Jurnal Siber Multi Disiplin (JSMD)
E-ISSN: 2987-0380
P-ISSN: 2987-0402
+62 822 1012 3600 https://research.e-siber.org siberpublisher.info@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.38035/jsmd.v4i3
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Systematic Literature Review (SLR) : *Digital Radiography* untuk Inspeksi Pengelasan Pipa

Ahdine Windyarti[1], Hosta Ardhyananta[2].
[1]Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 6032221138@student.its.ac.id
[2]Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, hosta.ardhyananta@its.ac.id

Corresponding Author: ahdine.w@gmail.com[1]

Abstract: *The development of Digital Radiography (DR) for pipe welding inspection has increased in response to the industrial need for faster, more efficient, and digitally integrated Non-Destructive Testing (NDT) methods. This study aims to map research developments in Digital Radiography Testing for pipe welding inspection, identify the methodological approaches employed, and analyze the advantages, limitations, and future development directions of the technology. A Systematic Literature Review (SLR) was conducted following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020 framework. Literature was searched using combinations of keywords related to Digital Radiography, Digital Detector Array, pipe welding, inspection, testing, and NDT through Google Scholar, PubMed, and SciSpace. Of the 234 articles initially identified, 10 studies met the inclusion and exclusion criteria after duplicate removal, screening, and full-text assessment. The results indicate that research from 2023 to 2025 has progressed from inspection digitalization and detector development toward automation, robotic scanning, and Artificial Intelligence integration. DR offers advantages in inspection efficiency, image quality, evaluation speed, and digital data processing, but challenges remain in system configuration, cross-condition validation, standardization, and technological complexity. Future research should focus on integrating detectors, inspection processes, automation, AI, and radiation safety into intelligent inspection systems.*

Keyword: *Systematic Literature Review, Nondestructive Test, Digital Radiography, Digital Detector Array, Welding Pipe*

Abstrak: Perkembangan *Digital Radiography* (DR) dalam inspeksi pengelasan pipa semakin meningkat seiring kebutuhan industri terhadap metode *Nondestructive Testing* (NDT) yang lebih cepat, efisien, dan terintegrasi dengan teknologi digital. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan perkembangan penelitian DR pada inspeksi pengelasan pipa, mengidentifikasi pendekatan metodologis yang digunakan, serta menganalisis keunggulan, keterbatasan, dan arah pengembangan teknologi. Penelitian menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan mengikuti kerangka *The Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020. Pencarian literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci terkait *Digital Radiography*, *Digital Detector Array*, *welding pipe*, *inspection*, *testing*, dan NDT melalui Google Scholar, PubMed, dan SciSpace. Dari 234 artikel yang diperoleh,

setelah proses penghapusan duplikasi, screening, pemeriksaan full-text, serta penerapan kriteria inklusi dan eksklusi, diperoleh 10 artikel yang dianalisis. Hasil menunjukkan bahwa perkembangan penelitian DR pada periode 2023 hingga 2025 bergerak dari digitalisasi inspeksi dan pengembangan detektor menuju otomasi, *robotic scanning*, serta integrasi *Artificial Intelligence* (AI). DR menunjukkan keunggulan dalam efisiensi inspeksi, kualitas citra, kecepatan evaluasi, dan pemrosesan data digital, tetapi masih menghadapi tantangan terkait konfigurasi sistem, validasi lintas kondisi, standardisasi, dan kompleksitas teknologi. Penelitian selanjutnya perlu mengarah pada integrasi detektor, inspeksi, otomasi, AI, dan keselamatan radiasi dalam sistem intelligent inspection.

Kata Kunci: *Systematic Literature Review*, *Nondestructive Test, Digital Radiography, Digital Detector Array, Welding Pipe*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi Nondestructive Testing (NDT) dalam dua dekade terakhir telah mengubah praktik pengendalian kualitas material dan pemantauan integritas struktur di berbagai sektor industri. Perkembangan tersebut berdampak pada industri minyak dan gas, petrokimia, pembangkit listrik, serta manufaktur, yang memiliki ketergantungan tinggi terhadap keandalan sambungan las pipa sebagai bagian penting dari keselamatan operasi dan keberlanjutan infrastruktur. Persoalannya tidak berhenti pada keberadaan cacat las yang terlihat secara langsung. *Crack*, *excessive hardness*, maupun kondisi *Heat-Affected Zone* (HAZ) yang tidak normal, misalnya, dapat menyebabkan kegagalan dini setelah fasilitas mulai beroperasi (Xu dkk., 2026). Retak dan kerusakan material yang luput dari pemeriksaan juga dapat berkembang secara progresif hingga berujung pada ruptur yang bersifat katastropik (Liu dkk., 2024). Bahkan, repair welding yang dilakukan berulang kali berpotensi mengubah karakteristik material, termasuk menurunkan kekerasan sambungan dan pada akhirnya memengaruhi integritasnya (Li dkk., 2025). Dalam kondisi nyata, cacat yang lolos selama fabrikasi atau commissioning bukan hanya persoalan teknis, tetapi dapat berkembang menjadi retak dan kebocoran yang menimbulkan kerugian serius serta mengancam keselamatan manusia, lingkungan, dan keberlangsungan transportasi (Feng dkk., 2017). Oleh karena itu, inspeksi dan pengujian sambungan las perlu dilakukan sejak dini sebagai bagian dari strategi pencegahan kegagalan. (Park dkk., 2025). Untuk menjaga relevansi teknologi inspeksi dengan tuntutan Industry 4.0, penerapan teknologi seperti *Digital Radiography* dan analisis berbasis *Artificial Intelligence* (AI) semakin diperlukan. Integrasi keduanya berpotensi meningkatkan kualitas hasil inspeksi, memperkuat aspek keselamatan, dan meningkatkan efisiensi dalam memastikan integritas material logam pada lingkungan industri modern (Sutanto dkk, 2026). Hasil inspeksi dapat diperoleh dan dievaluasi dalam waktu yang lebih singkat, visualisasi indikasi cacat menjadi lebih fleksibel, penggunaan bahan kimia untuk proses film dapat dikurangi, dan data hasil inspeksi memiliki peluang lebih besar untuk diintegrasikan dengan artificial intelligence. Dalam perkembangannya, DRT tidak lagi sekadar dipandang sebagai pengganti media film, tetapi mulai menempati posisi strategis dalam mendorong digitalisasi, efisiensi, dan peningkatan keandalan inspeksi pengelasan di lingkungan industri.

Dalam lima tahun terakhir, perkembangan riset DRT menunjukkan arah yang semakin luas dan kompleks. Sebagian penelitian berfokus pada *image enhancement*, *deep learning*, dan *computer vision* untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam mengenali serta mengklasifikasikan cacat pengelasan. Penelitian lainnya menelaah performa detektor digital, optimasi parameter eksposur, *Probability of Detection* (POD), hingga integrasi DRT dengan *Internet of Things* dan *cloud computing*. Pada saat yang sama, sejumlah studi mulai membandingkan DRT dengan metode lain seperti *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT),

Computed Radiography (CR), dan radiografi film dengan menggunakan indikator yang berbeda, mulai dari sensitivitas deteksi dan efisiensi operasional hingga biaya inspeksi serta keselamatan kerja. Luasnya pendekatan tersebut memang memperkaya bidang penelitian, tetapi sekaligus menimbulkan persoalan dalam membangun gambaran pengetahuan yang utuh. Perbedaan karakteristik objek dan kualitas citra radiografi, variasi jenis serta ukuran cacat, penggunaan dataset, pendekatan pemrosesan citra, dan metode evaluasi menyebabkan hasil antarpenelitian tidak selalu dapat dibandingkan secara langsung. Literatur menunjukkan bahwa penelitian radiographic weld inspection masih berkembang melalui beragam pendekatan, mulai dari peningkatan kualitas citra, segmentasi dan ekstraksi fitur hingga penerapan *machine learning* dan *deep learning*, sementara persoalan generalisasi model terhadap kondisi dan dataset yang berbeda masih menjadi tantangan (Hou dkk., 2020)(Wang dkk., 2025). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengetahuan mengenai perkembangan Digital Radiography masih tersebar pada berbagai tema dan pendekatan penelitian, sehingga diperlukan sintesis yang lebih terstruktur untuk memahami pola perkembangan teknologi dan mengidentifikasi aspek yang masih memerlukan perhatian penelitian.

Keterbatasan tersebut semakin terlihat ketika perhatian diarahkan secara khusus pada inspeksi sambungan las pipa. Kajian yang menyintesis perkembangan penelitian DRT secara sistematis pada konteks tersebut masih relatif terbatas. Review yang telah tersedia umumnya membahas radiografi digital dalam cakupan yang lebih luas atau mengombinasikannya dengan berbagai metode NDT lain, tanpa secara khusus menguraikan bagaimana tren penelitian berkembang, pendekatan metodologis apa yang paling dominan, kendala apa yang muncul dalam penerapan di lapangan, serta aspek teknologi mana yang masih menyisakan ruang pengembangan. Dengan kata lain, masih terdapat research gap berupa belum tersedianya sintesis yang komprehensif dan terstruktur mengenai perkembangan DRT untuk inspeksi pengelasan pipa. Kesenjangan ini penting karena pertumbuhan jumlah penelitian tidak selalu berarti terbentuknya pemahaman yang terintegrasi. SLR menjadi relevan pada kondisi tersebut karena menyediakan prosedur yang transparan dan terstruktur untuk mengidentifikasi, menyeleksi, mengevaluasi, serta mensintesis bukti dari berbagai studi yang telah dipublikasikan. Melalui pendekatan tersebut, temuan yang tersebar dapat dipetakan secara lebih konsisten, sekaligus memungkinkan proses kajian direplikasi oleh peneliti lain (Kitchenham dkk., 2009)(Page dkk., 2021).

Atas dasar permasalahan tersebut, kajian ini diarahkan untuk melakukan SLR mengenai *Digital Radiography Testing for Pipe Welding Inspection*. Fokus utamanya mencakup pemetaan tren publikasi dan perkembangan tema penelitian, evaluasi pendekatan metodologis yang digunakan, analisis keunggulan serta keterbatasan DRT dibandingkan metode inspeksi lainnya, dan identifikasi peluang riset yang masih terbuka. Sintesis tersebut diharapkan tidak hanya memberikan gambaran mengenai posisi perkembangan DRT dalam penelitian NDT, tetapi juga memperjelas area yang masih membutuhkan pengembangan, baik pada aspek teknologi, metodologi inspeksi, maupun penerapannya di lingkungan industri. Pada akhirnya, hasil kajian dapat menjadi pijakan bagi peneliti dalam merumuskan agenda riset berikutnya sekaligus memberikan referensi yang lebih terarah bagi praktisi NDT dan industri dalam memilih serta mengembangkan sistem inspeksi pengelasan yang efektif, efisien, andal, dan berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengkaji perkembangan *Digital Radiography Test* pada inspeksi sambungan pengelasan pipa di lingkungan industri. Proses pencarian literatur dilakukan secara terstruktur menggunakan kombinasi kata kunci yang disusun berdasarkan fokus penelitian, kemudian dilanjutkan dengan tahapan seleksi sesuai kerangka *The Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and*

Meta-Analyses (PRISMA) 2020. Kata kunci yang digunakan adalah ("*Digital Radiography*" *OR* "*Digital Detector Array*" *OR* "*DDA*") *AND* ("*Welding Pipe*" *OR* "*Pipe Weld*") *AND* (*Inspection OR Testing OR NDT*). Kombinasi tersebut digunakan untuk memperluas cakupan pencarian terhadap penelitian yang membahas teknologi radiografi digital, penggunaan *Digital Detector Array* (DDA), serta penerapannya pada pemeriksaan sambungan las pipa dan kegiatan *Nondestructive Testing* (NDT).

Seluruh hasil pencarian kemudian diproses mengikuti tahapan PRISMA 2020 yang mencakup *identification*, *screening*, dan *inclusion* (Page dkk., 2021). Pada tahap *identification*, pencarian dilakukan melalui beberapa sumber literatur yang dapat diakses secara daring, yaitu Google Scholar, PubMed, dan SciSpace. Dari proses tersebut diperoleh 234 artikel ilmiah, yang terdiri atas 19 artikel dari Google Scholar, 1 artikel dari PubMed, dan 214 artikel dari SciSpace. Seluruh artikel selanjutnya diperiksa untuk mengidentifikasi duplikasi. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa 134 artikel merupakan data duplikat sehingga dikeluarkan dari kumpulan literatur. Dengan demikian, sebanyak 100 artikel unik dilanjutkan ke tahap screening.

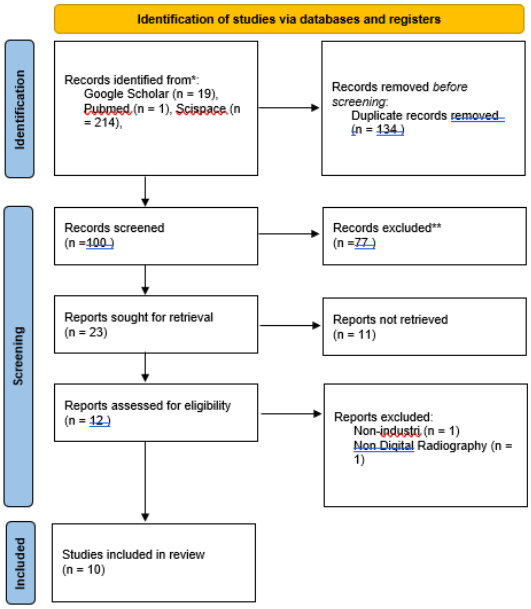
Tahap *screening* dilakukan secara bertahap dengan mengacu pada kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Penyaringan pertama dilakukan berdasarkan judul dan abstrak untuk menilai kesesuaian topik dengan ruang lingkup penelitian. Dari 100 artikel yang diperiksa, sebanyak 77 artikel dikeluarkan karena topik atau substansi abstraknya tidak memenuhi kriteria yang telah ditentukan. Hasil tersebut menyisakan 23 artikel untuk ditinjau lebih lanjut pada tahap berikutnya. Pemeriksaan kemudian dilakukan terhadap ketersediaan *full-text*. Sebanyak 11 artikel tidak dapat diakses dalam bentuk teks lengkap sehingga tidak dilanjutkan ke tahap evaluasi isi. Sebanyak 12 artikel yang masih tersedia kemudian diperiksa secara menyeluruh berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

No.	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
1.	Digital Radiography Technique, atau Digital Detector Array atau DDA	Non-industri
2.	Fokus pada Pengelasan Pipa	Fokus pada konvensional RT saja tanpa adanya perbandingan
3.	Metodologi atau Teknis	Tanpa fokus pada inspeksi pengelasan
4.	Komparasi atau performa analisis	

Sumber: Data Riset

Evaluasi *full-text* dilakukan untuk memastikan bahwa setiap artikel benar-benar membahas Digital Radiography dalam konteks inspeksi industri, khususnya yang relevan dengan pengelasan pipa. Pada tahap ini, 2 artikel dikeluarkan karena penelitian dilakukan pada konteks non-industri atau pembahasannya tidak berfokus pada *Digital Radiography*. Setelah seluruh tahapan seleksi selesai, diperoleh 10 artikel yang memenuhi seluruh kriteria dan dinilai relevan dengan tujuan penelitian. Keseluruhan proses identifikasi, penghapusan duplikasi, *screening*, pemeriksaan *full-text*, hingga penetapan artikel akhir mengikuti alur PRISMA 2020 dan disajikan secara visual pada Gambar 1.



Sumber: Hasil Riset

Gambar 1. Diagram PRISMA 2020

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan proses seleksi menggunakan PRISMA 2020, diperoleh 10 artikel ilmiah yang memenuhi seluruh kriteria penelitian. Literatur terpilih kemudian dianalisis berdasarkan lokasi penelitian, tahun publikasi, pendekatan metodologis, perkembangan teknologi, serta keunggulan dan keterbatasan Digital Radiography (DR) dalam inspeksi pengelasan pipa. Informasi mengenai judul artikel, penulis, tahun publikasi, dan lokasi penelitian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Detail Artikel Ilmiah Penelitian

No	Judul Penelitian	Lokasi Penelitian	Penulis	Tahun
1	*Conformable Digital Detector Arrays for Nondestructive Evaluation*	Amerika Serikat	Brian S. White	2023
2	*In-Service Detection of High-Temperature Pressure Pipeline Welds Based on DR Technology*	China	Le Chen	2023
3	*NDE 4.0 Automation of Digital X-Ray (DR System) with AI for Crude and Gas Transportation Pipes*	India	Kuldeep Sharma & Ashok Kumar	2023
4	*Application of DR Detection Technology for the Middle Weld Seam of Butt Welds in Thick Walled Pipes*	China	Cao Feng dkk.	2024
5	*Orbital-Rail-Type Automatic Inspection Device for Pipeline Welds Using Radiation Dose Prediction Results from FLUKA Simulation*	Korea Selatan	Du-Song Kim dkk.	2024
6	*Applications of Cd(Zn)Te Radiation Detectors in Non-Destructive Testing and Evaluation*	Amerika Serikat	Anthony R. Whittemore & Elena M. Zannoni	2025
7	*Advancements in Digital and Computed Radiography for Pipe Weld Inspection: A Focus on Sensitivity Checks and Innovative IQI Placement Techniques*	Amerika Serikat	Kuldeep Sharma dkk.	2025

Sumber: Data Riset

Tabel 2. Detail Artikel Ilmiah Penelitian (Lanjutan)

No	Judul Penelitian	Lokasi Penelitian	Penulis	Tahun
8	*Research on X-Ray Weld Defect Detection of Steel Pipes by Integrating ECA and EMA Dual Attention Mechanisms*	China	Guanli Su dkk.	2025
9	*X-Ray Techniques for Defect Detection in Industrial Components and Materials: A Review*	China	Xin Wen dkk.	2025
10	*Performance Analysis of Image Processing-Based Robotic scanning Systems in Detecting Weld Defects Using X-Ray Digital Radiography*	Turki	Uralbek Nurgeldiyev & Aytac Ugur Yerden	2025

Sumber: Data Riset

Tren Publikasi dan Penelitian

Sebaran lokasi penelitian menunjukkan bahwa artikel yang terpilih berasal dari lima negara, yaitu Amerika Serikat, China, India, Korea Selatan, dan Turki. China dan Amerika Serikat memiliki jumlah publikasi paling banyak dibandingkan negara lainnya. Dominasi kedua negara tersebut memberikan indikasi bahwa pengembangan teknologi *Digital Radiography* untuk inspeksi industri memperoleh perhatian penelitian yang relatif kuat, khususnya dalam pengembangan perangkat, penerapan lapangan, dan integrasi teknologi digital. Meskipun demikian, jumlah publikasi berdasarkan negara tidak secara langsung menunjukkan tingkat kematangan teknologi di masing-masing wilayah. Sebaran tersebut lebih tepat dipahami sebagai gambaran konsentrasi aktivitas penelitian pada literatur yang berhasil teridentifikasi dalam SLR ini.

Perkembangan publikasi pada periode 2023 sampai 2025 memperlihatkan perubahan fokus yang cukup menarik. Pada tahap awal, penelitian lebih banyak diarahkan pada penerapan praktis dan pengembangan perangkat *Digital Radiography*. Chen, misalnya, mengkaji penggunaan DR untuk inspeksi *in-service* pada pipa bertekanan tinggi, sedangkan White meneliti *Conformable Digital Detector Arrays* yang dirancang agar dapat mengikuti permukaan objek yang melengkung. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa perhatian awal tidak hanya tertuju pada kemampuan menghasilkan citra digital, tetapi juga pada bagaimana teknologi dapat diterapkan pada kondisi inspeksi yang lebih menantang. Studi Chen memperlihatkan peluang penggunaan DR untuk mendeteksi indikasi cacat pada sambungan pipa dalam kondisi temperatur dan tekanan tinggi tanpa harus menghentikan operasi. White, di sisi lain, memperluas fleksibilitas perangkat melalui penggunaan *flexible digital detector array* untuk mendukung inspeksi pada geometri yang tidak datar.

Arah penelitian kemudian mulai bergeser menuju digitalisasi dan otomasi. Sharma dan Kumar membawa pembahasan DR ke dalam kerangka NDE 4.0 melalui integrasi *Artificial Intelligence* dan *Assisted Defect Recognition*. Pergeseran ini cukup penting karena menunjukkan bahwa fungsi DR mulai berkembang dari perangkat akuisisi citra menjadi bagian dari ekosistem inspeksi digital. Pada titik tersebut, kualitas sistem tidak lagi hanya ditentukan oleh kemampuan detektor menghasilkan citra yang baik, tetapi juga oleh kemampuan data tersebut untuk diproses, diinterpretasikan, dan dimanfaatkan secara otomatis.

Tahun 2024 memperlihatkan penguatan pendekatan eksperimental dan pengembangan sistem inspeksi. Cao dkk. membandingkan DR dengan radiografi film pada sambungan las pipa berdinding tebal, sedangkan Kim dkk. mengembangkan sistem inspeksi otomatis berbasis orbital-rail yang didukung simulasi FLUKA untuk mempertimbangkan aspek paparan radiasi. Hasil penelitian Cao dkk. menunjukkan bahwa DR memberikan kualitas citra, sensitivitas, efisiensi waktu, keselamatan, dan keandalan inspeksi yang lebih baik dalam kondisi pengujian yang diteliti. Penelitian Kim dkk. memperluas ruang lingkup pembahasan dengan memasukkan

faktor keselamatan radiasi dan mekanisasi pergerakan sistem. Dengan demikian, perkembangan teknologi mulai bergerak dari sekadar digitalisasi hasil radiografi menuju otomasi proses inspeksi secara menyeluruh.

Perkembangan tersebut semakin terlihat pada publikasi tahun 2025. Su dkk. mengembangkan metode deteksi cacat berbasis YOLOv5 dengan mekanisme ECA, EMA, dan WIoU untuk meningkatkan kemampuan analisis citra secara otomatis. Sharma dkk. memfokuskan penelitian pada optimalisasi penempatan Image Quality Indicator (IQI), sedangkan Whittemore dan Zannoni mengeksplorasi penggunaan detektor Cd(Zn)Te. Pada sisi lain, Nurgeldiyev dan Yerden mengarahkan penelitian pada *robotic scanning* berbasis DR, sementara Wen dkk. memetakan evolusi teknologi X-ray dari interpretasi manual menuju penggunaan machine learning dan deep learning. Jika seluruh perkembangan tersebut dilihat secara berurutan, pola evolusinya menunjukkan kecenderungan yang cukup konsisten, yaitu digitalisasi inspeksi, peningkatan kemampuan detektor, otomasi, integrasi AI, kemudian menuju intelligent inspection. Artinya, perkembangan DR pada inspeksi pengelasan pipa semakin jauh dari konsep sekadar menggantikan radiografi film. Teknologi ini mulai berkembang menjadi sistem inspeksi yang adaptif, terhubung, otomatis, dan berorientasi pada pengambilan keputusan berbasis data.

Pendekatan Metodologis Penelitian

Dari sisi metodologi, artikel yang dikaji menunjukkan heterogenitas yang cukup tinggi. Pendekatan yang digunakan meliputi studi kasus lapangan, eksperimen komparatif, pengembangan perangkat keras, simulasi numerik, pengembangan algoritma deep learning, studi konseptual, hingga artikel review. Variasi tersebut mencerminkan luasnya ruang pengembangan DR, tetapi sekaligus menyebabkan hasil penelitian sulit dibandingkan secara langsung karena masing-masing studi memiliki objek, parameter, kondisi pengujian, dan indikator kinerja yang berbeda.

Chen menggunakan studi kasus penerapan DR pada pipa petrokimia dalam kondisi in-service. Pendekatan ini memberikan nilai empiris yang kuat karena teknologi diuji dalam lingkungan operasi nyata, meskipun ruang lingkupnya masih terbatas pada kasus tertentu dan belum memberikan perbandingan langsung dengan metode NDT lainnya. Berbeda dengan itu, Cao dkk. menggunakan eksperimen komparatif dengan membandingkan DR dan radiografi film pada sambungan las pipa berdinding tebal. Desain tersebut memberikan dasar yang lebih jelas untuk mengevaluasi perbedaan performa kedua metode berdasarkan kondisi pengujian yang sama. Temuannya menunjukkan bahwa DR mampu menghasilkan citra yang lebih mudah dianalisis, meningkatkan sensitivitas terhadap indikasi cacat tertentu, serta memperpendek waktu inspeksi dibandingkan radiografi film.

Kim dkk. menggabungkan pengembangan perangkat dengan simulasi numerik menggunakan FLUKA. Pendekatan tersebut menarik karena penilaian teknologi tidak hanya diarahkan pada kualitas citra, tetapi juga pada aspek keselamatan radiasi dan desain sistem otomatis. Sementara itu, Su dkk. menggunakan eksperimen berbasis *deep learning* melalui arsitektur YOLOv5 yang dikombinasikan dengan ECA, EMA, dan WIoU. Fokus utama penelitian tersebut terletak pada peningkatan kemampuan sistem dalam mengenali dan mengklasifikasikan cacat secara otomatis. Pendekatan serupa menunjukkan bahwa pemrosesan citra mulai menjadi komponen penting dalam pengembangan DR generasi baru.

Beberapa studi lainnya menempati ruang pengembangan yang berbeda. Sharma dkk. berfokus pada optimasi penempatan IQI untuk meningkatkan proses *sensitivity check*, sedangkan White mengembangkan *conformable* DDA sebagai inovasi pada sisi perangkat keras. Nurgeldiyev dan Yerden menempatkan DR dalam konteks *robotic scanning*, *image processing*, dan AI, sementara Sharma dan Kumar membahas integrasinya dengan konsep NDE 4.0. Wen dkk. menggunakan pendekatan *review* untuk menelusuri perkembangan

teknologi X-ray dari interpretasi manual hingga pemanfaatan *machine learning* dan *deep learning*. Secara keseluruhan, metodologi yang beragam tersebut menunjukkan bahwa perkembangan DR berlangsung secara multidimensi. Akan tetapi, belum terlihat adanya kerangka evaluasi yang seragam untuk menghubungkan kualitas detektor, parameter eksposur, performa deteksi, otomasi, keselamatan radiasi, serta efisiensi ekonomi dalam satu sistem penilaian yang terintegrasi.

Keunggulan dan Keterbatasan Digital Radiography

Hasil sintesis menunjukkan bahwa keunggulan utama DR dibandingkan radiografi film terletak pada efisiensi inspeksi, kualitas dan fleksibilitas citra, kecepatan evaluasi, kemampuan pemrosesan digital, serta peluang integrasi dengan teknologi komputasi. Bukti eksperimental dari Cao dkk. menunjukkan bahwa DR dapat digunakan untuk memeriksa sambungan las pipa berdinding tebal dan memberikan citra yang memadai untuk mengenali indikasi seperti *lack of fusion* dan porositas. Keberadaan data digital juga memungkinkan citra langsung diproses, disimpan, ditransmisikan, dan dianalisis menggunakan perangkat lunak tanpa melalui tahapan pengembangan film secara konvensional.

Nilai praktis lainnya terlihat pada penggunaan DR dalam kondisi *in-service*. Studi Chen memperlihatkan bahwa pemeriksaan dapat dilakukan pada pipa yang tetap berada dalam kondisi operasi tertentu, sehingga potensi penghentian proses produksi dapat dikurangi. Dari perspektif operasional, kemampuan semacam ini menjadi penting pada fasilitas seperti jalur perpipaan proses atau sistem bertekanan yang memiliki konsekuensi ekonomi tinggi ketika harus dihentikan untuk inspeksi. Fleksibilitas juga meningkat melalui penggunaan *conformable* DDA yang dapat menyesuaikan bentuk permukaan melengkung, sebagaimana ditunjukkan oleh White. Teknologi tersebut berpotensi memperluas penerapan DR pada objek dengan geometri yang tidak ideal untuk detektor konvensional.

Keunggulan strategis DR semakin terlihat ketika citra digital digunakan sebagai input bagi *image processing*, *computer vision*, *machine learning*, dan *deep learning*. Penelitian Su dkk., Nurgeldiyev dan Yerden, serta Sharma dan Kumar menunjukkan bahwa data radiografi dapat dikembangkan lebih jauh menjadi dasar sistem *Assisted Defect Recognition* hingga *intelligent inspection*. Dalam konteks ini, nilai DR tidak semata-mata berada pada kualitas citra, tetapi juga pada kemampuan data hasil inspeksi untuk diproses dalam rantai digital yang lebih luas.

Meski demikian, peningkatan kemampuan tersebut tidak berarti DR bebas dari keterbatasan. Performanya tetap dipengaruhi oleh jenis detektor, resolusi spasial, *signal-to-noise ratio*, sumber sinar-X, geometri penyinaran, tegangan tabung, dosis eksposur, serta karakteristik material dan ketebalan objek yang diperiksa. Perubahan pada salah satu parameter dapat memengaruhi kualitas citra dan sensitivitas sistem. Karena itu, penggunaan DR tidak dapat dilepaskan dari kebutuhan optimasi parameter berdasarkan kondisi objek dan tujuan inspeksi.

Persoalan lain muncul pada penerapan AI. Model *deep learning*, seperti yang dikembangkan Su dkk., sangat bergantung pada karakteristik dataset yang digunakan selama pelatihan dan pengujian. Model yang memberikan performa baik pada satu kumpulan data belum tentu menghasilkan akurasi serupa ketika diterapkan pada jenis cacat, material, ketebalan, atau kondisi pencitraan yang berbeda. Kesenjangan yang sama terlihat pada penelitian konseptual mengenai *robotic scanning* dan integrasi AI yang masih membutuhkan validasi eksperimental lebih luas. Conformable DDA juga masih memerlukan pengujian kuantitatif pada berbagai konfigurasi agar keunggulannya dapat dibuktikan secara konsisten, sedangkan sistem otomatis yang dikembangkan Kim dkk. masih membutuhkan pembuktian lebih lanjut dalam penerapan industri jangka panjang.

Dengan demikian, persoalan utama DR bukan terletak pada ketidakmampuan mendeteksi cacat, melainkan pada bagaimana mempertahankan kinerja tersebut pada kondisi inspeksi yang

beragam. Standardisasi parameter, validasi lintas kondisi, interoperabilitas perangkat, biaya implementasi, kompleksitas sistem, dan validasi algoritma otomatis menjadi isu yang masih perlu ditangani. Aspek keselamatan radiasi juga harus tetap ditempatkan sebagai bagian integral dari desain sistem, terutama ketika otomatisasi dan penggunaan sumber radiasi berintensitas tinggi diterapkan pada lingkungan industri.

Research Gap dan Arah Penelitian Masa Depan

Sintesis terhadap 10 artikel menunjukkan bahwa penelitian DR masih cenderung berjalan pada jalur yang terpisah. Sebagian studi berfokus pada detektor, sebagian pada optimasi parameter radiografi, sebagian pada penerapan lapangan, sebagian pada robotic scanning dan otomasi, sementara penelitian lainnya menitikberatkan pada AI atau keselamatan radiasi. Masing-masing memberikan kontribusi penting, tetapi hubungan antar-komponen tersebut belum banyak dikaji secara terpadu.

Kondisi tersebut membuka ruang penelitian untuk mengembangkan sistem Digital Radiography yang tidak hanya unggul dalam mendeteksi cacat, tetapi mampu mengintegrasikan seluruh tahapan inspeksi. Integrasi idealnya mencakup *hardware detector*, pengaturan parameter eksposur, akuisisi citra, *automated image processing*, *defect recognition* berbasis AI, *robotic scanning*, pengendalian keselamatan radiasi, hingga evaluasi performa dan efisiensi operasional. Pendekatan yang terintegrasi semacam ini akan membantu menggeser arah penelitian dari pengembangan komponen secara terpisah menuju pengembangan *intelligent inspection system* yang dapat diuji secara menyeluruh dalam kondisi industri.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil Systematic Literature Review terhadap 10 artikel terpilih, perkembangan Digital Radiography untuk inspeksi pengelasan pipa menunjukkan arah evolusi yang semakin jelas. Pada awalnya, penelitian banyak berorientasi pada digitalisasi inspeksi dan pengembangan perangkat detektor. Perkembangan berikutnya bergerak menuju peningkatan fleksibilitas perangkat, otomasi proses, integrasi *Artificial Intelligence*, dan akhirnya *intelligent inspection* berbasis data.

Dari sisi metodologi, penelitian yang tersedia masih menunjukkan fragmentasi yang cukup kuat. Studi kasus, eksperimen komparatif, pengembangan hardware, simulasi numerik, *deep learning*, *robotic scanning*, dan *review* telah digunakan secara terpisah sesuai fokus masing-masing penelitian. Keragaman pendekatan tersebut memperkaya pengetahuan mengenai DR, tetapi juga menyulitkan perbandingan hasil karena belum terdapat kerangka evaluasi yang seragam.

Digital Radiography memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan radiografi film, terutama dalam efisiensi inspeksi, kualitas dan fleksibilitas citra, kecepatan evaluasi, pemrosesan data digital, serta peluang integrasi dengan AI dan sistem otomasi. Di sisi lain, performanya masih dipengaruhi oleh konfigurasi detektor, parameter eksposur, kondisi objek, kualitas citra, validasi lintas kondisi, biaya implementasi, kompleksitas teknologi, serta kebutuhan standardisasi dan validasi sistem otomatis.

Arah penelitian berikutnya perlu bergerak menuju integrasi antara teknologi detektor, parameter radiografi, inspeksi lapangan, *robotic scanning*, *image processing*, *Artificial Intelligence*, keselamatan radiasi, dan evaluasi kinerja dalam satu kerangka sistem. Pendekatan tersebut berpotensi menghasilkan teknologi inspeksi pengelasan yang tidak hanya lebih cepat dan akurat, tetapi juga lebih adaptif, aman, konsisten, dan siap diterapkan pada lingkungan industri yang semakin terdigitalisasi.

REFERENSI

Cao, F., Liu, J., Yang, X., Nie, T., & Wang, S. (2024). 大厚壁管对接焊缝中间焊缝的DR检测技术应用 [Application of DR detection technology for the middle weld seam of butt welds in thick-walled pipes]. *工程施工技术 (Engineering Construction Technology), 2*(8), 46–48. https://doi.org/10.33142/ect.v2i8.13007

Chen, L. (2023). In-service detection of high-temperature pressure pipeline welds based on DR technology. *Journal of Physics: Conference Series, 2483*(1), 012049. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2483/1/012049

Feng, Q., Li, R., Nie, B., Liu, S., Zhao, L., & Zhang, H. (2017). Literature review: Theory and application of in-line inspection technologies for oil and gas pipeline girth weld defection. Sensors, 17(1), 50. https://doi.org/10.3390/s17010050

Hou, W., Zhang, D., Wei, Y., Guo, J., & Zhang, X. (2020). Review on computer aided weld defect detection from radiography images. Applied Sciences, 10(5), 1878. https://doi.org/10.3390/app10051878

Kim, D.-S., Heo, S.-H., Heo, S.-U., & Kim, J. (2024). Orbital-rail-type automatic inspection device for pipeline welds using radiation dose prediction results from FLUKA simulation. *Applied Sciences, 14*(14), 6165. https://doi.org/10.3390/app14146165

Kitchenham, B., Brereton, O. P., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering: A systematic literature review. *Information and Software Technology, 51*(1), 7–15. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009

Li, L., Zhu, L., Yan, X., Jia, H., Xie, S., & Zou, Y. (2025). The impact of weld repairs on the microstructure and mechanical integrity of X80 pipelines in oil and gas transmission. *Processes, 13*(2), 512. https://doi.org/10.3390/pr13020512

Liu, C., Hudgins, A., & James, B. (2024). Failure analysis of a ruptured pipeline. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. https://doi.org/10.1007/s11668-024-02071-w

Nurgeldiyev, U., & Yerden, A. U. (2025). Performance analysis of image processing-based robotic scanning systems in detecting weld defects using X-ray digital radiography: A research design. *IX International Academic Studies Congress Spring 2025*.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Park, S., Bokhari, I., Alnuaimi, H., Amjad, U., Fleischman, R., & Kundu, T. (2025). Early detection of steel tube welded joint failure using SPC-I nonlinear ultrasonic technique. *Structural Health Monitoring*, 24(1), 148-163. https://doi.org/10.1177/14759217241235057

Sharma, K., & Kumar, A. (2023). NDE 4.0 automation of digital X-ray (DR system) with AI for crude and gas transportation pipes. *International Journal of Science and Research, 12*(6), 809–811. https://doi.org/10.21275/MR23604072218

Sharma, K., Kumar, A., Banerjee, D. K., Yadav, V., & Marvel, R. (2025). Advancements in digital and computed radiography for pipe weld inspection: A focus on sensitivity checks and innovative IQI placement techniques. *Social Science Research Network*. https://doi.org/10.2139/ssrn.5153697

Su, G., Su, X., Wang, Q., Luo, W., & Lu, W. (2025). Research on X-ray weld defect detection of steel pipes by integrating ECA and EMA dual attention mechanisms. *Applied Sciences, 15*(8), 4519. https://doi.org/10.3390/app15084519

Sutanto, J., Permana, S., Mustari, A. P. A., Santoso, B., Hanurajie, B., & Sumirat, I. (2026). Radiography in industry: Using X-rays for quality control of metals. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology,* 16(1), 244-251. https://doi.org/10.18517/ijaseit.16.1.21521

Wen, X., Chen, S., Song, K., Yu, H., Li, X., & Zhong, L. (2025). X-ray techniques for defect detection in industrial components and materials: A review. *Computers, Materials & Continua, 85*(3), 4173–4201. https://doi.org/10.32604/cmc.2025.070906

White, B. S. (2023). Conformable digital detector arrays for nondestructive evaluation. *e-Journal of Nondestructive Testing, 28*(8). https://doi.org/10.58286/28203

Whittemore, A. R., & Zannoni, E. M. (2025). Applications of Cd(Zn)Te radiation detectors in non-destructive testing and evaluation. *Sensors, 25*(6), 1776. https://doi.org/10.3390/s25061776

Xu, K., Wang, P., Wang, S., Xie, S., & Wang, B. (2026). Weld seam failure analysis of a natural gas pipeline reducer: Implications for oil and gas transportation safety. *Fuels, 7*(2), 30. https://doi.org/10.3390/fuels7020030

Wang, X., Zscherpel, U., Tripicchio, P., D'Avella, S., Zhang, B., Wu, J., Liang, Z., Zhou, S., & Yu, X. (2025). A comprehensive review of welding defect recognition from X-ray images. *Journal of Manufacturing Processes, 140*, 161–180. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.039