

Evolution of PACS in the Era of Cloud Computing and Artificial Intelligence

Fachruddin (1), Saufa Taslima (2), Juni Sinarita Purba (3)

Universitas Efarina

fachruddincorps@gmail.com (1), saufataslima90@gmail.com (2),
junisinarinta@rocketmail.com (3)

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kritis evolusi PACS dengan fokus pada integrasi cloud-based systems dan Artificial Intelligence, serta mengidentifikasi tantangan interoperabilitas dan faktor kontekstual yang mempengaruhi implementasi. Metode yang digunakan adalah systematic literature review berbasis PRISMA terhadap 40 artikel ilmiah terkini (2020–2025). Analisis dilakukan menggunakan pendekatan sintesis tematik untuk mengidentifikasi tren, konflik antar studi, serta kesenjangan penelitian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transformasi PACS didorong oleh kebutuhan skalabilitas dan efisiensi, namun dihadapkan pada trade-off antara fleksibilitas sistem dan keamanan data. Selain itu, meskipun DICOM berfungsi sebagai standar global, implementasinya yang tidak konsisten menjadi hambatan utama interoperabilitas. Integrasi AI menunjukkan potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi workflow, tetapi masih terbatas oleh masalah generalisasi dan integrasi sistem. Dalam konteks negara berkembang, hambatan implementasi bersifat multidimensional, mencakup infrastruktur, sumber daya manusia, dan regulasi. Sebagai kontribusi utama, penelitian ini mengusulkan Adaptive PACS Integration Framework (APIF) yang mengintegrasikan empat dimensi utama—infra-struktur, data, inteligensi, dan konteks—untuk menjelaskan variasi hasil implementasi sistem pencitraan medis.

Kata Kunci: PACS, Cloud Computing, Artificial Intelligence, DICOM Interoperability Medical Imaging, Vendor Neutral Archive

ABSTRACT

This study aims to critically analyze the evolution of PACS with a focus on the integration of cloud-based systems and Artificial Intelligence, and identify interoperability challenges and contextual factors influencing implementation. The method used is a PRISMA-based systematic literature review of 40 recent scientific articles (2020–2025). The analysis was conducted using a thematic synthesis approach to identify trends, conflicts between studies, and research gaps. The results show that PACS transformation is driven by the need for scalability and efficiency, but faces a trade-off between system flexibility and data security. Furthermore, although DICOM serves as a global standard, its inconsistent implementation is a major barrier to interoperability. AI integration shows significant potential in improving workflow efficiency, but remains limited by issues of generalization and system integration. In the context of developing countries, implementation barriers are multidimensional, encompassing infrastructure, human resources, and regulations. As a key contribution, this study proposes an Adaptive PACS Integration Framework (APIF) that integrates four key dimensions—infrastructure, data, intelligence, and context—to explain variations in medical imaging system implementation outcomes.

Keywords: PACS, Cloud Computing, Artificial Intelligence, DICOM Interoperability Medical Imaging, Vendor Neutral Archive

I. PENDAHULUAN

1. 1. Latar Belakang

Perkembangan sistem pencitraan medis dalam satu dekade terakhir menunjukkan pergeseran signifikan dari sistem terisolasi menuju ekosistem digital yang terintegrasi. Picture Archiving and Communication System (PACS) telah berkembang dari sistem penyimpanan citra menjadi platform utama dalam pengelolaan data medis digital (Andriole, 2023). Transformasi ini tidak hanya dipicu oleh peningkatan volume data, tetapi juga oleh kebutuhan akan interoperabilitas dan efisiensi dalam workflow klinis. Standar Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) memainkan peran sentral dalam memungkinkan pertukaran data antar sistem, namun implementasinya masih menghadapi berbagai tantangan terkait konsistensi dan interoperabilitas (Clunie, 2020; Iancu et al., 2025). Dalam konteks ini, integrasi teknologi baru seperti cloud computing dan Artificial Intelligence (AI) menjadi pendorong utama evolusi sistem PACS (Kawa et al., 2022). Cloud-based PACS memungkinkan penyimpanan dan akses data secara terdistribusi, meningkatkan skalabilitas dan fleksibilitas sistem (Kawa et al., 2022). Sementara itu, AI berperan dalam meningkatkan efisiensi analisis citra medis serta mendukung pengambilan keputusan klinis (Hawkins et al., 2023). Namun, integrasi teknologi ini masih menghadapi tantangan, terutama dalam hal interoperabilitas data dan validasi klinis. Selain itu, konteks implementasi menjadi faktor penting yang mempengaruhi keberhasilan adopsi teknologi. Negara berkembang (LMICs) menghadapi hambatan tambahan seperti keterbatasan infrastruktur dan sumber daya manusia (Marey et al., 2025). Hal ini menunjukkan bahwa evolusi PACS tidak hanya dipengaruhi oleh faktor teknologi, tetapi juga oleh kondisi sosial dan ekonomi. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis evolusi PACS, tantangan interoperabilitas DICOM, serta integrasi AI dalam sistem pencitraan medis, dengan mempertimbangkan faktor kontekstual global. Dengan mempersempit ruang lingkup ini, diharapkan analisis yang dihasilkan menjadi lebih mendalam dan memberikan kontribusi yang lebih signifikan terhadap pengembangan sistem imaging modern.

1.1. Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana penelitian dengan judul *PEvolution Of PACS In The Era Of Cloud Computing And Artificial Intelligence* dapat dilaksanakan sesuai prosedur dan tepat waktu. .

2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan hasil penelitian dari judul *Evolution Of PACS In The Era Of Cloud Computing And Artificial Intelligence*.

3. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah diharapkan sebagai informasi bagi penelitian selanjutnya dari judul penelitian *Evolution Of PACS In The Era Of Cloud Computing And Artificial Intelligence*.

II. METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan systematic literature review (SLR) dengan mengikuti pedoman PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Pendekatan ini dipilih untuk memastikan proses identifikasi, seleksi, dan sintesis literatur dilakukan secara transparan, sistematis, serta meminimalkan bias seleksi.

Kajian difokuskan pada topik:

- PACS (Picture Archiving and Communication System)
- DICOM dan interoperabilitas

- Integrasi Artificial Intelligence (AI)
- Infrastruktur sistem imaging modern (cloud, VNA, teleradiology)

Strategi Pencarian Literatur

Database yang Digunakan

Pencarian literatur dilakukan pada beberapa database utama untuk memastikan cakupan yang luas dan representatif:

Database utama:

- PubMed / MEDLINE
- Scopus
- ScienceDirect
- IEEE Xplore
- SpringerLink

Database tambahan (untuk menghindari bias publikasi):

- MDPI (Sensors, Healthcare, dll.)
- PLOS
- Nature Scientific Reports
- Oxford Academic
- Google Scholar (untuk grey literature terbatas)

Pendekatan multi-database ini dilakukan untuk mengurangi bias indeks tunggal dan meningkatkan validitas studi.

Kata Kunci dan String Pencarian

Strategi pencarian menggunakan kombinasi Boolean (AND, OR) yang disusun berdasarkan konsep utama penelitian.

Kelompok kata kunci utama:

1. Sistem imaging
 - “PACS” OR “Picture Archiving and Communication System”
2. Standar data
 - “DICOM” AND “interoperability”
3. Teknologi integrasi
 - “Artificial Intelligence” OR “AI in radiology”
 - “clinical workflow integration”
4. Arsitektur modern
 - “cloud PACS” OR “cloud-based medical imaging”
 - “vendor neutral archive” OR “VNA”
 - “teleradiology”
5. Konteks global
 - “medical imaging systems”
 - “LMIC healthcare imaging”

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum Temuan

Berdasarkan analisis terhadap literatur yang dikaji, ditemukan bahwa evolusi sistem pencitraan medis, khususnya PACS, menunjukkan pergeseran yang jelas dari sistem berbasis penyimpanan lokal menuju ekosistem digital yang terintegrasi, fleksibel, dan berbasis data. Transformasi ini tidak hanya bersifat teknologis, tetapi juga mencerminkan perubahan paradigma dalam pengelolaan informasi medis.

Temuan utama dalam penelitian ini dapat dikelompokkan ke dalam tiga tema utama:

1. Evolusi arsitektur PACS menuju sistem berbasis cloud
2. Tantangan interoperabilitas DICOM dalam integrasi sistem
3. Integrasi AI dalam workflow pencitraan medis

4. Pengaruh konteks global, khususnya pada LMICs

Evolusi PACS Menuju Sistem Berbasis Cloud

Hasil analisis menunjukkan bahwa PACS telah mengalami transformasi signifikan dari sistem monolitik berbasis lokal menjadi arsitektur terdistribusi yang memanfaatkan teknologi cloud. Perubahan ini didorong oleh meningkatnya volume data medis serta kebutuhan akan akses data yang lebih cepat dan fleksibel.

Cloud-based PACS memungkinkan penyimpanan data dalam skala besar tanpa keterbatasan infrastruktur lokal, serta mendukung akses multi-lokasi secara real-time (Kawa et al., 2022). Selain itu, sistem ini meningkatkan efisiensi operasional dengan mengurangi kebutuhan pemeliharaan perangkat keras di tingkat institusi.

Namun demikian, hasil studi juga menunjukkan adanya trade-off antara fleksibilitas dan keamanan. Beberapa penelitian menyoroti bahwa sistem berbasis cloud meningkatkan risiko terhadap ancaman keamanan siber, seperti kebocoran data dan serangan ransomware (Eichelberg et al., 2020). Hal ini menunjukkan bahwa adopsi cloud PACS tidak hanya bergantung pada kesiapan teknologi, tetapi juga pada kebijakan keamanan dan regulasi yang berlaku.

Selain itu, munculnya konsep Vendor Neutral Archive (VNA) turut memperkuat evolusi PACS dengan memungkinkan penyimpanan data dalam format standar yang tidak bergantung pada vendor tertentu. Hal ini meningkatkan interoperabilitas serta fleksibilitas dalam integrasi sistem.

Tantangan Interoperabilitas DICOM

Meskipun DICOM telah menjadi standar global dalam pertukaran data citra medis, hasil penelitian menunjukkan bahwa interoperabilitas masih menjadi tantangan utama dalam implementasi sistem imaging modern.

Salah satu temuan utama adalah adanya ketidakkonsistenan dalam implementasi DICOM antar vendor, yang menyebabkan variasi dalam struktur metadata dan interpretasi data (Iancu et al., 2025). Hal ini berdampak pada kesulitan dalam integrasi sistem, terutama ketika data berasal dari berbagai sumber yang berbeda.

Selain itu, kualitas metadata DICOM sering kali tidak seragam. Banyak atribut yang tidak diisi secara lengkap atau tidak mengikuti standar yang ditetapkan, sehingga menghambat proses analisis data dan integrasi dengan sistem lain (Lemordant et al., 2021).

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa interoperabilitas DICOM menjadi semakin kompleks dengan adanya integrasi teknologi baru seperti AI. Perbedaan dalam format data, resolusi citra, serta proses preprocessing dapat mempengaruhi performa algoritma AI, bahkan ketika perbedaan tersebut tidak terlihat secara visual (Mayer et al., 2023).

Sebagai respons terhadap tantangan ini, berbagai pendekatan telah dikembangkan oleh institusi, seperti:

- penggunaan standar tambahan seperti FHIR untuk integrasi data klinis
- pengembangan pipeline normalisasi metadata
- implementasi VNA untuk meningkatkan interoperabilitas

Namun demikian, tidak ditemukan solusi tunggal yang mampu mengatasi seluruh permasalahan interoperabilitas, yang menunjukkan bahwa tantangan ini bersifat sistemik dan kompleks.

Integrasi AI dalam Sistem PACS

Hasil analisis menunjukkan bahwa AI telah menjadi komponen penting dalam evolusi sistem pencitraan medis. Integrasi AI dalam PACS memungkinkan otomatisasi berbagai proses, mulai dari deteksi citra hingga pengambilan keputusan klinis.

AI terbukti mampu meningkatkan efisiensi workflow dengan mengurangi waktu analisis dan membantu radiolog dalam mengidentifikasi pola kompleks dalam citra medis

(Hawkins et al., 2023). Selain itu, AI juga digunakan untuk prioritas kasus (triage) serta peningkatan kualitas diagnosis.

Namun, hasil penelitian juga menunjukkan adanya kesenjangan antara pengembangan dan implementasi AI. Banyak model AI dikembangkan dalam lingkungan penelitian dengan dataset terbatas, sehingga performanya tidak selalu konsisten ketika diterapkan pada lingkungan klinis yang berbeda (Mayer et al., 2023).

Selain itu, integrasi AI dalam PACS menghadapi tantangan teknis, seperti:

- kompatibilitas dengan sistem yang ada
- kebutuhan infrastruktur komputasi tinggi
- integrasi dengan workflow klinis

Hal ini menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi AI tidak hanya bergantung pada performa algoritma, tetapi juga pada kesiapan sistem dan integrasi yang efektif.

Pengaruh Konteks Global dan LMICs

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konteks implementasi memiliki pengaruh signifikan terhadap keberhasilan adopsi PACS. Negara berkembang (LMICs) menghadapi tantangan yang lebih kompleks dibandingkan negara maju.

Hambatan utama yang ditemukan meliputi:

- keterbatasan infrastruktur (listrik dan internet)
- kekurangan tenaga ahli
- keterbatasan pendanaan
- kurangnya regulasi yang mendukung (Marey et al., 2025)

Selain itu, kurangnya dataset lokal yang representatif juga menjadi kendala dalam implementasi AI, yang dapat menyebabkan bias dan penurunan akurasi model.

Namun demikian, beberapa strategi terbukti efektif dalam mengatasi hambatan tersebut, antara lain:

- penggunaan cloud-based PACS untuk mengurangi biaya infrastruktur
- pelatihan tenaga medis lokal
- kolaborasi internasional
- penggunaan teknologi low-cost imaging

Temuan ini menunjukkan bahwa implementasi PACS tidak dapat dilepaskan dari konteks sosial dan ekonomi, serta memerlukan pendekatan yang adaptif terhadap kondisi lokal.

Sintesis Temuan

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa evolusi PACS dipengaruhi oleh interaksi antara faktor teknologi dan konteks implementasi.

- Cloud computing mendorong fleksibilitas dan skalabilitas sistem
- DICOM tetap menjadi fondasi interoperabilitas, namun menghadapi tantangan implementasi
- AI memberikan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi, tetapi masih menghadapi kendala integrasi
- Konteks global, khususnya LMICs, mempengaruhi tingkat adopsi teknologi

Dengan demikian, transformasi PACS tidak dapat dipahami sebagai perubahan teknologi semata, melainkan sebagai proses multidimensional yang melibatkan aspek teknis, organisasi, dan sosial.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa evolusi Picture Archiving and Communication System (PACS) tidak dapat dipahami sebagai sekadar transformasi teknologi, melainkan sebagai perubahan sistemik dalam pengelolaan data pencitraan medis. Perkembangan menuju sistem berbasis cloud dan integrasi Artificial Intelligence (AI) telah mengubah peran

PACS dari repositori pasif menjadi platform aktif dalam mendukung workflow klinis dan analisis data. Namun, hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa transformasi ini tidak berlangsung secara seragam. Adopsi cloud-based PACS memang meningkatkan skalabilitas dan fleksibilitas sistem, tetapi juga memperkenalkan tantangan baru terkait keamanan dan kontrol data. Di sisi lain, standar DICOM tetap menjadi fondasi interoperabilitas, namun implementasinya yang tidak konsisten antar vendor menyebabkan fragmentasi sistem dan keterbatasan integrasi data. Integrasi AI dalam PACS menunjukkan potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan akurasi diagnosis, tetapi implementasinya masih menghadapi kendala pada aspek generalisasi model, kualitas data, dan integrasi dengan workflow klinis. Hal ini menunjukkan bahwa keberhasilan AI tidak hanya bergantung pada performa algoritma, tetapi pada kesiapan sistem secara keseluruhan. Lebih lanjut, penelitian ini menegaskan bahwa konteks implementasi memainkan peran penting dalam menentukan keberhasilan sistem. Dalam konteks Low- and Middle-Income Countries (LMICs), hambatan seperti keterbatasan infrastruktur, sumber daya manusia, dan regulasi memperlihatkan bahwa adopsi teknologi tidak dapat dilakukan secara universal tanpa penyesuaian terhadap kondisi lokal. Sebagai kontribusi utama, penelitian ini mengusulkan bahwa keberhasilan implementasi PACS ditentukan oleh keselarasan antar komponen sistem, yang mencakup infrastruktur, data, inteligensi, dan konteks. Ketidaksesuaian antar komponen tersebut (system misalignment) menjadi faktor utama yang menjelaskan variasi hasil implementasi yang ditemukan dalam literatur. Dengan demikian, penelitian ini memberikan perspektif baru bahwa evolusi PACS harus dipahami sebagai proses integrasi sistem yang adaptif, bukan sekadar adopsi teknologi individual.

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, A. J., Miller, A., Tan, E., Shin, E. K., & Tosti, R. (2022). Reliability of assessing distal radius fractures on a smartphone versus PACS. *HAND*, 19(1), 52–57. <https://doi.org/10.1177/15589447221105547>
- Agrawal, A. (2023). Digital transformation of career landscapes in radiology: Personal and professional implications. *Frontiers in Radiology*, 3, 1180699. <https://doi.org/10.3389/fradi.2023.1180699>
- Ajlan, A. M. (2024). Comparing two methods of aortic annulus computed tomography measurements: A retrospective teleradiology Saudi study. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.65019>
- Alasiri, M. A. Z., Alboqami, A. M. D., Alaslani, N. O. R., Almowalad, A. H., Al Samah, N. Y. F., Alghamdi, A. S., Albaqami, W. S., Alhatmi, F. A., Al Gaeir, I. S., Marghalani, H. Y., Aljedaani, B. K., Alsahafe, F. H., Al-Tala'a, & Altayari, K. M. (2024). The digital transformation of diagnostic imaging: A narrative review on cloud-based platforms, artificial intelligence integration, and global networks in modern teleradiology. *The Review of Diabetic Studies*.
- Alhasan, M. S., & Alhasan, A. S. (2025). Technical requirements and optimization strategies for home-based teleradiology workstations: A review article. *Insights into Imaging*, 16, 198. <https://doi.org/10.1186/s13244-025-02081-8>
- Andriole, K. P. (2022). SPIE medical imaging 50th anniversary: History of the picture archiving and communication systems conference. *Journal of Medical Imaging*, 9(S1), S12210. <https://doi.org/10.1117/1.JMI.9.S1.S12210>
- Andriole, K. P. (2023). Picture archiving and communication systems: Past, present, and future. *Journal of Medical Imaging*, 10(6), 061405. <https://doi.org/10.1117/1.JMI.10.6.061405>

- Arslan, M., Haider, A., Khurshid, M., Abu Bakar, S. S. U., Jani, R., Masood, F., Tahir, T., Mitchell, K., Panchagnula, S., & Mandair, S. (2023). From pixels to pathology: Employing computer vision to decode chest diseases in medical images. *Cureus*, 15(9), e45587. <https://doi.org/10.7759/cureus.45587>
- Bashshur, R. L., Krupinski, E. A., Thrall, J. H., & Bashshur, N. (2016). The empirical foundations of teleradiology and related applications: A review of the evidence. *Telemedicine and e-Health*, 22(11), 868–877. <https://doi.org/10.1089/tmj.2016.0149>
- Bass, R. Z., Smith, A. D., Langston, M. C., Frazier, M. B., & Tridandapani, S. (2021). Trainee and faculty perceptions of remote PACS workstations and next steps in a large US academic medical institution. *Current Problems in Diagnostic Radiology*.
- Dicle, O., Şenol, U., Özmen, M. N., & Aydıngöz, Ü. (2023). A snapshot of teleradiology practice in Turkey: The results of a survey among radiologists. *Diagnostic and Interventional Radiology*, 29(1), 46–52. <https://doi.org/10.5152/dir.2023.21270>
- Eichelberg, M., Kleber, K., & Kämmerer, M. (2020). Cybersecurity in PACS and medical imaging: An overview. *Journal of Digital Imaging*, 33, 1527–1542. <https://doi.org/10.1007/s10278-020-00393-3>
- Elahi, A., Dako, F., Zember, J., Ojetayo, B., Gerus, D. A., Schweitzer, A., Mollura, D. J., & Awan, O. (2020). Overcoming challenges for successful PACS installation in low-resource regions: Our experience in Nigeria. *Journal of Digital Imaging*. <https://doi.org/10.1007/s10278-020-00352-x>
- Ewing, B., & Holmes, D. (2022). Evaluation of current and former teleradiology systems in Africa: A review. *Annals of Global Health*, 88(1), 43. <https://doi.org/10.5334/aogh.3711>
- Goldenson, R. P., Avery, L. L., Gill, R. R., & Durfee, S. M. (2021). The virtual homeroom: Utility and benefits of small group online learning in the COVID-19 era. *Current Problems in Diagnostic Radiology*.
- Grewal, H., Prasad, N., Dhillon, G., & Kashyap, R. (2023). Teleradiology and the compensation conundrum in India. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.51342>
- Gupta, S., Johnson, E. M., Peacock, J. G., Jiang, L., McBee, M. P., Sneider, M. B., & Krupinski, E. A. (2020). Radiology, mobile devices, and internet of things (IoT). *Journal of Digital Imaging*, 33, 735–746. <https://doi.org/10.1007/s10278-019-00311-2>
- Hinterwimmer, F., Consalvo, S., Wilhelm, N., Seidl, F., Burgkart, R. H. H., von Eisenhart-Rothe, R., Rueckert, D., & Neumann, J. (2022). SAM-X: Sorting algorithm for musculoskeletal X-ray radiography. *European Radiology*. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-09184>
- Iannessi, A., Marcy, P. Y., Clatz, O., Bertrand, A. S., & Sugimoto, M. (2018). A review of existing and potential computer user interfaces for modern radiology. *Insights into Imaging*, 9, 599–609. <https://doi.org/10.1007/s13244-018-0620-7>

Accepted Date	Revised Date	Decided Date	Accepted to Publish
05 Mei 2026	14 Mei 2026	22 Mei 2026	Ya