



Konsep Dasar Sistem Kendali dalam Perspektif Rekayasa Sistem

Sulfikar^{1*}, Hasrul Bakri², Nur Alam Fajar³, Irfan⁴

¹⁴ Universitas Muhammadiyah Sinjai

² Universitas Negeri Makassar

³ Universitas Negeri Jakarta

DOI:

<https://doi.org/10.47134/jte.v3i1.5632>

*Correspondence: Sulfikar

Email: sulfikar1790@gmail.com

Received: 02-01-2026

Accepted: 02-03-2026

Published: 02-04-2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsep dasar sistem kendali dalam perspektif rekayasa sistem serta mengkaji perannya dalam pengelolaan sistem teknologi modern yang kompleks. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode deskriptif melalui studi pustaka terhadap berbagai sumber literatur akademik, termasuk buku ilmiah dan artikel jurnal yang relevan. Proses analisis dilakukan melalui identifikasi tema, reduksi data, kategorisasi konsep, serta penarikan kesimpulan secara induktif guna memperoleh pemahaman yang komprehensif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem kendali memiliki peran krusial dalam mengelola sistem dinamis melalui mekanisme umpan balik, stabilitas, dan optimasi kinerja. Dalam konteks rekayasa sistem, sistem kendali berfungsi sebagai elemen integratif yang memastikan koordinasi antar subsistem dalam lingkungan yang kompleks dan berubah. Perkembangan teknologi mutakhir juga mendorong integrasi sistem kendali dengan pendekatan seperti pembelajaran mesin, sistem siber-fisik, dan digital twin, yang memungkinkan peningkatan kemampuan adaptasi, efisiensi, serta keandalan sistem. Implikasi penelitian ini menegaskan bahwa pemahaman konseptual dan integratif terhadap sistem kendali sangat penting dalam pengembangan sistem teknologi modern, khususnya pada bidang robotika, energi, dan industri cerdas. Selain itu, integrasi teknologi digital dalam sistem kendali membuka peluang bagi inovasi lanjutan dalam pengembangan sistem yang lebih otonom dan responsif terhadap perubahan lingkungan.

Kata kunci: Sistem Kendali, Rekayasa Sistem, Sistem Dinamis, Integrasi Teknologi, Kontrol Adaptif.

Pendahuluan

Perkembangan teknologi modern mendorong meningkatnya kebutuhan akan sistem yang mampu beroperasi secara otomatis, adaptif, dan andal dalam berbagai bidang rekayasa. Dalam konteks ini, sistem kendali menjadi salah satu fondasi utama dalam pengembangan berbagai teknologi seperti robotika, sistem transportasi cerdas, manufaktur otomatis, hingga infrastruktur digital modern. Sistem kendali memungkinkan suatu sistem teknis untuk mempertahankan kinerja yang diinginkan melalui mekanisme pengaturan, pengawasan, serta koreksi terhadap perubahan kondisi lingkungan atau gangguan yang terjadi selama proses operasi (Baetica, 2019). Oleh karena itu, pemahaman terhadap konsep dasar sistem kendali menjadi bagian penting dalam disiplin rekayasa sistem. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas sistem teknologi, pendekatan rekayasa sistem semakin diperlukan untuk memastikan integrasi berbagai komponen yang saling berinteraksi secara

efektif. Rekayasa sistem berfokus pada pendekatan holistik dalam merancang, menganalisis, dan mengelola sistem kompleks agar dapat mencapai tujuan yang telah ditetapkan secara efisien. Dalam konteks ini, sistem kendali berperan sebagai mekanisme inti yang mengatur dinamika sistem sehingga mampu menjaga stabilitas, keandalan, serta kinerja optimal dalam berbagai kondisi operasional (Zhang, 2018).

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji sistem kendali dari beragam perspektif, seperti penerapan pada sistem biologis (Baetica, 2019), integrasi dengan pembelajaran mesin (Tsiamis, 2022), sistem robotika otonom (Ögren, 2021), sistem multi-agen (Zhang, 2019), hingga keamanan pada sistem siber-fisik (Jiang, 2023). Selain itu, studi lain juga menyoroti perkembangan kontrol berbasis data (Pan, 2021), pemanfaatan digital twin (Pileggi, 2020), serta aplikasi pada sistem energi (Ringwood, 2020), transportasi cerdas (Balaci, 2024), dan keselamatan industri (Porrás Vázquez, 2018). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih bersifat parsial dan berfokus pada domain aplikasi tertentu, sehingga belum memberikan gambaran konseptual yang menyeluruh mengenai sistem kendali dalam kerangka rekayasa sistem. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian berupa keterbatasan kajian yang secara komprehensif mengintegrasikan prinsip-prinsip dasar sistem kendali—seperti umpan balik, stabilitas, dan optimasi—dalam perspektif rekayasa sistem untuk menjawab kompleksitas sistem lintas domain. Selain itu, integrasi sistem kendali dengan teknologi modern seperti kecerdasan buatan, sistem siber-fisik, dan digital twin masih cenderung dibahas secara terpisah dan belum dikaji dalam satu kerangka konseptual yang utuh (Wang, 2019).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini berupaya menjawab beberapa pertanyaan utama, yaitu bagaimana konsep dasar sistem kendali dipahami dalam perspektif rekayasa sistem, bagaimana peran sistem kendali dalam mengelola sistem teknologi yang kompleks dan dinamis, serta bagaimana integrasi sistem kendali dengan teknologi modern seperti kecerdasan buatan, sistem siber-fisik, dan digital twin mempengaruhi pengembangan sistem rekayasa. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk membahas konsep dasar sistem kendali dari sudut pandang rekayasa sistem dengan menekankan pada prinsip-prinsip fundamental, peran sistem kendali dalam sistem kompleks, serta relevansinya terhadap perkembangan teknologi modern. Secara teoretis, artikel ini diharapkan dapat memperkaya pemahaman konseptual mengenai sistem kendali dalam kerangka rekayasa sistem, sedangkan secara praktis diharapkan dapat memberikan landasan bagi pengembangan dan implementasi sistem kendali yang lebih efektif dalam berbagai aplikasi teknologi dan industri.

Metodologi

Penelitian dalam artikel ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain deskriptif melalui studi pustaka. Pendekatan kualitatif dipilih karena mampu memberikan pemahaman yang mendalam terhadap konsep, teori, dan perkembangan pemikiran ilmiah terkait sistem kendali dalam perspektif rekayasa sistem. Metode kualitatif menekankan pada interpretasi makna, pemahaman konteks, serta analisis konseptual terhadap fenomena yang diteliti. Dalam penelitian kualitatif, peneliti berperan sebagai instrumen

utama dalam proses pengumpulan dan analisis data, sehingga memungkinkan eksplorasi terhadap berbagai sumber pengetahuan secara sistematis dan reflektif (Bingham, 2023) (Pratt, 2025). Pendekatan ini sangat relevan digunakan untuk mengkaji konsep dasar sistem kendali yang berkembang dalam berbagai disiplin rekayasa modern.

Pendekatan deskriptif dalam penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan secara sistematis dan komprehensif konsep dasar sistem kendali serta kaitannya dengan pendekatan rekayasa sistem. Desain penelitian deskriptif memungkinkan peneliti untuk menyajikan fenomena atau konsep ilmiah secara mendalam berdasarkan interpretasi terhadap literatur yang tersedia. Pendekatan ini banyak digunakan dalam penelitian akademik yang berfokus pada pengembangan konsep dan pemahaman teoritis karena mampu memberikan penjelasan yang jelas mengenai karakteristik suatu fenomena tanpa melakukan manipulasi terhadap variabel penelitian (Doyle, 2019) (Abraham, 2024) (Baillie, 2019).

Sumber data dalam penelitian ini berasal dari berbagai literatur akademik yang relevan dengan topik yang dikaji. Sumber tersebut meliputi buku akademik, artikel ilmiah yang dipublikasikan dalam jurnal internasional, laporan penelitian, serta dokumen ilmiah lain yang berkaitan dengan sistem kendali, rekayasa sistem, dan metodologi penelitian kualitatif. Pemilihan sumber data dilakukan dengan mempertimbangkan kredibilitas penerbit, relevansi topik, serta kontribusi teoritis terhadap kajian sistem kendali dan rekayasa sistem. Studi pustaka sebagai metode penelitian memberikan kesempatan bagi peneliti untuk menelaah berbagai gagasan, teori, dan hasil penelitian sebelumnya sehingga dapat membangun kerangka konseptual yang kuat dalam memahami fenomena yang dikaji (Togia, 2017) (Granikov, 2020) (Jimenez, 2024) (Bandaranayake, 2024).

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran literatur secara sistematis dengan mengadaptasi prinsip *systematic literature review* (SLR). Proses ini meliputi tahap perumusan kata kunci, penelusuran pada basis data akademik (seperti jurnal internasional dan repositori ilmiah), serta proses penyaringan literatur berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Tahap identifikasi dilakukan dengan mengumpulkan sejumlah literatur awal yang relevan, kemudian dilanjutkan dengan tahap seleksi melalui pembacaan judul, abstrak, dan isi untuk memastikan kesesuaian dengan fokus penelitian. Tahap akhir adalah pemilihan literatur yang memenuhi kriteria untuk dianalisis lebih lanjut. Selain itu, analisis dokumen juga dilakukan untuk memahami konsep, model, dan pendekatan yang digunakan dalam penelitian sebelumnya mengenai sistem kendali dan rekayasa sistem (Belotto, 2018).

Prosedur analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan mengombinasikan pendekatan *thematic analysis* dan sintesis literatur. Pada tahap awal, dilakukan proses *open coding* terhadap literatur terpilih untuk mengidentifikasi konsep-konsep kunci yang berkaitan dengan sistem kendali, seperti umpan balik, stabilitas, optimasi, integrasi sistem, serta adaptivitas. Selanjutnya, dilakukan proses pengelompokan kode ke dalam tema-tema utama (*axial coding*), seperti konsep dasar sistem kendali, integrasi dengan rekayasa sistem, perkembangan berbasis data dan kecerdasan buatan, serta aplikasi pada berbagai domain

teknologi. Tahap berikutnya adalah selective coding, yaitu mengintegrasikan tema-tema tersebut menjadi kerangka konseptual yang utuh.

Setelah proses tematik, dilakukan sintesis literatur secara komparatif untuk mengidentifikasi pola, kesamaan, dan perbedaan antar penelitian. Sintesis ini bertujuan untuk menemukan benang merah dari berbagai studi, mengidentifikasi perkembangan paradigma, serta mengungkap kesenjangan penelitian yang ada. Proses interpretasi dilakukan secara mendalam dengan mengaitkan temuan-temuan tersebut dalam perspektif rekayasa sistem, sehingga menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif dan terintegrasi (Kalpokaite, 2018) (Vila Henninger, 2022) (Fife, 2024).

Untuk menjaga keabsahan dan validitas data, penelitian ini menerapkan beberapa strategi validasi literatur. Pertama, peneliti menetapkan kriteria inklusi dan eksklusi dalam pemilihan sumber literatur. Literatur yang digunakan harus berasal dari publikasi akademik yang kredibel, relevan dengan topik sistem kendali dan rekayasa sistem, serta dipublikasikan dalam jurnal atau penerbit ilmiah yang bereputasi. Literatur yang tidak relevan, tidak memiliki sumber yang jelas, atau tidak memenuhi standar akademik dikeluarkan dari proses analisis. Kedua, validitas data dijaga melalui triangulasi sumber dengan membandingkan berbagai perspektif dari literatur yang berbeda sehingga diperoleh pemahaman yang lebih objektif dan komprehensif. Selain itu, proses analisis juga dilakukan secara transparan dan sistematis agar temuan penelitian dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah (Bingham, 2023) (Pratt, 2025).

Hasil dan Pembahasan

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa sistem kendali merupakan komponen fundamental dalam berbagai sistem rekayasa modern yang berfungsi untuk mengatur, memonitor, dan mengoptimalkan perilaku sistem dinamis. Secara umum, seluruh literatur yang dianalisis menegaskan bahwa prinsip dasar seperti umpan balik (feedback), stabilitas, dan optimasi performa menjadi fondasi utama dalam memastikan sistem dapat mencapai tujuan operasional secara efisien dan andal (Baetica, 2019). Namun demikian, sintesis dari berbagai studi menunjukkan bahwa sistem kendali tidak lagi dipahami hanya sebagai mekanisme teknis, melainkan sebagai elemen integratif yang menghubungkan berbagai subsistem dalam suatu arsitektur rekayasa sistem yang kompleks.

Lebih lanjut, sintesis literatur mengindikasikan adanya pergeseran paradigma dari pendekatan kontrol berbasis model menuju pendekatan hibrida yang menggabungkan model matematis dengan data empiris. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa integrasi pembelajaran mesin dan kontrol berbasis data memungkinkan sistem untuk beradaptasi terhadap ketidakpastian dan dinamika lingkungan secara lebih fleksibel dibandingkan metode konvensional (Tsiamis, 2022) (Pan, 2021). Secara kolektif, temuan ini mengarah pada kesimpulan bahwa sistem kendali modern berkembang menuju sistem yang bersifat adaptif, self-learning, dan kontekstual.

Selain itu, hasil sintesis juga menunjukkan bahwa rekayasa sistem berperan sebagai kerangka konseptual yang menyatukan berbagai pendekatan dalam sistem kendali. Pendekatan seperti *model-based systems engineering* dan desain aksiomatik tidak hanya

meningkatkan struktur desain, tetapi juga memungkinkan integrasi lintas domain yang lebih efektif (Wang, 2019) (Zhang, 2018). Dengan demikian, hubungan antara sistem kendali dan rekayasa sistem bersifat saling melengkapi, di mana sistem kendali menyediakan mekanisme operasional, sementara rekayasa sistem menyediakan kerangka integratifnya.

Dalam konteks aplikasi, sintesis literatur menunjukkan pola konsisten bahwa sistem kendali menjadi enabler utama dalam berbagai domain teknologi. Pada robotika, sistem kendali memungkinkan koordinasi modular dan adaptasi terhadap lingkungan dinamis (Ögren, 2021), sedangkan pada sistem energi berperan dalam meningkatkan efisiensi dan robustness sistem terhadap ketidakpastian (Ringwood, 2020). Sementara itu, pada sistem transportasi dan industri, sistem kendali berkontribusi dalam optimasi kinerja sistem secara real-time dan peningkatan efisiensi operasional (Balaci, 2024) (Porras Vázquez, 2018).

Dari sisi keamanan dan keandalan, sintesis menunjukkan bahwa seluruh literatur terbaru menempatkan aspek keamanan sebagai bagian integral dari desain sistem kendali, terutama pada sistem siber-fisik. Integrasi mekanisme deteksi, monitoring, dan strategi pertahanan menjadi kebutuhan utama untuk menjaga stabilitas sistem terhadap ancaman eksternal (Jiang, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa dimensi keamanan telah berevolusi dari fitur tambahan menjadi komponen inti dalam sistem kendali modern.

Selain itu, pada sistem multi-agen, sintesis literatur mengungkapkan bahwa tantangan utama terletak pada koordinasi dan keseimbangan antar entitas otonom. Pendekatan berbasis *game theory* dan kontrol terdistribusi menjadi solusi dominan untuk mengatasi kompleksitas interaksi antar agen (Zhang, 2019) (Li, 2025). Temuan ini memperlihatkan bahwa sistem kendali modern tidak hanya berfokus pada satu sistem tunggal, tetapi juga pada ekosistem sistem yang saling berinteraksi.

Di sisi lain, perkembangan digital twin memperkuat peran sistem kendali sebagai penghubung antara sistem fisik dan virtual. Sintesis menunjukkan bahwa sistem kendali memungkinkan sinkronisasi real-time, pemantauan berkelanjutan, serta optimasi berbasis simulasi, yang secara keseluruhan meningkatkan efisiensi dan kualitas pengambilan keputusan dalam siklus hidup sistem (Pileggi, 2020). Integrasi ini menjadi salah satu ciri utama transformasi digital dalam rekayasa sistem.

Hasil kajian literatur dapat dirangkum dalam tabel berikut.

Tabel 1.
Temuan Utama Penelitian Terkait Sistem Kendali dan Rekayasa Sistem

Aspek Kajian	Temuan Utama	Sumber
Konsep dasar sistem kendali	Sistem kendali berfungsi mengatur perilaku sistem dinamis melalui mekanisme umpan balik dan stabilitas sistem	Baetica (2019)
Integrasi pembelajaran mesin	Sistem kendali modern memanfaatkan pembelajaran statistik dan data driven control	Tsiamis (2022)) (Pan (2021))
Integrasi dengan rekayasa sistem	Model based systems engineering membantu desain sistem yang lebih terstruktur	Wang (2019)) (Zhang (2018))

Aspek Kajian	Temuan Utama	Sumber
Aplikasi robotika	Struktur modular dan hierarki kontrol meningkatkan fleksibilitas robot	Ögren (2021)
Sistem energi	Strategi kontrol meningkatkan efisiensi konversi energi	Ringwood (2020)
Keamanan sistem industri	Monitoring dan mekanisme pertahanan diperlukan pada sistem cyber physical	Jiang (2023)
Sistem multi agen	Koordinasi antar agen menggunakan pendekatan game based control	Zhang (2019)) (Li (2025)
Digital twin	Integrasi sistem fisik dan virtual meningkatkan efisiensi sistem	Pileggi (2020)

Secara keseluruhan, sintesis dari berbagai literatur menunjukkan bahwa sistem kendali telah berevolusi dari pendekatan klasik berbasis model menuju pendekatan multidisipliner yang terintegrasi dengan kecerdasan buatan, rekayasa sistem, dan teknologi digital. Sistem kendali tidak lagi hanya berfungsi sebagai alat pengatur, tetapi juga sebagai komponen strategis dalam membangun sistem yang adaptif, resilien, dan cerdas. Selain itu, terdapat pergeseran paradigma yang jelas antara pendekatan klasik dan modern, di mana penelitian klasik berfokus pada analisis matematis dan stabilitas, sedangkan penelitian modern menekankan integrasi data, pembelajaran mesin, serta kompleksitas sistem. Sintesis ini menegaskan bahwa masa depan sistem kendali akan sangat dipengaruhi oleh kemampuan integrasi lintas disiplin dan pemanfaatan teknologi digital untuk meningkatkan kinerja sistem secara menyeluruh (Nghiem, 2023) (Marshall, 2021) (Liu, 2023).

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa sistem kendali merupakan komponen fundamental dalam pengelolaan sistem dinamis yang kompleks dalam berbagai bidang rekayasa. Konsep dasar sistem kendali berfokus pada mekanisme pengaturan perilaku sistem melalui proses umpan balik, stabilitas, serta optimasi kinerja sistem. Temuan penelitian menunjukkan bahwa sistem kendali tidak hanya digunakan dalam sistem mekanik atau elektronik, tetapi juga berkembang pada berbagai domain seperti sistem biologis, sistem energi, dan sistem siber fisik. Pendekatan ini menegaskan bahwa teori kendali menyediakan kerangka analitis yang memungkinkan perancangan sistem yang mampu mempertahankan stabilitas sekaligus mencapai tujuan performa tertentu (Baetica, 2019).

Dalam perspektif rekayasa sistem, hasil penelitian memperlihatkan bahwa integrasi antara teori kendali dan pendekatan rekayasa sistem memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan sistem kompleks yang terstruktur dan dapat diandalkan. Pendekatan rekayasa sistem memungkinkan perancang sistem untuk mengelola interaksi antar komponen serta mengurangi potensi kegagalan sistem melalui perancangan yang sistematis. Integrasi model based systems engineering dengan prinsip desain aksiomatik terbukti mampu mengurangi ketergantungan fungsi dalam sistem dan meningkatkan efisiensi desain sistem yang kompleks. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan pendekatan

sistem secara holistik menjadi kunci dalam pengembangan sistem kendali modern (Wang, 2019) (Zhang, 2018).

Selain itu, temuan penelitian juga menunjukkan bahwa perkembangan teknologi digital telah mendorong transformasi dalam pendekatan sistem kendali. Integrasi metode berbasis data dan pembelajaran mesin dalam sistem kendali memungkinkan sistem untuk beradaptasi terhadap perubahan lingkungan operasional secara lebih fleksibel. Pendekatan ini memberikan peluang untuk mengembangkan sistem kendali yang mampu memanfaatkan data operasional secara real time untuk meningkatkan kinerja sistem. Pendekatan pembelajaran statistik dalam teori kendali juga membuka peluang baru dalam pengembangan sistem kendali adaptif yang lebih efisien dan responsif terhadap dinamika sistem yang kompleks (Tsiamis, 2022) (Pan, 2021) (Martinelli, 2022).

Implikasi dari temuan tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali modern tidak lagi terbatas pada pendekatan model matematis konvensional, tetapi berkembang menuju integrasi antara model fisik dan pendekatan berbasis data. Konsep physics informed machine learning menjadi salah satu pendekatan yang menggabungkan prinsip fisika dengan algoritma pembelajaran mesin untuk meningkatkan akurasi model sistem dinamis. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan model kendali yang lebih efisien serta mampu menangani kompleksitas sistem yang semakin tinggi. Dengan demikian, integrasi antara teori kendali, rekayasa sistem, serta kecerdasan buatan memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi rekayasa masa depan (Nghiem, 2023) (Lee, 2017).

Selain aspek teknologis, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa sistem kendali memiliki peran penting dalam menjaga keamanan dan keandalan sistem industri modern. Dalam sistem siber fisik industri, gangguan terhadap sistem kendali dapat menyebabkan dampak serius terhadap operasi sistem. Oleh karena itu, penelitian mengenai strategi monitoring dan pertahanan terhadap serangan siber menjadi sangat penting untuk memastikan stabilitas dan keamanan sistem. Integrasi antara mekanisme pengendalian dan sistem keamanan menjadi salah satu tantangan utama dalam pengembangan sistem industri berbasis teknologi digital (Jiang, 2023).

Temuan lain yang penting adalah perkembangan sistem kendali pada sistem multi agen yang melibatkan interaksi antara banyak komponen otonom. Dalam sistem ini, koordinasi antar agen menjadi aspek penting untuk mencapai tujuan sistem secara kolektif. Pendekatan berbasis permainan dalam sistem kendali memungkinkan pengaturan interaksi antar agen melalui mekanisme keputusan yang terstruktur. Pendekatan ini memberikan solusi bagi pengelolaan sistem kompleks seperti jaringan robot otonom, sistem transportasi cerdas, serta sistem kolaboratif lainnya (Zhang, 2019) (Li, 2025).

Meskipun demikian, penelitian ini juga menunjukkan bahwa terdapat beberapa faktor yang dapat memengaruhi efektivitas sistem kendali dalam praktik. Salah satu faktor utama adalah ketergantungan sistem kendali terhadap keakuratan model sistem yang digunakan. Ketidakesesuaian antara model matematis dan kondisi sistem nyata dapat menyebabkan penurunan performa sistem kendali. Dalam sistem energi, misalnya, sensitivitas terhadap kesalahan model dapat memengaruhi efisiensi operasi sistem serta

kestabilan kontrol yang diterapkan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu meningkatkan robustitas sistem terhadap ketidakpastian model (Ringwood, 2020).

Selain faktor model sistem, kompleksitas sistem modern juga menjadi tantangan dalam pengembangan sistem kendali yang efektif. Sistem rekayasa modern sering kali terdiri dari berbagai subsistem yang saling terhubung sehingga meningkatkan tingkat kompleksitas sistem secara keseluruhan. Dalam konteks ini, pendekatan sistem rekayasa menjadi penting untuk mengelola kompleksitas tersebut melalui kerangka desain yang terstruktur serta integrasi berbagai disiplin ilmu. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan sistem yang lebih terkoordinasi serta mampu mengurangi potensi konflik antar komponen sistem (Sivaramakrishnan, 2019) (Kiss, 2020).

Penelitian ini juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Salah satu keterbatasan utama adalah pendekatan penelitian yang menggunakan studi pustaka sehingga tidak melibatkan pengujian empiris secara langsung terhadap sistem kendali tertentu. Akibatnya, hasil penelitian lebih berfokus pada analisis konseptual dan sintesis literatur yang tersedia. Meskipun demikian, pendekatan ini tetap memberikan kontribusi penting dalam memahami perkembangan konsep sistem kendali dalam perspektif rekayasa sistem.

Untuk penelitian di masa depan, disarankan agar dilakukan penelitian empiris yang menguji penerapan konsep sistem kendali dalam berbagai sistem rekayasa nyata. Penelitian tersebut dapat melibatkan pengembangan model simulasi, eksperimen laboratorium, maupun studi kasus pada sistem industri. Selain itu, integrasi antara sistem kendali, kecerdasan buatan, serta teknologi digital seperti digital twin dan sistem siber fisik juga menjadi area penelitian yang sangat menjanjikan. Pengembangan penelitian pada bidang tersebut diharapkan dapat memperluas pemahaman mengenai peran sistem kendali dalam mendukung pengembangan sistem teknologi yang lebih adaptif, aman, dan efisien di masa depan (Pileggi, 2020) (Liu, 2023).

Dengan demikian, pembahasan ini menunjukkan bahwa sistem kendali memiliki peran yang sangat penting dalam pengembangan sistem rekayasa modern. Integrasi antara teori kendali, rekayasa sistem, serta teknologi digital memberikan peluang besar dalam menciptakan sistem yang lebih cerdas, adaptif, dan berkelanjutan. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi konseptual yang dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan dalam bidang sistem kendali dan rekayasa sistem.

Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem kendali merupakan elemen kunci dalam rekayasa sistem yang berperan dalam menjaga stabilitas, adaptivitas, dan kinerja sistem dinamis melalui mekanisme umpan balik dan optimasi. Temuan utama menegaskan adanya pergeseran dari pendekatan kontrol klasik menuju pendekatan terintegrasi yang menggabungkan rekayasa sistem, pembelajaran mesin, serta teknologi digital seperti sistem siber-fisik dan digital twin. Implikasi penting dari temuan ini adalah bahwa sistem kendali tidak lagi hanya berfungsi sebagai mekanisme teknis, tetapi juga sebagai komponen strategis dalam pengembangan sistem teknologi modern yang kompleks dan berbasis data,

sehingga dapat meningkatkan efisiensi operasional, keandalan, serta keamanan pada berbagai sektor seperti industri, energi, dan robotika. Namun, penelitian ini masih terbatas pada studi literatur sehingga belum mencakup validasi empiris. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan studi berbasis eksperimen, simulasi, atau studi kasus nyata guna menguji implementasi sistem kendali dalam konteks spesifik, serta mengeksplorasi integrasi yang lebih mendalam antara sistem kendali, kecerdasan buatan, dan teknologi digital untuk mendukung pengembangan sistem rekayasa yang lebih cerdas dan adaptif.

Daftar Pustaka

- Abraham, D., & Padmakumari, P. (2024). A methodological framework for descriptive phenomenological research. *Western Journal of Nursing Research*. <https://doi.org/10.1177/01939459241308071>
- Baetica, A. A., Westbrook, A. M., & El-Samad, H. (2019). Control theoretical concepts for synthetic and systems biology. *Current Opinion in Systems Biology*. <https://doi.org/10.1016/j.COISB.2019.02.010>
- Baillie, J. (2019). Commentary: An overview of the qualitative descriptive design within nursing research. *Journal of Research in Nursing*. <https://doi.org/10.1177/1744987119881056>
- Balaci, A. T., & Suh, E. S. (2024). Systematic approach to a government led technology roadmap for future ready adaptive traffic signal control systems. *Systems Engineering*. <https://doi.org/10.1002/sys.21772>
- Bandaranayake, P. (2024). Application of grounded theory methodology in library and information science research: An overview. *Sri Lanka Library Review*. <https://doi.org/10.4038/sllr.v38i2.70>
- Belotto, M. (2018). Data analysis methods for qualitative research: Managing the challenges of coding, interrater reliability, and thematic analysis. *The Qualitative Report*. <https://doi.org/10.46743/2160-3715/2018.3492>
- Bingham, A. (2023). From data management to actionable findings: A five phase process of qualitative data analysis. *International Journal of Qualitative Methods*. <https://doi.org/10.1177/16094069231183620>
- Doyle, L., McCabe, C., Keogh, B., Brady, A., & McCann, M. (2019). An overview of the qualitative descriptive design within nursing research. *Journal of Research in Nursing*. <https://doi.org/10.1177/1744987119880234>
- Fife, S., & Gossner, J. (2024). Deductive qualitative analysis: Evaluating, expanding, and refining theory. *International Journal of Qualitative Methods*. <https://doi.org/10.1177/16094069241244856>
- Granikov, V., Hong, Q., Crist, E., & Pluye, P. (2020). Mixed methods research in library and information science: A methodological review. *Library & Information Science Research*. <https://doi.org/10.1016/j.lisr.2020.101003>
- Jiang, Y., Wu, S., Ma, R., Liu, M., Luo, H., & Kaynak, O. (2023). Monitoring and defense of industrial cyber physical systems under typical attacks: From a systems and control

- perspective. *IEEE Transactions on Industrial Cyber Physical Systems*. <https://doi.org/10.1109/TICPS.2023.3317237>
- Jimenez, S., Berbegal Mirabent, J., & De La Torre, R. (2024). How do university libraries contribute to the research process. *The Journal of Academic Librarianship*. <https://doi.org/10.1016/j.acalib.2024.102930>
- Kalpokaite, N., & Radivojevic, I. (2018). Demystifying qualitative data analysis for novice qualitative researchers. *The Qualitative Report*. <https://doi.org/10.46743/2160-3715/2019.4120>
- Lee, J. H., Shin, J., & Realff, M. (2017). Machine learning: Overview of the recent progresses and implications for the process systems engineering field. *Computers and Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.10.008>
- Li, B., Wang, S., Guo, Z., Zhu, S., Huang, J., Sun, J., Wen, G., & Wen, S. (2025). Safe control framework of multi agent systems from a performance enhancement perspective. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1109/TASE.2024.3466791>
- Liu, Y., Lyu, C., Bai, F., Parishwad, O., & Li, Y. (2023). The role of intelligent technology in the development of urban air mobility systems. *Fundamental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2023.08.006>
- Marshall, J. A., Sun, W., & L'Afflito, A. (2021). A survey of guidance navigation and control systems for autonomous multi rotor small unmanned aerial systems. *Annual Reviews in Control*. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.10.013>
- Martinelli, A., Gargiani, M., Draskovic, M., & Lygeros, J. (2022). Data-driven optimal control of affine systems: A linear programming perspective. *IEEE Control Systems Letters*. <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2022.3180898>
- Nghiem, T. X., Drgona, J., Jones, C. N., Nagy, Z., Schwan, R., Dey, B., Chakrabarty, A., Di Cairano, S., Paulson, J. A., Carron, A., Zeilinger, M. N., Cortez, W. S., & Vrabie, D. (2023). Physics informed machine learning for modeling and control of dynamical systems. <https://doi.org/10.23919/acc55779.2023.10155901>
- Ögren, P., & Sprague, C. I. (2021). Behavior trees in robot control systems. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-042920-095314>
- Pan, G., Ou, R., & Faulwasser, T. (2021). On a stochastic fundamental lemma and its use for data-driven optimal control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. <https://doi.org/10.1109/TAC.2022.3232442>
- Pileggi, P., Lazovik, E., Broekhuijsen, J., Borth, M., & Verriet, J. (2020). Lifecycle governance for effective digital twins: A joint systems engineering and IT perspective. *IEEE Systems Conference*. <https://doi.org/10.1109/SysCon47679.2020.9275662>
- Porras Vázquez, A., & Romero Pérez, J. (2018). A new methodology for facilitating the design of safety related parts of control systems in machines according to ISO 13849: 2006 standard. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.02.018>

- Pratt, M. (2025). On the evolution of qualitative methods in organizational research. *Annual Review of Organizational Psychology and Organizational Behavior*. <https://doi.org/10.1146/annurev-orgpsych-111722-032953>
- Ringwood, J. V., Mériçaud, A., Faedo, N., & Fusco, F. (2020). An analytical and numerical sensitivity and robustness analysis of wave energy control systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. <https://doi.org/10.1109/TCST.2019.2909719>
- Sivaramakrishnan, K., Puliyaada, A., Tefera, D., Ganesh, A., & Thirumalaivasan, S. (2019). A perspective on the impact of process systems engineering on reaction engineering. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. <https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.9B00280>
- Togia, A., & Malliari, A. (2017). Research methods in library and information science. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68749>
- Tsiamis, A., Ziemann, I. M., Matni, N., & Pappas, G. (2022). Statistical learning theory for control: A finite-sample perspective. *IEEE Control Systems*. <https://doi.org/10.1109/MCS.2023.3310345>
- Vila Henninger, L., Dupuy, C., Van Ingelgom, V., Caprioli, M., Teuber, F., Pennetreau, D., Bussi, M., & Gall, C. (2022). Abductive coding: Theory building and qualitative reanalysis. *Sociological Methods and Research*. <https://doi.org/10.1177/00491241211067508>
- Wang, H., Li, H., Tang, C., Zhang, X., & Wen, X. (2019). Unified design approach for systems engineering by integrating model-based systems design with axiomatic design. *Systems Engineering*. <https://doi.org/10.1002/sys.21505>
- Zhang, R., & Guo, L. (2019). Controllability of Nash equilibrium in game based control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. <https://doi.org/10.1109/TAC.2019.2893150>