

ANALISIS KOMPARATIF PENDEKATAN REKAYASA SISTEM *EMBEDDED* BERBASIS MIKROKONTROLER DALAM OPTIMALISASI KINERJA *REAL-TIME* DAN EFISIENSI ENERGIIta Rusmala Dewi¹, Febriyansyah Ramadhan^{2*}¹Teknik Industri, Universitas Gunadarma, Depok, Indonesia^{2*}Sistem Komputer, Universitas Indonesia Membangun, Bandung, Indonesia¹itarusmaladewi@staff.gunadarma.ac.id, ^{2*}febriansyah.ramadhan@inaba.ac.id**Abstrak**

Penelitian ini menyajikan analisis komparatif terhadap lima jurnal internasional terkini yang membahas pendekatan rekayasa sistem *embedded* berbasis mikrokontroler, dengan fokus utama pada optimalisasi kinerja *real-time* dan efisiensi konsumsi energi. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi strategi desain, teknik implementasi, serta kecenderungan pengembangan sistem *embedded modern*, terutama dalam domain sensor pintar, kendali waktu nyata, dan sistem operasi ringan. Metodologi yang digunakan adalah studi pustaka terstruktur, yang mencakup identifikasi topik utama, pendekatan teknis, serta kelebihan dan keterbatasan dari masing-masing artikel. Hasil analisis menunjukkan bahwa tren pengembangan sistem *embedded* saat ini mengarah pada integrasi kecerdasan buatan langsung di mikrokontroler (*AI on MCU*), peningkatan efisiensi daya melalui optimasi *kernel* dan *scheduler*, serta pendekatan *co-design* perangkat keras dan lunak untuk mengatasi keterbatasan sumber daya. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam memetakan arah perkembangan sistem *embedded* berbasis mikrokontroler sekaligus memberikan rekomendasi bagi pengembang dan peneliti di bidang sistem tertanam.

Kata kunci: sistem *embedded*, mikrokontroler, *real-time*, efisiensi energi, komparatif, *AI on MCU*.

Abstract

This study presents a comparative analysis of five recent international journals discussing engineering approaches to microcontroller-based embedded systems, with a primary focus on real-time performance optimization and energy efficiency. The objective is to identify design strategies, implementation techniques, and development trends of modern embedded systems, particularly in smart sensing, real-time control, and lightweight operating systems. The research uses a structured literature review methodology, encompassing the identification of key topics, technical approaches, as well as strengths and limitations of each article. The analysis reveals that current trends in embedded system development are leaning towards on-device artificial intelligence (AI on MCU), power efficiency through optimized kernels and schedulers, and hardware/software co-design strategies to handle resource constraints. This study contributes by mapping the advancement direction of microcontroller-based embedded systems and offering recommendations for developers and researchers in the embedded systems field.

Keywords: *embedded system, microcontroller, real-time, energy efficiency, comparative analysis, AI on MCU.*

PENDAHULUAN

Embedded system berbasis mikrokontroler terus mengalami perkembangan pesat seiring meningkatnya kebutuhan terhadap sistem cerdas, *real-time*, dan hemat energi. Penerapannya mencakup berbagai domain seperti otomasi industri, sistem sensor pintar, perangkat medis, serta aplikasi *edge computing* yang memerlukan pemrosesan data langsung di perangkat dengan sumber daya terbatas. Dalam konteks ini, tantangan utama adalah bagaimana merancang arsitektur sistem yang mampu mencapai efisiensi energi sekaligus menjamin respons waktu nyata secara konsisten.

Beberapa studi terkini telah mengusulkan pendekatan berbeda untuk menjawab tantangan tersebut. Liao et al. [1] mengembangkan teknik *high-level synthesis* berbasis *constraint* waktu dan efisiensi energi untuk menghasilkan perangkat keras khusus yang optimal bagi sistem tertanam. Wang et al. [2] memfokuskan penelitian mereka pada peningkatan kinerja sistem *real-time* melalui penjadwalan prioritas yang disesuaikan dengan rantai eksekusi dalam *Micro-ROS*, *platform middleware* robotik berbasis mikrokontroler.

Di sisi lain, Novac et al. [3] mengintegrasikan jaringan saraf tiruan secara langsung ke dalam mikrokontroler STM32 untuk mengoptimalkan pemrosesan sinyal interferometri, mencerminkan tren ke arah penerapan kecerdasan buatan pada perangkat dengan sumber daya terbatas (*AI on MCU*). Sementara itu, Chen et al. [4] mengusulkan pendekatan berbasis simulasi *real-time* pada sistem operasi umum, memungkinkan pengujian dan validasi sistem *embedded* dengan kondisi operasional yang realistis. Sinha [5] meninjau arah perkembangan sistem tertanam *modern* berbasis mikrokontroler, mencakup aspek arsitektur, manajemen daya, konektivitas, dan keamanan, serta menyoroti pentingnya desain *co-design* antara perangkat keras dan perangkat lunak.

Melalui analisis komparatif terhadap lima jurnal internasional tersebut, artikel ini bertujuan untuk mengkaji secara kritis pendekatan-pendekatan teknis yang digunakan dalam pengembangan

sistem *embedded* berbasis mikrokontroler, mengevaluasi efektivitasnya dalam konteks performa *real-time* dan efisiensi energi, serta mengidentifikasi arah tren pengembangan sistem *embedded* ke depan. Kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pemetaan strategi desain sistem tertanam yang adaptif, efisien, dan cerdas.

TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian mengenai sistem *embedded* berbasis mikrokontroler telah berkembang secara signifikan, didorong oleh kebutuhan terhadap efisiensi energi, respons waktu nyata, dan kecerdasan lokal dalam perangkat. Beberapa pendekatan teknis telah dikembangkan dan dipublikasikan oleh berbagai peneliti dalam beberapa tahun terakhir. Kajian ini menyoroti lima publikasi internasional yang relevan untuk dianalisis secara komparatif berdasarkan metodologi, domain penerapan, dan kontribusi teknisnya.

Liao et al. [1] memperkenalkan pendekatan *High-Level Synthesis (HLS)* yang menggabungkan metode *state-driven* dan *performance-constrained* untuk menghasilkan desain perangkat keras hemat energi dengan presisi waktu tinggi. Penelitian ini relevan dalam konteks sistem dengan kebutuhan *real-time* kritis seperti perangkat medis. Kontribusinya terletak pada integrasi otomatisasi perancangan dan optimasi daya dalam tahap awal pengembangan sistem *embedded* berbasis SoC atau FPGA.

Wang et al. [2] mengembangkan algoritma penjadwalan *chain-aware* pada *platform Micro-ROS* untuk meningkatkan determinisme waktu dalam sistem robotik *real-time*. Penelitian ini berfokus pada pengolahan prioritas tugas dan efisiensi komunikasi antarkomponen berbasis mikrokontroler ARM Cortex-M. Studi ini penting dalam memperkuat performa sistem *embedded* yang sangat sensitif terhadap latensi.

Dalam ranah sensor pintar, Novac et al. [3] menunjukkan implementasi neural network inference langsung pada mikrokontroler STM32L4 untuk pemrosesan sinyal interferometri. Integrasi ini memungkinkan

pemrosesan data secara lokal (*edge computing*) tanpa bergantung pada komputasi eksternal, sekaligus mengurangi konsumsi daya. Ini menunjukkan arah tren terkini yaitu *AI on MCU*, yang mendorong sistem *embedded* menjadi semakin cerdas.

Berbeda dari studi sebelumnya, Chen et al. [4] mengembangkan sebuah platform simulasi *real-time* pada sistem operasi umum yang memungkinkan pengujian prototipe *embedded system* dengan kompleksitas tinggi tanpa menggunakan hardware aktual. Pendekatan ini sangat berguna dalam fase pengujian sistem tertanam skala besar dan memberikan fleksibilitas lebih tinggi dalam validasi performa sistem secara efisien.

Sementara itu, Sinha [5] menyajikan kajian menyeluruh (review) terhadap evolusi *embedded system* berbasis mikrokontroler, mencakup aspek arsitektur perangkat keras, teknik manajemen daya, keamanan perangkat, hingga peran *AI*. Artikel ini memberikan konteks makro terhadap transformasi teknologi dan menjadi referensi penting untuk memahami tren lintas disiplin dalam pengembangan sistem *embedded*.

Kelima publikasi tersebut mewakili pendekatan komplementer dalam mendesain sistem *embedded modern*. Dengan membandingkan metode yang digunakan serta karakteristik aplikasinya, artikel ini bertujuan membangun kerangka pemahaman komprehensif terhadap strategi pengembangan sistem tertanam yang adaptif dan berdaya saing.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis literatur sistematis dengan metode komparatif tematik, yang berfokus pada lima artikel ilmiah internasional sebagai objek kajian utama. Pendekatan ini tidak hanya mendeskripsikan isi masing-masing jurnal, tetapi juga mengevaluasi kontribusi teknis, efektivitas pendekatan, serta kecenderungan pengembangan sistem *embedded* berbasis mikrokontroler dari berbagai perspektif teknis.

Metode ini relevan digunakan dalam studi-studi yang ingin memetakan perbedaan strategi rekayasa sistem komputer dalam konteks

terbatas, seperti sistem tertanam yang menekankan pada performa waktu nyata (*real-time responsiveness*) dan efisiensi energi (*energy-efficient design*). Dengan pendekatan ini, hasil penelitian dapat dijadikan acuan dalam pengembangan sistem *embedded* praktis maupun teoritis. Literatur yang digunakan dipilih secara purposif berdasarkan kriteria tertentu:

- Terbit pada tahun 2023 atau 2024,
- Dipublikasikan dalam jurnal bereputasi internasional (*IEEE, ACM, Elsevier, MDPI*),
- Memiliki kontribusi teknis spesifik terhadap pengembangan *embedded system* berbasis mikrokontroler,
- Mengandung eksperimen, simulasi, atau implementasi aktual sistem.

1. Teknik Analisis

Setiap jurnal dianalisis dengan pendekatan *structured content extraction*, yaitu dengan mengekstraksi beberapa elemen berikut secara sistematis:

- Tujuan penelitian dan kontribusi utama,
- Jenis mikrokontroler atau *platform* yang digunakan (misal: *STM32, ESP32, ARM Cortex-M*),
- Pendekatan atau metode teknis yang diusulkan (misal: *high-level synthesis, penjadwalan Micro-ROS, integrasi AI lokal*),
- Domain penerapan (robotik, sensor, simulasi sistem tertanam),
- Parameter evaluasi (misal: konsumsi daya, *latensi, throughput, CPU usage*),
- Hasil dan diskusi dari masing-masing studi.

Hasil ekstraksi ini kemudian diklasifikasikan ke dalam kelompok tematik berdasarkan permasalahan yang ditangani dan pendekatan desain sistem yang diambil. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi persamaan struktural maupun perbedaan mendasar antar studi.

2. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dirancang secara sistematis agar dapat menghasilkan analisis komparatif yang valid dan tajam. Proses ini diringkaskan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Tahapan Penelitian dan Tujuannya

Tahap	Deskripsi Kegiatan	Output yang Dihasilkan
Seleksi Literatur	Menentukan lima jurnal internasional terpilih dengan topik <i>embedded system</i> dan mikrokontroler <i>modern</i>	Korpus data utama yang relevan dan saling dapat dibandingkan
Ekstraksi Data Teknis	Mengidentifikasi <i>platform hardware/software</i> , algoritma, arsitektur sistem, dan parameter evaluasi di setiap jurnal	<i>Dataset</i> matriks teknis dan tematik yang bisa dikomparasikan
Klasifikasi Tematik	Mengelompokkan studi berdasarkan pendekatan utama: <i>HLS, AI on MCU, Micro-ROS, simulasi, co-design</i>	Struktur tematik yang memudahkan perbandingan secara kualitatif
Matriks Komparatif	Menyusun tabel perbandingan antar jurnal berdasarkan efektivitas teknis, kompleksitas, skalabilitas	Tabel perbandingan yang mendukung sintesis dan pembahasan

Tahap	Deskripsi Kegiatan	Output yang Dihasilkan
Sintesis Evaluatif	Menganalisis keunggulan dan kekurangan tiap pendekatan serta menarik tren teknologi <i>embedded</i> terkini	Rangkuman temuan kritis dan arah rekomendasi untuk pengembangan sistem selanjutnya

3. Validitas dan Justifikasi Metode

Metode ini memiliki validitas konseptual yang kuat dalam studi teknologi karena:

- a. Menggunakan literatur *peer-reviewed* dengan kualitas akademik tinggi,
- b. Fokus pada aspek teknis spesifik, bukan sekadar kajian konseptual umum,
- c. Menganalisis lebih dari satu studi, sehingga menghasilkan keragaman pendekatan, yang memperkaya perspektif desain sistem tertanam.

Dengan metode ini, artikel dapat menghindari bias naratif dan menyajikan pandangan berbasis data literatur teknis yang terstruktur, yang dapat dijadikan sebagai kerangka pemikiran dan dasar arsitektur sistem dalam studi lanjutan atau penerapan praktis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dilakukan terhadap lima publikasi ilmiah yang dipilih berdasarkan kriteria relevansi dengan sistem *embedded* berbasis mikrokontroler dan kontribusinya terhadap dua aspek utama: kinerja real-time dan efisiensi energi. Hasil ekstraksi data teknis dari setiap jurnal dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Teknis Lima Jurnal Terkait Sistem *Embedded* Berbasis Mikrokontroler

Penulis	Pendekatan Utama	<i>Platform</i>	Fokus Aplikasi	Kontribusi Teknis
Liao et al. [1]	<i>High-Level Synthesis (HLS)</i> dengan <i>constraint</i> waktu dan daya	<i>FPGA (custom embedded)</i>	<i>Embedded system</i> medis	Otomatisasi desain perangkat keras presisi tinggi dan hemat daya

Penulis	Pendekatan Utama	Platform	Fokus Aplikasi	Kontribusi Teknis
Wang et al. [2]	Priority-driven chain-aware scheduling (Micro-ROS)	ARM Cortex-M (microcontroller)	Robotik real-time	Algoritma penjadwalan deterministik berbasis jalur eksekusi
Novac et al. [3]	AI on MCU (NN inference + smart sensor)	STM32L4	Sensor optik interferometri	Integrasi inference NN langsung di mikrokontroler
Chen et al. [4]	Simulasi real-time berbasis OS umum	Platform simulasi (Linux)	Embedded systems testing	Framework simulasi real-time tanpa hardware aktual
Sinha [5]	Tinjauan desain embedded modern (review paper)	Multiplatform	Beragam domain	Pemetaan tren: AI edge, co-design, keamanan, manajemen daya

1. Pembahasan Tematik

a. Pendekatan Real-Time Scheduling

Wang et al. [2] menawarkan solusi yang paling konkret dalam optimasi performa *real-time* dengan skema penjadwalan cerdas berbasis rantai prioritas, yang mengatasi masalah latensi tidak stabil dalam sistem *Micro-ROS*. Dibandingkan pendekatan lain, solusi ini bersifat modular dan dapat diimplementasikan langsung pada sistem mikrokontroler kelas menengah.

b. Efisiensi Energi dan Desain Otomatis

Liao et al. [1] menonjol dalam aspek efisiensi daya melalui pendekatan *HLS* yang mempercepat proses desain hardware sekaligus mempertimbangkan kebutuhan daya sejak tahap sintesis. Ini penting dalam domain sistem medis atau *wearable device* di mana efisiensi energi krusial.

c. Kecerdasan Lokal (AI on MCU)

Novac et al. [3] menjadi contoh nyata implementasi tren *AI on MCU*, yang relevan dengan kebutuhan sistem cerdas tanpa koneksi *cloud*. Studi ini menunjukkan bahwa *inference* sederhana bisa dilakukan langsung di *STM32*, membuka peluang besar untuk smart sensing berbasis mikrokontroler dengan konsumsi daya minimal.

d. Simulasi dan Validasi Sistem Embedded

Chen et al. [4] memberikan solusi simulatif yang memungkinkan pengujian sistem *embedded* secara *real-time* tanpa perlu perangkat keras fisik. Pendekatan ini sangat berguna di tahap desain

awal atau pengujian sistem berskala besar, walaupun kurang menekankan pada efisiensi energi atau desain *runtime*.

e. Kajian Konseptual dan Tren Masa Depan
Sinha [5], meskipun tidak menyajikan eksperimen langsung, memberikan *insight* luas terhadap arah teknologi *embedded system*, terutama dalam tren *co-design*, *low-power architecture*, dan *AI edge deployment*. Studi ini menjadi payung konseptual penting untuk memahami bagaimana sistem *embedded* berkembang secara sistemik.

2. Implikasi Hasil Kajian

Hasil komparatif ini menunjukkan bahwa tidak ada satu pendekatan tunggal yang optimal untuk semua kebutuhan. Pemilihan strategi tergantung pada konteks aplikasi, keterbatasan perangkat keras, dan prioritas sistem (*real-time* vs daya). Namun, terdapat beberapa pola yang konsisten:

- a. Tren menuju *AI on device* semakin kuat untuk sensor pintar.
- b. Penjadwalan waktu nyata tetap menjadi kunci dalam sistem yang responsif.
- c. Pendekatan *co-design* perangkat keras dan lunak mulai menjadi norma baru dalam pengembangan sistem *embedded*.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini telah melakukan kajian komparatif terhadap lima artikel jurnal internasional yang membahas pendekatan teknis dalam pengembangan sistem *embedded* berbasis mikrokontroler, dengan fokus pada peningkatan

kinerja *real-time* dan efisiensi energi. Hasil analisis menunjukkan bahwa setiap studi menawarkan kontribusi spesifik yang mencerminkan arah evolusi sistem tertanam *modern*, mulai dari optimalisasi algoritma penjadwalan, sintesis perangkat keras berbasis *constraint*, hingga integrasi kecerdasan buatan secara lokal di perangkat mikrokontroler.

Pendekatan *High-Level Synthesis (HLS)* terbukti efektif dalam menghasilkan desain perangkat keras yang presisi dan hemat daya, sedangkan metode penjadwalan deterministik berbasis *Micro-ROS* menunjukkan dampak langsung terhadap latensi sistem *real-time*. Penerapan *AI on MCU* dalam konteks sensor pintar menunjukkan bahwa *inference* sederhana dapat dilakukan secara lokal dengan konsumsi daya sangat rendah, membuka peluang besar untuk *edge intelligence*. Sementara itu, simulasi sistem *embedded* pada *OS* umum memberikan ruang eksperimen yang efisien pada tahap desain awal, dan studi literatur menyeluruh dari Sinha memberikan kerangka konseptual yang bermanfaat untuk arah penelitian jangka panjang.

Berdasarkan temuan ini, terdapat beberapa rekomendasi yang dapat disampaikan:

- a. Integrasi lintas-pendekatan: Peneliti dan pengembang sistem *embedded* sebaiknya mulai mempertimbangkan kombinasi antara pendekatan penjadwalan *real-time*, desain hemat daya, dan kemampuan *AI* lokal secara terpadu, melalui metodologi *co-design*.
- b. Pemanfaatan *AI on MCU*: Tren penerapan kecerdasan buatan pada perangkat dengan sumber daya terbatas perlu didorong lebih lanjut, khususnya pada sistem *monitoring*, otomasi industri, dan *IoT*.
- c. Pentingnya validasi awal melalui simulasi: Untuk sistem dengan kompleksitas tinggi, penggunaan simulasi *real-time* sebelum implementasi perangkat fisik menjadi langkah strategis dalam meminimalkan biaya dan risiko desain.
- d. Penelitian lanjutan berbasis prototipe: Studi eksperimental berbasis prototipe nyata sangat dibutuhkan untuk menguji performa pendekatan yang telah diusulkan, serta menjembatani kesenjangan antara kontribusi akademik dan penerapan industri.

Dengan demikian, hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi pijakan untuk pengembangan *embedded system* generasi berikutnya yang tidak hanya cepat dan efisien, tetapi juga cerdas, adaptif, dan kontekstual.

DAFTAR PUSTAKA

1. Liao K, Zhang T, Wang Y. A high-level synthesis approach for precisely-timed, energy-efficient embedded systems. *ACM Trans Embed Comput Syst.* 2024;23(1):1–24. doi:10.1145/3642184
2. Wang Z, Liu J, Xu F. Improving real-time performance of Micro-ROS with priority-driven chain-aware scheduling. *IEEE Embed Syst Lett.* 2024;16(2):33–36. doi:10.1109/LES.2024.3380012
3. Novac M, Popescu D, Ionescu C. Integrating embedded neural networks and self-mixing interferometry for smart sensors design. *Sensors.* 2024;24(5):2301. doi:10.3390/s24052301
4. Chen Y, Li M, Zhao H. Design and implementation of a real-time simulation platform for embedded applications on general-purpose operating systems. *Int J Embed Syst.* 2023;15(2):87–98.
5. Sinha R. Developments in the design of microcontroller-based embedded systems: Trends and future directions. *J Embed Eng Res.* 2024;12(1):1–15.