Explainability in Smart Manufacturing Systems: A Comprehensive Analysis and Conceptual Readiness Framework

Program 3P – Skema Talenta Unggul 2026

Suhono Harso Supangkat[3,4], Irma Rizkia[1,4], Rezky Kinanda[2,4]

[1] BINUS Online Learning, Universitas Bina Nusantara [2] SAPPK, ITB [3] Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, ITB [4] Pusat Inovasi Kota dan Komunitas Cerdas (SCCIC), ITB

Abstract & Introduction

Abstract. Adopsi kecerdasan artifisial (AI) di manufaktur cerdas telah meningkatkan perawatan prediktif, kendali mutu, optimasi produksi, dan digital twin. Namun, sifat "kotak hitam" model AI menghambat kepercayaan industri, transparansi, dan penerimaan regulasi. Penelitian ini melakukan Systematic Literature Review (SLR) berprotokol PRISMA atas 68 artikel bereputasi (2020–2026) untuk merumuskan kerangka kesiapan explainability tingkat sistem. Hasilnya berupa siklus hidup explainability 7 tahap, taksonomi 6 dimensi, dan 7 tantangan implementasi yang dipadukan menjadi Conceptual Explainability Readiness Framework (CERF), lalu dioperasionalkan sebagai model kematangan lima tingkat (CERF-MM).

Introduction. Transisi dari Industry 4.0 ke Industry 5.0 menggeser fokus dari otomasi menuju kolaborasi manusia–mesin yang berpusat pada manusia, berkelanjutan, dan tangguh. Operator, insinyur, dan manajer perlu memahami alasan di balik keputusan AI agar dapat memverifikasi, memercayai, dan menindaklanjuti rekomendasinya.

Kajian XAI di manufaktur masih terfragmentasi: sebagian besar berfokus pada teknik tingkat algoritma (misalnya SHAP dan LIME) atau pada satu domain aplikasi, sehingga belum ada panduan holistik tentang kesiapan organisasi, faktor manusia, dan tata kelola untuk menerapkan explainability secara utuh.

Keyword: Explainable Artificial Intelligence, Smart Manufacturing, Industry 5.0, Explainability Readiness Framework, Human-Centered AI.

Research Objectives

Penelitian ini bertujuan merumuskan kerangka kesiapan explainability yang holistik bagi penerapan AI terpercaya di manufaktur cerdas melalui tiga pertanyaan riset:

- **RQ1** – Bagaimana tahapan penerapan explainability dalam siklus hidup AI manufaktur?
- **RQ2** – Apa saja dimensi teknis dan sosio-teknis explainability?
- **RQ3** – Apa tantangan utama implementasinya di lantai produksi?

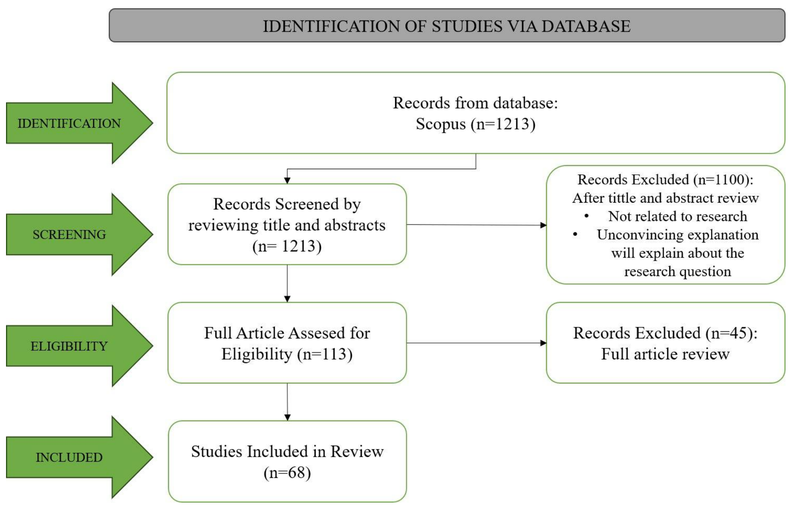
Kebaruan. Review terdahulu umumnya parsial—berfokus pada algoritma, pada satu domain seperti perawatan prediktif, atau pada sektor lain seperti kesehatan dan keuangan. Penelitian ini memadukan lifecycle, dimensi mutu, dan kesiapan ekosistem dalam satu kerangka yang dapat diukur.

Manfaat. Bagi akademisi, menjadi fondasi teoretis riset explainability. Bagi industri, menjadi peta jalan dan instrumen untuk menilai serta meningkatkan kesiapan adopsi AI yang transparan, terpercaya, dan berpusat pada manusia.

Research Method

Penelitian menggunakan desain **Systematic Literature Review** mengikuti protokol **PRISMA**. Penelusuran dilakukan pada basis data **Scopus** (Juli 2026) dengan kueri TITLE-ABS-KEY: ("smart manufacturing" OR "industry 4.0") AND ("explainable AI" OR "XAI") AND ("framework" OR "dimension*" OR "challenge*").

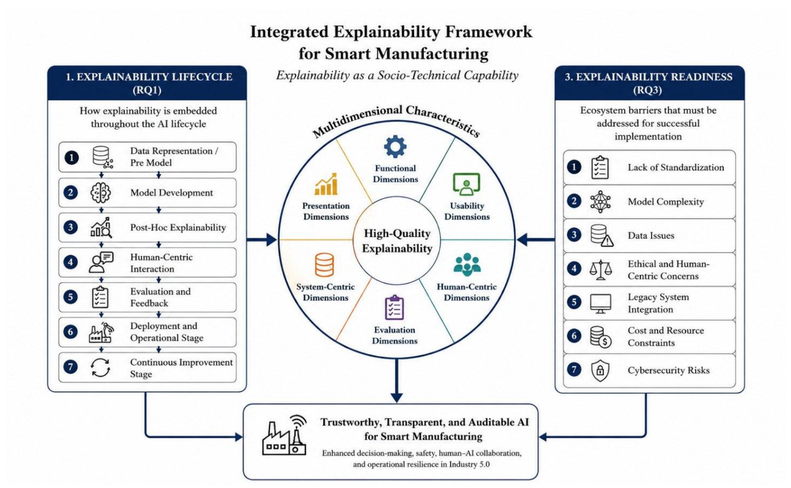
Artikel yang disertakan berbahasa Inggris, membahas XAI, transparansi, atau interpretabilitas model di manufaktur cerdas, dan relevan dengan RQ1–RQ3. Studi di luar domain manufaktur, murni algoritmik, duplikat, atau non-peer-reviewed dikeluarkan.



Picture 1. Diagram PRISMA seleksi artikel (1.213 → 68)

Seleksi dilakukan dua tahap: penyaringan judul–abstrak (1.100 rekaman dikeluarkan) dan telaah teks lengkap (45 artikel dikeluarkan), menghasilkan **68 artikel**. Analisis dilanjutkan dalam empat tahap:

1. **Problem scoping** – memetakan kesenjangan riset dan merumuskan RQ1–RQ3.
2. **Ekstraksi data** – domain industri, tahapan, dimensi, dan tantangan XAI.
3. **Sintesis tematik** – identifikasi dan kategorisasi temuan.
4. **Pengembangan kerangka** – perumusan CERF dan CERF-MM.



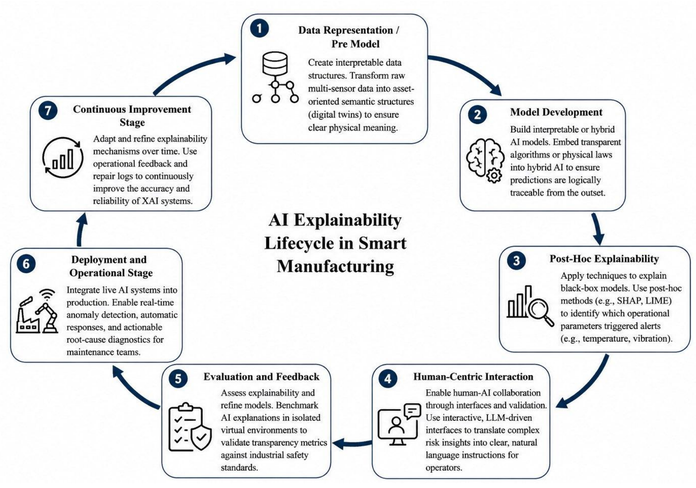
Picture 2. Conceptual Explainability Readiness Framework (CERF)

CERF-MM menilai tiga pilar—Lifecycle, Dimensions, dan Readiness—pada lima tingkat kematangan: (1) Ad hoc, (2) Emerging, (3) Defined, (4) Integrated, dan (5) Adaptive. Tingkat kesiapan keseluruhan mengikuti pilar terendah (aturan weakest-link), sehingga organisasi mengetahui posisi dan prioritas perbaikannya.

Discussion & Result

SLR menghasilkan **68 artikel** yang dipetakan ke tiga pertanyaan riset.

RQ1 – Siklus hidup 7 tahap. Explainability perlu tertanam sejak representasi data, pengembangan model, penjelasan post-hoc, interaksi manusia, evaluasi, operasional, hingga perbaikan berkelanjutan (Picture 3).



Picture 3. Siklus hidup explainability AI (RQ1)

RQ2 – 6 dimensi, 22 sub-dimensi: Functional (5), Usability (3), Human-Centric (4), Evaluation (3), System-Centric (4), dan Presentation (3). Explainability efektif menuntut keseimbangan keandalan teknis dan keterpahaman bagi manusia.

RQ3 – 7 tantangan: ketiadaan standar, kompleksitas model, kualitas data, etika dan faktor manusia, integrasi sistem lama, biaya dan sumber daya, serta keamanan siber.

Diskusi. Explainability bergeser dari pendekatan algorithm-centric menjadi kapabilitas sosio-teknis; kesiapan lebih ditentukan oleh kematangan ekosistem (standar, data, SDM, tata kelola, keamanan) daripada pilihan algoritma.

Conclusion

Explainability di manufaktur cerdas merupakan kapabilitas sosio-teknis. CERF memadukan siklus hidup, dimensi mutu, dan kesiapan ekosistem; CERF-MM membantu organisasi mendiagnosis kesiapan dan memprioritaskan perbaikan menuju AI terpercaya.

Hasil kegiatan:

- Basis bukti sistematis 68 artikel (2020–2026)
- Kerangka CERF dan model kematangan CERF-MM
- Kolaborasi ITB (STEI–SAPPK–SCCIC) dan BINUS

Keluaran: artikel jurnal internasional bereputasi (Q1) "Explainability in Smart Manufacturing Systems: Systematic Literature Review for The Framework of The Stages, Dimensions, and Challenges: 2020–2026 Literature (68 Articles)".

Acknowledgement. Didanai oleh Program 3P – Skema Talenta Unggul, Direktorat Riset dan Inovasi ITB, Tahun 2026 (DRI.PN-6-65-2026).