

Peran *Digital Twin* dalam Otomatisasi Manufaktur yang Berkelanjutan

Digital Twin's Role in Sustainable Manufacturing Automation

Eko Kurniawan¹, Oldy Fahlovi², Zeluyvenca Avista³, Yudha Witanto⁴, Reza Ilyasa⁵

^{1,2,3,4}Program Studi Mekatronika, Politeknik Takumi

⁵Program Studi Teknologi Informasi, Politeknik Takumi

eko.kurniawan@takumi.ac.id, oldy.ofi@takumi.ac.id, z.avista@takumi.ac.id, yudha.wto@takumi.ac.id,
reza.ilyasa@takumi.ac.id

Abstract

Digital Twin (DT) is a virtual model of a process, product, and/or service that applies the concept of modeling and simulation, which is one of the digital transformation solutions in Industry 4.0. To create a sustainable manufacturing industry, DT plays an important role in integrating automation systems with intelligent elements and digital technology in various aspects of production. Therefore, this paper explains the role of DT which focuses on manufacturing automation by considering aspects of sustainable development. A systematic literature review method is used to obtain more comprehensive information from previous research findings. The study found that DT plays a role in improving productivity and manufacturing operations. Based on the concept of sustainability, DT plays a role in improving the efficiency of energy use and asset management. The results of this study can help policymakers in the manufacturing industry make quick and accurate decisions for the sustainability of their companies.

Keywords: *Digital Twin, Manufacturing, Automation system, Sustainable development*

Abstrak

Digital Twin (DT) adalah model virtual dari sebuah proses, produk, dan/atau layanan dengan menerapkan konsep pemodelan dan simulasi, yang merupakan salah satu solusi transformasi digital di Industri 4.0. Untuk menciptakan industri manufaktur yang berkelanjutan, DT berperan penting dalam mengintegrasikan sistem otomasi dengan elemen cerdas dan teknologi digital dalam berbagai aspek produksi. Oleh karena itu, makalah ini menjelaskan peran DT yang berfokus pada otomatisasi manufaktur dengan mempertimbangkan aspek pembangunan berkelanjutan. Metode tinjauan literatur yang sistematis digunakan untuk mendapatkan informasi yang lebih komprehensif dari hasil penelitian sebelumnya. Penelitian ini menemukan bahwa DT berperan dalam meningkatkan produktivitas dan operasi manufaktur. Berdasarkan konsep keberlanjutan, DT berperan dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan manajemen aset. Hasil penelitian ini dapat membantu para pembuat kebijakan di industri manufaktur dalam mengambil keputusan yang cepat dan tepat untuk keberlanjutan perusahaannya.

Kata kunci: *Digital Twin, Manufaktur, Sistem otomasi, Pembangunan berkelanjutan*

Pendahuluan

Akselerasi Revolusi Industri 4.0 yang dipicu oleh kebijakan strategis telah mengakibatkan banyak industri manufaktur di seluruh dunia berusaha meningkatkan nilai bisnis dan efisiensi operasional melalui transformasi digital pada seluruh rantai bisnisnya. Kemajuan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) telah membantu perkembangan manufaktur dengan cepat. Hal ini mendorong kolaborasi teknologi otomatisasi dengan elemen cerdas dan teknologi digital. Penerapan konsep ini berpusat pada sistem otomasi yang didukung dengan penggunaan *computer-aided* (CAD, CAM, CAE, FEA, dll) serta *Internet of Things* (IoT), *Big Data*, *Artificial Intelligence* (AI), *Cloud computing*, dan *Additive Manufacturing* [1].

Saat ini, teknologi *Digital Twin* sebagai bentuk pengembangan dari *Cyber-Physical System* (CPS) dan IoT menjadi solusi yang banyak diusulkan dalam aplikasi transformasi digital di era Industri 4.0 [1]–[5]. Digital Twin atau kembaran digital merupakan replika digital dari komponen, proses atau sistem dalam lingkungan virtual yang memungkinkan untuk melakukan pemantauan, analisis, dan optimalisasi secara *real-time*. Replika digital yang dimaksudkan tersebut memang sudah nyata atau dirancang agar wujud di dunia nyata [4][6]. Dalam konteks otomatisasi manufaktur, DT dapat digunakan untuk mengontrol komponen *cyber-physics* dalam proses manufaktur tingkat lanjut sehingga mampu meningkatkan fleksibilitas otomatisasi [7], [8]. DT juga dapat digunakan untuk proses komisioning secara virtual, karena dapat mensimulasikan dan menguji sistem kontrol dan sistem otomasi dalam ruang virtual sebelum diaplikasikan di dunia nyata. Dengan menggunakan DT dapat mengurangi waktu dan biaya komisioning serta meningkatkan kinerja dan keandalan sistem, karena memungkinkan untuk mengidentifikasi dan menyelesaikan masalah dalam sistem kontrol atau sistem otomasi sebelum digunakan di lapangan. Selain itu, DT juga mampu mengintegrasikan sistem otomasi dengan elemen-elemen cerdas sehingga membuat proses manufaktur menjadi lebih cerdas (*smart manufacturing*) [4], [6], [9], [10].

Dari tahun 2020 hingga 2025, *smart manufacturing* diperkirakan mengalami pertumbuhan dengan nilai *Compound Annual Growth Rate* (CAGR) sebesar 12,4% [11]. Hal ini menunjukkan bahwa tren penggunaan transformasi digital semakin meningkat. Sementara itu, terdapat permintaan yang kuat untuk melakukan upaya dekarbonisasi yaitu pengurangan emisi gas rumah kaca / *greenhouse gases* (GHGs) dari kegiatan produksi untuk mencapai netralitas karbon. Akibatnya, tantangan perubahan iklim yang semakin meningkat telah menjadi isu utama bagi industri manufaktur [12]. Dengan demikian prioritas lingkungan, sosial dan tata kelola sangat berpengaruh terhadap keberlanjutan industri manufaktur baik yang sudah ada maupun yang akan berkembang. Pencapaian terhadap prioritas tersebut sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan/*Sustainable Development Goals* (SDGs) yang ditetapkan oleh PBB pada tahun 2015 [13].

Menyikapi masalah yang ada maka perlu dilakukan studi komprehensif terutamanya mengenai transformasi digital yang berperan terhadap otomatisasi manufaktur yang berkelanjutan pada era Industri 4.0. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, kata kunci *digital twin*, *smart manufacturing* dan Industri 4.0 memiliki keterkaitan yang tinggi. Akan tetapi hubungan secara langsung kata kunci tersebut dengan otomatisasi dan keberlanjutan masih terdapat peluang dan keterbaruan untuk diulas. Oleh karena itu, makalah ini akan memaparkan secara bertahap mengenai konsep dan karakteristik *digital twin*, selanjutnya penerapan *digital twin* yang berfokus pada otomatisasi manufaktur, serta mengenai keberlanjutan yang ditinjau dari transisi energi dan pengelolaan aset. Adapun kontribusi yang dapat diberikan dari studi ini yaitu untuk mengetahui sejauh mana peran *digital twin* dalam menciptakan otomatisasi manufaktur yang berkelanjutan. Selain itu, memberikan informasi ilmiah dalam mendukung kesiapan industri di Indonesia untuk bertransformasi menuju Industri 4.0 (*Making Indonesia 4.0*).

Metode Penelitian

Tinjauan literatur sistematis telah digunakan pada studi ini untuk mendapatkan data sekunder. Sumber data ini diperoleh melalui hasil literasi jurnal internasional dengan klasifikasi literatur utama yaitu *digital twin*. Tinjauan literatur ini didasarkan pada makalah ilmiah terindeks dibidang transformasi digital yang berfokus pada teknologi *digital twin*, otomatisasi manufaktur dan keberlanjutan. Selanjutnya tinjauan literatur tersebut diidentifikasi, diklasifikasi, dan dianalisis secara sistematis berdasarkan kata kunci dan rentang waktu terbitan yang relevan menggunakan metode VOSviewer.

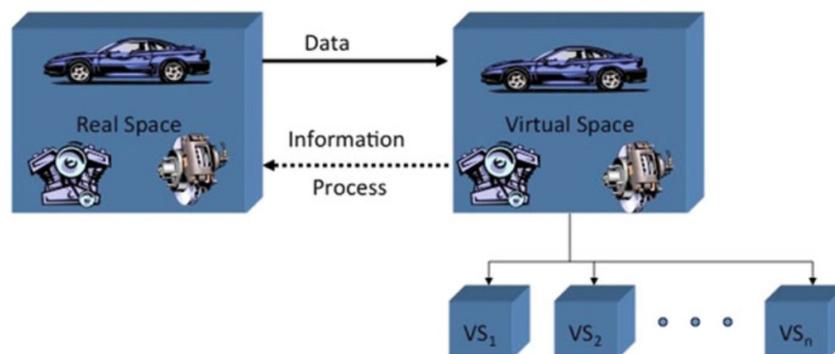
Hasil dan Pembahasan

Pada studi ini, hasil dan pembahasan mengenai peran *Digital Twin* (DT) dalam otomatisasi manufaktur yang berkelanjutan dibagi kedalam tiga bagian yaitu bagian pertama mengenai konsep dasar dan karakteristik DT untuk memberikan pemahaman mengenai DT beserta definisinya, bagian kedua mengenai peran DT yang

berfokus pada otomatisasi manufaktur, dan bagian ketiga mengenai pengembangan berkelanjutan dalam lingkup otomatisasi manufaktur khususnya pada transisi energi dan manajemen siklus hidup aset.

Konsep Dasar dan Karakteristik *Digital Twin*

Secara konseptual, *Digital Twin* (DT) meniru keadaan kembaran fisiknya secara *real time* dan sebaliknya. Teknologi DT bukanlah konsep yang baru, walaupun telah berkembang dan mendapatkan perhatian dalam beberapa tahun terakhir. Konsep dasar DT berkaitan dengan *Product Lifecycle Management* (PLM) muncul pada tahun 2002 dari presentasi Michael Grieves yang disebut “Konsep Ideal untuk PLM”. Penggunaan istilah “*Digital Twin*” merupakan hasil kerjasama dengan John Vickers dari NASA. Dimana, model konsep DT yang diusulkan tersebut memiliki tiga komponen utama yaitu: ruang nyata, ruang virtual, dan mekanisme yang menghubungkan koneksi data/informasi diantara keduanya. Model konseptual DT ini selanjutnya disebut sebagai “*Mirrored Spaces Model*” dan digunakan dalam perkuliahan PLM di Universitas Michigan pada awal tahun 2003 [14], [15]. Ilustrasi model konseptual DT dapat dilihat pada Gambar 1.



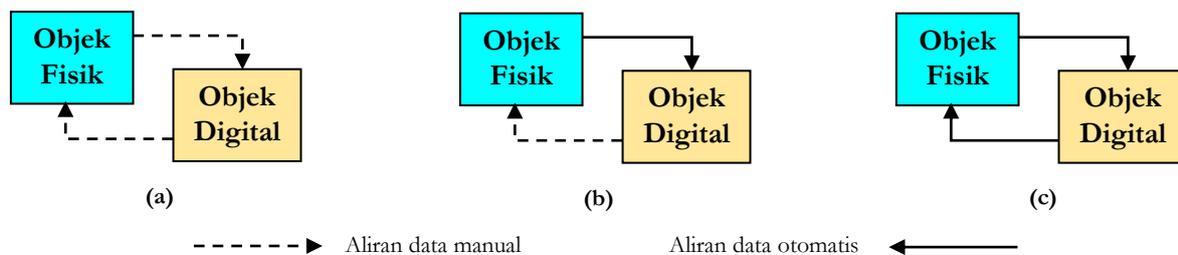
Gambar 1 Model konseptual DT untuk PLM atau *Mirrored Space Model* yang diusulkan oleh M. Grieves [14]

Tabel 1 Klasifikasi dan Definisi Konsep *Digital Twin* (Ref. [6], [14]–[18])

Klasifikasi	Konsep	Definisi
Waktu Pembuatan (<i>Creation time</i>)	<i>Digital Twin Prototype</i> (DTP)	Deskripsi virtual produk <i>prototype</i> , dapat digambarkan sebagai DT yang berisi semua informasi/data penting untuk membuat kembaran fisiknya.
	<i>Digital Twin Instance</i> (DTI)	DTI (dibentuk dari DTP) adalah kembaran aset fisik. Tipe DTI merupakan bentuk spesifik dari produk fisik yang tetap terkait dengan produk individual selama masa pakai produk tersebut.
	<i>Digital Twin Aggregate</i> (DTA)	Kombinasi dari semua <i>Digital Twin Instance</i>
	<i>Digital Twin Environment</i> (DTE)	Ruang aplikasi fisik <i>multi-domain</i> untuk pengoperasian pada <i>Digital Twin</i> . Operasi ini mencakup prediksi kinerja, simulasi, pemodelan dan penilaian.
Tingkat Integrasi (<i>Level of integration</i>)	<i>Digital Model</i>	Pertukaran data antara objek fisik dan digital hanya secara manual, sehingga tidak ada pembaruan status dan sinkronisasi <i>online</i> yang memungkinkan antara kedua objek. Ini adalah konsep umum yang terkait dengan fase desain.
	<i>Digital Shadow</i>	Pertukaran data otomatis terjadi dalam satu arah, khususnya dari objek fisik objek digital. Sehingga tidak ada umpan balik yang diberikan ke sistem fisik dari ruang digital. Model ini paling banyak diadopsi pada fase pemeliharaan untuk melacak dan memprediksi perilaku produk.
	<i>Digital Twin</i>	Terdapat aliran data dua arah secara otomatis antara objek fisik dan digital. Oleh karena itu, perubahan pada salah satu objek, baik fisik maupun digital, secara langsung menyebabkan perubahan pada objek lainnya.

Konsep dasar DT kemudian diperluas agar selaras dengan siklus hidup produk (*product lifecycle*) yang terdiri dari empat tipe yaitu: *Digital Twin Prototype*, *Digital Twin Instance*, *Digital Twin Aggregate*, dan *Digital Twin Environment*, dimana seluruh tipe tersebut merupakan klasifikasi dari waktu pembuatan DT [14]–[16]. Ditinjau dari tingkat integrasi antara sumber daya fisik dan salinan virtual (Gambar 2), konsep DT telah mengalami evolusi yang diklasifikasikan dalam tiga kategori yaitu: *Digital Model*, *Digital Shadow*, dan *Digital Twin* [15], [17], [18]. Kategori integrasi tersebut telah diterapkan oleh pemerintah Inggris dalam menentukan level *Building Information Modelling Industry* [16]. Klasifikasi dan definisi dari konsep DT dapat dilihat pada Tabel 1.

Inti dari konsep DT ini adalah untuk membayangkan sebuah sistem, dimana entitas fisik digabungkan dengan elemen virtual yang memanfaatkan lingkungan virtual dan fisik untuk kepentingan seluruh sistem. Dengan demikian informasi produk dapat ditangkap, disimpan, dievaluasi, dan dipelajari agar mampu diterapkan pada produk saat ini dan yang akan datang. Konsep DT menjadi landasan utama dalam membangun replika virtual dari produk/aset fisiknya berdasarkan model struktur, perilaku dan pendekatan berbasis data, yang selanjutnya digunakan terutamanya untuk mengelola, memantau, dan mengevaluasi kinerja serta meningkatkan siklus hidup produk/aset.



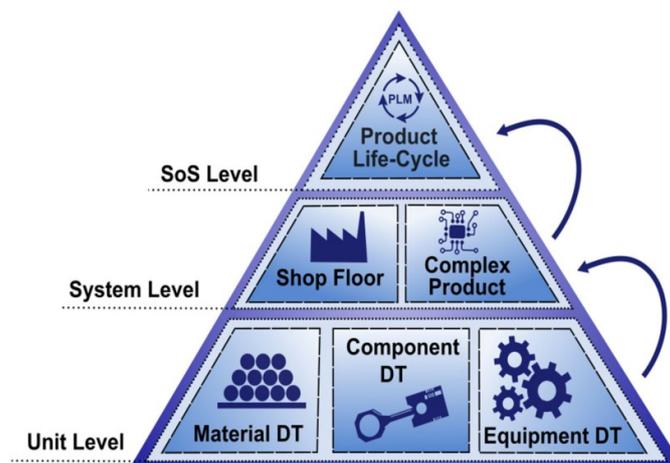
Gambar 2 Aliran data dan informasi pada (a) *Digital Model*, (b) *Digital Shadow*, dan (c) *Digital Twin*. (diadaptasi dari [17])

Berdasarkan Gambar 2 dapat dilihat bahwa karakteristik utama DT adalah pertukaran aliran data/informasi yang sepenuhnya otomatis dan berlangsung dua arah (*bi-directional*) antara ruang fisik dan ruang virtual yang saling tersinkronisasi secara *real-time*. Dengan demikian model DT adalah model yang paling sesuai untuk aplikasi manufaktur, seperti prediksi kualitas produk, perencanaan produksi, atau kolaborasi antara manusia dan robot [17], [18]. Selain itu, terlepas dari perbedaan jenis DT terdapat karakteristik DT secara umum yaitu sebagai berikut [15]:

- Ketelitian tinggi (*high-fidelity*): Model digital yang realistis dan didukung oleh pemodelan komputer dengan ketelitian sangat tinggi dan detail, memungkinkan DT untuk melakukan simulasi dan prediksi menjadi lebih andal dalam menyajikan serangkaian alternatif tindakan atau skenario.
- Dinamis (*dynamic*): Kondisi ruang fisik yang dinamis yaitu berubah seiring waktu mengakibatkan DT juga harus melakukan perubahan mengikuti ruang fisik tersebut. Tujuan dari DT yang dinamis adalah untuk mencerminkan kembaran fisik dan perilakunya secara realistis di dunia digital yang digambarkan dengan model hidup dalam bentuk 3D.
- Berkembang dengan sendirinya (*self-evolving*): DT mampu beradaptasi dan melakukan optimalisasi dengan bantuan data yang dikumpulkan dari kembaran fisik secara *real-time*, sehingga mampu berevolusi dan melakukan perubahan pada kembaran fisik atau digital melalui umpan balik tertutup.
- Dapat diidentifikasi (*identifiable*): Model DT yang dibuat dari setiap aset fisik terdiri dari data dan informasi yang terkait dengan model geometris 3D, model manufaktur, model penggunaan, model fungsionalitas dll. Dengan demikian model-model yang dibuat untuk DT tersebut dapat diidentifikasi secara unik dari kembaran fisiknya atau sebaliknya sepanjang siklus hidup.
- Multiskala dan Multifisik (*multiscale and multiphysical*): Pembuatan salinan virtual pada DT dilakukan dengan memasukkan sifat-sifat dari lingkungan fisik pada berbagai skala dan level. Dengan demikian

model DT terdiri dari sekumpulan informasi objek fisik mulai dari level atom mikro hingga geometris makro. Karakteristik multifisik DT didasarkan pada sifat-sifat fisik yang dimodelkan dari kembaran fisiknya seperti model dinamika struktural, termodinamika, analisis tegangan, sifat material (kekuatan, kekerasan, kelelahan) dan lain-lain.

- Multidisiplin (*multidisciplinary*): Teknologi DT sebagai tulang punggung pada Industri 4.0 telah melibatkan kolaborasi dengan berbagai disiplin ilmu diantaranya ilmu komputer dan teknologi informasi; teknik mesin, elektro, industri, otomasi dan mekatronika.
- Hirarkis (*hierarchical*): Karakteristik hirarkis pada DT dapat dilihat sebagai serangkaian submodel yang terintegrasi. Hal ini dikarenakan berbagai komponen dan bagian yang membentuk produk akhir semuanya memiliki model DT. Berdasarkan sudut pandang hirarki, model DT pada manufaktur terbagi kedalam tiga tingkat yaitu tingkat unit, tingkat sistem, dan tingkat *System of System* (SoS) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



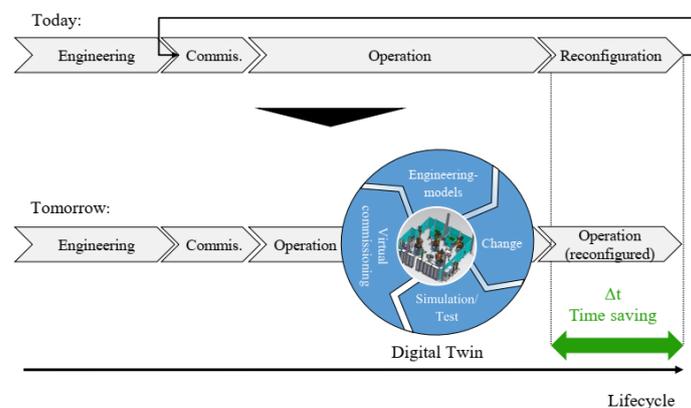
Gambar 3 Tingkatan hirarki DT pada manufaktur [15]

Digital Twin pada Otomatisasi Manufaktur

Secara umum, industri manufaktur merupakan proses produksi yang merubah bahan baku menjadi barang jadi. Namun, seiring berkembangnya tuntutan yang tinggi terhadap kualitas dan respon pasar yang cepat telah merubah paradigma industri manufaktur dari proses primer ke proses cerdas. Hal ini membutuhkan ketersediaan sistem otomasi fleksibel yang dapat dikonfigurasi ulang secara efisien sesuai kebutuhan. Pada era Industri 4.0, otomasi manufaktur tidak hanya mengalami pengembangan pada teknologi mekanik dan elektrik yang canggih, tetapi juga membutuhkan interaksi fisik dan digital secara terintegrasi. Dalam konteks *Cyber-Physical Production System* (CPPS), konsep DT menjadi pendorong untuk meningkatkan derajat otomasi dalam industri. Selain itu, DT dari sistem otomatis dapat mengatasi tantangan untuk membuat sistem dengan cepat dan mudah dikonfigurasi ulang dalam lingkungan simulasi [19].

DT pada otomasi manufaktur merupakan proses rekayasa sistem otomasi lintas bidang mekanik, elektrik dan kontrol yang saling berkolaborasi. Biasanya proses ini dilakukan secara berurutan, dimulai dengan desain mekanik misalnya pembuatan geometri dan pemilihan komponen fisik, dilanjutkan dengan desain elektrik dan perangkat lunak misalnya daftar sensor, desain sirkuit dan kode kontrol PLC, kemudian diakhiri dengan pengujian model dalam ruang virtual dan lintas bidang/*domain*. Data dan model yang dihasilkan atau digunakan dalam proses tersebut beserta hubungannya merupakan representasi DT dari sistem otomatisasi manufaktur [19].

Otomatisasi manufaktur seperti pada manufaktur otomotif berkaitan erat dengan sistem mekatronika yang mencakup berbagai komponen diantaranya, sensor, aktuator, konveyor, robot, *embedded system* dll. Dimana komponen tersebut dihubungkan bersama dan dikontrol secara terpusat menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC). Paradigma manufaktur cerdas mengharuskan integrasi antara otomatisasi manufaktur yang mencakup komponen mekatronika dengan teknologi digital diantaranya IoT, AI, dan *Big Data* pada setiap lini produksi [7]. Dengan meningkatnya kompleksitas sistem, perubahan kebutuhan pasar yang mendadak, meningkatnya variasi produk dan siklus hidup produk (PLM), maka dibutuhkan konfigurasi yang cepat dan murah pada sistem otomatisasi manufaktur yang ada. Dengan demikian DT menjadi salah satu solusi untuk menghadapi tantangan tersebut, karena dapat digunakan untuk mengurangi kompleksitas dan waktu konfigurasi melalui deteksi dini kesalahan desain atau urutan proses sistem dengan simulasi lintas *domain* [20]. Selain itu, terjadinya perubahan pada sistem manufaktur seperti pertukaran, penghapusan, dan penambahan sistem mekatronika dapat diperbarui pada model DT. Hal ini mampu menghindari kesenjangan antara model digital dan aset fisik dengan lebih cepat yang dapat dilihat pada Gambar 4.

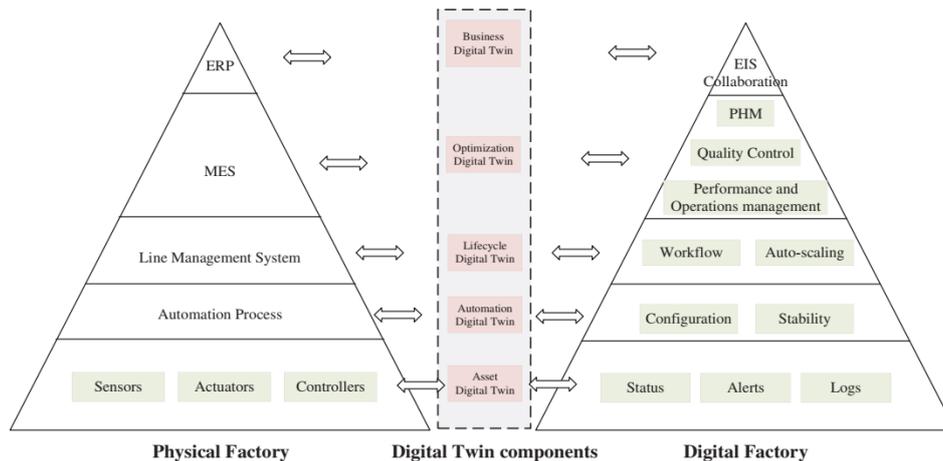


Gambar 4 Integrasi antara DT dan PLM pada otomatisasi manufaktur [20]

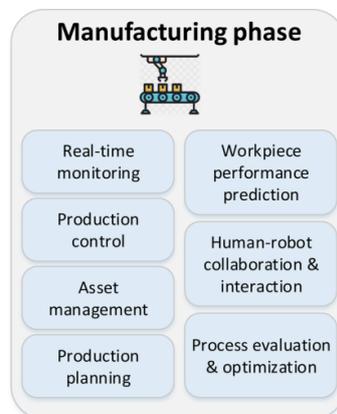
Adapun konsep yang digunakan untuk mengimplementasikan DT pada otomatisasi manufaktur yaitu dengan *Anchor-Point-Method*. Melalui konsep ini rekayasa DT dan sinkronisasi data komponen mekatronika dapat dilakukan secara sistematis dalam model rekayasa interdisipliner DT dan selama siklus hidup sistem otomasi manufaktur. Konsep tersebut juga mampu mendeteksi perbedaan struktur data mekatronika antara sistem fisik dan model digital secara sistematis. Dengan demikian penggunaan DT mampu meningkatkan efisiensi konfigurasi otomatisasi manufaktur, baik secara kualitatif maupun kuantitatif [19], [21]. Selain itu, dengan menggunakan teknologi DT, dapat mendeteksi, menganalisis, mengontrol, dan mengoptimalkan proses produksi dalam berbagai skenario tertentu berdasarkan data yang dikumpulkan dan direkam oleh sistem informasi, sehingga dapat meningkatkan kinerja otomatisasi pabrik. Melalui pemanfaatan teknologi DT maka semua faktor di pabrik fisik dapat didefinisikan dan diidentifikasi dengan lebih akurat [22]. Kerangka kerja aplikasi DT untuk otomatisasi pabrik berdasarkan ISA 95 Standart dan konsep piramida otomasi [23] dapat dilihat pada Gambar 5.

Saat ini, industri yang didukung oleh DT telah melakukan berbagai upaya untuk mengembangkan teknologi-teknologi penting yang berkontribusi pada tiga kemampuan utama yaitu *mirroring*, *shadowing*, dan *threading*. “*Mirroring*” mengacu pada kemampuan untuk membuat representasi virtual, dalam hal ini menekankan pada pembuatan proyeksi dari aset fisik ke model *offline*. Pada sistem otomasi, contoh peralatannya meliputi sintesis *point cloud*, tomografi, dan pengujian *ultrasonic*. “*Shadowing*” mengacu pada kemampuan untuk mengunduh informasi yang terdapat di lingkungan fisik agar sinkronisasi antara entitas fisik dan elemen virtual dapat dicapai. Sedangkan “*Threading*” berkaitan dengan kemampuan untuk menghubungkan atau membangun konektivitas antara berbagai tahapan operasi dengan DT *Instance* [5]. Oleh karena itu, lini

produksi di masa depan tidak hanya mudah diperbarui, tetapi juga harus memiliki kemampuan dalam melakukan pembaruan secara otomatis. Berdasarkan hal inilah maka DT yang terintegrasi dengan *Industrial Internet of Things* (IIOT), dan *cloud computing* berperan dalam sistem manufaktur. Sistem ini secara fleksibel dapat mengotomatiskan proses manufaktur dengan mengurangi campur tangan manusia secara konstan dengan tetap menjaga proses didalam kendali manusia [7]. Aplikasi DT pada fase manufaktur dapat dilihat pada Gambar 6. Dengan adanya fleksibilitas pada perusahaan manufaktur tersebut maka perusahaan dapat bersaing dalam waktu yang lebih singkat.



Gambar 5 Kerangka kerja DT untuk otomatisasi pabrik [22]



Gambar 6 Aplikasi DT pada fase manufaktur [18]

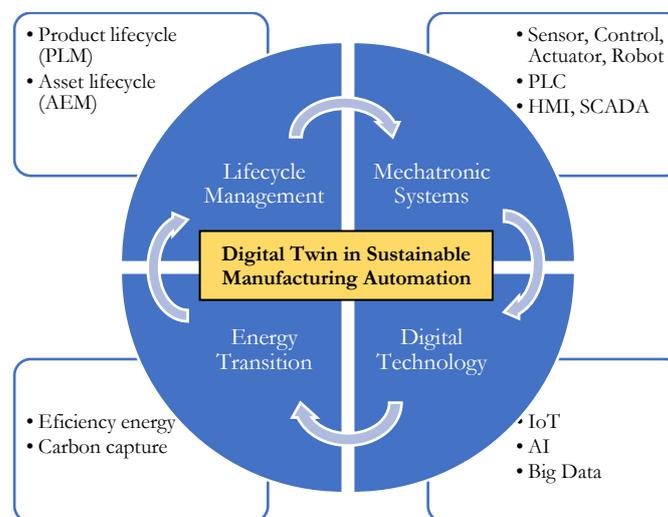
Pembangunan Berkelanjutan

Keberlanjutan menjadi tantangan yang harus dihadapi oleh industri masa depan, karena efek industrialisasi telah meningkatkan emisi gas rumah kaca di atmosfer yang berpengaruh besar terhadap perubahan iklim. Hal ini mengakibatkan konsep manufaktur berkelanjutan mendapat perhatian dan terus berkembang yang didukung oleh digitalisasi dan integrasi teknologi pintar. Dimana, teknologi tersebut memiliki potensi untuk membuat entitas fisik yang dapat diprogram, dikomunikasikan, dialamatkan dan dilacak. Selain itu, digitalisasi juga memiliki kemampuan untuk operasionalisasi produksi yang efektif secara berkelanjutan melalui peningkatan ketersediaan data yang relevan dan meningkatkan dasar pengambilan keputusan [12]. Sementara itu, berdasarkan penilaian siklus hidup/*life cycle assessment* (LCA) menunjukkan bahwa keberhasilan

transformasi digital terhadap otomatisasi manufaktur di era Industri 4.0 bergantung pada tingkat keberlanjutannya. Industri 4.0 yang menggabungkan teknologi seperti IoT, CPS, DT, AI, *Big Data*, dll yang terintegrasi dengan proses produksi melalui ketersediaan informasi yang relevan secara *real-time* antara manusia dan mesin memiliki pengaruh besar bagi keberlanjutan [24].

Untuk membantu memenuhi target pembangunan keberlanjutan pada lingkungan, ekonomi, dan sosial di era Industri 4.0 maka dalam studi ini peran DT pada otomatisasi manufaktur berkelanjutan ditinjau dari dua hal utama yaitu transisi energi dan manajemen aset. Kedua hal tersebut menjadi pertimbangan karena sekitar setengah dari total konsumsi energi dunia yang menjadi masalah pemanasan global berasal dari sektor manufaktur. Selain itu, semua sektor manufaktur menghadapi peningkatan biaya pemeliharaan, perbaikan dan operasi / *maintenance, repair and operations* (MRO) yang berpengaruh terhadap aset yang dimiliki. Secara umum, teknologi DT dapat memberikan solusi dari penilaian keberlanjutan statis ke pendekatan dinamis [8], sehingga DT dianggap memiliki peran yang signifikan dalam pengembangan keberlanjutan [12].

Berdasarkan kajian literatur yang dilakukan dalam studi ini, maka penulis mengusulkan diagram model seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Dari diagram model tersebut dapat dilihat bahwa DT pada otomatisasi manufaktur dibentuk melalui integrasi antara sistem mekatronika, teknologi digital, transisi energi dan manajemen siklus hidup yang saling terkait satu sama lain. Dalam konteks transisi energi, teknologi DT yang didukung dengan AI dan sistem kontrol dapat melakukan pengambilan keputusan secara otomatis yang diperlukan untuk menjaga keandalan sistem energi dan bebas karbon, serta memungkinkan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas sistem energi, sehingga mempercepat transisi energi bersih [25], [26]. Sedangkan dalam konteks manajemen aset, DT mampu mengintegrasikan antara *Product Life Management* (PLM) dan *Enterprise Asset Management* (EAM) secara *real-time* dan akurat, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan produksi serta mengelola biaya MRO [27], [28]. Hubungan integrasi pada Gambar 7 juga menunjukkan bahwa DT berperan dalam meningkatkan efisiensi konfigurasi pada sistem otomatisasi manufaktur sehingga dapat menciptakan keberlanjutan proses produksi yang efisien. Sementara itu, dengan terbentuknya DT pada otomatisasi manufaktur maka proses *monitoring* dan perawatan dapat dilakukan dengan lebih akurat. Hal ini dapat membantu dalam mencegah *down-time* dan meningkatkan efisiensi energi, sehingga optimalisasi dan keberlanjutan proses produksi serta dekarbonisasi dapat dicapai. Dengan demikian keberlanjutan sosial, ekonomi dan lingkungan pada industri manufaktur di era Industri 4.0 dapat terlaksana sesuai dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs). Selain itu, otomatisasi manufaktur berkelanjutan berdasarkan DT memiliki keunggulan dalam aplikasi praktis [24].



Gambar 7 Diagram model DT dalam otomatisasi manufaktur yang berkelanjutan

Kesimpulan

Otomatisasi manufaktur yang didukung dengan teknologi informasi dan komunikasi telah memberikan dampak yang besar terhadap transformasi digital di era Industri 4.0, utamanya sebagai solusi untuk menghadapi tantangan perubahan pasar yang cepat dan kualitas produk yang tinggi serta mengurangi polusi dan limbah. *Digital Twin* (DT) adalah teknologi penghubung antara ruang fisik dan digital yang sesuai dengan konsep Industri 4.0 telah banyak digunakan sebagai aplikasi transformasi digital pada industri manufaktur karena memiliki peran yang penting. Melalui teknologi DT, otomatisasi manufaktur yang mengintegrasikan sistem mekatronika, teknologi digital, transisi energi dan siklus hidup dapat dideteksi, dianalisis, dikontrol, dioptimalkan dan dikonfigurasi dengan lebih fleksibel. Dengan demikian dapat meningkatkan produktivitas dan operasi manufaktur, serta mampu meningkatkan efisiensi energi dan manajemen aset dalam pengembangan berkelanjutan. Selain itu, teknologi DT berperan dalam pengambilan keputusan yang cepat, tepat dan akurat secara otomatis dalam ruang lingkup tertentu. Penelitian mengenai penerapan DT dan kasus penggunaannya terutama pada industri manufaktur di Indonesia dapat dilakukan lebih lanjut melalui kolaborasi dengan pihak industri.

Daftar Rujukan

- [1] M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu, "Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications," *J Manuf Syst*, vol. 58, pp. 346–361, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017.
- [2] M. Azarian, H. Yu, W. D. Solvang, and B. Shu, "An Introduction of the Role of Virtual Technologies and Digital Twin in Industry 4.0," in *Advanced Manufacturing and Automation IX*, Y. Wang, K. Martinsen, T. Yu, and K. Wang, Eds., Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 258–266.
- [3] T. Yue, P. Arcaini, and S. Ali, "Understanding Digital Twins for Cyber-Physical Systems: A Conceptual Model," in *Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation: Tools and Trends*, T. Margaria and B. Steffen, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 54–71.
- [4] M. Soori, B. Arezoo, and R. Dastres, "Digital twin for smart manufacturing, A review," *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, vol. 2, no. 100017, pp. 1–15, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.smse.2023.100017.
- [5] Y. Jiang, S. Yin, K. Li, H. Luo, and O. Kaynak, "Industrial applications of digital twins," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 379, no. 2207, Oct. 2021, doi: 10.1098/rsta.2020.0360.
- [6] M. E. Korkmaz, "A Short Technical Review on Digital Twins in Smart Manufacturing," *Sustainable Production, Instrumentation and Engineering Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, May 2023, doi: 10.57223/spies.2023.1.1.01.
- [7] D. Guerra-Zubiaga, V. Kuts, K. Mahmood, A. Bondar, N. Nasajpour-Esfahani, and T. Otto, "An approach to develop a digital twin for industry 4.0 systems: manufacturing automation case studies," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 34, no. 9, pp. 933–949, 2021, doi: 10.1080/0951192X.2021.1946857.
- [8] C. Martínez-Olvera, "Towards the Development of a Digital Twin for a Sustainable Mass Customization 4.0 Environment: A Literature Review of Relevant Concepts," *Automation*, vol. 3, no. 1, pp. 197–222, Mar. 2022, doi: 10.3390/automation3010010.
- [9] A. Malik, P. Rajaguru, and R. Azzawi, "Smart Manufacturing with Artificial Intelligence and Digital Twin: A Brief Review," in *2022 8th International Conference on Information Technology Trends (ITT)*, 2022, pp. 177–182. doi: 10.1109/ITT56123.2022.9863938.
- [10] Q. Qi and F. Tao, "Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3585–3593, Jan. 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
- [11] V. Warke, S. Kumar, A. Bongale, and K. Kotecha, "Sustainable development of smart manufacturing driven by the digital twin framework: A statistical analysis," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 18, Sep. 2021, doi: 10.3390/su131810139.

- [12] R. Mieke, L. Waltersmann, A. Sauer, and T. Bauernhansl, "Sustainable production and the role of digital twins—Basic reflections and perspectives," *J Adv Manuf Process*, vol. 3, no. 2, Apr. 2021, doi: 10.1002/amp2.10078.
- [13] H. Hassani, X. Huang, and S. MacFeely, "Enabling Digital Twins to Support the UN SDGs," *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 6, no. 4, Dec. 2022, doi: 10.3390/bdcc6040115.
- [14] M. Grieves and J. Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, and A. Alves, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- [15] M. Singh, E. Fuenmayor, E. P. Hinchy, Y. Qiao, N. Murray, and D. Devine, "Digital twin: Origin to future," *Applied System Innovation*, vol. 4, no. 2. MDPI AG, 2021. doi: 10.3390/asi4020036.
- [16] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, "Characterising the Digital Twin: A systematic literature review," *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 29, pp. 36–52, May 2020, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- [17] W. Kritzing, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihm, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., Jan. 2018, pp. 1016–1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [18] L. Lattanzi, R. Raffaeli, M. Peruzzini, and M. Pellicciari, "Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 34, no. 6, pp. 567–597, 2021, doi: 10.1080/0951192X.2021.1911003.
- [19] B. A. Talkhestani, D. Braun, W. Schloegl, and M. Weyrich, "Qualitative and quantitative evaluation of reconfiguring an automation system using digital twin," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2020, pp. 268–273. doi: 10.1016/j.procir.2020.03.014.
- [20] B. A. Talkhestani, N. Jazdi, W. Schloegl, and M. Weyrich, "Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2018, pp. 159–164. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.166.
- [21] B. Ashtari Talkhestani and M. Weyrich, "Digital Twin of manufacturing systems: A case study on increasing the efficiency of reconfiguration," *At-Automatisierungstechnik*, vol. 68, no. 6, pp. 435–444, Jun. 2020, doi: 10.1515/auto-2020-0003.
- [22] J. Bao, D. Guo, J. Li, and J. Zhang, "The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing," *Enterp Inf Syst*, vol. 13, no. 4, pp. 534–556, Apr. 2019, doi: 10.1080/17517575.2018.1526324.
- [23] E. M. Martinez, P. Ponce, I. Macias, and A. Molina, "Automation pyramid as constructor for a complete digital twin, case study: A didactic manufacturing system," *Sensors*, vol. 21, no. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/s21144656.
- [24] B. He and K. J. Bai, "Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review," *Adv Manuf*, vol. 9, no. 1, Mar. 2021, doi: 10.1007/s40436-020-00302-5.
- [25] C. Ghenai, L. A. Husein, M. Al Nahlawi, A. K. Hamid, and M. Bettayeb, "Recent trends of digital twin technologies in the energy sector: A comprehensive review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 54, p. 102837, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102837>.
- [26] W. Yu, P. Patros, B. Young, E. Klinac, and T. G. Walmsley, "Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161. Elsevier Ltd, Jun. 01, 2022. doi: 10.1016/j.rser.2022.112407.
- [27] I. Rojek, D. Mikolajewski, and E. Dostatni, "Digital twins in product lifecycle for sustainability in manufacturing and maintenance," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–19, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11010031.

- [28] H. Rahnama, K. Johansen, L. Larsson, and A. Ö. Rönnbäck, “Collaboration in Value Constellations for Sustainable Production: The Perspective of Small Technology Solution Providers,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 8, Apr. 2022, doi: 10.3390/su14084794.