

RUDYCT ACADEMIC SERIES 2026

Digital Twin Technology **Menyimulasikan Masa Depan** **Bisnis**

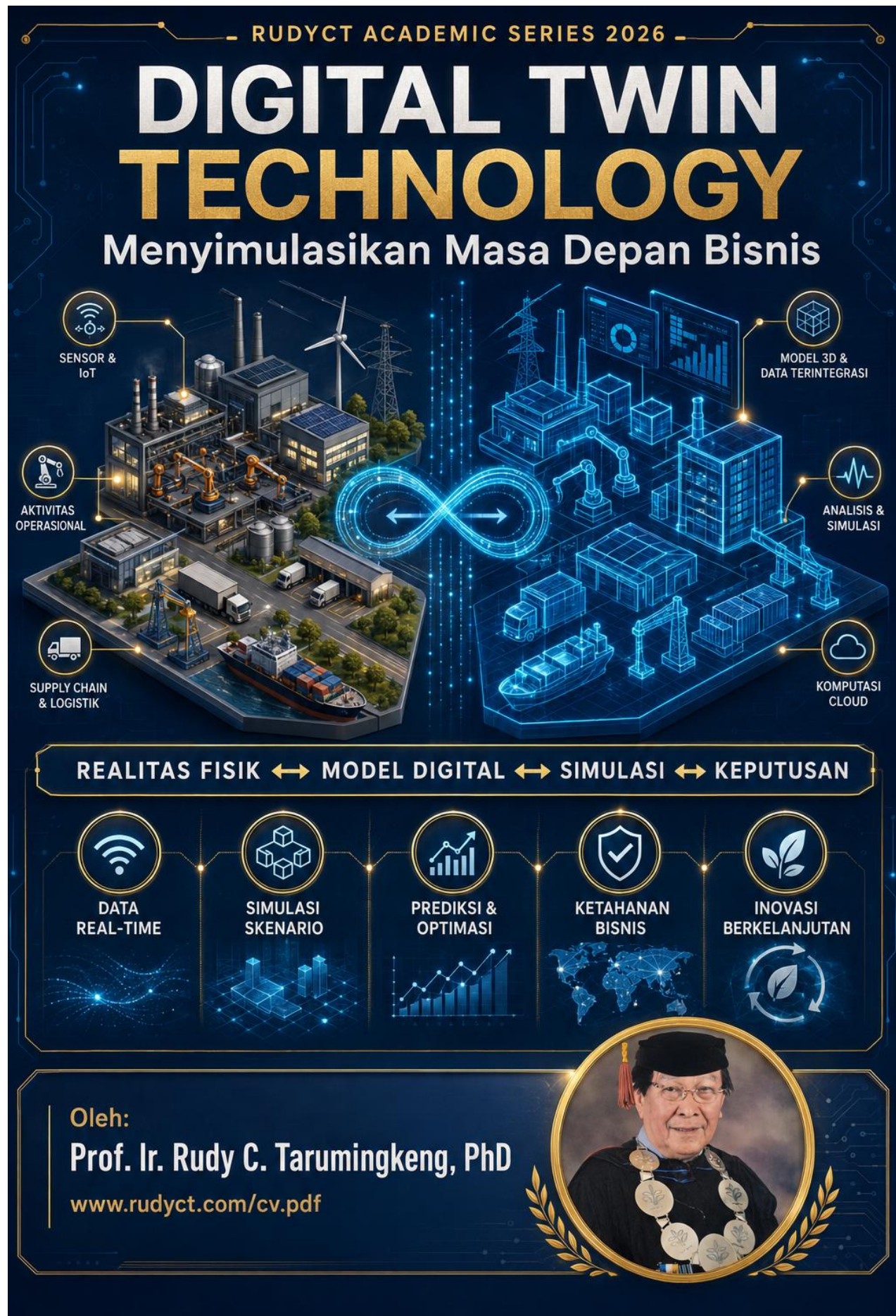
Teknologi, strategi, tata kelola, dan peta jalan implementasi

DIGITAL TWIN • SIMULASI • AI • RESILIENSI • KEBERLANJUTAN

Prof. Ir. Rudy C. Tarumingkeng, PhD

Bogor, Indonesia | 29 Juli 2026

www.rudyct.com/cv.pdf



Abstrak

Digital twin adalah representasi digital dinamis dari aset, proses, organisasi, atau sistem dunia nyata yang terus diperbarui melalui data dan digunakan untuk memahami keadaan masa lalu, membaca kondisi sekarang, serta menyimulasikan kemungkinan masa depan. Teknologi ini menghubungkan Internet of Things, komputasi awan dan tepi, pemodelan berbasis fisika, kecerdasan buatan, analitika, visualisasi, dan mekanisme kendali dalam suatu lingkaran pembelajaran siber-fisik. Berbeda dari model statis atau simulasi sekali jalan, digital twin memperoleh nilainya dari sinkronisasi, konteks, kemampuan bereksperimen, dan—pada tingkat kematangan tertentu—umpan balik menuju sistem fisik. Artikel ini menjelaskan evolusi konsep, arsitektur, jenis model, proses pembentukan nilai, penerapan lintas sektor, model bisnis, tata kelola, risiko, kompetensi, evaluasi investasi, dan peta jalan implementasi. Perhatian khusus diberikan pada fungsi digital twin sebagai “laboratorium masa depan” bagi manajemen: perusahaan dapat menguji kebijakan kapasitas, pemeliharaan, persediaan, energi, desain produk, dan ketahanan rantai pasok tanpa terlebih dahulu menanggung biaya serta risiko eksperimen pada sistem nyata. Namun, digital twin bukan cermin sempurna dan bukan mesin ramalan yang bebas nilai. Kualitas keputusan tetap ditentukan oleh kesesuaian tujuan, mutu data, validitas model, keterjelasan ketidakpastian, keamanan siber, tata kelola, dan kemampuan manusia untuk menafsirkan hasil. Bagi Indonesia, pendekatan yang paling rasional ialah memulai dari masalah bisnis yang bernilai dan terukur, membangun twin minimum yang layak, mengembangkan interoperabilitas secara bertahap, dan menempatkan manusia sebagai pemegang akuntabilitas. Dengan cara itu, digital twin dapat berkembang dari alat pemantauan menjadi infrastruktur pembelajaran, inovasi, resiliensi, dan keberlanjutan perusahaan.

Kata Kunci: *digital twin; simulasi bisnis; kecerdasan buatan; Internet of Things; sistem siber-fisik; transformasi digital; analitika prediktif; ketahanan rantai pasok; model bisnis; pengambilan keputusan.*

Ringkasan Eksekutif

Digital twin memberikan nilai ketika organisasi perlu memahami sistem kompleks dan keputusan tidak aman, mahal, atau lambat bila diuji langsung. Twin menghubungkan keadaan nyata dengan model yang dapat menjalankan diagnosis, prediksi, what-if, optimasi, dan stress test. Karena model terus diperbarui, skenario

tidak berhenti sebagai studi sekali jalan; ia mengikuti perubahan aset, proses, permintaan, dan lingkungan. Manajemen dapat melihat hubungan yang melintasi fungsi—misalnya antara utilisasi, keausan, persediaan, energi, layanan, dan margin—sebelum memilih tindakan.

Perbedaan penting perlu dijaga. Digital model diperbarui manual; digital shadow memperoleh aliran otomatis terutama dari fisik ke digital; digital twin memiliki representasi dinamis, pemrosesan, dan hubungan yang mendukung umpan balik keputusan. Simulasi adalah kemampuan di dalam atau di luar twin, bukan sinonimnya. Real time juga relatif terhadap keputusan. Kecepatan milidetik diperlukan untuk kontrol tertentu, tetapi planning dapat memakai menit, jam, atau hari. Twin yang baik bukan yang mengumpulkan data tercepat, melainkan yang menyediakan keadaan tepat pada saat tindakan masih dapat dilakukan.

Business case harus dimulai dari keputusan, baseline, serta mekanisme nilai. Manfaat utama meliputi pengurangan downtime, scrap, energi, lead time, dan persediaan; peningkatan availability, yield, mutu, serta layanan; percepatan desain; penciptaan layanan berbasis hasil; dan peningkatan resilience. Manfaat perlu dibandingkan dengan total cost of ownership: sensor, integrasi, data, model, komputasi, keamanan, perubahan proses, tenaga, pemeliharaan, serta exit. Portofolio bertahap memungkinkan perusahaan membeli hak untuk belajar tanpa membuat komitmen besar sebelum evidence tersedia.

Risiko digital twin juga lintas dunia. Data salah dapat menghasilkan gambaran keadaan yang salah; model dapat drift; serangan siber dapat berubah menjadi tindakan fisik; penggunaan data manusia dapat menjadi pengawasan; optimasi sempit dapat merugikan keselamatan, pekerja, atau lingkungan. Tata kelola harus mencakup data, model, keputusan, aset, keamanan, privacy, dan lifecycle. Manusia tetap memegang akuntabilitas. Tingkat otomatisasi ditingkatkan hanya setelah validasi, shadow operation, guardrail, override, rollback, dan kemampuan fallback dibuktikan.

Peta jalan yang disarankan terdiri atas framing, discovery, value-risk design, data readiness, model design, minimum viable twin, shadow mode, controlled deployment, workflow integration, scale, continuous assurance, dan organizational learning. Keberhasilan akhir bukan jumlah sensor, model, atau tampilan tiga dimensi. Ukur apakah keputusan lebih cepat dan baik, apakah manfaat terwujud, apakah sistem aman, dan apakah organisasi lebih cepat memperbaiki asumsi. Bagi

Indonesia, prioritas ialah aset industri, energi, logistik kepulauan, pangan, kesehatan, infrastruktur, kota, bencana, dan lingkungan, dengan foundation terbuka serta kompetensi lokal.

Implikasi terpenting bagi pimpinan ialah menjaga proporsionalitas. Tidak semua aset memerlukan twin dan tidak semua twin perlu otonom. Masalah sederhana sebaiknya diselesaikan dengan alat sederhana; kemampuan canggih digunakan ketika kompleksitas, frekuensi, risiko, dan nilai membenarkannya. Prinsip ini mencegah transformasi digital berubah menjadi perlombaan belanja. Organisasi yang disiplin akan menuntut bukti pada setiap gate, tetapi tetap memberi ruang bagi eksperimen. Ia membangun fondasi yang dapat dipakai ulang tanpa memaksakan keseragaman, serta menggabungkan keahlian teknis dengan pengetahuan operator dan pertimbangan etis. Dengan demikian, digital twin menjadi instrumen manajemen yang bumi: bukan sekadar representasi realitas, melainkan sarana untuk bertanya, menguji, berdialog, dan bertindak secara lebih bertanggung jawab di tengah ketidakpastian.

Ukuran keberhasilannya sederhana untuk dirumuskan, walaupun tidak mudah dicapai: keputusan menjadi lebih informasional, dampak negatif lebih dapat diantisipasi, pembelajaran lebih cepat, dan manfaat dibagikan secara layak kepada pihak yang menyediakan data, pengetahuan, kerja, serta kepercayaan.

Dengan prinsip tersebut, teknologi memperluas kebijaksanaan manajemen tanpa menghapus pertimbangan manusia, konteks lokal, dan tanggung jawab moral.

1. Pendahuluan: Mengelola Bisnis di Antara Kenyataan dan Kemungkinan

Setiap keputusan bisnis penting sesungguhnya mengandung sebuah pertanyaan tentang masa depan. Apakah sebuah mesin perlu dihentikan sekarang untuk pemeliharaan atau masih aman dioperasikan dua minggu lagi? Bagaimana perubahan konfigurasi lini produksi memengaruhi mutu, biaya, dan ketepatan pengiriman? Apa yang akan terjadi pada jaringan pasok bila satu pelabuhan ditutup, pemasok utama gagal memenuhi kontrak, atau permintaan melonjak secara tiba-tiba? Bagaimana sebuah gedung, rumah sakit, perkebunan, tambang, atau jaringan energi akan bereaksi terhadap skenario cuaca, kepadatan, dan harga yang berbeda? Pertanyaan semacam itu tidak cukup dijawab oleh laporan historis. Manajemen membutuhkan

sarana untuk melihat keadaan kini, memahami mekanisme yang membentuknya, dan menguji tindakan alternatif sebelum keputusan diterapkan pada dunia nyata.

Digital twin technology muncul sebagai salah satu jawaban paling ambisius terhadap kebutuhan tersebut. Secara ringkas, digital twin adalah representasi digital yang terhubung dengan objek atau sistem nyata, diperbarui dengan data, dan digunakan untuk pemantauan, diagnosis, prediksi, simulasi, optimasi, atau kendali. Representasi ini dapat berupa model sebuah turbin, kapal, kendaraan, produk, pasien, gudang, pabrik, bangunan, pelabuhan, rantai pasok, bahkan kota. Kata "twin" tidak berarti salinan visual yang identik. Ia mengacu pada hubungan operasional antara dunia fisik dan dunia digital: perubahan pada sistem nyata dibaca oleh representasi digital; hasil analisis digital kemudian membantu manusia atau sistem otomatis mengubah tindakan pada dunia nyata.

Gagasan tersebut mengubah cara perusahaan memandang data. Dalam pendekatan konvensional, data sering diperlakukan sebagai residu transaksi: dikumpulkan, disimpan, lalu diringkas dalam laporan. Dalam digital twin, data menjadi aliran yang memelihara keadaan sebuah model. Data sensor suhu, getaran, lokasi, kecepatan, tekanan, konsumsi energi, waktu tunggu, permintaan, inventori, mutu, cuaca, dan perilaku pengguna ditempatkan di dalam konteks struktural. Dengan konteks itu, angka tidak hanya menjelaskan "apa yang terjadi", tetapi ikut memperbarui estimasi mengenai "mengapa terjadi", "apa yang mungkin terjadi selanjutnya", dan "apa yang sebaiknya dilakukan". Inilah perpindahan dari organisasi yang hanya terdigitalisasi menuju organisasi yang mampu bereksperimen secara digital.

Literatur menempatkan integrasi otomatis dan sinkronisasi sebagai karakter penting digital twin. Kritzinger et al. (2018) membedakan digital model, digital shadow, dan digital twin berdasarkan arah serta tingkat otomatisasi aliran data. Jones et al. (2020) memperluas karakterisasi itu dengan menjelaskan entitas fisik, entitas virtual, lingkungan, keadaan, metrologi, proses twinning, dan hubungan dua arah. Sementara itu, VanDerHorn dan Mahadevan (2021) menekankan bahwa digital twin merupakan representasi virtual dari sistem fisik beserta lingkungan dan prosesnya yang diperbarui melalui pertukaran informasi. Perbedaan rumusan tidak menghapus inti yang sama: sebuah twin harus relevan terhadap objek keputusan, terhubung dengan data, dan cukup dinamis untuk mendukung penalaran tentang keadaan sistem.

Judul “Menyimulasikan Masa Depan Bisnis” perlu dipahami secara hati-hati. Digital twin tidak memindahkan perusahaan ke masa depan dan tidak menghasilkan kepastian. Ia menciptakan ruang eksperimen tempat beragam masa depan yang mungkin dapat disusun, dihitung, dibandingkan, dan diperdebatkan. Sebuah pabrik dapat menyimulasikan dampak perubahan jadwal; maskapai dapat menguji strategi perawatan; perusahaan logistik dapat menilai rute alternatif; rumah sakit dapat menelaah aliran pasien; pemerintah kota dapat mengevaluasi banjir, lalu lintas, atau energi. Hasil simulasi selalu bersyarat: jika asumsi, data, dan struktur model memadai, maka konsekuensi suatu skenario dapat diperkirakan dalam rentang ketidakpastian tertentu.

Karena itu, manfaat digital twin bukan semata-mata akurasi teknis. Manfaatnya adalah peningkatan kualitas pembelajaran organisasi. Model menjadi objek bersama yang memungkinkan insinyur, operator, analis, manajer keuangan, pemasaran, pemasok, dan pimpinan berdialog menggunakan gambaran sistem yang lebih konsisten. Konflik keputusan dapat dipindahkan dari perdebatan opini menuju perbandingan skenario. Sebagai contoh, bagian operasi mungkin ingin memaksimalkan utilisasi mesin, sedangkan bagian pemeliharaan ingin menyediakan waktu henti yang lebih panjang. Twin dapat menunjukkan bahwa utilisasi jangka pendek yang terlalu tinggi mempercepat degradasi, meningkatkan risiko kerusakan, dan pada akhirnya menurunkan tingkat layanan. Dengan demikian, teknologi membantu memperlihatkan hubungan antarfungsi yang sebelumnya tersembunyi.

Namun, digital twin juga mudah menjadi jargon. Model tiga dimensi yang menarik dapat disebut twin walaupun tidak pernah diperbarui oleh data. Dasbor waktu nyata dapat diberi label twin meskipun tidak memiliki model perilaku. Simulasi yang canggih dapat disamakan dengan twin walaupun terputus dari kondisi aktual. Wooley et al. (2023) menunjukkan bahwa batas antara simulasi dan digital twin masih sering kabur. Kesalahan klasifikasi bukan semata soal akademik. Ia dapat menyebabkan ekspektasi berlebihan, investasi pada visualisasi tanpa nilai keputusan, dan pengabaian terhadap biaya integrasi, validasi, keamanan, serta pemeliharaan model.

Artikel ini menggunakan perspektif manajemen dan sistem. Tujuannya bukan hanya menjelaskan bagaimana digital twin dibangun, melainkan mengapa, untuk siapa, dengan mekanisme nilai apa, serta dalam kondisi organisasi seperti apa teknologi ini layak digunakan. Pembahasan dimulai dari evolusi dan definisi, dilanjutkan dengan arsitektur serta pemodelan, kemudian bergerak ke nilai bisnis, penerapan sektoral, model pendapatan, risiko, sumber daya manusia, evaluasi investasi, dan peta jalan.

Di sepanjang artikel, digital twin diperlakukan sebagai sistem sosio-teknis: keberhasilannya bergantung pada keterpaduan teknologi, proses, struktur, manusia, insentif, dan tata kelola.

2. Dari “Information Mirroring” Menuju Mesin Pembelajaran Organisasi

Akar digital twin sering dikaitkan dengan pemikiran tentang manajemen siklus hidup produk pada awal 2000-an dan kebutuhan industri kedirgantaraan untuk menghubungkan kendaraan nyata dengan representasi komputasionalnya. Dalam penerbangan dan ruang angkasa, pengujian langsung mahal, berbahaya, dan tidak selalu dapat diulang. Model yang terus diperbarui dengan data operasi memungkinkan kondisi struktur, beban, kelelahan material, dan sisa umur diperkirakan dengan lebih baik. Tuegel et al. (2011), misalnya, menjelaskan penggunaan digital twin dalam rekayasa prediksi umur struktur pesawat. Dari konteks berisiko tinggi inilah terbentuk gagasan bahwa sebuah objek fisik dapat ditemani oleh “kembaran” digital sepanjang hidupnya.

Perkembangannya dipercepat oleh beberapa gelombang teknologi. Pertama, sensor menjadi lebih kecil, murah, dan mampu ditanamkan pada peralatan. Kedua, jaringan industri, Internet of Things, dan 5G memperluas konektivitas. Ketiga, komputasi awan menyediakan penyimpanan dan daya hitung elastis; komputasi tepi memungkinkan respons berlatensi rendah di dekat aset. Keempat, perangkat lunak simulasi multiphysics, discrete-event simulation, system dynamics, agent-based modeling, dan optimasi semakin matang. Kelima, pembelajaran mesin membuat pola nonlinier dapat dipelajari dari data dalam skala besar. Keenam, standar antarmuka, semantik, dan manajemen siklus hidup mulai mengurangi keterpisahan sistem teknik dan sistem bisnis. Digital twin lahir bukan dari satu penemuan, melainkan dari konvergensi semua kemampuan tersebut (Fuller et al., 2020; Tao et al., 2019).

Pada tahap awal, fokus utamanya adalah representasi aset individual. Perusahaan ingin mengetahui kondisi mesin, menyimulasikan beban, dan merencanakan pemeliharaan. Tahap berikutnya memperluas ruang lingkup menuju lini produksi, pabrik, armada, bangunan, dan rantai pasok. Perluasan ini meningkatkan kompleksitas secara eksponensial. Twin sebuah motor mungkin berfokus pada temperatur, getaran, pelumasan, dan beban. Twin pabrik harus menghubungkan mesin, manusia, aliran bahan, jadwal, mutu, energi, dan pesanan. Twin rantai pasok

perlu memodelkan pemasok, fasilitas, jalur transportasi, persediaan, permintaan, waktu tunggu, kebijakan, serta perilaku para pelaku yang otonom.

Perubahan ruang lingkup tersebut diikuti perubahan fungsi. Digital twin deskriptif menjawab keadaan kini. Twin diagnostik menelusuri penyebab. Twin prediktif memperkirakan kegagalan atau kinerja mendatang. Twin preskriptif membandingkan pilihan dan merekomendasikan tindakan. Pada tingkat paling maju, twin dapat mengendalikan sebagian sistem secara otonom dalam batas yang ditentukan. Kematangan tidak harus selalu berakhir pada otonomi. Dalam layanan kesehatan, kebijakan publik, atau keputusan yang mengandung konsekuensi etis besar, rekomendasi yang transparan dan dapat diawasi mungkin lebih tepat daripada kontrol otomatis.

Van der Valk et al. (2022) mengingatkan bahwa konfigurasi digital twin berbeda menurut kasus penggunaan. Mereka mengusulkan arketipe yang berkembang dari twin dasar hingga twin yang lebih lengkap. Pesan manajerialnya penting: perusahaan tidak perlu membangun replika universal yang mencakup segala sesuatu. Twin harus cukup lengkap untuk keputusan yang dituju. Model sederhana tetapi terhubung, tervalidasi, dan dipakai dalam proses kerja sering menghasilkan nilai lebih besar daripada model sangat rinci yang mahal, lambat, dan tidak dipercaya pengguna.

Kini digital twin bergerak dari aset teknik menjadi infrastruktur pembelajaran perusahaan. Data operasi memperbaiki model; model mengarahkan eksperimen; eksperimen menghasilkan keputusan; keputusan mengubah operasi; hasil operasi kembali menjadi data. Lingkaran ini menjadikan twin sebagai memori aktif, bukan arsip pasif. Ia menangkap hubungan antara rancangan, penggunaan, lingkungan, dan hasil. Pengetahuan yang sebelumnya melekat pada teknisi senior dapat sebagian diformalkan ke dalam aturan, parameter, dan skenario. Di sinilah digital twin bertemu dengan manajemen pengetahuan, dynamic capabilities, dan organizational learning.

3. Menentukan Batas Konsep: Model, Shadow, Thread, Simulasi, dan Twin

Kejelasan terminologi merupakan syarat pertama investasi yang sehat. Sebuah digital model adalah representasi digital yang tidak memiliki pertukaran data otomatis dengan objek fisik. Model CAD sebuah mesin, peta tiga dimensi gedung, spreadsheet kapasitas, atau simulasi jaringan dapat sangat bernilai, tetapi belum

tentu merupakan twin. Hubungan dengan kenyataan diperbarui secara manual atau hanya pada saat tertentu. Model menjawab pertanyaan yang telah didefinisikan, tetapi ia tidak selalu mengetahui bahwa kondisi aset telah berubah.

Digital shadow memiliki aliran otomatis terutama dari fisik ke digital. Sensor dan sistem transaksi memperbarui gambaran digital, sehingga pengguna dapat melihat keadaan aktual atau historis secara lebih konsisten. Namun, arus balik dari digital menuju fisik tidak otomatis atau tidak terstruktur. Banyak platform “real-time monitoring” berada pada tingkat ini. Shadow sangat berguna untuk transparansi, pelacakan, dan deteksi anomali. Ia dapat menjadi tahap yang rasional sebelum organisasi membangun kemampuan simulasi, rekomendasi, dan kontrol yang lebih maju.

Digital thread adalah rangkaian informasi yang menghubungkan fase dan pihak sepanjang siklus hidup. Dalam pengembangan produk, thread dapat menghubungkan kebutuhan pelanggan, desain, bill of materials, proses produksi, pengujian, penjualan, penggunaan, pemeliharaan, dan akhir masa pakai. Thread menjamin keterlacakan: sebuah perubahan desain dapat ditelusuri ke alasan, komponen, pemasok, dan konsekuensi operasionalnya. Digital twin memakai thread sebagai sumber konteks, tetapi keduanya bukan sinonim. Thread menekankan kesinambungan informasi; twin menekankan representasi keadaan dan perilaku suatu entitas.

Simulasi adalah eksperimen dengan model. Ia dapat dilakukan tanpa twin, misalnya simulasi antrian berdasarkan distribusi kedatangan rata-rata atau simulasi strategi pemasaran menggunakan data survei. Digital twin memakai simulasi, tetapi menambahkan hubungan sistematis dengan entitas nyata, pembaruan keadaan, identitas, dan konteks operasi. Wright dan Davidson (2020) menegaskan bahwa perbedaan model dan twin terletak pada hubungan serta tujuan, bukan hanya tingkat detail visual. Wooley et al. (2023) juga menunjukkan bahwa kemampuan representasi, replikasi, sinkronisasi, dan penggunaan data aktual perlu diperiksa sebelum sebuah implementasi disebut twin.

Sistem siber-fisik adalah kategori yang lebih luas, yaitu integrasi komputasi, komunikasi, dan proses fisik. Digital twin dapat menjadi lapisan pengetahuan dan keputusan di dalam sistem siber-fisik. Internet of Things menyediakan penginderaan dan konektivitas; big data menyediakan pengelolaan volume, variasi, serta kecepatan data; AI menyediakan pembelajaran, persepsi, dan rekomendasi; BIM

menyediakan representasi informasi bangunan; metaverse menyediakan lingkungan pengalaman atau kolaborasi imersif. Tidak satu pun secara otomatis menjadi digital twin. Twin adalah orkestrasi berorientasi entitas dan keputusan yang dapat menggunakan semua teknologi tersebut.

Definisi operasional yang digunakan dalam artikel ini adalah sebagai berikut: digital twin merupakan representasi digital dinamis dari entitas atau sistem tertentu, yang identitas serta batasnya jelas, diperbarui melalui data relevan, memiliki satu atau lebih model untuk menaksir keadaan dan perilaku, dan digunakan untuk menghasilkan pemahaman atau tindakan sepanjang siklus hidup. Pada implementasi dengan risiko rendah dan kontrol matang, tindakan dapat dikirim kembali secara otomatis. Pada implementasi lain, keluaran twin masuk ke proses pengambilan keputusan manusia.

Definisi ini sengaja tidak mewajibkan “real time” dalam arti milidetik. Kebutuhan frekuensi twinning tergantung fenomena. Pengendalian robot mungkin membutuhkan milidetik; pemeliharaan turbin dapat menggunakan detik atau menit; perencanaan kapasitas gudang mungkin cukup per jam; twin hutan atau wilayah pesisir dapat diperbarui harian, bulanan, atau musiman. Yang penting ialah kesesuaian antara laju pembaruan, dinamika sistem, dan kebutuhan keputusan. Mengirim data lebih cepat dari yang dapat digunakan hanya meningkatkan biaya dan permukaan serangan.

Definisi tersebut juga menghindari tuntutan kesetiaan sempurna. Model selalu menyederhanakan kenyataan. Twin yang baik bukan yang menyalin semua detail, melainkan yang mempertahankan variabel, hubungan, dan ketidakpastian yang material bagi keputusan. Peta tidak perlu sebesar wilayah yang dipetakan. Bila twin mesin ditujukan untuk memprediksi kerusakan bantalan, ia tidak perlu memodelkan warna cat. Bila twin rumah sakit ditujukan untuk mengurangi waktu tunggu, ia perlu memodelkan kedatangan, triase, sumber daya, prioritas klinis, dan aliran pasien—bukan setiap atribut yang tersimpan di rekam medis.

4. Arsitektur Digital Twin: Dari Sinyal Lapangan ke Keputusan

Arsitektur digital twin dapat dipahami sebagai rangkaian lapisan yang mengubah fenomena fisik menjadi keputusan. Lapisan pertama adalah entitas fisik dan lingkungannya: mesin, produk, pasien, kendaraan, gedung, jaringan, operator, material, cuaca, atau pasar. Batas entitas harus ditentukan berdasarkan masalah.

Sebuah pompa dapat menjadi unit analisis, tetapi untuk mengoptimalkan konsumsi energi mungkin perlu memasukkan tangki, pipa, katup, jadwal produksi, dan tarif listrik. Kesalahan batas menyebabkan model mengoptimalkan bagian sambil merugikan keseluruhan.

Lapisan kedua adalah penginderaan dan akuisisi data. Sensor mengukur temperatur, getaran, tekanan, arus, suara, posisi, kelembapan, kualitas udara, atau biomarker. Sistem bisnis menyumbangkan data pesanan, stok, jadwal, biaya, pemasok, pelanggan, dan layanan. Sumber eksternal mencakup cuaca, lalu lintas, harga komoditas, regulasi, dan risiko geopolitik. Data manusia dapat berasal dari pemeriksaan, observasi, catatan teknisi, keluhan, atau penilaian ahli. Digital twin yang matang menggabungkan data mesin, transaksi, lingkungan, dan pengetahuan manusia—bukan hanya telemetri.

Lapisan ketiga adalah konektivitas dan integrasi. Protokol industri, API, message broker, jaringan seluler, Wi-Fi, satelit, dan gateway mengalirkan data dari sumber ke platform. Pada tahap ini dilakukan timestamping, identifikasi aset, buffering, penyaringan awal, dan pengamanan. Integrasi merupakan sumber biaya tersembunyi karena perusahaan biasanya memiliki peralatan lintas generasi, format berbeda, sistem lama, dan kepemilikan data yang tersebar. Twin gagal bukan karena persamaan matematisnya lemah, melainkan karena data dari sistem pemeliharaan, ERP, sensor, dan catatan desain tidak dapat dipertemukan.

Lapisan keempat adalah pengelolaan data dan konteks. Data lake atau lakehouse menyimpan data mentah dan terolah; time-series database menangani telemetri; master data management menjaga identitas; knowledge graph dan ontologi menjelaskan hubungan semantik. Konteks menjawab pertanyaan: sensor ini milik aset mana, satuannya apa, dikalibrasi kapan, digunakan dalam kondisi apa, dan berhubungan dengan komponen serta proses mana? Tanpa konteks, data besar berubah menjadi kumpulan sinyal yang tidak dapat dipercaya. Prinsip kualitas—akurasi, kelengkapan, konsistensi, ketepatan waktu, keterlacakan, dan kesesuaian tujuan—harus diukur, bukan diasumsikan.

Lapisan kelima adalah representasi dan model. Model geometri menjelaskan bentuk serta ruang. Model berbasis fisika menjelaskan mekanika, termal, fluida, elektromagnetik, kimia, atau degradasi. Model proses menggambarkan urutan kerja, antrian, kapasitas, dan aturan. Model statistik dan machine learning mempelajari pola dari data. Model ekonomi menghubungkan kinerja teknis dengan biaya,

pendapatan, risiko, dan nilai. Model perilaku menggambarkan keputusan manusia atau agen. Dalam implementasi nyata, twin jarang memakai satu model tunggal; ia menjadi federasi model dengan resolusi dan horizon waktu yang berbeda.

Lapisan keenam adalah sinkronisasi dan state estimation. Data sensor selalu tidak sempurna: ada noise, data hilang, keterlambatan, bias, dan kegagalan. Twin menggunakan filter, data assimilation, anomaly detection, dan metode estimasi untuk menaksir keadaan yang tidak dapat diukur langsung. Temperatur internal komponen, tingkat keausan, probabilitas gagal, atau niat pelanggan mungkin merupakan keadaan laten. Rasheed et al. (2020) menjelaskan nilai penggabungan model berbasis fisika dan data untuk menjaga interpretabilitas sekaligus kemampuan adaptasi.

Lapisan ketujuh adalah analitika dan simulasi. Twin dapat menjalankan diagnosis akar masalah, forecasting, what-if analysis, optimasi, Monte Carlo simulation, sensitivity analysis, dan stress testing. Pada lapisan ini organisasi menciptakan “masa depan jamak”. Bukan satu ramalan tunggal, melainkan distribusi hasil di bawah skenario yang berbeda. Sistem dapat membandingkan biaya, waktu, energi, emisi, mutu, keselamatan, dan risiko. Dalam twin rantai pasok, misalnya, model dapat menguji penambahan pemasok, pergeseran persediaan, perubahan rute, atau kapasitas cadangan.

Lapisan kedelapan adalah pengalaman dan keputusan. Hasil disajikan melalui dasbor, peringatan, visualisasi 2D/3D, augmented reality, laporan, API, atau percakapan berbasis bahasa alami. Desain antarmuka harus mengikuti keputusan, bukan mengejar kemegahan. Operator membutuhkan sinyal yang spesifik dan dapat ditindaklanjuti; manajer membutuhkan dampak terhadap sasaran; insinyur memerlukan penjelasan teknis; direksi memerlukan risiko, nilai, dan alternatif. Satu visual tidak dapat melayani semua pengguna.

Lapisan kesembilan adalah aktuasi dan umpan balik. Rekomendasi dapat diterjemahkan menjadi work order, perubahan jadwal, set point, rute, pesanan, atau konfigurasi. Tingkat otomatisasi harus disejajarkan dengan risiko. Sistem dapat hanya memberi informasi, meminta persetujuan, menjalankan tindakan dalam batas, atau mengendalikan secara otonom. Guardrail, hak akses, fail-safe, audit log, dan mekanisme override diperlukan agar tindakan digital tidak memperbesar gangguan fisik.

Seluruh lapisan tersebut dibungkus oleh tata kelola, keamanan, dan manajemen siklus hidup. Model perlu versi, pemilik, dokumentasi, pengujian, dan jadwal kalibrasi. Data perlu hak akses, retensi, persetujuan, serta perlindungan. Perubahan pada aset fisik harus tercermin dalam twin; perubahan model harus ditelusuri. Karena digital twin hidup selama entitas yang diwakilinya, biaya pemeliharaan, obsolescence, dan penghentian harus dirancang sejak awal. Arsitektur bukan diagram sekali jadi, tetapi perjanjian organisasi tentang bagaimana kenyataan akan diukur, dimodelkan, dipahami, dan diubah.

5. Bagaimana Digital Twin Menyimulasikan Masa Depan

Kekuatan sebuah twin terletak pada kemampuannya mengubah pertanyaan manajerial menjadi eksperimen komputasional. Prosesnya dimulai dengan estimasi keadaan sekarang. Model perlu mengetahui konfigurasi aset, beban, persediaan, antrean, kesehatan komponen, dan kondisi lingkungan. Dari titik awal itu, manajer menetapkan skenario: permintaan naik 20 persen, harga energi berlipat, satu pemasok berhenti, jadwal pemeliharaan dimajukan, desain produk diubah, atau curah hujan ekstrem terjadi. Model kemudian memproyeksikan dinamika sistem di bawah setiap kombinasi asumsi.

Ada perbedaan penting antara forecasting dan scenario simulation. Forecasting berusaha memperkirakan hasil paling mungkin berdasarkan pola serta informasi saat ini. Simulasi skenario bertanya apa yang akan terjadi bila asumsi tertentu berlaku, termasuk kejadian yang tidak paling mungkin tetapi berkonsekuensi besar. Perusahaan membutuhkan keduanya. Peramalan permintaan membantu rencana dasar; stress test terhadap kelangkaan bahan, gangguan siber, atau penutupan rute membantu menyiapkan ketahanan. Twin memungkinkan hasil kedua jenis analisis ditautkan dengan keadaan operasi yang terus berubah.

Metode simulasi dipilih sesuai sifat sistem. Finite element analysis menelaah tegangan dan deformasi; computational fluid dynamics memodelkan aliran; discrete-event simulation menilai antrean, jadwal, dan kapasitas; system dynamics melihat umpan balik pada tingkat agregat; agent-based modeling menggambarkan perilaku banyak pelaku; Monte Carlo simulation mengulang model dengan distribusi input untuk menghasilkan rentang risiko. Optimasi mencari konfigurasi terbaik di bawah tujuan dan kendala. Reinforcement learning dapat belajar memilih tindakan dari

interaksi dengan lingkungan virtual, tetapi penggunaan pada sistem nyata menuntut batas keselamatan.

Sebuah simulasi masa depan yang kredibel harus menyatakan ketidakpastian. Angka tunggal sering menimbulkan ilusi presisi. Bila twin memperkirakan mesin gagal dalam 27 hari, manajer perlu mengetahui interval probabilitas, kondisi yang mempercepat kegagalan, dan biaya kesalahan. Untuk keputusan persediaan, perlu diketahui bukan hanya permintaan rata-rata, tetapi ekor distribusi, korelasi antarwilayah, serta skenario gangguan. Digital twin yang bertanggung jawab menyajikan hasil sebagai rentang, probabilitas, dan trade-off.

Validasi menjembatani model dengan realitas. Verification memeriksa apakah model diimplementasikan sesuai rancangan; validation memeriksa apakah model cukup mewakili kenyataan untuk penggunaan yang dimaksud. Back-testing membandingkan prediksi dengan data masa lalu. Shadow mode menjalankan rekomendasi tanpa mengeksekusinya untuk melihat kinerja. Pilot terkontrol menguji pada ruang lingkup kecil. Model juga perlu diuji pada kondisi ekstrem, bukan hanya keadaan normal. Digital twin yang akurat pada rata-rata tetapi gagal saat krisis justru dapat memperbesar kerentanan.

Bayangkan sebuah perusahaan minuman dengan tiga pabrik dan dua pusat distribusi. Manajemen mempertimbangkan promosi nasional. Model konvensional mungkin menghitung kebutuhan produksi dari proyeksi penjualan. Twin menghubungkan proyeksi dengan kapasitas pengisian, jadwal pergantian format botol, ketersediaan bahan, waktu transportasi, stok regional, konsumsi energi, dan risiko keterlambatan. Skenario menunjukkan bahwa promosi serentak memaksimalkan permintaan tetapi menimbulkan kemacetan pada satu lini dan kekurangan botol di wilayah timur. Alternatif promosi bertahap menghasilkan pendapatan sedikit lebih rendah pada minggu pertama, tetapi margin total lebih tinggi karena lembur, ekspedisi darurat, dan kehilangan penjualan berkurang. Masa depan tidak "diramal"; ia dinegosiasikan melalui konsekuensi yang dibuat terlihat.

Digital twin juga mengubah waktu keputusan. Jika simulasi hanya dilakukan dalam proyek tahunan, hasilnya cepat usang. Twin dapat menjalankan rolling simulation setiap kali keadaan berubah. Perubahan permintaan, kerusakan alat, atau cuaca memperbarui model; rencana dihitung ulang; keputusan baru dibandingkan dengan komitmen lama. Organisasi bergerak dari perencanaan periodik menuju adaptive planning. Namun, frekuensi tinggi tidak boleh mendorong reaksi berlebihan terhadap

noise. Kebijakan perlu membedakan perubahan struktural, sinyal sementara, dan ambang yang benar-benar membutuhkan tindakan.

6. Jantung Analitis: Model Berbasis Fisika, Data, dan Pengetahuan

Digital twin yang hanya bergantung pada satu pendekatan pemodelan biasanya rapuh. Model berbasis fisika memiliki struktur kausal dan dapat digunakan pada kondisi yang belum pernah diamati, tetapi memerlukan pengetahuan domain serta komputasi. Model berbasis data mampu menangkap pola rumit dan beradaptasi, tetapi dapat gagal ketika distribusi berubah atau data pelatihan tidak mewakili kondisi baru. Model berbasis aturan menangkap praktik ahli, tetapi sulit dipelihara jika aturan terlalu banyak. Pendekatan hibrida menggabungkan kekuatan ketiganya.

Pada mesin berputar, persamaan fisika dapat memperkirakan hubungan beban, temperatur, pelumasan, dan keausan. Machine learning kemudian mempelajari residual—perbedaan antara model fisika dan observasi—untuk menangkap karakteristik spesifik unit. Pengetahuan teknisi menambahkan aturan seperti gejala suara tertentu atau efek riwayat perbaikan. Ketika data sensor hilang, model fisika menjaga kontinuitas; ketika kondisi aktual menyimpang, komponen pembelajaran menyesuaikan estimasi. Kombinasi ini meningkatkan robustness dan kemampuan menjelaskan.

Pemilihan fidelitas merupakan keputusan ekonomi. Model berfidelitas tinggi merepresentasikan detail lebih banyak, tetapi membutuhkan data, waktu, dan daya hitung yang besar. Untuk kendali waktu nyata, surrogate model atau reduced-order model mungkin diperlukan. Twin dapat memiliki hierarki: model rinci dipakai untuk desain dan kalibrasi, sedangkan model cepat dipakai untuk operasi. Rasheed et al. (2020) menempatkan pengurangan orde, asimilasi data, dan komputasi skala besar sebagai enabler penting untuk mencapai respons yang berguna.

Kecerdasan buatan memperluas fungsi twin dalam empat cara. Pertama, AI mengekstrak keadaan dari data kompleks seperti gambar, suara, video, dan teks. Kedua, AI mendeteksi anomali dan memprediksi kejadian. Ketiga, AI mengoptimalkan tindakan dalam ruang keputusan yang besar. Keempat, AI dapat menjadi antarmuka pengetahuan: pengguna mengajukan pertanyaan dalam bahasa alami, lalu sistem menerjemahkannya menjadi kueri, skenario, atau ringkasan. Kreuzer et al. (2024) menunjukkan bahwa integrasi AI dan digital twin berkembang

pesat, tetapi konsistensi istilah, kualitas evaluasi, serta kematangan implementasi masih beragam.

Generative AI memberi peluang baru sekaligus risiko. Model bahasa dapat merangkum log operasi, membantu menulis skenario, menjelaskan hasil simulasi, atau menyusun prosedur. Namun, model bahasa tidak boleh menggantikan solver, model fisika, atau sumber data yang tervalidasi. Ia dapat “berhalusinasi”, mengarang hubungan, dan menyajikan keyakinan verbal tanpa bukti numerik. Arsitektur yang sehat memisahkan lapisan percakapan dari mesin kebenaran: jawaban naratif harus merujuk pada data, versi model, waktu pembaruan, asumsi, dan hasil komputasi yang dapat diaudit.

Knowledge graph membantu menghubungkan data dan model. Dalam twin pabrik, graph dapat menyatakan bahwa sensor S-104 mengukur getaran pada bantalan B-3, yang merupakan bagian motor M-2, yang menggerakkan pompa P-7, yang memasok proses tertentu, dan pemeliharannya menjadi tanggung jawab tim tertentu. Ketika anomali muncul, sistem dapat menelusuri dampak ke proses, produk, jadwal, dan suku cadang. Semantik juga mendukung interoperabilitas: sistem yang berbeda dapat memahami bahwa istilah, satuan, dan identitas mengacu pada entitas yang sama.

Data sintetis merupakan fungsi penting lain. Kegagalan besar jarang terjadi karena perusahaan biasanya mencegahnya, sehingga data pelatihan untuk predictive maintenance terbatas. Twin dapat menyimulasikan degradasi dan menghasilkan contoh di bawah kondisi berbeda. Akan tetapi, synthetic data mewarisi bias model. Jika mode kegagalan tidak dimodelkan, data sintetis tidak akan menemukannya. Oleh sebab itu, data sintetis sebaiknya melengkapi, bukan menggantikan, bukti lapangan; model harus diberi label mengenai wilayah validitasnya.

Model drift terjadi ketika hubungan antara input dan output berubah. Peralatan menua, bahan baku berganti, perilaku pelanggan berubah, operator mengadaptasi kebiasaan, dan iklim menggeser pola. Twin harus memantau kesalahan prediksi, distribusi input, dan perubahan struktur. MLOps untuk model AI dan ModelOps untuk keseluruhan model perlu meliputi registrasi, versi, pengujian, persetujuan, deployment, monitoring, rollback, dan retirement. Kualitas twin bukan properti yang sekali dicapai, melainkan layanan yang harus dipelihara.

7. Mekanisme Penciptaan Nilai Bisnis

Investasi digital twin tidak boleh dibenarkan oleh kebaruan teknologi. Nilainya harus ditelusuri melalui rantai sebab-akibat: kemampuan teknis mengubah keputusan atau proses; perubahan itu memengaruhi indikator operasi; indikator operasi memengaruhi arus kas, risiko, pelanggan, keberlanjutan, atau pilihan strategis. Trauer et al. (2023) menekankan pentingnya proposisi nilai, segmen pengguna, sumber daya, mitra, struktur biaya, dan hasil ketika merancang model bisnis digital twin.

Mekanisme nilai pertama adalah visibilitas kontekstual. Twin menyatukan data yang tersebar ke dalam gambaran keadaan sistem. Nilainya muncul ketika visibilitas memperpendek waktu deteksi, mengurangi pencarian informasi, dan menciptakan single operational picture. Dalam operasi pelabuhan, posisi kapal saja tidak cukup; pengelola perlu menghubungkannya dengan jadwal sandar, kapasitas alat, ketersediaan tenaga, status dokumen, cuaca, dan arus truk. Twin membuat hubungan tersebut dapat dinavigasi.

Mekanisme kedua adalah pengurangan downtime dan biaya pemeliharaan. Pemeliharaan berbasis kalender sering terlalu dini atau terlambat. Condition-based dan predictive maintenance mengarahkan intervensi sesuai kondisi serta risiko. Errandonea et al. (2020) dan van Dinter et al. (2022) menunjukkan penggunaan twin untuk diagnosis, prognosis, estimasi remaining useful life, dan perencanaan pemeliharaan. Nilai tidak hanya berasal dari mencegah kerusakan, tetapi juga dari menyelaraskan waktu henti dengan produksi, tenaga, alat, dan suku cadang.

Mekanisme ketiga adalah peningkatan throughput, mutu, dan yield. Twin menguji kombinasi jadwal, parameter, urutan, dan alokasi sumber daya. Jika model menghubungkan parameter proses dengan mutu, perusahaan dapat mengurangi scrap dan rework. Optimasi lokal harus dihindari: mempercepat satu mesin bisa hanya memindahkan bottleneck. Twin tingkat sistem melihat aliran ujung ke ujung, sehingga perbaikan dinilai terhadap waktu siklus, work in process, energi, dan ketepatan pengiriman.

Mekanisme keempat adalah percepatan inovasi. Prototype digital memungkinkan desain diuji sebelum bahan dipotong atau fasilitas dibangun. Data penggunaan kembali ke engineering, sehingga asumsi desain dapat dibandingkan dengan kenyataan. Lo et al. (2021) menjelaskan peran twin dalam product design and

development, termasuk evaluasi kinerja dan pembelajaran sepanjang siklus hidup. Perusahaan dapat melakukan virtual commissioning, menguji sistem kendali, melatih operator, dan menemukan konflik sebelum instalasi.

Mekanisme kelima adalah personalisasi dan servitization. Produsen yang memahami keadaan setiap unit produk dapat menjual uptime, performance-as-a-service, atau kontrak berbasis hasil. Alih-alih hanya menjual kompresor, produsen dapat menjamin tekanan dan ketersediaan. Twin mengukur penggunaan, memprediksi kebutuhan, dan mendukung penetapan harga risiko. Model ini mengubah hubungan satu kali menjadi layanan jangka panjang, tetapi juga memindahkan sebagian risiko kinerja ke produsen.

Mekanisme keenam adalah ketahanan. Twin membantu melihat dependensi, menguji gangguan, dan membandingkan strategi kontinjensi. Dalam rantai pasok, ia dapat menunjukkan efek riak dari pemasok, pelabuhan, kapasitas, atau permintaan. Ivanov dan Dolgui (2021) merumuskan digital supply chain twin sebagai model komputer yang merepresentasikan keadaan jaringan pada suatu waktu dan mendukung pengelolaan gangguan. Nilai ketahanan sering tidak tampak pada tahun normal; ia muncul sebagai kerugian yang dihindari saat krisis.

Mekanisme ketujuh adalah efisiensi energi dan keberlanjutan. Twin menghubungkan konsumsi dengan beban, konfigurasi, cuaca, okupansi, produksi, dan emisi. Skenario dapat membandingkan perubahan set point, jadwal, desain, bahan, rute, atau strategi penggunaan kembali. Preut et al. (2021) menunjukkan potensi twin untuk menyediakan informasi yang diperlukan bagi ekonomi sirkular. Namun, manfaat harus dikurangi oleh jejak sensor, komputasi, penyimpanan, serta perangkat; "digital" tidak otomatis berarti "hijau".

Mekanisme kedelapan adalah kualitas keputusan strategis. Twin memungkinkan manajemen membandingkan investasi kapasitas, lokasi, diversifikasi pemasok, kebijakan inventori, dan desain jaringan sebelum membuat komitmen besar. Nilai di sini adalah option value: perusahaan mempertahankan fleksibilitas karena dapat belajar lebih cepat dan menunda keputusan irreversibel sampai informasi cukup. Digital twin menjadi sarana real-options thinking, bukan sekadar perangkat otomatisasi.

Nilai juga dapat bersifat kognitif dan institusional. Twin menciptakan bahasa lintas fungsi, mempercepat pelatihan, dan menyimpan pengetahuan. Tetapi manfaat ini sering sulit dimonetisasi. Business case yang baik memisahkan manfaat terukur, manfaat yang dapat diperkirakan, dan manfaat strategis. Ia juga menetapkan

baseline, counterfactual, serta aturan atribusi agar setiap peningkatan tidak secara otomatis diklaim sebagai hasil twin.

8. Manufaktur: Dari Desain sampai Layanan Purnajual

Manufaktur merupakan lahan paling matang bagi digital twin karena aset, proses, dan variabelnya relatif dapat diinstrumentasi. Pada tahap desain, twin mendukung eksplorasi konfigurasi, simulasi beban, toleransi, performa, dan manufakturabilitas. Tim dapat membandingkan desain terhadap biaya, massa, energi, reliability, dan kebutuhan layanan. Data dari produk yang telah digunakan memperbaiki generasi berikutnya, sehingga lingkaran product lifecycle management menjadi lebih tertutup.

Dalam perencanaan pabrik, digital twin memodelkan tata letak, material handling, jadwal, operator, buffer, dan utilisasi. Sebelum lini dibangun, virtual commissioning menguji programmable logic controller, robot, interlock, dan urutan. Kesalahan yang biasanya ditemukan saat instalasi dapat diketahui lebih awal. Setelah operasi, model yang sama atau turunannya diperbarui dengan data aktual. Perbedaan antara rencana dan pelaksanaan menjadi bahan perbaikan.

Pada shop floor, twin menghubungkan order, material, mesin, alat, manusia, dan mutu. Corallo et al. (2021) mengusulkan pandangan multi-dimensi untuk twin rantai produksi karena tidak cukup hanya memodelkan aset. Misalnya, keterlambatan sebuah order dapat disebabkan oleh availability mesin, kekurangan operator bersertifikat, pergantian tool, lot bahan yang tertahan, inspeksi, atau prioritas yang berubah. Twin membantu menilai penyebab secara sistemik.

Predictive quality menggunakan sinyal proses untuk memperkirakan mutu sebelum inspeksi akhir. Pada proses pengelasan, pencetakan, fermentasi, atau pemesinan, model mengaitkan parameter dengan cacat. Jika probabilitas cacat meningkat, sistem dapat menyesuaikan parameter atau mengarahkan inspeksi. Pendekatan ini menggeser quality control dari penyaringan hasil menuju pencegahan. Namun, keputusan otomatis harus menjaga traceability dan tidak menyembunyikan perubahan yang dapat memengaruhi validasi produk.

Pemeliharaan adalah kasus penggunaan populer, tetapi business process di sekeliling model menentukan nilai. Prediksi tanpa work order, spare part, tenaga, izin, dan jendela operasi tidak mengurangi downtime. Twin perlu terintegrasi dengan computerized maintenance management system, produksi, dan persediaan. Metrik

teknis seperti akurasi prediksi harus dilengkapi lead time tindakan, false alarm cost, downtime avoided, maintenance compliance, serta ketersediaan suku cadang.

Twin produk yang digunakan pelanggan membuka layanan baru. Produsen dapat memantau kesehatan armada, memberikan remote diagnostics, mengirim pembaruan, dan merancang kontrak hasil. Data penggunaan juga menunjukkan apakah fitur benar-benar bernilai. Di sisi lain, muncul pertanyaan mengenai kepemilikan data, kerahasiaan operasi pelanggan, tanggung jawab bila rekomendasi gagal, dan lock-in terhadap platform produsen. Model layanan perlu menjelaskan hak serta nilai bagi kedua pihak.

Bagi industri proses seperti minyak dan gas, kimia, semen, pulp, pangan, dan farmasi, tantangan utamanya adalah proses kontinu, interaksi nonlinier, keselamatan, dan regulasi. Perno et al. (2022) menemukan bahwa integrasi data, kompleksitas model, keterampilan, serta business case menjadi penghambat implementasi. Pendekatan bertahap dapat dimulai dari satu unit kritis, kemudian memperluas ke proses dan site. Keberhasilan awal harus membangun reusable data foundation, bukan aplikasi tertutup baru.

9. Rantai Pasok: Menguji Gangguan Sebelum Gangguan Terjadi

Rantai pasok adalah sistem jaringan yang kompleks, adaptif, dan lintas organisasi. Perusahaan sering memiliki visibilitas baik pada fasilitas sendiri tetapi lemah pada pemasok tingkat kedua, transportasi, pelabuhan, dan pelanggan hilir. Digital supply chain twin berusaha merepresentasikan struktur jaringan, aliran, kebijakan, kapasitas, inventori, lead time, permintaan, risiko, dan keadaan aktual. Tujuannya bukan membuat peta indah, melainkan meningkatkan keputusan dalam perencanaan dan gangguan.

Dalam operasi normal, twin dapat menguji kebijakan safety stock, lot size, alokasi permintaan, penjadwalan, dan transportasi. Ketika keadaan berubah, model memperbarui expected arrival, kapasitas, serta risiko kekurangan. Dalam krisis, twin menjalankan skenario: menutup node, mengurangi kapasitas, memperpanjang lead time, memindahkan permintaan, atau mengubah rute. Hasilnya dinilai terhadap service level, biaya, cash-to-cash cycle, emisi, dan waktu pemulihan.

Ivanov dan Dolgui (2021) menekankan peran twin dalam disruption risk dan resilience. Misalnya, perusahaan elektronik mengetahui bahwa pemasok komponen

tertentu berada di wilayah rawan banjir. Twin tidak hanya menghitung kemungkinan berhentinya pemasok; ia menelusuri bill of materials, produk terdampak, inventori yang tersedia, substitusi, kapasitas pemasok alternatif, sertifikasi, transportasi, dan prioritas pelanggan. Manajemen dapat membandingkan biaya dual sourcing sekarang dengan kerugian yang dihindari nanti.

Efek bullwhip dan ripple perlu dibedakan. Bullwhip adalah pembesaran variasi permintaan ke hulu akibat informasi dan kebijakan pesanan. Ripple effect adalah perambatan gangguan struktur atau kapasitas melalui jaringan. Twin dapat mensimulasikan keduanya. Keputusan yang tampak aman pada satu node—misalnya menaikkan pesanan secara defensif—dapat memperburuk kelangkaan sistem. Gambaran end-to-end membantu mengurangi tindakan yang rasional secara lokal tetapi destruktif secara kolektif.

Tantangan terbesar ialah data lintas perusahaan. Pemasok mungkin tidak mau membagikan kapasitas, biaya, atau kondisi aktual. Format dan kualitas berbeda; insentif tidak sejajar. Twin rantai pasok membutuhkan federated architecture, kontrak data, semantik, cyber security, dan mekanisme kepercayaan. Tidak semua data perlu dipusatkan. Pihak dapat berbagi indikator, event, atau hasil komputasi tanpa membuka seluruh data mentah. Governance network sama pentingnya dengan teknologi.

Untuk rantai dingin pangan dan farmasi, twin dapat menggabungkan temperatur, lokasi, waktu, kemasan, dan umur simpan. Bila terjadi deviasi, model memperkirakan dampak terhadap mutu dan mengarahkan prioritas distribusi. Produk tidak harus otomatis dibuang hanya karena satu ambang sesaat terlewati; keputusan dapat menggunakan profil waktu-suhu dan model degradasi. Hal ini mengurangi risiko keselamatan sekaligus pemborosan.

Dalam konteks Indonesia sebagai negara kepulauan, twin rantai pasok memiliki relevansi tinggi. Ketergantungan pada pelabuhan, cuaca, konektivitas antarpulau, dan variasi infrastruktur menciptakan lead time serta risiko besar. Twin tidak menghapus keterbatasan fisik, tetapi dapat membantu sinkronisasi kapal, terminal, pergudangan, truk, kereta, dan distribusi. Manfaat awal dapat dicapai dengan memodelkan koridor prioritas dan komoditas strategis, bukan langsung seluruh ekonomi nasional.

10. Produk, Pelanggan, dan Transformasi Menuju Layanan

Produk yang terhubung mengubah batas hubungan produsen dan pelanggan. Pada model transaksi konvensional, informasi produsen sering berhenti setelah produk dijual. Keluhan, klaim garansi, dan kunjungan servis menjadi sumber umpan balik yang terlambat. Product digital twin mempertahankan identitas setiap unit atau tipe produk, menyimpan konfigurasi, riwayat penggunaan, lingkungan, modifikasi, kejadian, dan layanan. Perusahaan dapat melihat bagaimana produk benar-benar digunakan, bukan hanya bagaimana ia diasumsikan akan digunakan.

Informasi tersebut mendukung closed-loop product lifecycle management. Engineering dapat membandingkan beban desain dengan beban aktual; manufaktur dapat menelusuri cacat ke lot, proses, atau pemasok; layanan dapat mendiagnosis dari jarak jauh; pemasaran dapat memahami fitur yang dipakai; pelanggan memperoleh rekomendasi operasi. Lo et al. (2021) menempatkan digital twin sebagai penghubung penting dalam desain dan pengembangan produk karena ia menyatukan pembelajaran dari fase yang biasanya terpisah.

Namun, tidak semua data penggunaan pantas dikumpulkan. Prinsip data minimization mengharuskan perusahaan hanya mengumpulkan data yang diperlukan untuk tujuan yang sah dan disepakati. Pengguna perlu mengetahui apa yang diukur, untuk apa, berapa lama, siapa yang mengakses, dan bagaimana manfaat dibagi. Pada alat kesehatan, kendaraan, peralatan rumah, atau mesin pabrik pelanggan, data dapat mengungkapkan kondisi sensitif, kebiasaan, kapasitas, formula, dan strategi operasi. Kepercayaan menjadi bagian dari proposisi nilai.

Servitization terjadi ketika perusahaan berpindah dari menjual produk ke menyediakan fungsi atau hasil. Produsen mesin dapat menawarkan jam operasi tersedia; produsen pencahayaan menawarkan lumen; penyedia udara bertekanan menawarkan volume dan kualitas; produsen kendaraan menawarkan mobilitas. Digital twin mendukung pengukuran kontrak, prediksi biaya, pemeliharaan, dan optimasi. Li et al. (2020) menunjukkan bagaimana jaringan platform digital twin dapat mendukung model bisnis berkelanjutan dan penciptaan nilai ekonomi, sosial, serta lingkungan.

Perubahan tersebut tidak sederhana. Pendapatan berulang menarik, tetapi perusahaan harus membiayai aset, memikul risiko performa, dan mengelola hubungan lebih lama. Fungsi penjualan harus memahami outcome; keuangan harus

menghitung lifetime economics; engineering harus merancang maintainability; layanan harus mampu merespons; legal harus mengatur tanggung jawab; TI harus menjaga platform. Twin menjadi enabler transformasi model bisnis, bukan pengganti transformasi itu sendiri.

Penetapan harga dapat memakai subscription, pay-per-use, gainsharing, availability contract, atau risk-sharing. Dalam gainsharing, penyedia mendapat bagian dari penghematan yang diverifikasi. Digital twin membantu menetapkan baseline dan mengukur hasil, tetapi kedua pihak harus menyepakati metodologi. Jika model dikendalikan sepihak oleh penyedia, pelanggan mungkin meragukan klaim. Auditability, akses data, dan mekanisme penyelesaian sengketa perlu dirancang.

Digital twin juga mendukung mass customization. Konfigurasi virtual pelanggan dapat diuji terhadap aturan teknik, waktu produksi, dan biaya. Setelah produk digunakan, parameter dapat disesuaikan melalui perangkat lunak. Namun, variasi menambah kompleksitas. Twin harus menjadi bagian dari modular architecture dan configuration management agar personalisasi tidak menghancurkan skala ekonomi. Setiap varian perlu identitas, kompatibilitas, dan traceability.

Pada akhir masa pakai, product twin dapat menjadi dasar repair, refurbish, remanufacture, reuse, atau recycle. Riwayat bahan, penggunaan, kondisi, dan perbaikan membantu menentukan nilai sisa. Digital product passport memperluas transparansi lintas pemilik. Preut et al. (2021) menghubungkan potensi ini dengan circular supply chain. Nilai masa depan produk tidak lagi hanya ditentukan usia kronologis, tetapi oleh kondisi yang dibuktikan.

11. Bangunan, Energi, Infrastruktur, dan Kota

Bangunan adalah sistem dinamis yang memadukan struktur, peralatan, cuaca, manusia, energi, dan aturan operasi. BIM umumnya kuat dalam desain serta informasi aset, tetapi sering menjadi statis setelah serah terima. Building digital twin menghubungkan representasi bangunan dengan sensor, building management system, jadwal, okupansi, pemeliharaan, dan model energi. Ia dapat mendeteksi anomali, mengoptimalkan HVAC, memprediksi kebutuhan, serta menguji renovasi.

Contoh sederhananya adalah gedung perkantoran dengan keluhan ruang terlalu dingin di satu sisi dan terlalu panas di sisi lain. Menurunkan set point secara keseluruhan mungkin meningkatkan konsumsi dan memperburuk sebagian ruang.

Twin menggabungkan orientasi, selubung bangunan, cuaca, okupansi, aliran udara, sensor, serta karakteristik peralatan. Skenario dapat membandingkan balancing, perubahan jadwal, perbaikan sensor, retrofit, dan kontrol berbasis zona. Cespedes-Cubides et al. (2024) mengidentifikasi monitoring komponen, deteksi anomali, optimasi operasi, predictive maintenance, dan simulasi alternatif sebagai aplikasi utama building twin untuk efisiensi energi.

Pada sistem energi, twin dapat mewakili turbin, pembangkit, jaringan, microgrid, baterai, beban, dan pasar. Variabilitas energi terbarukan meningkatkan kebutuhan forecasting serta koordinasi. Model dapat menyimulasikan cuaca, output, permintaan, state of charge, harga, dan kendala jaringan. Di tingkat industri, twin mengaitkan jadwal produksi dengan tarif serta intensitas karbon, sehingga beban fleksibel dapat dipindahkan tanpa mengorbankan layanan.

Infrastruktur sipil seperti jembatan, bendungan, jalan, rel, pelabuhan, jaringan air, dan drainase memiliki umur panjang serta risiko tinggi. Sensor dan inspeksi memperbarui model kondisi; skenario menilai beban, degradasi, cuaca, serta intervensi. Prioritas pemeliharaan dapat ditentukan berdasarkan risiko, bukan hanya umur. Namun, aset lama sering tidak memiliki model digital atau sensor. Strategi brownfield memerlukan laser scanning, photogrammetry, inspeksi, rekonstruksi dokumen, dan instrumentasi selektif.

Urban digital twin memperluas skala ke kota. Ia dapat menggabungkan tata ruang, bangunan, mobilitas, utilitas, lingkungan, populasi, ekonomi, dan layanan publik. Weil et al. (2023) menunjukkan potensi sekaligus tantangan twin kota untuk keberlanjutan. Model lalu lintas dapat menguji kebijakan rute, transit, parkir, dan pembangunan. Model banjir dapat menggabungkan topografi, curah hujan, drainase, sungai, pasang, dan penggunaan lahan. Model energi dapat melihat kebutuhan, pembangkitan, dan efisiensi kawasan.

Semakin luas skala, semakin besar risiko reduksionisme. Kota bukan mesin tunggal; ia adalah ruang sosial dengan konflik kepentingan, ketimpangan, perilaku adaptif, dan politik. Data yang lengkap untuk kawasan formal belum tentu mewakili permukiman informal. Optimasi arus kendaraan dapat merugikan pejalan kaki; efisiensi layanan dapat memperluas pengawasan; visualisasi canggih dapat menciptakan otoritas semu. Twin kota harus mendukung deliberasi, bukan menggantikan demokrasi.

Partisipasi publik dapat dibantu melalui skenario visual. Warga melihat dampak alternatif tata ruang, transportasi, ruang hijau, atau mitigasi bencana. Akan tetapi, keterlibatan bukan sekadar menampilkan model setelah pilihan dibuat. Asumsi, indikator, dan tujuan perlu dibahas bersama. Data komunitas, pengalaman lokal, serta pengetahuan kelompok rentan harus masuk. Human-centered urban twin mengakui bahwa realitas kota tidak sepenuhnya tertangkap sensor.

Untuk Bogor, Manado, Bitung, Tondano, dan kota-kota Indonesia lain, prioritas tidak harus membangun “kota kembar” total. Kasus penggunaan dapat dipilih: banjir dan DAS, kemacetan koridor, sampah, energi gedung publik, kualitas air danau, atau koordinasi pelabuhan. Twin minimum menghubungkan data kunci, model keputusan, dan proses instansi. Setelah nilai serta tata kelola terbukti, ruang lingkup diperluas. Pendekatan ini menghindari proyek mercusuar yang kuat pada visual tetapi lemah pada keputusan.

12. Kesehatan, Rumah Sakit, dan Batas Etis Kembaran Manusia

Dalam kesehatan, istilah digital twin digunakan pada banyak tingkat: molekul, sel, organ, pasien, alur klinis, rumah sakit, dan populasi. Human digital twin yang lengkap masih merupakan visi yang sangat sulit. Tubuh berubah, dipengaruhi biologi, perilaku, lingkungan, dan intervensi. Data tidak pernah lengkap; penyakit jarang mengikuti model mekanis sederhana. Oleh karena itu, klaim harus dibatasi pada fungsi tertentu, misalnya simulasi jantung, prediksi respons terapi, monitoring pasien, atau optimasi aliran pelayanan.

Vallée (2023) menjelaskan potensi digital twin dalam personalisasi, prediksi, operasi klinis, dan pelatihan. Pada perawatan individu, twin dapat menggabungkan citra, laboratorium, vital signs, obat, genomik, dan riwayat untuk menilai alternatif. Pada rumah sakit, twin operasional dapat memodelkan kedatangan pasien, triase, bed, tenaga, laboratorium, farmasi, kamar operasi, dan discharge. Keduanya berbeda dalam data, risiko, validasi, dan pengawasan.

Contoh rumah sakit: instalasi gawat darurat mengalami waktu tunggu panjang. Menambah dokter tampak sebagai solusi, tetapi twin discrete-event menunjukkan bottleneck pada pemeriksaan penunjang dan ketersediaan bed rawat. Skenario membandingkan fast track, perubahan roster, point-of-care testing, discharge lounge, dan koordinasi rawat inap. Hasil tidak hanya menilai waktu tunggu rata-rata, tetapi juga pasien prioritas tinggi, beban staf, risiko keselamatan, dan variasi harian.

Kembaran pasien menuntut consent, privacy, fairness, clinical validity, dan accountability. Data dapat sangat sensitif; serangan atau kesalahan dapat membahayakan. Model yang dilatih pada populasi tertentu mungkin tidak akurat bagi kelompok lain. Penjelasan harus sesuai tingkat risiko dan pengguna. Dokter perlu mengetahui evidence, uncertainty, contraindication, serta alasan rekomendasi. Pasien perlu memperoleh informasi yang dapat dipahami. Keputusan klinis tidak boleh diserahkan pada representasi yang tidak dapat dipertanggungjawabkan.

Konsep “consent sekali untuk selamanya” tidak memadai. Penggunaan data berkembang, model diperbarui, dan pihak baru dapat terlibat. Dynamic consent atau tata kelola berlapis lebih sesuai. Data yang dipakai untuk perawatan, penelitian, penagihan, dan pengembangan komersial memiliki dasar serta harapan berbeda. De-identification mengurangi risiko tetapi tidak selalu mencegah re-identification ketika data kaya digabungkan.

Digital twin rumah sakit juga harus memperhatikan respons manusia. Jika model mengoptimalkan utilisasi hingga mendekati 100 persen, sistem kehilangan slack untuk keadaan darurat dan meningkatkan burnout. Efisiensi tidak boleh menjadi tujuan tunggal. Balanced objectives mencakup mutu klinis, keselamatan, pengalaman pasien, beban staf, akses, biaya, dan resilience. Model yang hanya menghitung throughput dapat mendorong kebijakan yang secara statistik efisien tetapi secara manusiawi buruk.

Validasi klinis lebih ketat daripada validasi operasi biasa. Model perlu dibandingkan lintas lokasi, waktu, demografi, dan kondisi. Perubahan protokol, alat, obat, atau pola penyakit dapat menyebabkan drift. High-stakes recommendations memerlukan prospective evaluation, regulatory review, dan human oversight. Twin dapat memperluas kemampuan dokter, tetapi bukan “pasien kedua” yang lebih benar daripada pasien nyata.

13. Pertanian, Kehutanan, Kelautan, Pertambangan, dan Lingkungan

Digital twin tidak terbatas pada pabrik dan gedung. Sistem alam serta kegiatan berbasis sumber daya juga dapat direpresentasikan, meskipun ketidakpastiannya besar. Dalam pertanian, twin lahan atau tanaman menggabungkan tanah, cuaca, varietas, kelembapan, nutrisi, hama, citra drone, dan praktik budidaya. Skenario membantu penjadwalan irigasi, pemupukan, perlindungan tanaman, serta panen.

Nilai terbesar bukan selalu otomatisasi penuh, melainkan rekomendasi spesifik lokasi yang mengurangi input dan risiko.

Untuk peternakan, data kesehatan, pakan, aktivitas, lingkungan, dan produksi dapat mendukung deteksi dini penyakit serta optimasi kesejahteraan. Tetapi instrumentasi tidak boleh mengubah hewan menjadi sekadar unit produksi. Indikator perilaku, stres, dan kesehatan perlu menjadi tujuan, bukan hanya hasil ekonomi. Bagi petani kecil, model bisnis harus menghindari ketergantungan pada platform yang menguasai data serta keputusan.

Dalam kehutanan, landscape twin dapat memadukan inventarisasi, pertumbuhan, biodiversitas, tanah, hidrologi, kebakaran, akses, masyarakat, dan penggunaan lahan. Horizon waktunya panjang; perubahan musim, iklim, kebijakan, dan perilaku manusia berpengaruh. Skenario dapat menilai pemanenan, restorasi, koridor habitat, risiko kebakaran, serta jasa ekosistem. Namun, nilai budaya dan ekologis tidak seluruhnya dapat direduksi menjadi angka. Pengetahuan masyarakat adat dan lokal perlu diperlakukan sebagai sumber pengetahuan dengan hak yang jelas.

Pada kawasan Danau Tondano, misalnya, twin konseptual dapat menghubungkan DAS, curah hujan, erosi, sedimentasi, kualitas air, eceng gondok, penggunaan lahan, permukiman, pertanian, perikanan, PLTA, danau, serta kegiatan pengerukan. Manajemen dapat menguji kombinasi rehabilitasi DAS, pengendalian nutrisi, pengerukan, pemanfaatan biomassa, zonasi, dan tata air. Twin tidak menggantikan koordinasi kelembagaan; ia membantu menunjukkan bahwa tindakan sektoral memiliki dampak lintas wilayah dan waktu.

Digital twin laut dapat menggabungkan arus, temperatur, salinitas, cuaca, bathymetry, habitat, kualitas air, perikanan, kapal, dan infrastruktur pesisir. Aplikasi meliputi navigasi, aquaculture, konservasi, respons tumpahan, energi laut, dan adaptasi iklim. Data laut mahal dan jarang; satelit, buoy, kapal, sensor, serta model numerik harus diasimilasikan. Ketidakpastian perlu terlihat agar pengguna tidak menganggap permukaan visual sebagai observasi langsung.

Pertambangan dapat memakai twin untuk geologi, perencanaan pit, alat, hauling, pengolahan, keselamatan, air, energi, emisi, dan reklamasi. Model menguji jadwal, blending, rute, atau perubahan kadar. Risiko etis muncul jika optimasi hanya mengejar produksi sementara dampak masyarakat serta lingkungan diperlakukan sebagai constraint minimum. Twin keberlanjutan perlu memasukkan cumulative impact, tailing risk, air, biodiversitas, dan rencana penutupan.

Dalam menghadapi perubahan iklim, environmental twin membantu stress testing. Perusahaan dapat menilai aset di bawah suhu, curah hujan, muka laut, kebakaran, atau ketersediaan air yang berubah. Horizon puluhan tahun membuat uncertainty besar; skenario iklim tidak boleh diperlakukan sebagai forecast titik. Robust decision making mencari strategi yang tetap dapat diterima pada banyak masa depan. Twin menjadi alat adaptasi bila ia membantu memilih tindakan fleksibel, memantau signpost, dan memperbarui strategi.

14. Narasi Kasus: PT Nusantara Rasa Membangun Twin dari Masalah Nyata

Untuk melihat logika implementasi secara utuh, bayangkan PT Nusantara Rasa, perusahaan pangan hipotetis dengan tiga pabrik di Jawa, pemasok bahan dari beberapa pulau, dan distribusi nasional. Perusahaan menghadapi tiga masalah: downtime mesin pengisian, variasi mutu, dan pengiriman yang terlambat ketika permintaan promosi naik. Direksi semula tertarik membeli platform “enterprise digital twin” setelah melihat demonstrasi tiga dimensi. Namun, tim lintas fungsi mengubah titik awal: bukan memilih platform, melainkan memilih keputusan yang paling bernilai.

Analisis menunjukkan bahwa mesin pengisian pada Pabrik B menjadi bottleneck. Kerusakan mendadak menyebabkan lembur, kehilangan output, dan pengiriman darurat. Data sebenarnya telah tersedia: PLC, temperatur, tekanan, getaran, kecepatan, alarm, hasil inspeksi, work order, lot bahan, dan mutu. Masalahnya, data berada pada enam sistem dan timestamp tidak konsisten. Teknisi senior mengenali pola, tetapi pengetahuannya tidak tertulis. Perusahaan menetapkan use case pertama: memprediksi risiko gangguan 48 jam hingga 14 hari dan menghubungkannya dengan keputusan jadwal serta pemeliharaan.

Tim membentuk product owner dari operasi, reliability engineer sebagai model owner, data engineer, teknisi, planner, quality, TI/OT security, serta finance analyst. Mereka menyusun baseline enam bulan: unplanned downtime, mean time between failure, output lost, overtime, scrap, maintenance cost, dan service level. Mereka juga mencatat proses keputusan saat ini. Tujuannya bukan hanya meningkatkan AUC model, tetapi memberi waktu yang cukup untuk tindakan ekonomis.

Twin minimum dibangun tanpa visual 3D. Ia terdiri dari identitas aset, streaming data terpilih, model keadaan, anomaly detection, aturan teknisi, simulasi dampak jadwal, dan antarmuka risiko. Setiap peringatan menyebutkan komponen, sinyal utama, confidence, horizon, konsekuensi produksi, dan tindakan pemeriksaan. Selama delapan minggu, sistem berjalan dalam shadow mode. Tim membandingkan peringatan dengan observasi, menemukan sensor yang salah kalibrasi, dan memperbaiki kategori work order.

Hasil awal tidak sempurna. Model sensitif terhadap perubahan produk dan pembersihan, sehingga banyak false positive. Alih-alih menyalahkan AI, tim menyadari bahwa konteks recipe dan cleaning cycle belum masuk. Setelah data tersebut ditambahkan, performa membaik. Lebih penting lagi, operator mulai mencatat gejala secara konsisten karena melihat catatan mereka memengaruhi rekomendasi. Proyek teknologi berubah menjadi perbaikan disiplin data dan proses kerja.

Pada bulan keenam, perusahaan mengintegrasikan twin dengan jadwal produksi dan persediaan. Jika risiko meningkat, sistem membandingkan tindakan: inspeksi singkat sekarang, pemeliharaan saat changeover, atau terus operasi dengan risiko tertentu. Dampak terhadap pesanan dan stok dihitung. Planner tidak lagi menerima alarm teknis tanpa konteks bisnis. Finance menghitung avoided loss berdasarkan kejadian yang memiliki counterfactual jelas, bukan semua perubahan output.

Setelah use case pertama mencapai payback yang dapat diterima, perusahaan memperluas ke predictive quality. Model menghubungkan parameter proses, karakteristik bahan, cleaning, dan hasil laboratorium. Sistem mendeteksi pergeseran sebelum produk keluar spesifikasi. Tim quality tetap menyetujui perubahan parameter dan menjaga validation protocol. Data twin pertama menjadi foundation, sehingga use case kedua tidak memulai integrasi dari nol.

Tahap berikutnya membangun supply network twin untuk promosi. Model menggabungkan forecast, kapasitas, changeover, bahan, stok, transportasi, dan service level. Saat pemasok kemasan mengalami gangguan, manajemen menguji alokasi produk, alternatif desain, dan promosi bertahap. Keputusan yang sebelumnya membutuhkan spreadsheet lintas departemen selama beberapa hari dapat disiapkan dalam jam, sementara asumsi tetap dapat diperdebatkan.

Kasus hipotetis ini menampilkan beberapa prinsip. Pertama, nilai dimulai dari keputusan. Kedua, twin minimum tidak harus spektakuler secara visual. Ketiga,

kualitas konteks lebih penting daripada volume data. Keempat, model perlu masuk ke workflow. Kelima, ekspansi dilakukan setelah bukti, bukan karena ambisi arsitektur. Keenam, organisasi belajar bersamaan dengan model. PT Nusantara Rasa tidak “membeli masa depan”; ia membangun kemampuan untuk berlatih menghadapi masa depan.

15. Strategi, Dynamic Capabilities, dan Model Bisnis

Digital twin menjadi strategis ketika ia meningkatkan kemampuan perusahaan untuk merasakan perubahan, menangkap peluang, dan mentransformasi sumber daya. Dalam kerangka dynamic capabilities, sensing berarti melihat keadaan serta sinyal lebih awal; seizing berarti mengevaluasi dan memilih tindakan; transforming berarti mengubah proses, aset, struktur, atau model bisnis. Twin menguatkan ketiganya bila ia terhubung dengan keputusan dan pembelajaran, bukan bila hanya menambah dasbor.

Pada tahap sensing, twin menggabungkan data operasional dengan konteks eksternal. Perusahaan dapat mendeteksi pergeseran permintaan, degradasi aset, risiko pemasok, perubahan energi, atau pola layanan. Keunggulan bukan berasal dari banyaknya sensor, tetapi dari kemampuan mengidentifikasi sinyal material sebelum pesaing atau sebelum masalah membesar. Sistem yang terlalu sensitif dapat menghasilkan alarm fatigue; sensing yang strategis memerlukan prioritas dan threshold yang dikaitkan dengan konsekuensi.

Pada tahap seizing, twin menciptakan ruang untuk membandingkan opsi. Ia mengurangi biaya eksperimen dan mempercepat time-to-insight. Manajemen dapat menguji kombinasi desain, kapasitas, lokasi, kontrak, dan kebijakan. Namun, model tidak memilih tujuan perusahaan. Trade-off antara margin, pertumbuhan, ketahanan, pekerja, pelanggan, dan lingkungan tetap merupakan keputusan normatif. Twin memperjelas konsekuensi; kepemimpinan menetapkan nilai.

Pada tahap transforming, twin membantu orchestration. Perubahan pada produk dapat diterjemahkan ke proses, pemasok, pelatihan, dan layanan. Model dapat menjadi boundary object: representasi yang cukup sama untuk kolaborasi tetapi cukup fleksibel bagi perspektif berbeda. Dengan model bersama, engineering dan operasi tidak harus berdebat berdasarkan data yang terpisah. Transformasi tetap menuntut insentif, wewenang, dan kemampuan eksekusi. Informasi tanpa kapasitas bertindak hanya membuat masalah terlihat lebih jelas.

Strategi platform muncul ketika perusahaan menyediakan infrastruktur twin bagi ekosistem. Produsen dapat mengundang pemasok aplikasi, penyedia layanan, pelanggan, dan lembaga sertifikasi. Platform menciptakan network effects jika semakin banyak peserta meningkatkan data, layanan, atau kompatibilitas. Li et al. (2020) menggambarkan bagaimana jaringan platform dapat menopang model bisnis berkelanjutan. Tetapi platform juga dapat menciptakan kekuasaan asimetris, lock-in, dan ketergantungan pada pemilik standar.

Trauer et al. (2023) menawarkan proses sistematis untuk merancang model bisnis twin: mendeskripsikan konsep, mengidentifikasi segmen serta pain point, merumuskan proposisi nilai, menentukan aliran pendapatan dan nilai, kegiatan, sumber daya, mitra, organisasi, serta biaya. Kerangka ini mencegah proyek berhenti pada technical proof of concept. Setiap use case perlu menjawab siapa pengguna keputusan, siapa yang membayar, siapa yang menanggung risiko, data siapa yang digunakan, dan nilai apa yang dapat diverifikasi.

Beberapa arketipe pendapatan dapat dibedakan. Pertama, internal efficiency twin yang nilainya berupa penghematan dan risiko yang dihindari. Kedua, product-enhancement twin yang meningkatkan diferensiasi serta loyalitas. Ketiga, service twin dengan subscription atau pay-per-use. Keempat, outcome twin dengan availability, performance, atau gainsharing. Kelima, ecosystem twin yang memperoleh pendapatan dari transaksi, aplikasi, atau data service. Keenam, compliance twin yang mendukung pelaporan, traceability, dan sertifikasi.

Pilihan make, buy, atau partner perlu dilihat per lapisan. Perusahaan mungkin membeli konektivitas dan platform umum, bermitra untuk model khusus, tetapi mempertahankan ownership atas model proses yang menjadi keunggulan. Membeli semua dapat mempercepat, tetapi meningkatkan lock-in dan mengurangi pembelajaran. Membangun semua memberi kendali, tetapi mahal dan lambat. Arsitektur modular, open interface, portability, dan exit plan menyeimbangkan keduanya.

Digital twin juga menghasilkan strategi berbasis data yang baru. Data kondisi armada dapat memperbaiki desain, penjualan suku cadang, warranty reserve, dan strategi layanan. Namun, monetisasi data bukan hak otomatis. Data dapat merupakan co-created asset antara produsen, pengguna, operator, dan penyedia. Kontrak perlu membedakan data mentah, data turunan, model, insight, dan hak penggunaan

sekunder. Kepercayaan jangka panjang lebih bernilai daripada pendapatan singkat dari penggunaan data yang tidak diharapkan pelanggan.

Keunggulan kompetitif dari twin dapat mudah ditiru pada tingkat perangkat lunak, tetapi lebih sulit pada tingkat sistem. Data historis berkualitas, pengetahuan domain, integrasi proses, model tervalidasi, kebiasaan eksperimen, dan ekosistem mitra terbentuk secara kumulatif. Dengan demikian, moat bukan visualisasi digital; moat adalah learning loop yang semakin baik melalui penggunaan. Perusahaan yang lebih cepat belajar dari operasi dapat meningkatkan produk dan keputusan secara berulang.

16. Tata Kelola Data, Model, Keputusan, dan Siklus Hidup

Digital twin mempertemukan empat jenis tata kelola yang sering terpisah: tata kelola aset, data, model, dan keputusan. Tata kelola aset menetapkan identitas, konfigurasi, pemilik, dan perubahan fisik. Tata kelola data menetapkan kualitas, akses, lineage, privacy, serta retensi. Tata kelola model menetapkan validitas, versi, dokumentasi, dan penggunaan yang diizinkan. Tata kelola keputusan menetapkan siapa yang berwenang, bukti apa yang diperlukan, bagaimana override dilakukan, serta siapa bertanggung jawab atas hasil.

Kepemilikan perlu dibedakan dari stewardship. Asset owner bertanggung jawab atas hasil aset; data owner menetapkan kebijakan; data steward menjaga definisi dan kualitas; model owner bertanggung jawab atas kesesuaian model; product owner memastikan nilai pengguna; platform owner menjaga layanan; risk owner menetapkan toleransi. Satu orang dapat memegang beberapa peran pada pilot, tetapi perannya harus eksplisit. Ketidakjelasan menyebabkan masalah dilempar antara operasi dan TI.

Data contract menjelaskan apa yang disediakan suatu sumber: skema, satuan, frekuensi, latency, kualitas, perubahan, keamanan, dan respons kegagalan. Kontrak ini bukan hanya dokumen teknis; ia menetapkan harapan organisasi. Bila sensor atau ERP mengubah format tanpa pemberitahuan, twin dapat memberikan keputusan salah. Schema registry, observability, dan change management mengurangi risiko. Data lineage memungkinkan pengguna menelusuri angka dari hasil kembali ke transformasi dan sumber.

Master data serta asset identity merupakan fondasi yang sering diremehkan. Satu pompa dapat memiliki nama berbeda pada gambar, sistem pemeliharaan, historian, dan laporan keuangan. Jika identitas tidak dipertemukan, data tidak menyatu. Hierarki aset juga berubah ketika komponen diganti atau dipindah. Twin perlu merepresentasikan serial number, functional location, configuration, dan temporal validity—komponen mana terpasang pada waktu tertentu.

Model card atau model dossier mendokumentasikan tujuan, pemilik, input, output, metode, data, asumsi, wilayah validitas, metrik, batas, risiko, versi, dan persetujuan. Untuk twin kompleks, system model card menghubungkan beberapa model. Dokumentasi tidak boleh menjadi formalitas yang terpisah; ia harus dipakai ketika pengguna menilai rekomendasi atau auditor menelusuri kejadian. Setiap hasil penting perlu dapat menunjuk versi model dan data yang menghasilkannya.

Validasi harus berbasis risiko dan konteks penggunaan. Model yang dipakai untuk edukasi dapat menerima toleransi lebih longgar daripada model yang mengubah set point reaktor. Kriteria mencakup akurasi, robustness, calibration, latency, interpretability, dan fail-safe. Acceptance threshold ditetapkan sebelum uji agar tim tidak memilih metrik setelah melihat hasil. Independent review diperlukan untuk risiko tinggi; conflict of interest antara pembuat dan penyetuju perlu dikelola.

Decision rights membatasi otomatisasi. Tingkat 0 dapat berupa visualisasi; tingkat 1 rekomendasi; tingkat 2 tindakan memerlukan persetujuan; tingkat 3 tindakan otomatis dalam envelope; tingkat 4 otonomi luas dengan pengawasan. Setiap kenaikan harus didasarkan pada evidence, risk assessment, dan kemampuan rollback. Automated action perlu guardrail seperti batas operasi, interlock, rate limit, serta human override. Log harus mencatat rekomendasi, persetujuan, tindakan, dan hasil.

Auditability tidak sama dengan menyimpan semua data selamanya. Organisasi perlu retention policy berdasarkan kebutuhan hukum, risiko, nilai pembelajaran, dan biaya. Data yang terlalu banyak meningkatkan paparan serta kompleksitas. Privacy-preserving techniques, pseudonymization, aggregation, federated learning, dan access segmentation dapat dipakai sesuai kasus. Prinsip least privilege berlaku untuk manusia, aplikasi, model, dan perangkat.

Twin juga membutuhkan configuration management. Ketika aset diubah, model mungkin tidak lagi valid. Ketika firmware diperbarui, karakteristik sinyal berubah. Ketika supplier component berganti, parameter degradasi dapat berubah. Proses

management of change harus menilai dampak pada sensor, data, model, interface, dokumentasi, dan pelatihan. “Twin drift” dapat terjadi bukan karena AI drift saja, tetapi karena perbedaan konfigurasi fisik-digital.

Siklus hidup berakhir ketika aset dipensiunkan, use case tidak lagi bernilai, atau platform diganti. Decommissioning mencakup penghentian aliran, pengarsipan bukti, pemindahan data, pencabutan kredensial, penghapusan sesuai kebijakan, dan dokumentasi. Exit plan terhadap vendor perlu diuji: format ekspor, ownership model, portability, serta continuity. Twin yang tidak dapat dihentikan dengan aman adalah technical debt yang hidup.

17. Keamanan Siber, Keselamatan, Privasi, dan Kepercayaan

Digital twin memperluas permukaan serangan karena menghubungkan teknologi informasi dengan operasi fisik. Penyerang dapat memalsukan data sensor, mencuri model, mengubah parameter, menyusup melalui API, mengambil kredensial perangkat, atau mengganggu platform. Jika twin mengirim tindakan, manipulasi digital dapat menimbulkan kerusakan fisik. NIST (Voas et al., 2025) menekankan bahwa keamanan dan trust harus dipertimbangkan dalam karakteristik serta penggunaan digital twin, bukan ditempelkan setelah sistem selesai.

Threat modeling dimulai dari aset yang perlu dilindungi: keselamatan, ketersediaan, integritas proses, kerahasiaan, model, data pelanggan, dan intellectual property. Arsitektur perlu memetakan trust boundary, aktor, interface, dependensi, serta konsekuensi. Risiko berbeda antara twin gedung publik dan twin reaktor; kontrol harus proporsional. Menyalin checklist tanpa memahami dampak tidak cukup.

Integritas data sangat penting karena twin memperlakukan data sebagai keadaan. Sensor spoofing dapat membuat model melihat suhu normal ketika proses berbahaya. Data poisoning dapat merusak model secara perlahan. Kontrol meliputi device identity, secure boot, signed firmware, encryption, network segmentation, anomaly detection, cross-sensor plausibility checks, dan provenance. Redundansi fisik serta model dapat membantu mendeteksi pembacaan yang tidak masuk akal.

Model juga merupakan attack surface. Adversarial input dapat mengecoh model; model theft mencuri pengetahuan; model inversion mengungkapkan data; parameter tampering mengubah keputusan. Registry, code signing, access control, reproducible build, integrity check, serta approval pipeline diperlukan. Model rahasia tidak

otomatis aman; security by obscurity rapuh. Untuk model pihak ketiga, supply-chain security mencakup library, container, update, dan dependency.

Ketersediaan perlu didesain dengan graceful degradation. Jika koneksi putus, apakah aset tetap aman? Apakah operasi kembali ke kontrol lokal, mode manual, atau set point konservatif? Twin tidak boleh menjadi single point of failure. Edge computing dapat menjaga fungsi penting, sedangkan cloud menangani analisis berat. Recovery time objective dan recovery point objective harus dikaitkan dengan dinamika fisik, bukan hanya standar TI.

Keselamatan dan keamanan saling terkait tetapi berbeda. Safety menangani kerugian akibat kegagalan atau kesalahan; security menangani ancaman bermaksud jahat. Sebuah kontrol keamanan dapat memengaruhi keselamatan—misalnya autentikasi yang lambat saat darurat. Safety case menjelaskan mengapa sistem cukup aman; security case menjelaskan perlindungan terhadap ancaman. Digital twin berisiko tinggi membutuhkan keduanya dan analisis interaksi.

Privasi melampaui kerahasiaan. Data okupansi gedung, mobilitas kota, kendaraan, perangkat kesehatan, atau produktivitas pekerja dapat digunakan untuk pengawasan. Tujuan awal yang sah dapat bergeser melalui function creep. Privacy by design menetapkan tujuan, minimisasi, pemisahan, transparansi, kontrol subjek, dan batas penggunaan. Aggregate twin mungkin cukup untuk optimasi; identitas individu tidak selalu diperlukan.

Etika pekerja menjadi perhatian ketika twin memodelkan manusia. Sensor dapat meningkatkan keselamatan, tetapi juga mengukur gerak, jeda, atau kecepatan secara invasif. Jika model hanya mengoptimalkan produktivitas, pekerja diperlakukan sebagai komponen mesin. Implementasi yang adil melibatkan pekerja dalam desain, menjelaskan data dan keputusan, membatasi penggunaan disipliner, serta memasukkan ergonomi, beban kognitif, dan kesejahteraan sebagai tujuan.

Bias dapat masuk melalui data, model, objective function, dan deployment. Twin layanan publik mungkin mengalokasikan sumber daya berdasarkan data historis yang mencerminkan ketimpangan, lalu memperkuat ketimpangan itu. Fairness tidak selalu berarti perlakuan sama; konteks dapat membutuhkan prioritas kebutuhan. Impact assessment, disaggregated evaluation, stakeholder review, dan mekanisme keluhan diperlukan.

Kepercayaan tidak dapat dibangun hanya dengan accuracy. Pengguna perlu memahami kapan sistem kompeten, kapan ragu, dan kapan gagal. Calibrated uncertainty, explanation, provenance, audit trail, serta pengalaman konsisten membantu calibrated trust—kepercayaan yang tidak terlalu rendah maupun tinggi. Automation bias terjadi ketika pengguna mengikuti rekomendasi karena tampil canggih. Training harus mengajarkan cara menantang model, bukan hanya cara mengoperasikan antarmuka.

18. Organisasi, Kompetensi, Kepemimpinan, dan Manajemen Perubahan

Digital twin menembus batas fungsi sehingga struktur proyek harus lintas disiplin. Tim inti biasanya mencakup domain expert, operator, data engineer, modeler, software engineer, architect, cybersecurity, UX, product management, change lead, dan finance. Pada konteks tertentu diperlukan safety, legal, privacy, sustainability, atau clinical expert. Tim yang hanya terdiri dari data scientist dapat menghasilkan model bagus yang tidak masuk operasi; tim yang hanya terdiri dari engineer dapat mengabaikan produk digital dan pengguna.

Product operating model lebih sesuai daripada proyek sekali jadi. Twin memiliki pengguna, backlog, service level, version, incident, dan roadmap. Product owner bertanggung jawab pada outcome, bukan penyelesaian instalasi. Funding perlu beralih dari capital project murni ke lifecycle funding yang mencakup sensor, cloud, model maintenance, security, training, dan support. Jika anggaran berhenti setelah go-live, twin segera menua.

Kompetensi dapat dibagi menjadi lima lapisan. Data literacy memungkinkan orang memahami kualitas, konteks, dan batas data. Model literacy memungkinkan menafsirkan asumsi, ketidakpastian, serta validitas. Decision literacy membantu menghubungkan hasil dengan trade-off dan tindakan. Digital engineering menghubungkan aset, sistem, dan software. Governance literacy membantu memahami risiko, hak, serta akuntabilitas. Tidak semua orang perlu menjadi programmer, tetapi pengguna keputusan harus mampu mengajukan pertanyaan yang benar.

Peran “translator” sangat penting. Ia memahami bahasa domain dan analitik, menerjemahkan pain point menjadi use case, serta menerjemahkan hasil model

menjadi keputusan. Translator mencegah dua kegagalan: masalah teknis yang tidak bernilai dan ekspektasi bisnis yang tidak realistis. Dalam perusahaan kecil, peran ini dapat dipegang engineer atau manajer yang dilatih; dalam perusahaan besar, dapat menjadi profesi tersendiri.

Pengetahuan tacit teknisi dan operator harus dihargai. Model bukan pengganti pengalaman; ia dapat memformalkan sebagian pengalaman dan menemukan pola lain. Workshop, cognitive task analysis, dan failure review menangkap indikator yang diketahui praktisi. Operator juga membantu mengidentifikasi data yang tampak aneh tetapi sebenarnya normal karena pergantian produk, pembersihan, atau kondisi lokal. Co-design meningkatkan mutu sekaligus penerimaan.

Resistensi sering merupakan respons rasional terhadap ketidakjelasan. Pekerja mungkin khawatir dipantau, keahliannya diremehkan, atau tugasnya hilang. Manajer mungkin khawatir transparansi mengungkap masalah. Fungsi TI mungkin khawatir shadow system; operasi khawatir cloud mengganggu reliability. Change management perlu membahas insentif, peran, beban, dan perlindungan, bukan hanya mengkomunikasikan manfaat.

Pelatihan paling efektif berbasis skenario. Operator berlatih membaca peringatan, menguji rekomendasi, dan merespons kegagalan data. Manajer berlatih membandingkan opsi serta uncertainty. Tim keamanan menjalankan incident exercise. Digital twin itu sendiri dapat menjadi lingkungan training: prosedur, keadaan abnormal, dan dampak tindakan disimulasikan tanpa risiko fisik. Setelah latihan, hasil dipakai memperbaiki model dan SOP.

Kepemimpinan perlu menghindari dua ekstrem. Technology-first leadership membeli platform tanpa masalah prioritas. Skeptical leadership menunggu standar serta data sempurna sehingga tidak pernah belajar. Kepemimpinan adaptif memilih use case bernilai, memberi ruang eksperimen terkontrol, menuntut evidence, dan menghentikan proyek yang tidak layak. Ia menjaga ambisi arsitektur sambil mengirim hasil bertahap.

Budaya eksperimen harus disertai psychological safety. Simulasi dapat mengungkap bahwa kebijakan lama tidak optimal atau asumsi pimpinan salah. Jika hasil yang tidak nyaman dihukum, tim akan menyesuaikan model dengan harapan. Model governance perlu melindungi integritas ilmiah. Sensitivity analysis, pre-mortem, red teaming, dan independent challenge menormalkan perbedaan.

Keberhasilan akhirnya diukur dari perubahan rutinitas. Apakah rapat perencanaan memakai skenario twin? Apakah teknisi menindaklanjuti insight? Apakah desain baru memakai data lapangan? Apakah keputusan tercatat dan hasilnya kembali ke model? Adoption metrics tidak cukup berupa login. "Decision adoption" dan "learning velocity" lebih bermakna: seberapa sering insight digunakan dengan tepat dan seberapa cepat kesalahan diperbaiki.

19. Ekonomi Investasi, KPI, dan Pengelolaan Portofolio

Business case digital twin perlu menghitung total cost of ownership, bukan hanya lisensi. Biaya awal mencakup discovery, instrumentasi, konektivitas, integrasi, pembersihan data, model, aplikasi, security, dan change. Biaya berulang mencakup cloud atau edge, kalibrasi sensor, data quality, support, model validation, update, vendor, dan tenaga. Biaya transisi mencakup dual running, downtime instalasi, pelatihan, serta perubahan proses. Exit cost juga perlu dipertimbangkan.

Manfaat dapat dikelompokkan sebagai peningkatan pendapatan, pengurangan biaya, pengurangan modal kerja, penghindaran risiko, pengurangan emisi, dan option value. Revenue uplift dapat berasal dari availability, kualitas, time-to-market, atau layanan. Cost reduction berasal dari energi, scrap, maintenance, labor, dan ekspedisi. Working-capital benefit muncul dari persediaan dan siklus. Risk avoidance mencakup kerusakan, keselamatan, penalti, kehilangan pelanggan, dan gangguan. Option value adalah nilai fleksibilitas serta pembelajaran.

Menghitung avoided cost sulit karena peristiwa tidak terjadi. Counterfactual perlu didefinisikan: apa yang mungkin terjadi tanpa twin? Baseline historis dapat dipakai, tetapi kondisi berubah. Control group atau phased rollout memberi bukti lebih baik. Setiap peringatan dapat dicatat bersama tindakan, hasil, dan estimasi. Finance perlu terlibat sejak desain agar metodologi tidak dibuat setelah manfaat diklaim.

Metode investasi tradisional seperti NPV, IRR, dan payback tetap berguna, tetapi perlu dilengkapi real options. Pada teknologi baru, ketidakpastian tinggi dan pembelajaran memiliki nilai. Investasi tahap pertama dapat dipandang sebagai opsi: biaya kecil membuka hak untuk memperluas setelah evidence. Stage-gate mengurangi irreversible commitment. Sebaliknya, menunggu juga memiliki biaya peluang; perusahaan dapat kehilangan data, kompetensi, dan waktu.

KPI harus tersusun dalam rantai. Lapisan teknis mencakup uptime platform, latency, data completeness, dan error model. Lapisan penggunaan mencakup active users, scenario runs, response time, dan recommendation acceptance. Lapisan proses mencakup downtime, lead time, yield, energy, dan service. Lapisan bisnis mencakup margin, revenue, cash, risk, dan customer outcome. Lapisan pembelajaran mencakup waktu validasi, jumlah asumsi yang diperbaiki, dan reuse component.

Model performance tidak boleh dipisahkan dari decision performance. Prediksi yang sedikit kurang akurat tetapi memberikan lead time cukup mungkin lebih bernilai. Precision dan recall harus dikaitkan dengan biaya false positive serta false negative. Untuk predictive maintenance, alarm palsu menimbulkan inspeksi dan hilangnya kepercayaan; kegagalan yang tidak terdeteksi menimbulkan kerusakan. Threshold dipilih berdasarkan ekonomi serta keselamatan, bukan metrik statistik tunggal.

Portfolio management diperlukan karena ide use case akan banyak. Skor prioritas dapat menilai value potential, feasibility, data readiness, decision frequency, risk, reuse, time-to-value, dan sponsor readiness. Use case bernilai tinggi tetapi data buruk dapat dimulai dengan data foundation; use case mudah tetapi nilai rendah mungkin menjadi learning pilot. Portofolio perlu menyeimbangkan quick win dan strategic foundation.

Reuse meningkatkan ekonomi. Identitas aset, streaming, security, ontology, model registry, simulation service, dan UI component dapat dipakai ulang. Platform team menyediakan paved road, sedangkan domain team mengembangkan use case. Namun, standardization yang terlalu dini dapat membekukan desain yang belum dipahami. Prinsipnya adalah "reuse after evidence": generalisasikan pola yang telah bekerja lebih dari sekali.

Vendor proposal sering memasukkan estimasi manfaat industri. Angka benchmark berguna sebagai hipotesis, bukan business case. Kondisi aset, biaya downtime, maturitas proses, dan perilaku pengguna berbeda. Perusahaan perlu menjalankan value discovery dengan data sendiri. Kontrak vendor dapat mengaitkan pembayaran dengan milestone teknis dan outcome yang dapat dikendalikan, tetapi jangan memindahkan seluruh risiko yang sebenarnya bergantung pada perubahan internal.

Kill criteria harus ditetapkan. Pilot dihentikan atau diubah bila data tidak dapat diperoleh dengan biaya wajar, model tidak mengungguli baseline, lead time tidak cukup, workflow tidak menerima, risiko tidak dapat ditoleransi, atau economics tidak masuk. Menghentikan use case bukan kegagalan bila pembelajaran ditangkap.

Kegagalan terbesar adalah pilot yang terus hidup karena prestise tanpa menghasilkan keputusan.

20. Peta Jalan Implementasi: Dari Pertanyaan Bisnis ke Twin yang Hidup

Tahap pertama adalah framing. Organisasi mendefinisikan keputusan, pengguna, frekuensi, pain point, baseline, constraint, dan nilai. Pertanyaan “bagaimana membangun digital twin?” diubah menjadi “keputusan apa yang perlu dibuat lebih cepat atau lebih baik?” Contohnya: kapan mesin dipelihara, bagaimana jadwal diubah, berapa safety stock, atau konfigurasi mana paling efisien. Framing juga menetapkan apa yang tidak termasuk.

Tahap kedua adalah system discovery. Tim memetakan proses fisik, aktor, data, sistem, model, dan dependensi. Gemba walk, interview, process mining, document review, serta sensor audit dipakai. Tujuannya memahami keadaan nyata, termasuk workaround. Diagram arsitektur saja sering menampilkan sistem resmi tetapi tidak spreadsheet, telepon, dan pengetahuan yang sebenarnya menjalankan operasi.

Tahap ketiga adalah value and risk design. Tim menyusun outcome metric, counterfactual, risk classification, privacy impact, security threat, safety implication, dan decision right. Jika use case berdampak tinggi, validasi serta pengawasan diperkuat. Pada tahap ini dipilih tingkat otomatisasi awal—biasanya rekomendasi atau shadow mode. Business owner menyetujui bahwa outcome cukup bernilai.

Tahap keempat adalah data readiness. Sumber diprofilkan untuk coverage, kualitas, timestamp, identitas, latency, dan akses. Kesenjangan diklasifikasikan: dapat diperbaiki melalui engineering, memerlukan sensor baru, memerlukan proses manual, atau tidak layak. Data set minimum dipilih berdasarkan model dan keputusan. Mengumpulkan semua data sebelum membangun model memperlambat; mengabaikan foundation membuat pilot rapuh.

Tahap kelima adalah model design. Tim memilih representasi, fidelity, horizon, dan metode. Baseline sederhana dibangun terlebih dahulu: aturan, regresi, atau simulasi dasar. Model canggih harus mengalahkan baseline dalam metrik keputusan. Assumption register mencatat asumsi dan bukti. Uncertainty plan menetapkan bagaimana hasil disajikan. Model diuji pada normal, abnormal, dan edge case.

Tahap keenam adalah twin minimum yang layak. Minimum viable twin memuat identitas, data loop, state, model, dan pengalaman keputusan minimum. Ia tidak harus memiliki semua otomatisasi, visual 3D, atau integrasi enterprise. Tujuan tahap ini membuktikan tiga hal: model dapat diperbarui, insight relevan, dan pengguna dapat bertindak. Architecture runway tetap disiapkan agar prototype tidak menjadi jalan buntu.

Tahap ketujuh adalah shadow operation. Sistem berjalan berdampingan dengan proses lama tanpa mengambil kontrol. Rekomendasi dibandingkan dengan keputusan manusia dan hasil. Disagreement menjadi bahan belajar: model salah, manusia memiliki konteks, atau kebijakan lama tidak optimal. Shadow mode juga menguji latency, alert volume, support, serta incident process. Durasi harus mencakup variasi operasi yang memadai.

Tahap kedelapan adalah controlled deployment. Twin diterapkan pada aset, shift, lokasi, atau segmen terbatas. Guardrail dan rollback disiapkan. Tim support tersedia; pengguna dilatih. KPI diukur terhadap baseline atau kelompok pembandingan. Incident, near miss, dan override ditelaah. Implementasi diperluas hanya jika safety, trust, dan value memenuhi gate.

Tahap kesembilan adalah workflow integration. Insight dimasukkan ke sistem dan ritual: work order, planning meeting, SOP, approval, atau customer service. Jika pengguna harus membuka portal terpisah dan menyalin data, adopsi menurun. API dan embedded experience sering lebih penting daripada aplikasi baru. Ownership berpindah dari proyek ke product operation.

Tahap kesepuluh adalah scale and federate. Komponen reusable distandardisasi; twin aset dihubungkan ke proses dan jaringan. Data product serta semantic layer dibuat. Scaling bukan menyalin model tanpa validasi; setiap lokasi dapat memiliki distribusi, konfigurasi, dan kebiasaan berbeda. Template mempercepat, local calibration menjaga relevansi.

Tahap kesebelas adalah continuous assurance. Model, data, security, dan value dipantau. Drift dan konfigurasi ditelaah. Red team menguji skenario salah dan serangan. Audit memastikan penggunaan sesuai tujuan. Quarterly value review memutuskan investasi, perubahan, atau retirement. Twin diperlakukan sebagai living system dengan service management.

Tahap kedua belas adalah organizational learning. Keputusan, asumsi, hasil, dan pembelajaran disimpan. Post-decision review menilai bukan hanya apakah hasil baik, tetapi apakah proses keputusan baik berdasarkan informasi saat itu. Twin menjadi institutional memory. Model diperbaiki, dan kebijakan organisasi dapat diubah ketika pola berulang ditemukan.

Secara praktis, organisasi dapat menggunakan pertanyaan gate. Gate masalah: apakah keputusan bernilai dan cukup sering? Gate data: apakah keadaan dapat diobservasi? Gate model: apakah perilaku dapat direpresentasikan dengan kegunaan memadai? Gate aksi: apakah pengguna mampu bertindak? Gate bukti: apakah outcome lebih baik daripada baseline? Gate skala: apakah komponen dapat dipakai ulang tanpa mengabaikan konteks? Gate etika: apakah dampak dapat diterima dan dipertanggungjawabkan?

21. Agenda Indonesia: Industri, UMKM, Infrastruktur, dan Kebijakan Publik

Indonesia memiliki karakter yang membuat digital twin relevan: geografi kepulauan, infrastruktur beragam, industri sumber daya, pertumbuhan manufaktur, urbanisasi, risiko bencana, dan kebutuhan efisiensi energi. Namun, pendekatan tidak boleh sekadar menyalin proyek negara maju. Banyak aset bersifat brownfield, data tersebar, konektivitas tidak merata, dan kompetensi terbatas. Strategi harus selektif serta berorientasi hasil.

Pada manufaktur, prioritas dapat diberikan pada aset kritis, energi, mutu, dan bottleneck. Industri pangan, semen, pupuk, petrokimia, pulp, tekstil, otomotif, elektronik, dan pengolahan mineral memiliki use case berbeda. Program demonstrator sektor dapat menyediakan reference architecture, data template, dan pelajaran, tetapi model bisnis serta data perusahaan harus dilindungi. Asosiasi industri dan perguruan tinggi dapat menjadi neutral convenor.

Pada pelabuhan dan logistik, twin koridor dapat menghubungkan jadwal kapal, sandar, yard, dokumen, truk, kereta, gudang, dan cuaca. Bitung dan kawasan Lembeh, misalnya, dapat dipandang sebagai sistem maritim-industri, bukan terminal terisolasi. Skenario investasi menilai hubungan pelabuhan, perikanan, cold chain, industri, pariwisata, lingkungan, dan kota. Governance lintas instansi menjadi faktor kritis.

Pada energi, twin dapat membantu pembangkit, jaringan, microgrid pulau, dan integrasi energi terbarukan. Kondisi geografis menuntut kombinasi cloud, edge, dan operasi offline. Sistem perlu dirancang untuk reliability serta kemampuan lokal. Vendor lock-in berisiko bila data dan model sistem kritis tidak portable. Standar serta local capability harus menjadi syarat procurement.

Pada pertanian dan UMKM, digital twin skala penuh per aset mungkin tidak ekonomis. Pendekatan shared twin atau cooperative twin lebih cocok: model mewakili kelompok lahan, cold chain, sentra produksi, atau fasilitas bersama. Data satelit, cuaca, harga, dan input lokal dapat dipadukan. Layanan disediakan melalui koperasi, platform daerah, penyuluh, atau perusahaan inti dengan aturan data yang adil.

UMKM manufaktur dapat memperoleh twin-as-a-service. Sensor retrofit dan model generik digunakan untuk mesin umum, dengan kalibrasi lokal. Pembiayaan berbasis penghematan mengurangi biaya awal. Namun, layanan harus transparan mengenai data, tarif, dan ketergantungan. Program subsidi yang hanya membeli perangkat tanpa pendampingan akan menghasilkan sensor yang mati dan dashboard yang tidak dipakai.

Pemerintah dapat berperan melalui standard setting, sandbox, procurement, data infrastructure, pendidikan, dan demonstrator. Regulasi sebaiknya berbasis risiko dan outcome, tidak membekukan teknologi. Untuk critical infrastructure dan data personal, persyaratan keamanan, audit, lokasi atau transfer data, serta incident reporting perlu jelas. Procurement harus meminta open interface, documentation, portability, dan lifecycle cost.

Perguruan tinggi dapat membangun laboratorium twin lintas fakultas. Teknik memodelkan sistem; komputer mengelola data dan AI; ekonomi menilai nilai; manajemen merancang organisasi; hukum mengatur hak; kedokteran serta lingkungan memvalidasi domain. Mahasiswa belajar pada masalah nyata, bukan demonstrasi terpisah. Kemitraan dengan industri perlu menjaga intellectual property dan publikasi.

Kurikulum manajemen juga perlu berubah. Calon manajer tidak harus membuat solver, tetapi harus memahami model, uncertainty, eksperimen, data governance, dan AI. Studi kasus dapat meminta mahasiswa membandingkan skenario kapasitas, resilience, atau layanan menggunakan twin. Fokusnya bukan menekan tombol, melainkan menilai asumsi serta konsekuensi.

Kesenjangan digital antarwilayah harus diperhitungkan. Twin nasional yang hanya menyerap data dari kawasan terhubung dapat bias terhadap daerah yang “terlihat”. Kebijakan perlu berinvestasi pada observability dasar: identitas, data kualitas, konektivitas, dan institusi. Teknologi canggih di pusat tidak boleh menggantikan perbaikan sensor, pencatatan, serta layanan di lapangan.

Agenda nasional yang sehat dapat bergerak dalam tiga horizon. Horizon satu membuktikan use case dengan nilai jelas. Horizon dua membangun common data space, standar, dan kompetensi. Horizon tiga menghubungkan twin lintas sektor untuk resilience serta keberlanjutan. Setiap horizon harus memiliki governance dan indikator. Ambisi “Indonesia digital twin” tanpa masalah, batas, serta akuntabilitas hanya menghasilkan metafora besar.

22. Arah Masa Depan: AI Generatif, Edge, Federasi, dan Otonomi

Perkembangan digital twin ke depan akan ditandai oleh federasi. Satu twin tidak dapat memodelkan seluruh perusahaan pada satu resolusi. Twin komponen, aset, proses, fasilitas, produk, pelanggan, dan jaringan akan saling bertukar keadaan serta layanan. Federated twin mempertahankan ownership domain sambil memungkinkan analisis sistem. Tantangannya ialah identitas, semantik, sinkronisasi, versi, dan pembagian hak. Komposisi model juga dapat menghasilkan kesalahan emergen yang tidak terlihat pada setiap bagian.

Edge computing memperpendek latency dan menjaga fungsi ketika jaringan terganggu. Model cepat, anomaly detection, dan safety envelope berjalan dekat aset; analisis berat, training, serta portfolio optimization berjalan di cloud atau pusat data. Orchestration harus menentukan data serta model mana di edge, cloud, atau perangkat. Keputusan bukan hanya teknis; ia dipengaruhi biaya, privacy, kedaulatan data, energi, dan reliability.

AI generatif akan memperluas akses. Pengguna dapat bertanya: “Mengapa output turun kemarin?”, “Apa tiga penyebab paling mungkin?”, “Simulasikan jika pemasok A berhenti dua minggu,” atau “Jelaskan konsekuensi bagi pelanggan prioritas.” Sistem dapat menyusun scenario template dan narasi. Namun, bahasa alami ambigu. Twin perlu meminta klarifikasi, menampilkan asumsi, dan mengunci tindakan berisiko. LLM harus memakai retrieval serta tool yang terotorisasi, bukan menjawab dari ingatan umum.

Multimodal models dapat membaca diagram, foto, video, suara, dan teks pemeliharaan. Teknisi memakai perangkat augmented reality untuk melihat status dan instruksi pada aset. Remote expert berkolaborasi dengan representasi yang sama. Nilai imersif muncul ketika mempercepat tugas atau pemahaman; penggunaan 3D tanpa kebutuhan spasial menambah beban. Antarmuka masa depan kemungkinan bersifat adaptif: operator melihat tindakan, engineer melihat model, eksekutif melihat skenario.

Autonomous twin adalah arah paling kontroversial. Dalam lingkungan stabil dengan tujuan serta batas jelas, twin dapat mengoptimalkan set point, rute, atau energi. Multi-agent systems dapat bernegosiasi untuk aset berbeda. Tetapi otonomi menimbulkan interaksi dan perilaku tak terduga. Safe reinforcement learning, formal verification, runtime assurance, dan human-on-the-loop diperlukan. Otonomi sebaiknya dibatasi pada envelope yang dapat dijelaskan dan dihentikan.

Foundation models untuk fisika dan engineering dapat mempercepat surrogate modeling, parameter estimation, serta transfer learning. Sebuah model yang dilatih pada banyak aset dapat disesuaikan ke unit baru dengan data lebih sedikit. Federated learning memungkinkan pembelajaran lintas perusahaan tanpa memusatkan data mentah. Akan tetapi, heterogenitas, intellectual property, poisoning, dan pembagian manfaat perlu diatasi.

Digital twin dan ekonomi sirkular akan bertemu melalui product passport, traceability, serta condition-based valuation. Twin dapat menilai apakah komponen dapat dipakai ulang, diperbaiki, atau didaur ulang. Pasar sekunder memperoleh informasi kondisi yang lebih kredibel. Tantangannya adalah menjaga identitas serta data sepanjang pergantian pemilik dan puluhan tahun, termasuk ketika vendor atau format tidak lagi ada.

Climate twin akan digunakan untuk adaptasi aset serta kota. Perusahaan menguji compound risk: banjir bersamaan dengan gangguan listrik, gelombang panas dengan permintaan tinggi, atau kekeringan dengan konflik air. Model perlu menggabungkan horizon pendek dan panjang. Adaptive pathways lebih berguna daripada satu rencana tetap: tindakan awal, indikator pemicu, serta opsi lanjutan ditetapkan.

Komputasi twin sendiri harus berkelanjutan. Model fisis beresolusi tinggi, streaming, rendering, dan AI memerlukan energi. Green computing, model efficiency, intelligent sampling, retention, dan carbon-aware scheduling perlu menjadi bagian desain.

Manfaat lingkungan harus dihitung neto. Twin yang menghemat satu persen energi tetapi menggunakan komputasi berlebihan mungkin tidak layak.

Arah paling mendasar bukan teknologi tertentu, melainkan pergeseran dari digital representation ke digital institution. Twin akan mengandung aturan, hak, model, dan hubungan lintas organisasi. Ia dapat memengaruhi alokasi sumber daya serta akses layanan. Karena itu, governance, legitimacy, dan accountability akan menjadi sama penting dengan fidelity. Masa depan twin adalah masa depan cara organisasi menentukan apa yang dianggap nyata dan tindakan apa yang dianggap rasional.

23. Batas Pengetahuan dan Agenda Riset

Literatur digital twin berkembang cepat, tetapi bukti nilai bisnis masih tidak merata. Banyak studi berupa konsep, prototype, atau kasus tanpa counterfactual. Medina et al. (2025) dalam umbrella review product digital twins menyoroti keterbatasan bukti mengenai nilai. Penelitian perlu melaporkan bukan hanya arsitektur dan akurasi, tetapi adoption, decision impact, lifecycle cost, failure, dan outcome jangka panjang.

Definisi masih perlu disiplin. Label twin sering diberikan pada dashboard, model, atau simulasi. Penelitian sebaiknya menyatakan tingkat koneksi, frekuensi, arah data, state, model, dan tindakan. Taksonomi Kritzinger et al. (2018), karakterisasi Jones et al. (2020), dan arketipe van der Valk et al. (2022) dapat digunakan untuk transparansi. Dengan demikian, studi dapat dibandingkan tanpa memaksakan satu definisi sempit.

Validasi komposisi merupakan agenda utama. Model individual dapat akurat, tetapi interaksi federasi menghasilkan error. Uncertainty propagation lintas model, skala, dan horizon perlu dikembangkan. Digital twin juga membutuhkan online validation: bagaimana mengetahui model masih valid ketika sistem berubah dan ground truth terlambat? Teknik monitoring, causal discovery, dan active learning dapat membantu, tetapi harus diletakkan dalam governance.

Human-digital twin interaction belum cukup dipahami. Bagaimana visual, explanation, uncertainty, dan rekomendasi memengaruhi trust, situational awareness, serta bias? Kapan manusia mengoreksi model dan kapan justru memperburuk? Eksperimen human factors dibutuhkan. Penelitian harus membandingkan keputusan dengan dan tanpa twin, bukan hanya mengukur kepuasan antarmuka.

Ekonomi digital twin perlu model lebih baik. Manfaat risk avoidance, resilience, option value, dan knowledge sulit diukur. Penelitian longitudinal dapat melihat cost of ownership, reuse, depreciation data/model, dan lock-in. Business model lintas organisasi membutuhkan teori pembagian nilai serta governance data. Kasus kegagalan perlu dipublikasikan agar survivorship bias berkurang.

Sustainability assessment harus memasukkan jejak digital. Banyak studi melaporkan energi atau emisi yang dihemat tetapi tidak menghitung sensor, jaringan, pusat data, perangkat, dan rebound effect. Life-cycle assessment bagi twin sendiri perlu dikembangkan. Tujuan sosial—keselamatan, kerja layak, akses, keadilan—juga perlu diukur, bukan hanya efisiensi.

Di Indonesia, agenda riset perlu menekankan kondisi tropis, kepulauan, brownfield, UMKM, data terbatas, dan kelembagaan majemuk. Riset aksi bersama industri serta pemerintah dapat menghasilkan reference case yang kontekstual. Dataset dan model bersama dapat dibangun dengan perlindungan tepat. Keberhasilan tidak harus mengimitasi twin global; ia harus menyelesaikan masalah lokal secara dapat dipertanggungjawabkan.

24. Dua Belas Pola Keputusan yang Cocok untuk Digital Twin

Pola pertama ialah keputusan kondisi: “apa keadaan sistem sekarang?” Cocok ketika pengamatan tersebar atau variabel penting laten. Twin menggabungkan sensor serta model untuk state estimation. Nilainya ialah situational awareness, tetapi model harus memperlihatkan freshness dan confidence.

Pola kedua ialah diagnosis: “mengapa kinerja menyimpang?” Twin menghubungkan gejala, struktur, kejadian, dan hubungan kausal. Pengguna dapat menelusuri bottleneck atau mode kegagalan. Diagnosis tidak boleh hanya memberikan korelasi; alternatif penyebab dan bukti perlu ditampilkan.

Pola ketiga ialah prognosis: “apa yang kemungkinan terjadi?” Contohnya remaining useful life, permintaan, waktu tiba, atau risiko kegagalan. Horizon harus sesuai lead time tindakan. Prediksi yang sangat akurat setelah waktu bertindak habis tidak bernilai.

Pola keempat ialah what-if: “apa akibat jika kita mengubah input atau kebijakan?” Ini inti simulasi. Skenario harus mencakup baseline, alternatif, asumsi, dan

sensitivity. Pengguna perlu dapat menantang skenario, bukan menerima paket tertutup.

Pola kelima ialah optimasi: "konfigurasi mana yang terbaik?" Objective function serta constraint harus eksplisit. Multi-objective optimization lebih realistis ketika biaya, mutu, energi, risiko, dan manusia harus diseimbangkan. Hasil bukan "jawaban objektif" jika bobot merupakan pilihan nilai.

Pola keenam ialah stress test: "apakah sistem bertahan pada keadaan ekstrem?" Model menguji gangguan tunggal dan majemuk. Fokusnya bukan ramalan paling mungkin, melainkan kerentanan, threshold, recovery, dan contingency. Stress test berguna bagi rantai pasok, keuangan, energi, infrastruktur, dan kesehatan.

Pola ketujuh ialah sequencing dan scheduling: "urutan tindakan apa yang meminimalkan waktu serta gangguan?" Discrete-event model, constraint programming, atau optimization dipakai. Twin memperbarui jadwal ketika keadaan berubah. Stabilitas rencana perlu dipertimbangkan agar sistem tidak terus mengubah instruksi.

Pola kedelapan ialah resource allocation: "ke mana kapasitas, tenaga, inventori, atau dana dialokasikan?" Model menilai kebutuhan, dampak, dan keadilan. Pada layanan publik dan kesehatan, objective fairness harus jelas. Optimasi murni berdasarkan volume dapat merugikan kelompok kecil.

Pola kesembilan ialah design selection: "desain mana paling baik sepanjang siklus hidup?" Twin menguji performa, manufaktur, penggunaan, pemeliharaan, dan akhir masa pakai. Data lapangan memperbaiki design rule. Keputusan perlu menghindari optimasi biaya awal yang menaikkan biaya operasi.

Pola kesepuluh ialah control: "tindakan apa yang harus dijalankan sekarang?" Model predictive control atau agent dapat mengubah set point dan rute. Karena konsekuensi fisik, latency, safety envelope, fallback, dan audit menjadi syarat. Otonomi dinaikkan bertahap.

Pola kesebelas ialah training dan rehearsal: "bagaimana manusia berlatih menghadapi kondisi yang jarang?" Twin menyimulasikan abnormal situation, incident, atau prosedur. Hasil latihan memperbaiki SOP dan model. Training twin perlu merepresentasikan tekanan waktu serta koordinasi, bukan hanya tampilan normal.

Pola kedua belas ialah negotiation and alignment: “bagaimana pihak menyepakati pilihan?” Twin menjadi objek bersama untuk membandingkan konsekuensi. Ia tidak menghilangkan konflik kepentingan, tetapi membuat asumsi terlihat. Fasilitasi, transparansi, dan hak menantang model diperlukan agar twin tidak menjadi alat legitimasi pihak dominan.

Pola-pola tersebut menunjukkan bahwa digital twin paling bernilai ketika keputusan berulang, kompleks, berisiko, memiliki data, dan dapat dipengaruhi. Untuk keputusan satu kali yang sederhana, spreadsheet atau simulasi statis mungkin cukup. Untuk fenomena yang tidak dapat diobservasi dan tidak dapat dimodelkan dengan kegunaan memadai, twin dapat memberi rasa percaya palsu. Pemilihan pola membantu menjaga proporsionalitas.

25. Kesimpulan

Digital twin technology memperkenalkan cara baru mengelola bisnis: realitas fisik dan digital ditempatkan dalam lingkaran observasi, pemodelan, simulasi, keputusan, tindakan, dan pembelajaran. Teknologi ini memungkinkan perusahaan menelaah masa lalu, membaca keadaan kini, serta menguji banyak masa depan sebelum mengambil risiko pada dunia nyata. Ia dapat meningkatkan pemeliharaan, mutu, throughput, desain, energi, layanan, ketahanan, dan keberlanjutan.

Namun, twin bukan cermin sempurna. Ia adalah model dengan tujuan, batas, data, asumsi, dan nilai. Makin realistis tampilan, makin mudah pengguna melupakan penyederhanaan. Karena itu, kualitas twin harus dinilai melalui fitness for purpose, uncertainty, validasi, keamanan, tata kelola, dan dampak keputusan. Model yang sederhana serta jujur sering lebih baik daripada model megah yang tidak dipahami.

Penerapan yang berhasil dimulai dari pertanyaan bisnis, bukan platform. Organisasi memilih keputusan bernilai, membangun baseline, memetakan data serta risiko, membuat twin minimum, menjalankan shadow mode, mengintegrasikan workflow, dan memperluas setelah bukti. Tim lintas fungsi, product ownership, lifecycle funding, kompetensi model, dan psychological safety mengubah prototype menjadi kapabilitas.

Nilai strategis digital twin adalah learning loop. Setiap operasi menghasilkan data; data memperbaiki pemahaman; pemahaman memperluas skenario; keputusan mengubah sistem; hasil kembali menguji asumsi. Perusahaan yang dapat

menjalankan loop ini dengan cepat, aman, dan etis memperoleh bukan hanya efisiensi, tetapi kemampuan adaptasi. Disiplin ini menjaga nilai berkelanjutan.

Bagi Indonesia, peluang terbesar terdapat pada masalah nyata: aset industri, energi, logistik kepulauan, pangan, kesehatan, kota, bencana, sumber daya, dan lingkungan. Jalan yang tepat bukan mengejar replika total, melainkan menyusun portofolio use case, foundation bersama, kompetensi lokal, dan governance. Digital twin harus menjadi sarana membangun kapasitas, bukan ketergantungan baru.

Pada akhirnya, “menyimulasikan masa depan bisnis” berarti meningkatkan kedewasaan dalam menghadapi ketidakpastian. Masa depan tetap terbuka, manusia tetap bertanggung jawab, dan model tetap dapat salah. Tetapi dengan eksperimen digital yang terhubung pada kenyataan, organisasi dapat melihat lebih awal, belajar lebih murah, bertindak lebih tepat, serta mempertahankan pilihan. Itulah janji utama digital twin—bukan mengetahui masa depan secara pasti, melainkan mempersiapkan bisnis untuk lebih banyak kemungkinan masa depan.

Lampiran A. Audit Kesiapan Digital Twin dalam Dua Belas Dimensi

A.1 Kejelasan masalah dan keputusan

Organisasi yang siap dapat menyebutkan keputusan, pengguna, frekuensi, lead time, dan konsekuensi. Pernyataan seperti “kami ingin digital twin pabrik” belum cukup. Pernyataan yang layak ialah “planner dan reliability engineer perlu memilih jendela pemeliharaan tujuh sampai empat belas hari sebelumnya untuk mengurangi unplanned downtime tanpa melanggar service level.” Audit memeriksa pain point, baseline, process owner, dan alternatif sederhana. Jika keputusan tidak dapat dipengaruhi, prediksi tidak menciptakan nilai.

A.2 Nilai dan sponsorship

Sponsor perlu memiliki kewenangan mengubah proses serta mengalokasikan sumber daya. Nilai harus ditelusuri dari insight ke tindakan dan outcome. Audit memeriksa benefit owner, metode counterfactual, kisaran manfaat, cost of delay, serta toleransi payback. Dukungan verbal direksi tanpa waktu dari domain expert bukan sponsorship. Finance perlu menyetujui baseline dan cara menghitung manfaat sebelum implementasi.

A.3 Observability sistem fisik

Twin membutuhkan keadaan yang dapat diamati secara cukup. Audit memetakan sensor, log, transaksi, inspeksi, serta variabel laten. Pertanyaan penting: apakah sinyal material tersedia, akurat, dan tepat waktu? Apakah pemasangan sensor aman? Apakah ground truth tersedia untuk validasi? Kesiapan bukan berarti semua variabel terukur; state estimation dapat mengisi sebagian. Namun, sistem yang hampir tidak dapat diamati tidak boleh ditutupi oleh visualisasi.

A.4 Identitas, konteks, dan kualitas data

Data perlu terkait dengan aset, lokasi, waktu, unit, recipe, batch, pengguna, dan kondisi. Audit menguji master data, timestamp, lineage, completeness, outlier, calibration, serta definisi. Data berkualitas tinggi pada satu sumber tidak cukup jika tidak dapat dipertemukan. Sample join antarsistem sering mengungkap masalah lebih cepat daripada presentasi arsitektur. Kesenjangan diberi owner dan rencana, bukan sekadar skor.

A.5 Kelayakan model

Fenomena harus dapat direpresentasikan dengan ketepatan yang berguna. Audit membandingkan physics-based, data-driven, rules, dan simulation. Baseline sederhana ditentukan; metric serta acceptance threshold dikaitkan dengan keputusan. Tim mencatat data coverage, edge case, dan extrapolation risk. Model yang membutuhkan data kegagalan selama dua puluh tahun mungkin tidak layak; model hibrida atau pendekatan risiko dapat menjadi alternatif.

A.6 Integrasi dan arsitektur

Audit memeriksa konektivitas OT/IT, API, latency, edge/cloud, keamanan, scalability, dan interoperability. Sistem lama, vendor protocol, dan jaringan harus diperhitungkan. Arsitektur yang siap memiliki modular boundary, identity, event flow, serta ownership. Ia juga memiliki graceful degradation dan exit plan. Proof of concept yang bergantung pada ekspor manual tidak dianggap production-ready.

A.7 Keamanan, keselamatan, dan privasi

Risk classification dilakukan sebelum deployment. Audit memeriksa threat model, safety impact, personal data, criticality, access, logging, incident response, dan fallback. Jika twin mengendalikan sistem, kontrol runtime dan override diuji. Jika memodelkan manusia, purpose limitation dan keterlibatan stakeholder diperiksa. Tidak adanya insiden masa lalu bukan bukti keamanan.

A.8 Workflow dan kemampuan bertindak

Insight perlu mencapai orang atau sistem yang dapat bertindak. Audit mengikuti satu rekomendasi hipotetis: siapa menerima, bagaimana menilai, siapa menyetujui, apa tindakan, berapa lama, serta bagaimana hasil dicatat. Hambatan dapat berupa suku cadang, kontrak, kewenangan, atau jadwal. Twin tidak memperbaiki proses jika tindakan tidak tersedia. Workflow integration dan SOP harus masuk scope.

A.9 Manusia dan kompetensi

Audit menilai domain expertise, data engineering, modeling, software, security, product, UX, dan change. Kesenjangan dapat diisi melalui mitra, tetapi internal ownership diperlukan. Pengguna dinilai pada data dan model literacy. Tim juga menilai beban kerja, kepercayaan, kekhawatiran pengawasan, serta perubahan peran. Training plan berbasis skenario disiapkan.

A.10 Tata kelola dan akuntabilitas

Setiap data, model, keputusan, dan layanan memiliki owner. Audit memeriksa data contract, model card, validation, approval, versioning, change, audit, dan decommission. Decision rights serta tingkat otomatisasi jelas. Komite governance tidak harus besar; yang penting keputusan dapat dibuat dan ditelusuri. Untuk high-risk use case diperlukan independent challenge.

A.11 Operasi produk dan lifecycle funding

Digital twin bukan proyek yang selesai saat go-live. Audit memeriksa support, monitoring, incident, model refresh, sensor calibration, cloud cost, patching, dan service level. Funding berulang serta tim operasi tersedia. Technical debt dan vendor dependency dicatat. Roadmap menghubungkan fitur dengan outcome, bukan daftar teknologi.

A.12 Pembelajaran dan skalabilitas

Organisasi siap belajar bila ia memiliki hypothesis, experiment, review, dan kill criteria. Audit memeriksa apakah keputusan serta outcome dikumpulkan, apakah disagreement dipelajari, dan apakah model dapat diperbaiki. Untuk scaling, komponen reusable diidentifikasi tetapi standardisasi tidak dipaksakan sebelum evidence. Pengalaman satu lokasi digunakan sebagai template, bukan sebagai kebenaran universal.

Skor kesiapan sebaiknya tidak dijumlahkan secara naif. Dimensi tertentu adalah constraint keras. Use case bernilai tinggi tetapi tidak aman tidak boleh dilanjutkan; model baik tanpa workflow tidak akan menghasilkan outcome. Hasil audit lebih berguna sebagai peta dependensi: apa yang harus diperbaiki, siapa pemiliknya, dan bukti apa yang diperlukan untuk gate berikutnya.

Lampiran B. Kamus Ringkas Indikator Kinerja

Availability digital twin mengukur proporsi waktu layanan dapat digunakan pada tingkat fungsi yang disepakati. Angka ini berbeda dari availability aset fisik. Target harus mengikuti criticality; twin analitik mingguan tidak membutuhkan SLA yang sama dengan kontrol waktu nyata.

Data freshness adalah selisih waktu antara kejadian dan ketersediaannya bagi model. Freshness dinilai terhadap kebutuhan keputusan. Data lima menit dapat sangat baik untuk planning tetapi buruk untuk safety control.

Data completeness kontekstual mengukur proporsi record yang memiliki identitas, timestamp, unit, konfigurasi, dan kondisi yang diperlukan. Completeness raw field tanpa konteks dapat menyesatkan.

State-estimation error membandingkan keadaan yang diperkirakan dengan pengukuran atau inspeksi yang dapat dipercaya. Karena tidak semua state dapat diamati, evaluasi perlu memakai proxy, interval, dan event tertentu.

Calibration mengukur kesesuaian probabilitas dengan frekuensi aktual. Jika sistem memberi risiko 20 persen pada banyak kasus, kira-kira 20 persen seharusnya terjadi. Model terkalibrasi membantu keputusan risiko.

Actionable lead time adalah waktu antara insight dan saat tindakan harus dimulai. Ia lebih penting daripada prediction horizon nominal. Lead time harus cukup untuk memperoleh tenaga, suku cadang, izin, atau mengubah jadwal.

False-action cost menghitung biaya tindakan tidak perlu yang dipicu model. Ini mencakup inspeksi, downtime, perubahan jadwal, dan hilangnya kepercayaan. Metrik menyeimbangkan dorongan meningkatkan recall.

Missed-event cost menghitung konsekuensi kejadian material yang tidak diperingatkan. Untuk safety, toleransinya sangat rendah. Untuk masalah kecil, trade-off dapat berbeda.

Recommendation adoption rate adalah proporsi rekomendasi yang diterapkan setelah memenuhi syarat. Angka tinggi tidak selalu baik; pengguna seharusnya menolak rekomendasi yang tidak tepat. Alasan menerima dan menolak lebih informatif.

Override quality menilai apakah override manusia meningkatkan outcome dan apakah alasannya dicatat. Override bukan kegagalan; ia sumber konteks. Pola override dapat mengungkap kelemahan model atau kebijakan.

Decision cycle time mengukur waktu dari perubahan keadaan sampai keputusan. Twin sering menciptakan nilai dengan memperpendek pengumpulan, rekonsiliasi, analisis, dan persetujuan.

Scenario coverage menilai variasi kondisi yang diuji, termasuk normal, abnormal, ekstrem, dan kombinasi. Banyaknya scenario bukan tujuan; coverage harus berbasis risk serta decision space.

Model drift detection time adalah waktu untuk menemukan bahwa error atau distribusi berubah. Keterlambatan meningkatkan periode keputusan yang tidak andal. Metrik dipasangkan dengan time-to-remediate.

Business outcome delta membandingkan outcome aktual dengan baseline atau counterfactual: downtime, yield, energy, service, inventory, atau revenue. Atribusi dan confidence perlu dicantumkan.

Avoided loss evidence grade mengklasifikasikan bukti manfaat risiko, misalnya estimasi ahli, model, perbandingan historis, kontrol, atau kejadian terverifikasi. Ini mencegah semua potensi kerugian diklaim sebagai manfaat pasti.

Learning velocity mengukur waktu dari anomali atau keputusan sampai asumsi, model, data, atau SOP diperbaiki. Twin matang mempercepat loop ini.

Reuse ratio mengukur proporsi komponen data, model, interface, dan governance yang digunakan kembali pada use case baru. Reuse harus menjaga validasi lokal; angka tinggi bukan tujuan bila menciptakan coupling.

Net sustainability benefit menghitung penghematan energi, material, emisi, dan limbah dikurangi jejak instrumentasi serta komputasi. Boundary dan periode harus jelas.

Trust calibration menilai apakah keyakinan pengguna sesuai kinerja aktual. Survei perlu dipadukan dengan perilaku—kapan pengguna mengikuti, memeriksa, atau menolak.

Lifecycle value realization membandingkan manfaat kumulatif dengan total biaya pembangunan, operasi, perubahan, dan decommission. Ini menghindari business case yang berhenti pada pilot.

Glossarium

Actuator: Perangkat yang menerjemahkan perintah digital menjadi perubahan fisik, misalnya membuka katup, mengubah kecepatan motor, atau memindahkan lengan robot.

Agent-based modeling: Metode simulasi yang merepresentasikan pelaku otonom beserta aturan dan interaksinya sehingga perilaku sistem dapat muncul dari tindakan individual.

AI generatif: Model kecerdasan buatan yang menghasilkan teks, gambar, kode, atau struktur lain; dalam twin berguna sebagai antarmuka, tetapi harus ditambahkan pada data serta model tervalidasi.

Anomaly detection: Teknik untuk menemukan pola atau keadaan yang menyimpang dari perilaku normal, yang dapat menandakan kerusakan, serangan, kesalahan data, atau kondisi baru.

Application programming interface (API): Kontrak teknis yang memungkinkan aplikasi bertukar data atau memanggil fungsi secara terstruktur.

Asset hierarchy: Struktur hubungan sistem, subsistem, aset, dan komponen yang membantu data serta tindakan dikaitkan dengan lokasi fungsional yang benar.

Asset identity: Identitas unik dan persisten bagi aset atau komponen sepanjang perubahan lokasi, konfigurasi, serta sistem informasi.

Assumption register: Catatan terkelola mengenai asumsi model, dasar bukti, pemilik, dampak, dan waktu peninjauan.

Augmented reality: Teknologi yang menempatkan informasi digital pada pandangan dunia nyata, misalnya status twin dan instruksi di atas mesin yang sedang diperiksa.

Automation bias: Kecenderungan manusia mempercayai keluaran sistem otomatis secara berlebihan walaupun bukti lain menunjukkan perlunya pemeriksaan.

Baseline: Titik pembandingan kinerja sebelum intervensi, yang digunakan untuk memperkirakan perubahan dan manfaat.

Bill of materials: Daftar terstruktur bahan, komponen, dan kuantitas yang membentuk sebuah produk; penting untuk traceability dan analisis dampak.

Building Information Modeling (BIM): Proses dan representasi informasi bangunan sepanjang siklus hidup; dapat menjadi salah satu fondasi building digital twin.

Calibration model: Kesesuaian antara probabilitas yang diprediksi dengan frekuensi kejadian aktual, atau proses menyesuaikan parameter agar model konsisten dengan observasi.

Closed-loop control: Pengendalian yang mengukur keadaan, membandingkan dengan tujuan, menentukan tindakan, dan menggunakan hasil sebagai umpan balik berikutnya.

Cloud computing: Penyediaan komputasi, penyimpanan, dan layanan melalui sumber daya jaringan yang elastis.

Computational fluid dynamics: Pemodelan numerik aliran fluida dan perpindahan terkait, digunakan pada desain serta operasi sistem seperti pipa, turbin, dan ventilasi.

Configuration management: Pengendalian identitas, versi, status, dan perubahan komponen fisik maupun digital agar keduanya tetap konsisten.

Counterfactual: Estimasi mengenai apa yang akan terjadi tanpa tindakan atau sistem, yang diperlukan untuk menilai dampak secara lebih kredibel.

Cyber-physical system: Sistem yang mengintegrasikan komputasi, komunikasi, dan proses fisik dalam interaksi terkoordinasi.

Data assimilation: Penggabungan observasi dengan model untuk memperbarui estimasi keadaan sistem secara konsisten.

Data contract: Kesepakatan mengenai skema, definisi, kualitas, frekuensi, akses, serta perubahan data antara penyedia dan pengguna.

Data drift: Perubahan distribusi input dari kondisi ketika model dibangun atau divalidasi.

Data lineage: Rekam jejak asal, transformasi, perpindahan, dan penggunaan data hingga menjadi suatu hasil.

Data minimization: Prinsip mengumpulkan dan mempertahankan hanya data yang diperlukan bagi tujuan yang sah.

Data product: Data yang dikelola sebagai produk dengan pengguna, owner, kualitas, dokumentasi, interface, dan lifecycle yang jelas.

Digital model: Representasi digital tanpa pembaruan otomatis yang memadai dari entitas fisik; perubahan biasanya dimasukkan secara manual.

Digital product passport: Catatan digital mengenai identitas, komposisi, asal, kondisi, perbaikan, dan informasi keberlanjutan produk sepanjang siklus hidup.

Digital shadow: Representasi digital yang diperbarui otomatis dari sistem fisik, terutama dengan aliran satu arah fisik-ke-digital.

Digital thread: Aliran informasi yang menghubungkan kebutuhan, desain, produksi, penggunaan, layanan, dan akhir masa pakai sepanjang lifecycle.

Digital twin: Representasi digital dinamis dari entitas atau sistem yang diperbarui dengan data, mengandung model keadaan atau perilaku, dan mendukung insight serta tindakan.

Discrete-event simulation: Simulasi yang memodelkan perubahan sistem sebagai rangkaian kejadian, sesuai untuk antrean, jadwal, kapasitas, dan aliran proses.

Dynamic capabilities: Kemampuan organisasi untuk merasakan perubahan, menangkap peluang, dan mentransformasi sumber daya secara berulang.

Edge computing: Pemrosesan data dekat sumber atau aset untuk mengurangi latency, bandwidth, dan ketergantungan koneksi pusat.

Explainability: Kemampuan menyediakan alasan atau bukti yang membantu pengguna memahami bagaimana keluaran model dihasilkan dan kapan dapat dipercaya.

Federated learning: Pelatihan model lintas lokasi atau organisasi tanpa memusatkan seluruh data mentah.

Federated twin: Kumpulan digital twin yang tetap memiliki ownership domain namun berinteraksi untuk merepresentasikan sistem lebih besar.

Fidelity: Tingkat detail dan kesetiaan model terhadap aspek nyata yang relevan; fidelitas lebih tinggi tidak selalu lebih berguna atau ekonomis.

Finite element analysis: Metode numerik yang membagi struktur menjadi elemen kecil untuk menghitung tegangan, deformasi, termal, dan fenomena lain.

Fitness for purpose: Derajat kesesuaian data, model, atau twin untuk keputusan serta risiko penggunaan tertentu.

Forecasting: Proses memperkirakan nilai atau kejadian masa depan berdasarkan data, model, dan asumsi.

Gainsharing: Model komersial ketika penyedia menerima bagian dari manfaat atau penghematan yang terukur.

Graceful degradation: Kemampuan sistem mempertahankan fungsi aman atau terbatas ketika sebagian komponen, koneksi, atau data gagal.

Guardrail: Batas teknis, prosedural, atau kebijakan yang mencegah tindakan twin melampaui kondisi yang diizinkan.

Historian: Sistem penyimpanan data deret waktu industri dari sensor dan kontrol.

Human-in-the-loop: Desain ketika manusia aktif menilai, menyetujui, mengoreksi, atau memberi label dalam proses keputusan.

Human-on-the-loop: Desain ketika sistem bertindak dalam batas tertentu sementara manusia mengawasi dan dapat mengambil alih.

Internet of Things (IoT): Jaringan perangkat beridentitas yang mengindra, berkomunikasi, atau bertindak melalui konektivitas digital.

Interoperability: Kemampuan sistem, data, model, dan organisasi bertukar serta menggunakan informasi dengan makna yang konsisten.

Knowledge graph: Representasi entitas dan hubungan semantik yang memungkinkan data ditelusuri serta dihubungkan lintas sumber.

Latency: Waktu tunda dari kejadian atau permintaan sampai data, hasil, atau tindakan tersedia.

Lock-in: Ketergantungan yang membuat perpindahan dari vendor, platform, format, atau arsitektur menjadi mahal atau sulit.

Machine learning: Metode komputasi yang mempelajari pola atau fungsi dari data untuk prediksi, klasifikasi, rekomendasi, atau kontrol.

Master data management: Tata kelola data inti seperti aset, produk, pemasok, pelanggan, dan lokasi agar identitas serta definisinya konsisten.

Mean time between failures: Rata-rata waktu operasi antara dua kegagalan; salah satu indikator reliability.

Minimum viable twin: Implementasi terkecil yang memiliki data loop, state atau model, dan pengalaman keputusan untuk membuktikan nilai.

Model card: Dokumen ringkas mengenai tujuan, metode, data, metrik, asumsi, batas, risiko, versi, dan owner model.

Model drift: Penurunan kesesuaian model karena perubahan data, proses, aset, lingkungan, atau perilaku.

Model predictive control: Metode kendali yang berulang kali menyimulasikan horizon mendatang dan memilih tindakan optimal di bawah kendala.

ModelOps: Praktik mengelola pengembangan, validasi, deployment, monitoring, perubahan, dan penghentian model secara sistematis.

Monte Carlo simulation: Pengulangan model dengan sampel acak dari distribusi input untuk menghasilkan distribusi hasil dan risiko.

Multiphysics model: Model yang menggabungkan beberapa fenomena fisika yang berinteraksi, misalnya termal, struktur, dan fluida.

Observability: Derajat keadaan internal sistem dapat ditaksir dari pengukuran dan informasi yang tersedia.

Ontology: Spesifikasi konsep, kategori, atribut, dan hubungan dalam suatu domain agar makna dapat dibagi.

Optimization: Pencarian alternatif terbaik menurut tujuan dan kendala; kualitas hasil bergantung pada formulasi tujuan serta representasi sistem.

Outcome-based service: Layanan yang pembayaran atau keberhasilannya dikaitkan dengan hasil, seperti availability, efisiensi, atau mutu.

Physics-informed machine learning: Pembelajaran mesin yang memasukkan hukum fisika, constraint, atau struktur domain ke proses belajar.

Predictive maintenance: Perencanaan pemeliharaan berdasarkan prediksi kondisi, kegagalan, atau sisa umur, bukan kalender semata.

Prognostics: Estimasi perkembangan kondisi dan waktu menuju kejadian seperti kerusakan atau batas performa.

Provenance: Bukti mengenai asal, kepemilikan, proses, dan perubahan data, model, atau hasil.

Reduced-order model: Model yang menyederhanakan sistem beresolusi tinggi agar komputasi lebih cepat sambil mempertahankan dinamika penting.

Reinforcement learning: Pembelajaran kebijakan tindakan melalui reward dari interaksi dengan lingkungan; penggunaan fisik memerlukan jaminan keselamatan.

Remaining useful life: Estimasi sisa waktu atau penggunaan sebelum aset mencapai kegagalan atau batas kinerja.

Resilience: Kemampuan sistem mengantisipasi, menyerap, beradaptasi, pulih, dan bila perlu bertransformasi setelah gangguan.

Rollback: Kemampuan kembali ke versi model, konfigurasi, atau operasi sebelumnya ketika perubahan menimbulkan masalah.

Scenario: Rangkaian asumsi konsisten mengenai keadaan atau kejadian untuk menelaah kemungkinan masa depan.

Semantic layer: Lapisan yang menyatukan definisi, identitas, hubungan, dan metrik agar data dapat digunakan konsisten.

Sensitivity analysis: Analisis tentang seberapa besar perubahan input atau asumsi memengaruhi hasil.

Sensor fusion: Penggabungan beberapa sensor untuk meningkatkan akurasi, coverage, atau reliability estimasi.

Servitization: Transformasi produsen dari menjual produk menuju penyediaan layanan, kemampuan, atau hasil.

Shadow mode: Operasi ketika sistem menghasilkan rekomendasi tetapi tidak mengeksekusi, sehingga kinerja dapat dibandingkan secara aman.

Single point of failure: Komponen tunggal yang kegagalannya dapat menghentikan seluruh layanan atau menimbulkan risiko besar.

State estimation: Proses memperkirakan kondisi internal sistem dari pengukuran dan model.

Stress testing: Pengujian sistem pada gangguan atau kondisi ekstrem untuk menemukan kerentanan, ambang, dan kebutuhan kontinjensi.

Surrogate model: Model komputasi cepat yang mendekati keluaran model lebih kompleks untuk simulasi atau optimasi berulang.

Synthetic data: Data buatan yang dihasilkan model atau simulasi untuk melengkapi kondisi yang jarang, sensitif, atau mahal diobservasi.

System dynamics: Metode pemodelan stok, aliran, keterlambatan, dan feedback untuk memahami perilaku sistem agregat dari waktu ke waktu.

Technical debt: Biaya masa depan akibat kompromi desain, dokumentasi, integrasi, atau pemeliharaan yang tidak diselesaikan.

Time-series database: Basis data yang dioptimalkan untuk nilai berurutan berdasarkan waktu, seperti telemetri sensor.

Traceability: Kemampuan menelusuri hubungan kebutuhan, desain, komponen, proses, data, keputusan, dan hasil.

Twinning rate: Frekuensi atau laju pembaruan hubungan antara entitas fisik dan representasi digital.

Uncertainty quantification: Pengidentifikasian dan pengukuran ketidakpastian input, parameter, struktur, serta hasil model.

Use case: Deskripsi pengguna, keputusan, alur, data, tindakan, dan nilai yang ingin dicapai oleh sistem.

Validation: Penilaian apakah model cukup merepresentasikan kenyataan untuk tujuan penggunaan yang ditentukan.

Verification: Pemeriksaan apakah model atau perangkat lunak dibangun serta dijalankan sesuai spesifikasi.

Virtual commissioning: Pengujian sistem kontrol, mesin, atau lini pada model virtual sebelum atau bersamaan dengan instalasi fisik.

What-if analysis: Eksperimen untuk menilai konsekuensi perubahan asumsi, kondisi, atau tindakan.

Zero trust: Prinsip keamanan yang tidak memberi kepercayaan implisit berdasarkan lokasi jaringan dan terus memverifikasi identitas, perangkat, serta akses.

Lampiran C. Pertanyaan Kritis bagi Direksi dan Pimpinan Program

- 1. Keputusan mana yang akan berubah?** Direksi perlu meminta contoh keputusan sebelum dan sesudah twin. Jika jawaban hanya “visibilitas” atau “transformasi”, use case belum matang. Jelaskan siapa memutuskan, kapan, berdasarkan informasi apa, dan tindakan apa yang menjadi mungkin.
- 2. Berapa nilai masalah tanpa solusi?** Ukur downtime, mutu, energi, lost sales, modal kerja, risiko, atau keterlambatan. Nilai masalah menetapkan batas wajar investasi. Masalah kecil tidak perlu arsitektur besar meskipun teknologinya menarik.
- 3. Mengapa digital twin diperlukan?** Bandingkan dengan perbaikan proses, sensor dan dashboard, analitika, simulasi statis, atau rule engine. Twin tepat bila koneksi dinamis, state, skenario, dan lifecycle memberi manfaat tambahan yang material.
- 4. Apa batas sistem?** Tanyakan aset, proses, aktor, lingkungan, dan horizon yang masuk atau keluar. Batas yang terlalu sempit menyebabkan optimasi lokal; batas terlalu luas membuat proyek tidak terkendali. Batas harus mengikuti keputusan serta risiko.
- 5. Apa twin minimum yang membuktikan hipotesis?** Minta scope yang cukup untuk menguji data loop, model, dan tindakan tanpa membangun seluruh platform. Minimum tidak berarti ceroboh; keamanan, validasi, dan identitas tetap diperlukan.
- 6. Bagaimana kita mengetahui model salah?** Minta ground truth, monitoring, acceptance threshold, interval ketidakpastian, edge case, dan fail-safe. Sistem yang hanya menjelaskan keberhasilan tetapi tidak mendefinisikan kegagalan tidak siap.
- 7. Apakah data benar-benar tersedia?** Presentasi sering menyebut puluhan sumber tanpa menguji join. Minta sample end-to-end yang menunjukkan identitas, timestamp, unit, kualitas, serta hak akses. Data readiness harus dibuktikan pada data aktual.
- 8. Siapa pemilik data dan model?** Bedakan ownership aset, data mentah, data turunan, model, insight, serta penggunaan komersial. Kontrak vendor dan mitra harus menjelaskan portability, confidentiality, serta hak setelah hubungan berakhir.

9. Apa konsekuensi serangan atau kesalahan? Minta threat serta safety case sesuai criticality. Jika twin memberi rekomendasi salah, siapa terdampak? Jika koneksi hilang, apakah operasi tetap aman? Risiko fisik dan manusia harus terlihat.

10. Berapa tingkat otomatisasi yang tepat? Jangan menganggap otonomi sebagai tujuan wajib. Rekomendasi dengan persetujuan dapat memberi nilai tinggi. Kenaikan otomatisasi memerlukan evidence, guardrail, override, log, dan rollback.

11. Bagaimana twin masuk ke workflow? Insight yang tinggal di dashboard jarang mengubah outcome. Tanyakan integrasi work order, planning, SOP, approval, dan rapat. Ukur waktu serta langkah yang dihemat atau ditambahkan bagi pengguna.

12. Siapa yang merawat setelah pilot? Minta tim, anggaran, service level, incident, calibration, model refresh, security patch, dan vendor support. Twin adalah produk hidup. Tanpa lifecycle funding, pilot berubah menjadi aset digital usang.

13. Apa counterfactual manfaat? Minta metode untuk membandingkan hasil dengan apa yang akan terjadi tanpa twin. Gunakan baseline, phased rollout, control, atau evidence grade. Hindari mengklaim seluruh perbaikan sebagai hasil teknologi.

14. Bagaimana pekerja dan pengguna dilibatkan? Tanyakan co-design, pelatihan, beban, data pekerja, serta mekanisme keberatan. Penerimaan bukan masalah komunikasi saja; desain dapat mengubah kontrol, keahlian, dan rasa aman.

15. Apakah tujuan memasukkan resilience dan keberlanjutan? Efisiensi jangka pendek dapat mengurangi slack atau meningkatkan risiko. Minta trade-off biaya, layanan, keselamatan, pekerja, energi, emisi, dan recovery. Tujuan tunggal cenderung menghasilkan optimasi sempit.

16. Bagaimana menghindari vendor lock-in? Periksa open interface, format ekspor, model ownership, semantic standard, container portability, dan exit test. Harga awal murah tidak berarti lifecycle cost rendah jika perpindahan mustahil.

17. Apa yang dapat digunakan kembali? Minta data product, identity, security, registry, simulation service, atau komponen antarmuka yang menjadi foundation. Namun, jangan menerima klaim "satu model untuk semua lokasi" tanpa local validation.

18. Kapan proyek dihentikan? Tetapkan kill criteria: data terlalu mahal, model tidak mengungguli baseline, tindakan tidak tersedia, risiko tidak dapat diterima,

pengguna tidak memperoleh nilai, atau payback gagal. Disiplin menghentikan menjaga portofolio.

19. Bagaimana akuntabilitas dijaga? Tanyakan siapa menyetujui model, siapa berwenang bertindak, siapa mengaudit, dan siapa menangani insiden. “AI memutuskan” bukan jawaban. Akuntabilitas tetap pada struktur manusia dan organisasi.

20. Apakah organisasi menjadi lebih cepat belajar? Indikator akhir bukan jumlah twin, sensor, atau skenario. Tanyakan apakah asumsi diperbaiki, keputusan lebih cepat, insiden mendorong perubahan, pengetahuan dipakai ulang, dan pilihan strategis meningkat. Learning loop adalah aset utama.

Lampiran D. Register Risiko Implementasi

Risiko 1—masalah bisnis kabur. Program dimulai dari keinginan memiliki teknologi, sehingga ruang lingkup terus melebar dan manfaat tidak terukur. Mitigasi: tetapkan decision statement, pengguna, baseline, outcome, serta alternatif non-twin. Gate framing harus disetujui pemilik proses dan finance.

Risiko 2—ilusi digital twin. Dashboard atau model statis diberi label twin, lalu sponsor berharap prediksi serta optimasi yang tidak tersedia. Mitigasi: dokumentasikan arah data, twinning rate, state, model, fungsi, dan tindakan. Gunakan klasifikasi model-shadow-twin secara eksplisit.

Risiko 3—kualitas serta identitas data buruk. Sensor, ERP, historian, dan maintenance system tidak dapat dipertemukan. Model menjadi rapuh atau salah. Mitigasi: lakukan data profiling dan sample join awal, perbaiki asset identity, timestamp, calibration, serta data contract.

Risiko 4—model canggih tanpa validitas. Tim mengejar algoritma kompleks, tetapi data tidak mewakili keadaan ekstrem dan baseline sederhana diabaikan. Mitigasi: tetapkan fitness for purpose, acceptance threshold, back-test, shadow mode, uncertainty, dan independent review menurut tingkat risiko.

Risiko 5—insight tidak dapat ditindaklanjuti. Twin memberi peringatan tetapi tenaga, suku cadang, wewenang, atau jendela operasi tidak tersedia. Mitigasi: rancang workflow bersamaan dengan model, integrasikan planning serta work order, dan ukur actionable lead time.

Risiko 6—automation bias dan hilangnya kompetensi. Pengguna mengikuti sistem tanpa pemeriksaan atau berhenti melatih kemampuan manual. Mitigasi: tampilkan bukti serta ketidakpastian, latih challenge dan override, lakukan scenario exercise, dan pertahankan fallback competence untuk fungsi kritis.

Risiko 7—serangan siber berdampak fisik. Data dipalsukan, model diubah, atau perintah disusupi. Mitigasi: threat model, zero trust, segmentation, signed model dan firmware, plausibility check, least privilege, runtime guardrail, incident response, serta recovery test.

Risiko 8—pelanggaran privasi dan pengawasan. Data pekerja, pasien, pelanggan, atau warga digunakan melampaui tujuan. Mitigasi: purpose limitation, minimization, consent atau dasar sah, aggregation, access control, transparency, audit, dan mekanisme keluhan. Libatkan kelompok terdampak.

Risiko 9—vendor lock-in. Data, model, dan interface terikat format tertutup; biaya meningkat dan exit sulit. Mitigasi: open API, semantic standard, export test, ownership clause, container atau model portability, documentation, serta exit plan yang diuji selama kontrak.

Risiko 10—pilot purgatory. Banyak proof of concept berjalan tanpa masuk produksi atau dihentikan. Mitigasi: gunakan portfolio governance, value gate, product owner, architecture runway, lifecycle funding, dan kill criteria. Setiap pilot harus menghasilkan keputusan scale, pivot, atau stop.

Risiko 11—optimasi lokal merusak sistem. Twin aset meningkatkan utilisasi tetapi menaikkan inventori, risiko, energi, atau burnout. Mitigasi: perluas boundary sesuai dampak, gunakan multi-objective metric, uji konsekuensi lintas fungsi, dan libatkan stakeholder yang menanggung externality.

Risiko 12—twin menjadi usang. Aset, data, model, dan proses berubah setelah go-live. Mitigasi: configuration management, drift monitoring, model registry, calibration schedule, management of change, recurring validation, dan owner. Twin harus memiliki lifecycle budget.

Risiko 13—manfaat dibesar-besarkan. Semua penurunan biaya diklaim sebagai hasil twin tanpa counterfactual. Mitigasi: predefine attribution, control atau phased rollout, evidence grade, confidence range, serta verifikasi finance. Pisahkan manfaat aktual, probabilistik, dan strategis.

Risiko 14—jejak lingkungan tersembunyi. Sensor, streaming, penyimpanan, visualisasi, dan AI mengonsumsi energi serta material. Mitigasi: hitung net sustainability, pilih fidelity serta sampling proporsional, terapkan retention, efficient model, edge/cloud placement, dan carbon-aware operation.

Risiko 15—ketergantungan pada individu kunci. Model serta integrasi hanya dipahami konsultan atau satu engineer. Mitigasi: dokumentasi, pairing, code review, model card, runbook, training, knowledge transfer, serta succession. Uji operasi ketika individu kunci tidak tersedia.

Risiko 16—akuntabilitas kabur. Ketika keputusan salah, operasi menyalahkan model, TI menyalahkan data, vendor menyalahkan penggunaan. Mitigasi: tetapkan RACI, model owner, decision owner, risk owner, approval, audit log, incident review, dan kontrak tanggung jawab.

Risiko 17—scaling mengabaikan konteks lokal. Model pilot disalin ke semua lokasi walau mesin, bahan, iklim, dan praktik berbeda. Mitigasi: template plus local calibration, transfer test, drift baseline, local expert review, dan rollout bertahap. Reuse tidak menghapus validasi.

Risiko 18—model menjadi alat legitimasi. Pihak dominan memilih asumsi dan indikator, lalu hasil twin dipakai menutup perdebatan. Mitigasi: transparansi tujuan, sensitivity, participatory modeling, independent challenge, akses terhadap asumsi, serta hak mengajukan skenario alternatif.

Register risiko harus hidup seperti twin. Setiap risiko memiliki likelihood, impact, owner, control, indicator, residual risk, dan review date. Insiden, near miss, perubahan sistem, serta pembelajaran pilot memperbaiki register. Tujuannya bukan menghilangkan semua risiko, melainkan membuat keputusan sadar, proporsional, dan dapat dipertanggungjawabkan.

Daftar Pustaka

- Aheleroff, S., Xu, X., Zhong, R. Y., & Lu, Y. (2021). Digital twin as a service (DTaaS) in Industry 4.0: An architecture reference model. *Advanced Engineering Informatics*, 47, 101225. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225>
- Alcaraz, C., & López, J. (2022). Digital twin: A comprehensive survey of security threats. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(3), 1475–1503. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3171465>
- Ante, L. (2021). Digital twin technology for smart manufacturing and Industry 4.0: A bibliometric analysis of the intellectual structure of the research discourse. *Manufacturing Letters*, 27, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.01.003>
- Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, 7, 167653–167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, A.-S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., & Lozoya-Santos, J. de J. (2022). Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 14(6), 1335. <https://doi.org/10.3390/rs14061335>
- Céspedes-Cubides, A. S., Jradi, M., & Hviid, C. A. (2024). A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. *Energy Informatics*, 7, 11. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00313-7>
- Cimino, C., Negri, E., & Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, 113, 103130. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>
- Corallo, A., Del Vecchio, V., Lezzi, M., & Morciano, P. (2021). Shop floor digital twin in smart manufacturing: A systematic literature review. *Sustainability*, 13(23), 12987. <https://doi.org/10.3390/su132312987>
- Davila Delgado, J. M., & Oyedele, L. (2021). Digital twins for the built environment: Learning from conceptual and process models in manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, 49, 101332. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332>
- Errandonea, I., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2020). Digital twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 123, 103316. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316>
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.),

- Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85–113). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Haag, S., & Anderl, R. (2018). Digital twin—Proof of concept. *Manufacturing Letters*, 15, 64–66.
<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.006>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 32(9), 775–788.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Kamel Boulos, M. N., & Zhang, P. (2021). Digital twins: From personalised medicine to precision public health. *Journal of Personalized Medicine*, 11(8), 745.
<https://doi.org/10.3390/jpm11080745>
- Kreuzer, T., Röglinger, M., & Rupprecht, L. (2024). Artificial intelligence in digital twins—A systematic literature review. *Data & Knowledge Engineering*, 154, 102304.
<https://doi.org/10.1016/j.datak.2024.102304>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Li, X., Cao, J., Liu, Z., & Luo, X. (2020). Sustainable business model based on digital twin platform network: The inspiration from Haier's case study in China. *Sustainability*, 12(3), 936. <https://doi.org/10.3390/su12030936>
- Lim, K. Y. H., Zheng, P., & Chen, C.-H. (2020). A state-of-the-art survey of digital twin: Techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(6), 1313–1337.
<https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346–361.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Lo, C. K., Chen, C.-H., & Zhong, R. Y. (2021). A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*, 48, 101297.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297>
- Lu, Q., Xie, X., Parlikad, A. K., & Schooling, J. M. (2020). Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance. *Automation in Construction*, 118, 103277. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103277>
- Masood, T., & Sonntag, P. (2020). Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry*, 121, 103261. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103261>
- Mügge, J., Riedelsheimer, T., & Stark, R. (2024). Digital twins within the circular economy: Literature review and analysis of current applications. *Sustainability*, 16(7), 2748.
<https://doi.org/10.3390/su16072748>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Nguyen, T., Duong, Q. H., Nguyen, T. V., Zhu, Y., & Zhou, L. (2022). Knowledge mapping of digital twin and physical internet in supply chain management: A systematic literature

- review. *International Journal of Production Economics*, 244, 108381.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108381>
- Omran, H., Al-Obaidi, K. M., Husain, A., & Ghaffarianhoseini, A. (2023). Digital twins in the construction industry: A comprehensive review of current implementations, enabling technologies, and future directions. *Sustainability*, 15(14), 10908.
<https://doi.org/10.3390/su151410908>
- Opoku, D.-G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., Rashidi, M., Famakinwa, T., & Bamdad, K. (2022). Drivers for digital twin adoption in the construction industry: A systematic literature review. *Buildings*, 12(2), 113. <https://doi.org/10.3390/buildings12020113>
- Perno, M., Hvam, L., & Haug, A. (2022). Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. *Computers in Industry*, 134, 103558.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558>
- Preut, A., Kopka, J.-P., & Clausen, U. (2021). Digital twins for the circular economy. *Sustainability*, 13(18), 10467. <https://doi.org/10.3390/su131810467>
- Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 6, 3585–3593.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Qi, Q., Tao, F., Zuo, Y., & Zhao, D. (2018). Digital twin service towards smart manufacturing. *Procedia CIRP*, 72, 237–242. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.103>
- Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*, 8, 21980–22012.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), 141–144.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., & Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130, 103469.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469>
- Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., & Calinescu, A. (2022). Digital twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration*, 30, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415.
<https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Annals*, 67(1), 169–172.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.055>
- Teece, D. J. (2010). Business models, business strategy and innovation. *Long Range Planning*, 43(2–3), 172–194. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.003>
- Timperi, M., Kokkonen, K., & Hannola, L. (2024). Digital twins for environmentally sustainable and circular manufacturing sector: Visions from industry professionals. *Production & Manufacturing Research*, 12(1), 2428249. <https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2428249>
- Tomczyk, M., & van der Valk, H. (2022). Digital twin paradigm shift: The journey of the digital twin definition. In *Proceedings of the 24th International Conference on Enterprise Information Systems* (pp. 90–100). SCITEPRESS.
<https://doi.org/10.5220/0010997600003179>

- Trauer, J., Mac, D. P., Mörtl, M., & Zimmermann, M. (2023). A digital twin business modelling approach. *Proceedings of the Design Society*, 3, 121–130. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.13>
- Trauer, J., Schweigert-Recksiek, S., Engel, C., Spreitzer, K., & Zimmermann, M. (2020). What is a digital twin? Definitions and insights from an industrial case study in technical product development. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 757–766. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.15>
- Tuegel, E. J., Ingrassia, A. R., Eason, T. G., & Spottswood, S. M. (2011). Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 154798. <https://doi.org/10.1155/2011/154798>
- Vallée, A. (2023). Digital twin for healthcare systems. *Frontiers in Digital Health*, 5, 1253050. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2023.1253050>
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- van der Valk, H., Haße, H., Möller, F., & Otto, B. (2022). Archetypes of digital twins. *Business & Information Systems Engineering*, 64(3), 375–391. <https://doi.org/10.1007/s12599-021-00727-7>
- van Dinter, R., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2022). Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 151, 107008. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>
- Voas, J., Kuhn, R., & Piroumian, V. (2025). *Security and trust considerations for digital twin technology* (NISTIR 8356). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8356>
- Weil, C., Bibri, S. E., Longchamp, R., Golay, F., & Alahi, A. (2023). Urban digital twin challenges: A systematic review and perspectives for sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104862. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104862>
- White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110, 103064. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103064>
- Wooley, A., Silva, D. F., & Bitencourt, J. (2023). When is a simulation a digital twin? A systematic literature review. *Manufacturing Letters*, 35, 940–951. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.014>
- Wright, L., & Davidson, S. (2020). How to tell the difference between a model and a digital twin. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 7, 13. <https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4>
- Yao, J.-F., Yu, D., Huang, Z.-N., Chen, J., & Li, Y.-F. (2023). Systematic review of digital twin technology and applications. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 6, 10. <https://doi.org/10.1186/s42492-023-00137-4>