Enterprise Digital Triplet untuk Industri Cerdas yang Berpusat pada Manusia

Program P2MI ITB 2026 – Skema Riset Guru Besar (PPMI STEI)

Suhono Harso Supangkat[1,3], Irma Rizkia[2,3], Devi Willieam Anggara[1,3]

[1]Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, ITB [2]BINUS Online Learning, Bina Nusantara University [3]Center for Smart City and Community Innovation, ITB

Latar Belakang & Kondisi Mitra

Sasaran. Kegiatan ini berbasis riset dan tidak memiliki mitra formal. Sasaran pemanfaatannya adalah perusahaan manufaktur, termasuk UKM, yang sedang bertransformasi menuju Industri 5.0.

Digital Twin sudah banyak dipakai untuk memantau dan mengoptimalkan aset produksi, tetapi masih berpusat pada sisi fisik dan data. Proses bisnis, pengetahuan organisasi, keahlian manusia, dan alasan keputusan belum menjadi bagian dari representasi digital.

Kondisi awal. Analisis literatur atas 1.919 rekaman (773 dikodekan) menunjukkan tidak ada pendekatan yang mencakup keenam dimensi sebagai elemen inti, dan pembelajaran adaptif hanya dibahas 6,7% rekaman. Keputusan lintas fungsi, seperti respons terhadap keterlambatan pasokan, masih bergantung pada pengalaman individu yang tidak terdokumentasi.

Tiga kesenjangan: G1 representasi (keahlian dan penalaran keputusan tidak dimodelkan), G2 cakupan (Digital Triplet masih di tingkat mesin), G3 adaptivitas dan tata kelola (hasil keputusan tidak dipelajari).

Keyword: Enterprise Digital Triplet, Digital Twin, Industri 5.0, kecerdasan keputusan.

Tujuan & Solusi Program

Tujuan. Merancang representasi perusahaan yang memadukan operasi fisik, informasi dan proses bisnis, serta keahlian manusia dan kecerdasan keputusan berbasis AI, agar perusahaan dapat mengindra, menalar, memutuskan, bertindak, dan belajar.

Solusi: Enterprise Digital Triplet (EDT)

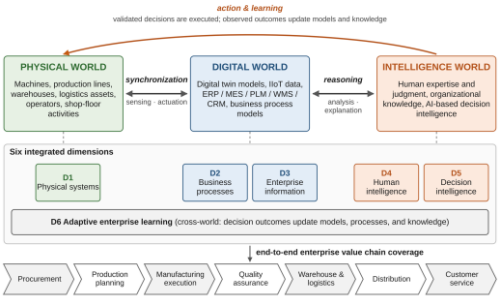
- Tiga dunia (fisik, digital, kecerdasan) dan enam dimensi: sistem fisik (D1), proses bisnis (D2), informasi perusahaan (D3), kecerdasan manusia (D4), kecerdasan keputusan (D5), dan pembelajaran adaptif (D6).
- Empat prinsip desain: representasi triadik, kelengkapan rantai nilai, kecerdasan manusia dan keputusan sebagai elemen utama, serta adaptivitas siklus tertutup.
- Arsitektur enam lapis: L1 operasi fisik, L2 data dan sinkronisasi, L3 informasi perusahaan, L4 proses bisnis, L5 kecerdasan manusia, L6 kecerdasan keputusan, dengan gerbang validasi manusia dan siklus pembelajaran adaptif.
- Tata kelola: tiga tingkatan kewenangan, catatan keputusan, dan persetujuan manusia atas pembaruan model.

Ruang lingkup. Tingkat perusahaan, bukan mesin atau sel produksi; rantai nilai manufaktur dari pengadaan, perencanaan produksi, eksekusi manufaktur, mutu, gudang dan logistik, distribusi, hingga layanan pelanggan; keputusan lintas fungsi dengan kewenangan akhir pada manusia; dievaluasi secara deskriptif.

Manfaat. Keahlian para ahli terdokumentasi lintas shift dan lokasi, rekomendasi AI dapat dijelaskan, keputusan akhir tetap pada manusia, dan keputusan serupa makin baik dari waktu ke waktu.

Metode & Pelaksanaan Kegiatan

Kegiatan mengikuti Design Science Research dalam empat tahap: (1) identifikasi masalah, (2) analisis literatur terstruktur di OpenAlex dengan penelusuran sitasi, (3) pengembangan kerangka kerja dan arsitektur, dan (4) evaluasi deskriptif terhadap lima kriteria: kelengkapan, konsistensi internal, keterterapan, kelayakan, dan keberpusatan pada manusia.

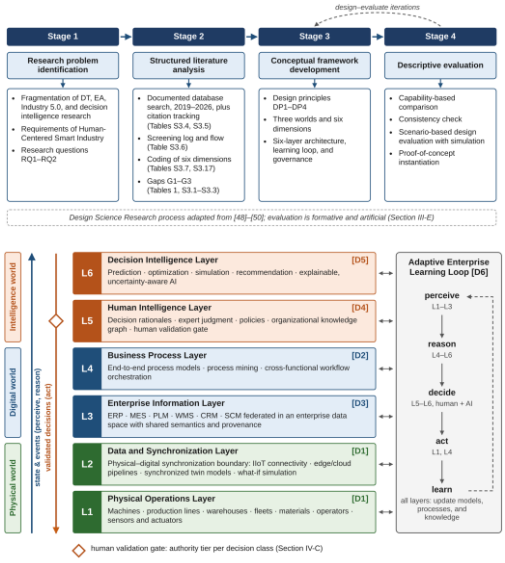


Gambar 1. Model konseptual Enterprise Digital Triplet (EDT)

Evaluasi dilakukan melalui empat aktivitas:

- Perbandingan kapabilitas dengan kriteria pengodean yang terdokumentasi.
- Pemeriksaan konsistensi dari kesenjangan ke prinsip desain, dimensi, dan lapis.
- Skenario perencanaan produksi saat komponen kritis terlambat 10 hari, ditelusuri dalam tujuh langkah keputusan dan diuji dengan simulasi Monte Carlo 100.000 kali.
- Purwarupa publik AI Smart Supply Chain Optimizer untuk pemilihan pemasok.

Seluruh log penyaringan literatur serta kode dan hasil simulasi dipublikasikan terbuka di Zenodo.



Gambar 3. Arsitektur referensi enam lapis EDT

Hasil & Peningkatan Keberdayaan Mitra

- Tidak ada pendekatan yang mencakup keenam dimensi; EDT menutup kesenjangan ini secara desain.
- Pada skenario gangguan pasokan, perencana menggabungkan pemasok kedua dan realokasi stok menjadi keputusan hibrida yang memenuhi tenggat dengan biaya tambahan 2.100, lebih murah daripada rekomendasi model (4.500).
- Simulasi Monte Carlo: keputusan hibrida tetap terbaik di bawah ketidakpastian (peluang tepat waktu 0,96).
- Siklus pembelajaran menurunkan biaya hingga 6,2% ketika pengetahuan yang tercatat ternyata salah, sehingga pembaruan model perlu persetujuan manusia.
- Purwarupa membuktikan satu irisan vertikal layak dibangun dengan teknologi web umum: peta jaringan pasok, data pemasok, alur pengadaan, peringkat terdekat dan termurah, serta pemilihan oleh perencana.

Keberdayaan. Karena tidak ada mitra formal, peningkatan keberdayaan belum diukur. Kerangka kerja menyediakan jalur adopsi bertahap, dari Digital Twin aset hingga layanan keputusan dan pembelajaran, yang dapat dimulai UKM dari satu kelas keputusan.

Luaran & Keberlanjutan Program

Luaran

- Artikel jurnal IEEE Access (Q1), ID Access-2026-57213, dalam proses review.
- Data dan kode terbuka: doi.org/10.5281/zenodo.23874526.
- Aplikasi publik AI Smart Supply Chain Optimizer: supplyc-optimizer.sccic.org.
- Kerangka kerja, arsitektur referensi, instrumen asesmen enam dimensi, dan panduan tata kelola human-AI.
- Supplementary Materials S1–S3: log penyaringan literatur, kode simulasi, serta 17 tabel dan 3 gambar tambahan.

Tingkat bukti. (1) Semua lapis dan mekanisme dispesifikasikan secara konseptual; (2) skenario menguji setiap elemen secara analitis, dan simulasi menjalankan aturan evaluasi serta siklus pembelajaran; (3) purwarupa merealisasikan L1–L4 dan L6 sebagian untuk satu kelas keputusan, dengan L5 berupa pemilihan oleh manusia.

Kesimpulan. EDT adalah arsitektur referensi konseptual yang mengintegrasikan keenam dimensi dan menjaga kewenangan manusia; dampaknya pada perusahaan nyata belum diuji.

Tindak lanjut

- Evaluasi pakar dan simulasi yang dikalibrasi dengan data perusahaan.
- Pengembangan purwarupa ke pencatatan keputusan dan siklus pembelajaran.
- Uji coba bersama perusahaan mitra, termasuk UKM, dengan metrik kualitas, biaya, dan waktu keputusan.
- Model kematangan EDT dan studi kasus lintas sektor.

Kontak: Irma Rizkia (irma.rizkia@binus.ac.id)