektur komputer modern diproyeksikan menjadi fondasi utama dalam mendukung perkembangan teknologi komputasi masa depan, termasuk kecerdasan buatan, HPC, IoT, dan sistem komputasi cerdas lainnya (Torphy, 2023).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil NLR terhadap berbagai publikasi ilmiah dapat disimpulkan bahwa arsitektur komputer modern telah mengalami evolusi yang signifikan dari sistem komputasi konvensional menuju arsitektur yang heterogen, terdistribusi, adaptif, dan cerdas. Perkembangan tersebut didorong oleh meningkatnya kebutuhan komputasi berkinerja tinggi, efisiensi energi, skalabilitas, serta kemampuan memproses data secara *real-time* pada berbagai domain, seperti HPC, kecerdasan buatan, IoT, dan *cloud computing*. Hasil kajian menunjukkan bahwa peningkatan performa sistem tidak lagi bergantung pada prosesor tunggal, melainkan pada integrasi *multi-core processor*, GPU, FPGA, dan akselerator khusus dalam arsitektur komputasi heterogen yang mampu mengoptimalkan pemrosesan sesuai karakteristik beban kerja. Selain itu, penerapan sistem *cloud computing*, *edge computing*, dan arsitektur *reconfigurable* semakin memperkuat fleksibilitas dan efisiensi pemanfaatan sumber daya komputasi. Integrasi kecerdasan buatan juga berperan penting tidak hanya sebagai aplikasi, tetapi sebagai teknologi yang mendukung optimasi desain prosesor, manajemen memori, penjadwalan komputasi, dan pengelolaan energi. Meskipun demikian, arsitektur komputer modern masih menghadapi tantangan berupa efisiensi energi, keamanan, skalabilitas, dan interoperabilitas antarkomponen. Oleh karena itu, pengembangan arsitektur komputer di masa depan

perlu mengadopsi pendekatan *hardware-software co-design* yang mampu menghasilkan sistem komputasi yang lebih adaptif, aman, hemat energi, dan berkelanjutan, sehingga dapat mendukung kebutuhan komputasi generasi mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, F. A., Faisal, F. H., Siregar, F. A., Sintiya, A., & Yahfizham. (2024). Analisis Perkembangan dan Klasifikasi Komputer dari Awal Konsep Hingga Era Modern. *Nusantara Journal of Multidisciplinary Science*, 2(1), 14–27.
- Afif, A. Z., Safaraz, D. A., Febriyanti, D., Febrianti, R. A., & Aminah, S. (2025). Revolusi Teknologi dalam Arsitektur Komputer: Tantangan dan Peluang di Era Digital. *Kohesi: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 9(5).
- Ederhion, J., Zindozin, F., Owusu, H., Ozoomezim, C., Okere, M., Owolabi, O., Fagbo, O., & Oluwatosin, O. (2024). *Evolution, Challenges, and Optimization in Computer Architecture: The Role of Reconfigurable Systems* (pp. 1–11). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.19234>
- Gebremichael, L. (2024). Scalability and Efficiency in Multi-Core and Many-Core Advanced Computing Systems. *Journal of Advanced Computing Systems (JACS)*, 4(8), 45–53. <https://doi.org/10.69987/JACS.2024.40905>
- Gill, S. S., Wu, H., Patros, P., Ottaviani, C., Arora, P., Puyol, V. C., Haunschild, D., Parlikad, A. K., Cetinkaya, O., Lutfiyya, H., Stankovski, V., Li, R., Ding, Y., Qadir, J., Abraham, A., Ghosh, S. K., Song, H. H., Sakellariou, R., Rana, O., ... Buyya, R. (2024). Modern Computing: Vision and Challenges. *Telematics and Informatics Reports*, 13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.teler.2024.100116>
- Hanif, & Sugiantoro, B. (2025). Literature Review: Evolusi Arsitektur Komputer dalam Konteks Sistem Organisasi Komputer. *Jurnal Media Informatika [JUMIN]*, 6(4), 2452–2457.
- Hayati, E., Wulandari, P., & Irianto. (2024). Pengaruh Desain Arsitektur Komputer Terhadap Efisiensi Operasional dan Kinerja Sistem Terintegrasi. *JULIKOM: Jurnal Ilmu Komputer*, 1(1), 1–5.
- Kania, J. P. (2021). Modern Computer Architecture Using Different Technique. *International Journal of Computer Applications*, 183(36), 47–53.
- Lumpp, F., Barchi, F., Acquaviva, A., & Bombieri, N. (2023). On the Containerization and Orchestration of RISC-V Architectures for Edge-Cloud Computing. In *3rd Eclipse Security, AI, Architecture and Modelling Conference on Cloud to Edge Continuum (ESAAM 2023)*, Oktober, 21–28. <https://doi.org/10.1145/3624486.3624490>
- Mammadov, E., Asgarov, A., & Mammadova, A. (2025). The Role of Artificial Intelligence in Modern Computer Architecture: From Algorithms to Hardware Optimization. *Porta Universorum*, 1(2), 65–71. <https://doi.org/https://doi.org/10.69760/portuni.010208>
- Maulana, A., Putri, A., Syakir, M. A. F., Saputra, R. S., & Lestari, M. D. (2025). RISC vs CISC: Studi Kinerja dan Efisiensi dalam Organisasi Arsitektur Komputer. *Jupiter: Publikasi Ilmu Keteknikan Industri, Teknik Elektro Dan Informatika*, 3(4), 157–171. <https://doi.org/https://doi.org/10.61132/jupiter.v3i4.973>
- Muthusamy, K. (2025). Innovative Architectural Designs for Next-Generation High- Performance Computing. *International Journal of Emerging Research in Engineering and Technology*, 6(1), 10–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.63282/3050-922X/IJERET-V6I1P102>
- Pacini, F., Pacini, T., Lai, G., Zocco, A. M., & Fanucci, L. (2024). Design and Evaluation of CPU-, GPU-, and FPGA-Based Deployment of a CNN for Motor Imagery Classification in Brain-Computer Interfaces. *Electronics*, 13. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/electronics13091646>

- Rizky, M. (2024). Sistem Operasi dan Arsitektur Komputer: Inovasi dan Tren Terbaru. *Logicloom.Id*, 1(7), 1–21.
- Satria, A., Simbolon, A. P., & Purba, W. K. (2023). Adaptasi Organisasi Terhadap Perkembangan Arsitektur Komputer Modern. *JUIT: Jurnal Ilmiah Teknik*, 2(3), 43–49.
- Sulaeman, D. A., Sya'bani, I. N., Azka, M. A. A., & Aribowo, D. (2023). Ruang Lingkup Organisasi dan Arsitektur Komputer. *Jurnal Elektronika Dan Teknik Informatika Terapan (JENTIK)*, 1(4), 164–177. <https://doi.org/https://doi.org/10.59061/jentik.v1i4.519>
- Torphy, S. (2023). Exploring the Evolution and Recent Trends in Computer Architecture. *Journal of Global Research in Computer Sciences*, 14(1), 9–11. <https://doi.org/10.4172/2229-371X.14.1.004>
- Vaithianathan, M. (2025). Memory Hierarchy Optimization Strategies for High-Performance Computing Architectures. *International Journal of Emerging Trends in Computer Science and Information Technology*, 1(1), 24–35.
- Wu, N., & Xie, Y. (2023). A Survey of Machine Learning for Computer Architecture and Systems. *ACM Computing Surveys*, 55(3). <https://doi.org/10.1145/3494523>
- Ziliwu, I. N. (2025). Analisis Hierarki Memori pada Organisasi Arsitektur Komputer. *IDENTIK: Jurnal Ilmu Ekonomi, Pendidikan Dan Teknik*, 02(01), 166–174.