

Potensi Penerapan Teknologi Digital Twin pada Industri Pertanian dan Pangan di Indonesia: Sebuah Tinjauan Literatur

Potential Application of Digital twin Technology in Agriculture and Food Industry in Indonesia: A Literature Review

Thabed Tholib Baladraf

Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember, Jember 67173, Indonesia
*E-mail: thabedtholib2000@gmail.com

Diterima: 15 Januari 2023; Disetujui: 22 Februari 2024

ABSTRAK

Persaingan yang semakin ketat dan kebutuhan konsumen yang semakin meningkat menuntut industri pertanian dan pangan bergerak secara efisien, cepat, dan tepat. Guna memenuhi kebutuhan tersebut kemampuan untuk melakukan peramalan secara akurat dan meminimalisir kesalahan yang terjadi menjadi suatu hal yang dibutuhkan oleh industri pertanian dan pangan di Indonesia. *Digital twin* merupakan replika digital dari entitas dunia nyata yang menghasilkan informasi aktual. Tujuan dari *literature review* ini adalah untuk memberikan gambaran tentang status perkembangan *digital twin* saat ini dan potensi penerapannya di bidang industri pertanian dan pangan Indonesia. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah *literature review* melalui database ilmiah Web of Science, Scencedirect, dan Google Scholar dengan kata kunci *digital twin* dan *agriculture*. Kriteria inklusi dan eksklusi digunakan untuk mengeliminasi sumber yang tidak berkaitan sehingga didapatkan referensi sesuai dengan kebutuhan dan dianalisis secara deskriptif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *digital twin* menjadi teknologi potensial jika diterapkan di industri pertanian dan pangan karena *digital twin* menimbulkan *multiplier effect* dengan menciptakan manajemen pertanian yang terpadu mulai dari pra-panen, panen, pasca panen. Namun sayangnya hingga saat ini belum ada industri pertanian yang menerapkan *digital twin* dalam prosesnya di Indonesia. Hal ini dikarenakan terdapat tantangan antara lain 1) ketersediaan infrastruktur, 2) tingginya biaya investasi, 3) penerimaan pelaku industri pertanian, 4) kualitas data, dan 5) ketersediaan tenaga ahli. Hadirnya riset ini harapannya dapat menjadi inisiasi guna mengenalkan teknologi *digital twin* sekaligus membuka pandangan bagi para pelaku industri pertanian dan pangan untuk menerapkan teknologi *digital twin* di Indonesia.

Kata kunci: *Digital twin*; efisiensi; industri pertanian; pertanian presisi; simulasi; virtual.

ABSTRACT

Increasingly fierce competition and increasing consumer needs require the agriculture and food industry to move efficiently, quickly, and precisely. In order to meet these needs, the ability to forecast accurately and minimise errors is something that is needed by the agricultural and food industry in Indonesia. Digital twins are digital replicas of real-world entities that generate actual information. The purpose of this literature review is to provide an overview the current status of digital twin development and its potential applications in the Indonesian agricultural and food industries. The methodology used in this research is literature review through the Web of Science, Scencedirect, and Google Scholar scientific databases with the keywords digital twin and agriculture. Inclusion and exclusion criteria were used to eliminate unrelated sources so that references were obtained according to needs and analyzed descriptively. The results of the study show that the digital twin is a potential technology when applied to the agriculture and food industry because digital twin creates a multiplier effect by creating integrated agricultural management starting from pre-harvest, harvest, post-harvest. But unfortunately, until now, there has been no agricultural industry that has implemented a digital twin in its processes in Indonesia. This is because there are challenges including 1) availability of infrastructure, 2) high investment costs, 3) acceptance of agricultural industry players, 4) data quality, and 5) availability of experts. The digital twin has great potential to improve the quality and productivity of Indonesian agriculture, so the penta helix collaboration between the government, academia, business, community, and media is needed.

Keywords: *Digital twins; efficiency; agricultural industry; precision agriculture; simulation; virtual.*

PENDAHULUAN

Indonesia dikenal sebagai negara agraris dengan luas lahan pertanian 25,05 juta hektar (BPS, 2019). Selain itu industri pertanian menjadi salah satu penyumbang PDB terbesar di Indonesia yaitu sebesar 13,59%. Namun fakta di lapangan menunjukkan bahwa sistem pertanian di Indonesia mayoritas masih menerapkan sistem secara tradisional mulai dari pra-panen hingga pasca panen (Komatsuzaki, 2011). Di sisi lain, persaingan industri pertanian semakin hari semakin meningkat (Sheldon, 2017). Hal ini menuntut para pelaku industri pertanian untuk menggunakan teknologi guna

meningkatkan produktivitas, mempermudah proses melalui inovasi, dan meningkatkan profit (keuntungan) perusahaan (Legner et al., 2017). Salah satu teknologi yang potensial dan masih belum diterapkan di Indonesia khususnya sektor pertanian adalah *digital twin*. Menurut (Gholami Mayani et al., 2018), *digital twin* merupakan replika digital berupa virtual dari entitas dunia nyata yang menghasilkan informasi otomatis secara aktual dengan tujuan untuk meningkatkan bagian fisik menggunakan simulasi dan teknik komputasi (D. Jones et al., 2020).

Dalam implementasinya, *digital twin* sudah diterapkan di berbagai sektor di berbagai negara dan menunjukkan

dampak yang positif. *Digital twin* sudah diterapkan di sektor energi untuk peramalan dan peningkatan efisiensi (Sivalingam et al., 2018), sektor otomotif untuk menguji durabilitas dan simulasi keamanan kendaraan (Caputo et al., 2019), sektor manufaktur untuk redesign produk dan peningkatan ergonomi tempat kerja (Kritzing et al., 2018), sektor farmasi untuk simulasi obat (Chen et al., 2020), sektor industri penerbangan simulasi mesin (Guo et al., 2018; Tuegel et al., 2011), sektor bongkar muat perkapalan untuk menguji kemampuan kapal (Pang et al., 2021), sektor pesawat untuk meningkatkan kualitas suku cadang (Ibrion et al., 2019), sektor minyak dan gas yang digunakan untuk simulasi pengeboran dan mengurangi biaya pemeliharaan (Gholami Mayani et al., 2018; Erol et al., 2020), sektor industri kesehatan untuk simulasi operasi dan monitoring kesehatan pasien secara *realtime* (Tao et al., 2018; Brenner & Hummel, 2017). Selain di sektor lain, *digital twin* juga sudah merambah ke sektor pertanian. India menjadi salah satu negara yang sudah menerapkan *digital twin* pada sistem irigasi yang diterapkan dan mampu mengefisienkan penggunaan air hingga 60-70% (Mellos Carlos et al., 2020).

Namun di sisi lain, penerapan *digital twin* memiliki beberapa tantangan antara lain kesiapan infrastruktur, tingginya biaya, penerimaan pelaku industri, dan ketersediaan tenaga ahli yang masih minim. Namun tantangan-tantangan tersebut dapat diselesaikan melalui solusi kolaborasi antara akademisi, pebisnis, dan pemerintah. Para akademisi akan berfokus perancangan sistem seefisien mungkin, pebisnis berperan sebagai investor, dan pemerintah berperan dalam penyedia kebijakan dan subsidi alat dengan sistem sewa kepada para pelaku industri pertanian.

Berdasarkan penelitian terdahulu, masih belum ditemukan studi atau penelitian mengenai potensi implementasi teknologi *digital twin* di sektor pertanian di Indonesia padahal teknologi *digital twin* dapat menjadi peluang yang besar di sektor pertanian Indonesia. Mayoritas penelitian *digital twin* yang sudah ada membahas mengenai sektor lain dan berada di luar negeri. Berbeda dengan hal tersebut, artikel ini menyajikan kajian literatur mengenai penerapan *digital twin* serta memberikan potensi pengembangan *digital twin* sesuai kondisi di Indonesia. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan studi literatur mengenai penerapan teknologi *digital twin* pada industri pertanian di Indonesia. Tujuan artikel ilmiah ini adalah meninjau penerapan teknologi *digital twin* pada pertanian serta melihat peluang penerapan teknologi tersebut secara pada bidang pertanian di Indonesia. Originalitas riset berupa

studi literatur menggunakan *narrative literature review* dan *text mining* dalam tema *digital twin*.

METODOLOGI

Metode dalam penelitian ini menggunakan *literature review* lalu di deskripsikan. *Literature review* digunakan untuk memberikan gambaran komprehensif terkait topik penelitian (Xiao & Watson, 2019). Kata kunci yang digunakan pada penelitian ini adalah jurnal penelitian "*evidence based agriculture*", "*smart agriculture*", "*digital twin*", "*digital farming*" dan kombinasi kata kunci tersebut. Pencarian literatur dilakukan menggunakan mesin pencari Web of Science, Scencedirect, Researchgate, Google Scholar dan dibantu dengan *software Publish or Perish 8*.

Sumber pustaka yang telah didapatkan selanjutnya disortir menggunakan beberapa kriteria inklusi lalu dirangkum dan disimpulkan untuk mendapatkan suatu kesimpulan informasi yang sistematis. Adapun kriteria inklusi pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

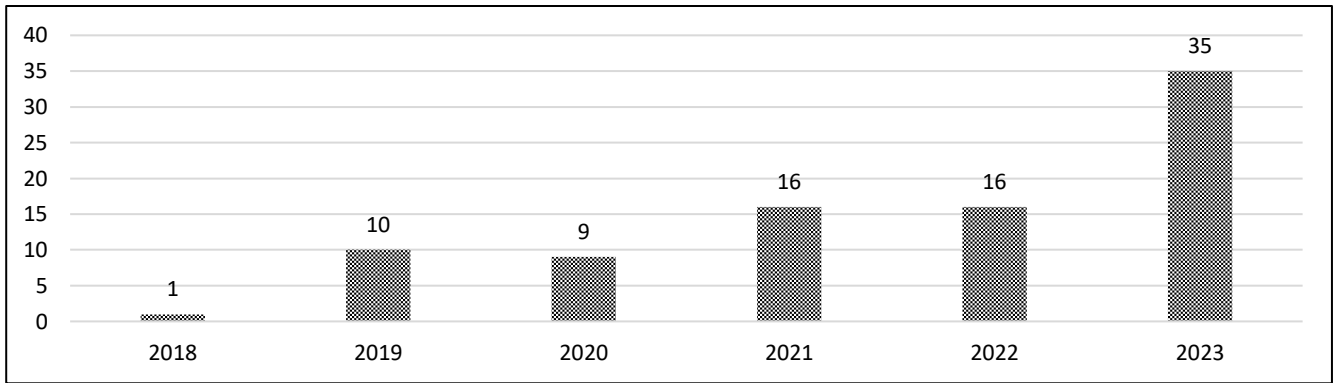
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Terkini *Digital twin* di Industri Pertanian Dunia

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, didapati bahwa referensi penelitian *digital twin* di bidang pertanian masih sangat terbatas. Hal ini semakin diperkuat dengan masih belum adanya penelitian yang menunjukkan penerapan *digital twin* di bidang pertanian di Indonesia, karena mayoritas penelitian *digital twin* diterapkan di luar negeri. Terbatasnya literatur mengenai penerapan *digital twin* diduga diakibatkan oleh kurangnya kesadaran dan pemahaman akan hadirnya teknologi baru yang potensial yaitu *digital twin*. Namun perkembangan riset mengenai *digital twin* di bidang pertanian kian hari kian mengalami peningkatan. Hal ini mengindikasikan bahwa kajian literatur terkait *digital twin* sangat dibutuhkan sehingga dapat memberikan informasi dan pandangan bagi pertanian Indonesia. Secara garis besar penerapan *digital twin* terdiri dari lima kategori pelayanan, yaitu sistem pemantauan *real time*, analisis kegagalan sistem, optimasi proses, integrasi, dan analisis konsumsi energi (Zong et al., 2021; Henson et al., 2021; Loaiza & Cloutier, 2022; Jiang et al., 2021; Onile et al., 2021). Adapun perkembangan penelitian *digital twin* pada bidang pertanian di dunia dari tahun ke tahun disajikan pada Gambar 1 dan studi kasus kondisi terkini penggunaan *digital twin* di bidang pertanian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Kriteria inklusi sumber pustaka yang digunakan

Tipe	Kriteria Inklusi
Bahasa sumber pustaka	Bahasa Indonesia dan Bahasa Inggris
Jenis sumber	Jurnal, artikel, buku, skripsi, tesis dan disertasi
Penulis	Akademisi yang terkait dengan topik yang akan dikaji
Desain penelitian	Eksperimental dan <i>review</i>
Tahun publikasi	<ul style="list-style-type: none"> • Pustaka utama: 2012-sekarang • Pustaka pendukung: 1999-sekarang



Gambar 1. Perkembangan riset digital twin agriculture

Tabel 2. Studi kasus penerapan *digital twin*

No.	Implementasi <i>Digital twin</i>	Keuntungan	<i>Physical Twin</i>	Fitur <i>Digital twin</i>	Sumber
1.	Penerapan kamera tiga dimensi yang dapat berputar 360° pada perkebunan. Kamera yang digunakan berfungsi untuk memonitoring kesehatan pohon dan memprediksi penyakit pada pohon yang ada di perkebunan	Deteksi dini penyakit pada tanaman dan produktivitas yang meningkat.	Tanaman	Realtime monitoring dan optimasi	(Moghadam et al., 2020)
2.	Penggunaan sensor pada sapi guna mendeteksi panas, estrus, dan kesehatan sapi ternak berdasarkan pada perilakunya.	Analisis penyakit dan tindakan preventif dapat dilakukan	Hewan ternak sapi	Realtime monitoring dan sistem analisis kegagalan	(Verdouw & Kruize, 2017)
3.	Pemanfaatan aplikasi mobile berbasis <i>on the field</i> dan <i>on the fly</i> . Pengguna mengambil foto dan mengirimkan kepada aplikasi tersebut. Secara otomatis aplikasi akan mengidentifikasi penyakit.	Analisis hama dan penyakit dengan cepat berdasarkan pendapat ahli.	Tanaman	Realtime monitoring	(Verdouw & Kruize, 2017)
4.	Pembangunan sistem pertanian cerdas yang dapat memberikan informasi kelembaban tanah dan prediksi cuaca yang disimpan dalam <i>cloud</i> . Informasi yang didapatkan dari sistem pertanian cerdas tersebut berfungsi untuk memberikan rekomendasi tindakan kepada petani sehingga dapat menghasilkan pengambilan keputusan yang tepat.	Dapat tercipta sistem pertanian berkelanjutan	Lahan pertanian	Realtime monitoring dan optimasi	(Kahlen et al., 2016)
5.	Pembangunan sistem <i>website</i> yang dapat melakukan simulasi terhadap irigasi sehingga dapat meminimalisir terjadinya kerugian.	Dapat tercipta sistem pertanian berkelanjutan	Lahan pertanian	Realtime monitoring dan optimasi	(Zhao et al., 2023)
6.	Pemanfaatan sensor guna menganalisa suhu, kelembaban, luminositas, dan CO ₂ . Data yang didapatkan digunakan untuk memberikan rekomendasi kepada produsen untuk dapat meningkatkan produksi	Membantu dalam mengambil keputusan dan dapat tercipta sistem pertanian berkelanjutan	Lahan pertanian	Realtime monitoring dan optimasi	(Monteiro et al., 2018)

Tabel 2. (Lanjutan)

No.	Implementasi <i>Digital twin</i>	Keuntungan	<i>Physical Twin</i>	Fitur <i>Digital twin</i>	Sumber
7.	Pembangunan kerangka kerja menggunakan WebGis, AI, drone, robot, <i>internet of things</i> dan big data yang berfungsi dalam mengintegrasikan data yang didapatkan dari skala lokal, regional, dan global. Pembangunan kerangka kerja ini juga berfungsi dalam pemberian rekomendasi untuk pembangunan.	Membantu dalam pembangunan agroindustri dan dapat tercipta sistem pertanian berkelanjutan	Lahan pertanian	<i>Realtime monitoring</i> , teknologi integrasi, dan optimasi	(Delgado et al., 2019)
8.	Penerapan simulasi matematis pada bidang pangan dengan menciptakan model kembar virtual dari produk. Dengan menggunakan simulasi matematis ini, peneliti dapat melakukan eksperimen terkomputerisasi untuk merancang produk dengan karakteristik dan sifat yang diinginkan atau dibutuhkan.	Membantu dalam merancang produk sesuai dengan kebutuhan	Pangan	Optimasi dan simulasi	(Gkouskou et al., 2020)
9.	Penerapan <i>digital twin</i> untuk mendiagnosis dan memprediksi potensi masalah pada rantai pasok untuk mengurangi <i>food loss</i> . <i>Digital twin</i> diterapkan dengan memantau secara real time beberapa aspek antara lain biologis, termal, fisiologi, dan mekanis.	Membantu untuk mendiagnosis dan memprediksi potensi masalah dan dapat tercipta sistem pertanian berkelanjutan	Pangan	<i>Realtime monitoring</i> dan optimasi	(Onwude et al., 2020)
10.	Penerapan <i>digital twin</i> sebagai solusi pengambil keputusan cerdas pada peternakan babi, akuakultur, dan urban farming. <i>Digital twin</i> mengambil keputusan <i>dari</i> dua sisi yaitu dari sisi bisnis dan dari sisi budidaya	Membantu untuk mengambil keputusan yang menguntungkan	Lahan pertanian dan bisnis	<i>Realtime monitoring</i> dan pengambil keputusan	(Li et al., 2019)
11.	Implementasi <i>digital twin</i> guna menciptakan simulasi terhadap mesin penabur benih dan penggembur tanah agar dapat menciptakan mesin yang sesuai dengan kebutuhan	Membantu dalam merancang produk sesuai dengan kebutuhan	Lahan pertanian dan alat	Optimasi dan simulasi	(Nemtinov et al., 2020)
12.	Penggunaan <i>digital twin</i> sebagai alat untuk monitoring kondisi dan keadaan tanaman yang berada dalam <i>green house</i> .	Membantu untuk menganalisis kondisi secara langsung	Lahan pertanian	<i>Realtime monitoring</i> dan pengambil keputusan	(Athira et al., 2022)
13.	Pemanfaatan <i>digital twin</i> sebagai alat untuk monitoring, memprediksi, dan memberikan rekomendasi kepada nelayan pembudidaya tambak ikan dengan menggunakan 5 indikator yaitu kualitas air, biomassa ikan, oksigen terlarut, pakan, dan kandungan kimia lain yang terkandung dalam air.	Membantu untuk menganalisis kondisi dan memprediksi	Tambak perikanan	<i>Realtime monitoring</i> dan simulasi	(Lima et al., 2022)

Tabel 2. (Lanjutan)

No.	Implementasi <i>Digital twin</i>	Keuntungan	<i>Physical Twin</i>	Fitur <i>Digital twin</i>	Sumber
14.	Penerapan teknologi <i>digital twin</i> pada pertanian hidroponik yang ada di London, Inggris. <i>Digital twin</i> yang digunakan berfungsi dalam mengambil data berupa temperatur, kelembaban, ketersediaan CO ₂ , kecerahan, curah hujan, dan kecepatan udara. Semua data tersebut diinterpretasikan guna menciptakan suatu prediksi dan rekomendasi. Hasil menunjukkan tumbuhan hidroponik tumbuh 12x lebih cepat dibandingkan dengan hidroponik tradisional.	Membantu menciptakan sistem pertanian berkelanjutan	Lahan pertanian dan alat	<i>Realtime monitoring</i> dan optimasi	(Jans-Singh et al., 2020)
15.	Implementasi pertanian cerdas berbasis <i>digital twin</i> di Nigeria untuk meningkatkan produktivitas dan memperbaiki sistem pertanian yang ada di negara tersebut.	Membantu menciptakan sistem pertanian berkelanjutan	Lahan Pertanian	<i>Realtime monitoring</i>	(Elijah et al., 2021)
16.	Penerapan <i>digital twin</i> pada aquaponic berupa <i>internet of things</i> , analisa produktivitas, dan rekomendasi pengambilan keputusan bisnis	Membantu menciptakan sistem pertanian berkelanjutan serta membantu memprediksi prospek kedepan	Aquaponic	<i>Realtime monitoring</i> , simulasi, dan pengambilan keputusan	(Ghandar et al., 2021)
17.	Penerapan <i>digital twin</i> pada industri pertanian dan kehutanan untuk memproyeksikan rute distribusi yang paling efektif dan menguntungkan	Membantu menciptakan sistem pertanian berkelanjutan serta membantu memprediksi prospek kedepan	Jalan	<i>Realtime monitoring</i> dan simulasi	(Machl et al., 2019)Machl et al. (2019)
18.	Pemodelan alat pertanian dengan menggunakan pendekatan <i>digital twin</i> guna meminimalisir risiko kegagalan alat yang diciptakan	Membantu dalam merancang produk sesuai dengan kebutuhan	Lahan pertanian dan alat	Simulasi dan optimasi	(Foldager et al., 2021)
19.	Implementasi <i>digital twin</i> untuk menciptakan pertanian presisi berdasarkan ontologis para ahli yang dihimpun guna memodelkan prediksi	Membantu memprediksi prospek kedepan	Lahan pertanian	<i>Realtime monitoring</i> , simulasi, dan optimasi	(Skobelev et al., 2020)
20.	Penerapan <i>digital twin</i> guna mensimulasikan konsumsi energi kandang babi dengan menggunakan kombinasi internet of things, spesifikasi kipas, dan model kandang babi dengan tujuan untuk mengoptimalkan konsumsi energi, meningkatkan kualitas udara, suhu, dan kelembapan yang optimal dengan input energi yang serendah mungkin.	Membantu menciptakan sistem pertanian berkelanjutan serta membantu memprediksi prospek kedepan	Hewan ternak babi	<i>Realtime monitoring</i> , simulasi, dan optimasi	(Yang et al., 2016)

Tantangan Penerapan *Digital twin*

Penerapan *digital twin* merupakan sebuah perubahan besar yang dapat menciptakan suatu kemajuan khususnya bagi industri pertanian. Namun terdapat berbagai tantangan yang dapat menghambat implementasi *digital twin* khususnya di Indonesia. Beberapa tantangan yang mungkin akan dihadapi antara lain 1) ketersediaan infrastruktur, 2) tingginya biaya investasi dan konsumsi produk, 3) kondisi dan penerimaan pelaku industri pertanian, 4) kualitas data, dan 5) ketersediaan tenaga ahli. Tantangan pertama dalam penerapan *digital twin* pada industri pertanian di Indonesia yaitu ketersediaan infrastruktur. Dalam penyediaan sistem *digital twin*, perlu adanya infrastruktur perangkat lunak dan perangkat keras yang terbaru dan memiliki performa tinggi. Dalam penyusunan sistem *digital twin* diperlukan beberapa komponen antara lain komponen fisik, komponen virtual, dan komponen manajemen data (Qi et al., 2021; Ivanov & Dolgui, 2021). Hal ini semakin diperparah dengan biaya pengadaan *digital twin* yang cukup tinggi (Farsi et al., 2021). Menurut Jans-Singh et al. (2020), biaya yang perlu dialokasikan sebagai modal awal/investasi pengadaan *digital twin* pada industri antara lain 7 milyar-10 milyar. Angin et al. (2020) membuktikan bahwa penerapan *digital twin* membutuhkan biaya yang tinggi dan membutuhkan waktu yang cukup lama dengan produksi yang besar supaya dapat menjadi teknologi yang menguntungkan. Selain itu infrastruktur internet dan teknologi yang buruk masih menjadi hal yang perlu diperbaiki guna menunjang prosesnya nanti (Ciruela-Lorenzo et al., 2020). Hal ini tentu menjadi tantangan bagi industri pertanian di Indonesia yang ingin mengadopsi *digital twin* karena mayoritas industri pertanian di Indonesia masih berskala kecil hingga sedang dengan modal yang sangat minim. Menurut van der Ploeg et al. (2013) dalam dunia pertanian terdapat dua konsep yang dikenal dengan nama *peasants* dan *farmers*. *Peasants* adalah petani yang memiliki lahan sempit dan memanfaatkan sebagian besar dari hasil pertaniannya untuk kepentingan pribadi. Sedangkan *farmers* merupakan orang-orang yang memanfaatkan hasil pertaniannya untuk dijual dan *farmers* sudah mengenal teknologi pertanian. Berdasarkan fakta di lapangan ditemui bahwa mayoritas petani di Indonesia masih berstatus sebagai *peasant*.

Petani *peasant* mayoritas belum memiliki kesiapan dalam menerima teknologi baru yang datang. Berdasarkan fakta di lapangan, para pelaku industri khususnya pertanian skala kecil hingga sedang sudah nyaman dan percaya menggunakan skema atau sistem tradisional yang sudah ada sejak zaman dahulu. Hal ini menyebabkan mereka sulit beralih ke teknologi baru. Selain itu menurut BPS (2013), 32,7% pelaku petani di Indonesia tidak tamat Sekolah Dasar (SD), 39,9% tamat Sekolah Dasar (SD), dan 27,4% berpendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) ke atas. Menurut Haryanto & Helmi (2020), tingkat pendidikan pelaku pertanian berkaitan erat dengan penerimaan teknologi yang ada karena berkaitan dengan literasi digital. Penerimaan teknologi yang sulit menyebabkan pertanian sulit beradaptasi serta produktivitas dan kualitas yang rendah dari komoditas pertanian yang dihasilkan. Hal ini semakin diperparah dengan tingkat kompleksitas penerapan *digital twin* yang cukup tinggi menyebabkan para pelaku enggan untuk menerapkan teknologi *digital twin*. Perlu adanya sesuatu yang memacu para pelaku industri pertanian dan masyarakat agar tertarik dan percaya untuk menggunakan *digital twin* (J. W. Jones et al., 2017). Selain itu edukasi dan penyuluhan secara berkala terkait dengan *digital twin* perlu diberikan supaya para pelaku industri pertanian dapat memahami dan mengerti keuntungan yang didapatkan. Hal lain yang akan menjadi tantangan nanti yaitu terkait dengan kualitas data, serta minimnya tenaga ahli dalam bidang

digital twin di Indonesia menjadi suatu tantangan yang harus dipertimbangkan dalam penerapannya (Perno et al., 2022).

Guna mengatasi berbagai tantangan yang ada, terdapat beberapa hal yang dapat dilakukan terutama dari sisi akademisi, pebisnis dan pemerintah. Akademisi berperan dalam perancangan sistem seefisien mungkin sehingga cost yang dikeluarkan tidak terlalu tinggi, pebisnis berperan sebagai investor teknologi, di sisi lain pemerintah berperan dalam penyedia kebijakan dan pemberian subsidi alat dengan sistem sewa. Kolaborasi ini dinilai ideal untuk menanggulangi permasalahan tersebut

Penerapan *Digital twin* di Industri Pertanian

Dalam mengimplementasikan *digital twin* terdapat sistem yang mengintegrasikan komponen fisik, komponen virtual, dan komponen manajemen data. Komponen fisik terdiri dari peralatan jaringan dan sensor yang berada di lapangan yang bertugas untuk mengumpulkan data yang dibutuhkan (Zhang & Shi, 2018), komponen virtual merupakan representasi digital dari komponen fisik yang ada di lapangan serta membangun suatu model berdasarkan data historis yang sudah dikumpulkan pada komponen fisik, sedangkan komponen manajemen data terdiri dari data historical, data operasi, data model dan data hasil visualisasi yang digunakan untuk menganalisis serta memprediksi. Adapun secara visual gambaran kerangka penerapan *digital twin* disajikan pada Gambar 2.

Komponen fisik yang ada dalam *digital twin* pertanian dapat berupa alat, material, dan kondisi yang ditemukan di lapangan, contohnya seperti hewan atau tanaman itu sendiri, jumlah hewan atau tanaman, luas tanah, kondisi tanah, kondisi iklim, mesin pertanian (traktor dan robot). Seluruh komponen fisik ini diukur menggunakan sensor untuk mengumpulkan data. Sensor yang dapat digunakan dalam industri pertanian contohnya sensor kelembaban, sensor suhu, sensor *Global Positioning System* (GPS), sensor suara, sensor amonia, dan sensor cuaca (Neethirajan & Kemp, 2021; Moghadam et al., 2020; Angin et al., 2020). Data yang sudah dikumpulkan selanjutnya ditransmisikan ke dalam komponen virtual. Komponen virtual inilah yang dapat mensimulasikan, mengontrol sistem fisik, melakukan prediksi masalah, mendeteksi galat, dan mengoptimalkan proses. Contoh penerapan dalam industri pertanian dan pangan dapat berupa pemantauan pertumbuhan tanaman secara *realtime* (Verdouw & Kruize, 2017) dan pemantauan kinerja oven dalam industri pangan.

Tiga negara yang perlahan sudah berhasil mengadopsi teknologi *digital twin* adalah India, Mexico, dan Nigeria. Ketiga negara tersebut memiliki iklim tropis yang produktif di sektor pertanian. India mengadopsi *digital twin* dan salah satunya berhasil menerapkan sistem simulasi pada irigasi pertanian. Sistem simulasi irigasi yang diterapkan yaitu memprediksi sekaligus memberikan rekomendasi kebutuhan air bagi lahan pertanian sesuai dengan iklim dan cuaca yang sedang terjadi. Penerapan *digital twin* pada irigasi pertanian berhasil menghemat penggunaan air 60-70% (Mellos Carlos et al., 2020). Di sisi lain, Mexico mengadopsi *digital twin* dan menerapkannya di industri mangga karena mangga menjadi salah satu komoditas ekspor andalan negara tersebut.

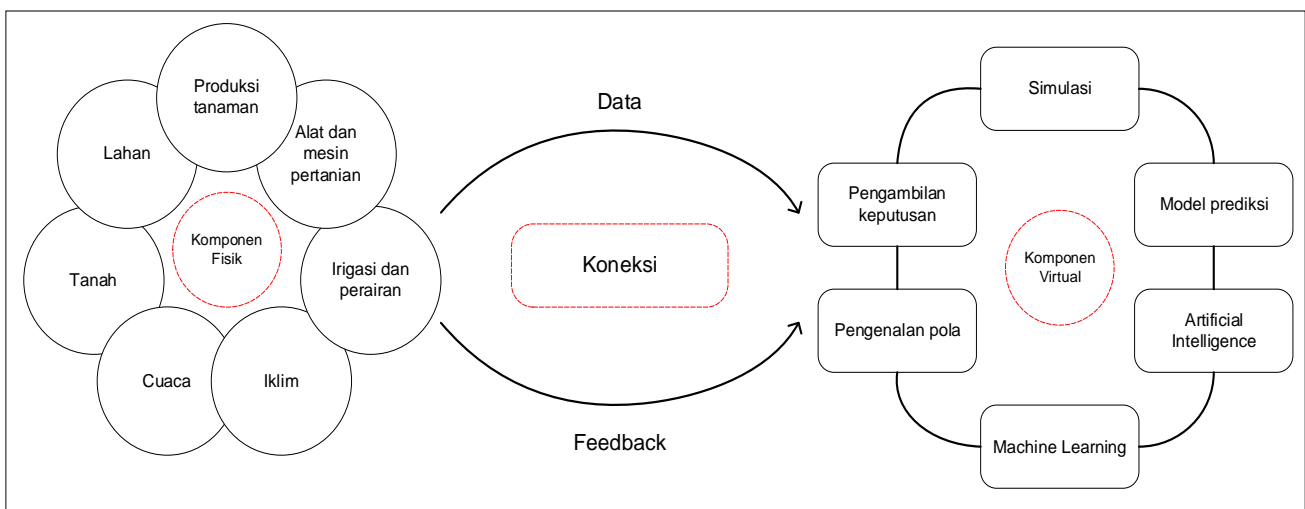
Digital twin yang diterapkan industri mangga di Mexico berfokus terhadap penyimpanan komoditas mangga yang akan diekspor, *digital twin* membantu industri mangga dalam melakukan simulasi apabila akan dikirim ke berbagai negara dengan mempertimbangkan jarak, waktu, dan kondisi lingkungan. Hal ini tentu sangat menguntungkan bagi industri dan bersifat ramah lingkungan karena dapat mengurangi tingkat kehilangan kualitas komoditas dan mencegah timbulnya limbah makanan (Defraeye et al., 2019). Sedangkan di Nigeria, *digital twin* salah satunya diterapkan untuk simulasi pada komoditas tomat yang akan didistribusikan. *Digital twin* memberikan gambaran

kerusakan yang dialami komoditas tomat dengan beberapa indikator antara lain warna, kandungan likopen, dan tekstur. Hal ini sangat berguna bagi para pelaku industri tomat dalam mengambil keputusan pemilihan kemasan yang tepat untuk mengurangi terjadinya penurunan kualitas tomat (Nwaizu et al., 2022).

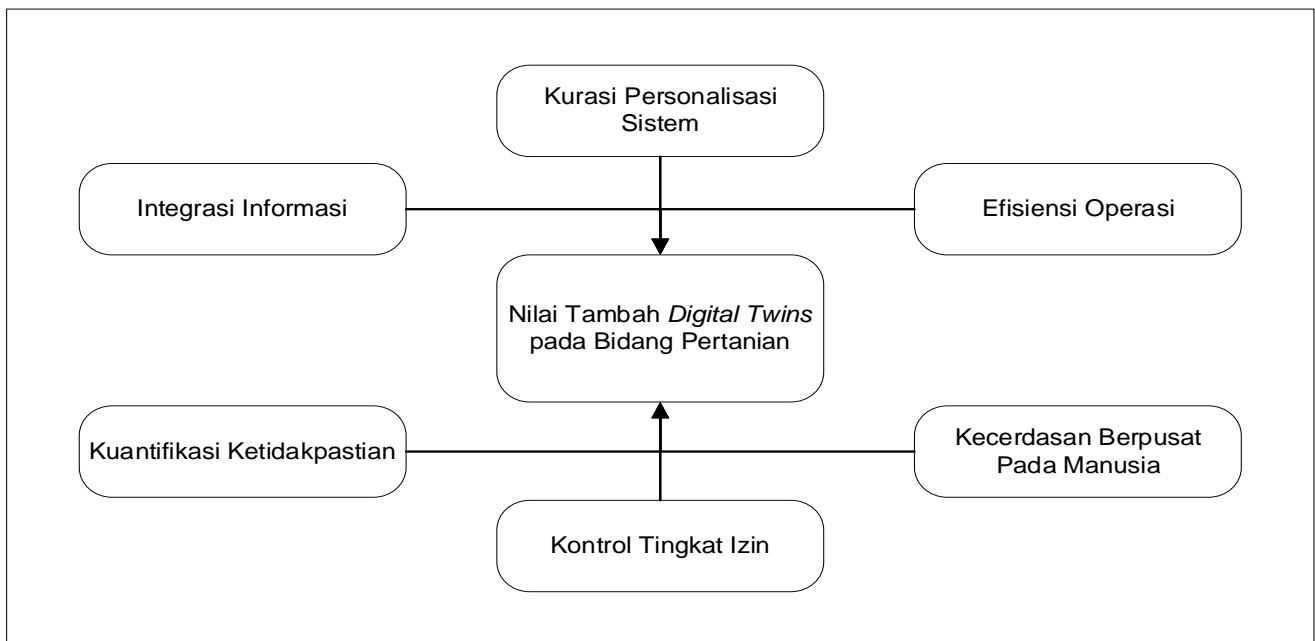
Nilai Tambah Penerapan *Digital twin*

Digital twin pada industri pertanian memberikan manfaat dan nilai tambah (Pylianidis et al., 2021) yang disajikan pada Gambar 3. Nilai tambah pertama yang dimiliki oleh *digital twin* adalah kurasi personalisasi sistem. Nilai tambah ini menjadi suatu keuntungan tersendiri karena pelaku industri dapat melakukan diagnosis kesehatan sistem, efektivitas operasi, dan profitabilitas sebagai langkah preventif. Hal ini menjadikan *digital twin* sebagai potensi menguntungkan apabila diterapkan karena dapat mengantisipasi terjadinya kerugian. Nilai tambah yang kedua yaitu terciptanya efisiensi operasi, karena *digital twin* dapat menciptakan operasi

otomatis seperti akuisisi data dari sensor, melakukan simulasi, membuat laporan, dan mengendalikan aktuator/alat. Operasi ini dapat berjalan secara otomatis tanpa memerlukan pengawasan secara terus menerus. Hal ini menyebabkan tidak adanya kerumitan serta penghematan waktu dalam penerapannya. Nilai tambah yang ketiga yaitu integrasi informasi, *digital twin* dapat mengintegrasikan dan mengumpulkan informasi dari beberapa sumber yang digunakan untuk memberikan gambaran masa lalu dan memperkirakan keadaan masa depan dari industri. Nilai tambah keempat yang dimiliki *digital twin* yaitu kuantifikasi ketidakpastian, hal ini menjadikan *digital twin* sebagai alat untuk mengidentifikasi ketidakpastian yang akan terjadi. Hal ini berguna untuk menentukan strategi yang tepat kedepannya. Nilai tambah kelima yaitu kontrol tingkat izin dan nilai tambah yang keenam yaitu kecerdasan yang berpusat pada manusia sehingga sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 2. Kerangka penerapan *digital twin* industri pertanian dan pangan



Gambar 3. Nilai tambah *digital twin*

Digital twin Masa Pra-Panen dan Panen

Proses pra-panen menjadi salah satu proses awal yang menjadi bagian penting dalam pertumbuhan tanaman. Dalam proses pra-panen, terdapat proses pemantauan kualitas tanah dan air mulai dari sebelum ditanami hingga mendekati masa panen. Adanya teknologi *digital twin* mampu mempermudah petani dalam memahami karakteristik tanah dan mengontrol irigasi perairan. Dalam *digital twin*, pemantauan kualitas tanah yang akan ditanami dapat dilakukan dengan menggunakan pemetaan berbasis spasial dengan menggunakan GIS (*Geographic Information System*) untuk mengidentifikasi jenis tanah serta kandungan yang dimiliki tanah tersebut (Söderström et al., 2016). Jenis dan kandungan tanah yang sudah diidentifikasi akan memberikan suatu informasi kepada petani terkait dengan kesesuaian lahan dan kesesuaian komoditas yang cocok untuk ditanam sehingga mendapatkan hasil panen yang maksimal (Searle et al., 2021; Wadoux & McBratney, 2021). Selain itu *digital twin* juga mampu melakukan prediksi terhadap cuaca atau iklim, karena cuaca atau iklim menjadi salah satu faktor yang berpengaruh dalam pertumbuhan tanaman (Vadlamani et al., 2023). Cuaca dan iklim yang mampu diprediksi lebih awal dengan menggunakan data *historical* dan pembobotan beberapa faktor. Hal ini tentu memberikan keuntungan dikala terjadi perubahan iklim yang cukup ekstrim saat ini. Prediksi cuaca atau iklim akan dapat mempermudah petani untuk menerapkan strategi dan mengambil keputusan yang tepat serta mengantisipasi terjadinya gagal panen akibat cuaca atau iklim yang tidak sesuai (Chaux et al., 2021).

Irigasi dan pengairan juga menjadi salah satu hal pokok yang harus diperhatikan dalam masa pra-panen. Menurut Baladraf (2020), irigasi yang tepat waktu dan sesuai kebutuhan akan meningkatkan pertumbuhan tanaman tersebut. Terdapat banyak alat yang biasa digunakan dalam sistem irigasi pintar antara lain *wireless system network*, *internet of things*, dan komputasi tepi. Penelitian Awais et al. (2022) mengembangkan *digital twin* untuk monitoring irigasi dan pengairan dengan menggunakan sensor suhu, sensor kelembaban, seperangkat alat irigasi, drone UAV, dan pipa air. Dari komponen fisik tersebut, didapatkan data berupa suhu, kelembaban, informasi lingkungan, informasi penginderaan jauh. Informasi tersebut diolah melalui suatu pemodelan sehingga didapatkan luaran berupa tampilan 3 dimensi *realtime*, *maintenance* alat, keputusan irigasi, peringatan dini jika akan terjadi kekeringan, dan pola statistik yang digunakan untuk analisa. Selain irigasi dan pengairan, juga terdapat pemupukan yang juga menjadi komponen penting selama masa pertumbuhan tanaman. Penelitian lain juga berhasil mengembangkan model *digital twin* yang dapat memprediksi kebutuhan kuantitas pupuk (N) suatu lahan dengan memanfaatkan beberapa informasi data seperti cuaca, informasi jenis tanah, kelembapan tanah, dan suhu tanah (Weckesser et al., 2022; Kessler et al., 2021). Penerapan *digital twin* pada pemupukan juga dilakukan oleh Tsolakos et al. (2019) dengan menciptakan robot simulasi otomatis yang dapat memberikan pupuk dan melakukan penyemprotan dengan terjadwal sesuai dengan pengaturan.

Digital twin juga dapat berperan dalam proses pemanenan dengan menggunakan robot. Proses pemanenan dengan robot berbasis *digital twin* dapat termonitoring secara *real time*, menghemat konsumsi energi, efisiensi ekonomi dan meminimalisir terjadinya *human error*. Penelitian De Preter et al. (2018), mengembangkan robot pemanenan otomatis yang terdiri dari mobil robot, lengan robot, *autonomous navigation*, 3D *vision*, dan rak logistik. Robot yang diciptakan mampu melakukan deteksi terhadap buah yang sudah matang dan dapat melakukan pemetikan secara otomatis dengan menggunakan lengan tersebut.

Digital Twin pada Pasca Panen

Proses pasca panen dalam pertanian terdiri dari distribusi, pengeringan, pendinginan, penyimpanan, hingga pemasaran. *Digital twin* dalam distribusi memiliki peranan dalam monitoring kualitas buah yang sedang dikirim dengan skala regional, nasional, hingga antar benua. Penelitian Defraeye et al. (2019) berhasil mengembangkan sistem monitoring dan simulasi distribusi sehingga dapat melakukan prediksi terhadap penyimpanan buah sebelum pengiriman atau distribusi dilakukan. Selain pada buah, hal ini juga berpotensi diterapkan pada seluruh komoditas pertanian karena memiliki sifat yang *perishable* (mudah rusak) seperti sayur-sayuran, daging-dagingan, dan *seafood* (Tzachor et al., 2022). *Digital twin* juga dapat melakukan prediksi keterlambatan rantai pasok yang akan dikirim serta memberikan rekomendasi pencegahan. *Digital twin* yang digunakan menggunakan beberapa input data seperti suhu makanan, kelembaban, aktivitas pernapasan komoditas, dan jadwal pengiriman. Hal ini tentu menguntungkan bagi industri pertanian dan pangan karena dapat mengurangi kerugian dan mengefisienkan *cost* yang dikeluarkan. Selain itu *digital twin* pada proses distribusi dapat melakukan simulasi melalui komputer untuk menganalisa mengukur penggunaan energi pada proses. Hal ini bertujuan untuk mengurangi emisi karbon yang timbul akibat transportasi distribusi, karena transportasi pada distribusi makanan menyumbang 0,3 gigaton CO₂ dalam satu tahun (Crippa et al., 2021). Selain itu hal ini juga dapat digunakan untuk menyusun strategi pengiriman baru yang lebih efisien.

Dalam pasca panen, *digital twin* juga dapat berperan dalam berbagai proses salah satunya pengeringan. Penelitian Kannapinn & Schäfer (2021) menunjukkan bahwa pengeringan menggunakan oven dapat disimulasikan dengan menggunakan *porous media model* berdasarkan pada data luas permukaan, waktu, konsentrasi kelembaban, atribut sensori dan tingkat penonaktifan patogen. Penelitian *digital twin* serupa juga dilakukan oleh Prawiranto et al. (2021) dengan melakukan pengeringan berbasis *digital twin* serta dilakukan pengujian kualitas buah yang dikeringkan. Hasil menunjukkan bahwa pengeringan dapat berjalan dengan optimal. Di sisi lain, *digital twin* juga diterapkan pada proses pasca panen seperti pemotongan buah, pemotongan daging hingga pengemasan (Perno et al., 2022). Hal ini menjadikan *digital twin* sebagai teknologi masa depan yang potensial untuk digunakan pada proses pasca panen.

Aplikasi dan Perkembangan di Indonesia

Hadirnya teknologi terkhusus *digital twin* menyebabkan para pelaku industri pertanian dan pangan harus beradaptasi supaya dapat bersaing dan tetap hidup. Teknologi dalam pertanian menimbulkan *multiplier effect* yang positif karena dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas suatu proses. Namun di sisi lain, hadirnya teknologi juga menjadi tantangan karena adanya kesenjangan pengetahuan dan keterampilan yang dimiliki khususnya bagi para pelaku industri pertanian kecil (Sugihono et al., 2022). Berdasarkan fakta di lapangan, diketahui bahwa para pelaku industri pertanian masih nyaman dengan skema atau sistem tradisional yang sudah ada sejak zaman dahulu. Hal ini menyebabkan mereka sulit beralih ke teknologi baru.

Dalam penerapannya *digital twin* kedepannya, perlu adanya suatu kolaborasi pentahelix yang terdiri dari akademisi, pemerintah, sektor bisnis, komunitas, dan media.

a. Akademisi

- Melakukan riset mendalam mengenai suatu teknologi *digital twin* yang sesuai dengan kebutuhan para petani serta mudah digunakan oleh berbagai kalangan pelaku industri pertanian

- Melakukan riset *pilot project* kepada para petani untuk memberikan bukti nyata bahwa hadirnya teknologi *digital twin* dapat menguntungkan
- b. Pemerintah
 - Melakukan studi pendahuluan mengenai *digitalisasi* pertanian di Indonesia
 - Menyusun kebijakan dan perencanaan strategis yang mendukung terciptanya iklim digitalisasi pertanian
- c. Sektor Bisnis
 - Mengembangkan teknologi *digital twin* yang murah dari segi biaya sehingga semua kalangan pelaku industri pertanian dapat merasakan
- d. Komunitas
 - Membantu meningkatkan literasi digital para pelaku industri pertanian
- e. Media
 - Mengedukasi para pelaku industri pertanian dan pangan melalui berita yang diterbitkan terkait dengan digitalisasi pertanian terkhusus *digital twin*
 - Publikasi informasi tentang penerapan digitalisasi pertanian terkhusus *digital twin* supaya memacu motivasi bagi para pelaku industri pertanian dan pangan yang lain.

KESIMPULAN

Teknologi *digital twin* secara garis besar terdiri dari tiga komponen utama yaitu komponen fisik, komponen virtual, dan koneksi antar keduanya. Teknologi *digital twin* menjadi teknologi yang potensial jika diimplementasikan, namun terdapat berbagai tantangan yang mungkin akan muncul seperti 1) ketersediaan infrastruktur yang terbatas, 2) tingginya biaya investasi dan konsumsi produk, 3) kondisi dan penerimaan pelaku industri pertanian, 4) kualitas data, dan 5) ketersediaan tenaga ahli. Perlu adanya kolaborasi *pentahelix* yang diterapkan oleh akademisi, pemerintah, sektor bisnis, komunitas, dan media dengan peranannya masing-masing. Sehingga diharapkan dapat tercipta penerapan teknologi *digital twin* yang inklusif dan menguntungkan. Penelitian ini bersifat literature review dan observasi sehingga kedepannya perlu adanya pendekatan dan pengamatan secara empiris terkait dengan penerapan *digital twin* pada industri pertanian dan pangan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Angin, P., Anisi, M. H., Göksel, F., Gürsoy, C., & Büyükgölcü, A. (2020). Agrilora: A digital twin framework for smart agriculture. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 11(4), 77–96. <https://doi.org/10.22667/JOWUA.2020.12.31.077>
- Athira, P. S., Maneesha, K. P., Mathew, V. K., Rose, H. A. N., & Pradyumna, K. (2022). Digital Twin Technology in Greenhouse. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 10(04), 229–231.
- Awais, M., Li, W., Li, H., Cheema, M. J. M., Hussain, S., & Liu, C. (2022). Optimization of Intelligent Irrigation Systems for Smart Farming Using Multi-Spectral Unmanned Aerial Vehicle and Digital Twins Modeling. 13. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022023013>
- Badan Pusat Statistik. (2019) *Statistik Indonesia 2019 (Indonesian Statistics)*, Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Baladraf, T. T. (2020). Design Automatic Drip Irrigation Integrated of Solar Energy Soil Moisture Based as a Efforts To Optimize The Use of Water. *Gontor AGROTECH Science Journal*, 6(3), 455.

- <https://doi.org/10.21111/agrotech.v6i3.5019>
- Brenner, B., & Hummel, V. (2017). Digital Twin as Enabler for an Innovative Digital Shopfloor Management System in the ESB Logistics Learning Factory at Reutlingen - University. *Procedia Manufacturing*, 9, 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.039>
- Caputo, F., Greco, A., Fera, M., & Macchiaroli, R. (2019). Digital twins to enhance the integration of ergonomics in the workplace design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 71(February), 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.02.001>
- Chaux, J. D., Sanchez-Londono, D., & Barbieri, G. (2021). A digital twin architecture to optimize productivity within controlled environment agriculture. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/app11198875>
- Chen, Y., Yang, O., Sampat, C., Bhalode, P., Ramachandran, R., & Ierapetritou, M. (2020). Digital Twins in Pharmaceutical and Biopharmaceutical Manufacturing: Processes, 8(1088), 1–33.
- Ciruela-Lorenzo, A. M., Del-Aguila-Obra, A. R., Padilla-Meléndez, A., & Plaza-Angulo, J. J. (2020). Digitalization of agri-cooperatives in the smart agriculture context. Proposal of a digital diagnosis tool. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/su12041325>
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2(3), 198–209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
- De Preter, A., Anthonis, J., & De Baerdemaeker, J. (2018). Development of a Robot for Harvesting Strawberries. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.054>
- Defraeye, T., Tagliavini, G., Wu, W., Prawiranto, K., Schudel, S., Assefa Kerisima, M., Verboven, P., & Bühlmann, A. (2019). Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 149(April), 778–794. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.002>
- Delgado, J. A., Short, N. M., Roberts, D. P., & Vandenberg, B. (2019). Big Data Analysis for Sustainable Agriculture on a Geospatial Cloud Framework. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3(July). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00054>
- Elijah, O., Rahim, S. K. A., Emmanuel, A. A., Salihu, Y. O., Usman, Z. G., & Jimoh, A. M. (2021). Enabling Smart Agriculture in Nigeria: Application of Digital-Twin Technology. *2021 1st International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science, ICMEAS 2021*, June. <https://doi.org/10.1109/ICMEAS52683.2021.9692351>
- Erol, T., Mendi, A. F., & Dogan, D. (2020). Digital Transformation Revolution with Digital Twin Technology. *4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2020 - Proceedings, January 2021*. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT50672.2020.9254288>
- Farsi, M., Ariansyah, D., Erkoyuncu, J. A., & Harrison, A. (2021). A digital twin architecture for effective product lifecycle cost estimation. *Procedia CIRP*, 100, 506–511. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.111>
- Foldager, F. F., Thule, C., Balling, O., & Larsen, P. G. (2021). Towards a Digital Twin - Modelling an Agricultural Vehicle. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and*

- Lecture Notes in Bioinformatics), 12479 LNCS(December 2017), 109–123. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83723-5_8
- Ghandar, A., Ahmed, A., Zulfiqar, S., Hua, Z., Hanai, M., & Theodoropoulos, G. (2021). A decision support system for urban agriculture using digital twin: A case study with aquaponics. *IEEE Access*, 9, 35691–35708. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061722>
- Gholami Mayani, M., Svendsen, M., & Oedegaard, S. I. (2018). Drilling digital twin success stories the last 10 years. *Society of Petroleum Engineers - SPE Norway One Day Seminar 2018, April*, 290–302. <https://doi.org/10.2118/191336-ms>
- Gkouskou, K., Vlastos, I., Karkalousos, P., Chaniotis, D., Sanoudou, D., & Eliopoulos, A. G. (2020). The “virtual Digital Twins” Concept in Precision Nutrition. *Advances in Nutrition*, 11(6), 1405–1413. <https://doi.org/10.1093/advances/nmaa089>
- Guo, F., Zou, F., Liu, J., & Wang, Z. (2018). Working mode in aircraft manufacturing based on digital coordination model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(5–8), 1547–1571. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2048-0>
- Haryanto, Y., & Helmi, Z. (2020). Pokok-Pokok Pikiran Pendidikan Pertanian Di Era Teknologi Informasi. *Jurnal Komunitas Online*, 1(1), 31–42. <https://doi.org/10.15408/jko.v1i1.17706>
- Henson, C. M., Decker, N. I., & Huang, Q. (2021). A digital twin strategy for major failure detection in fused deposition modeling processes. *Procedia Manufacturing*, 53(2020), 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.039>
- 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 and Control*, 32(9), 775–788. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>
- Jans-Singh, M., Leeming, K., Choudhary, R., & Girolami, M. (2020). Digital twin of an urban-integrated hydroponic farm. *Data-Centric Engineering*, 1(2). <https://doi.org/10.1017/dce.2020.21>
- Jiang, Z., Guo, Y., & Wang, Z. (2021). Digital twin to improve the virtual-real integration of industrial IoT. *Journal of Industrial Information Integration*, 22(August 2020), 100196. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100196>
- 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>
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Howitt, R. E., Janssen, S., Keating, B. A., Munoz-Carpena, R., Porter, C. H., Rosenzweig, C., & Wheeler, T. R. (2017). Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agricultural Systems*, 155, 269–288. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.021>
- Kahlen, F. J., Flumerfelt, S., & Alves, A. (2016). Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches* (Issue March). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7>
- Kannapinn, M., & Schäfer, M. (2021). Autonomous cooking with digital twin methodology. *World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress, 1200*, 1–12. <https://doi.org/10.23967/wccm-eccomas.2020.074>
- Kessler, I., Perzylo, A., & Rickert, M. (2021). Ontology-Based Decision Support System for the Nitrogen Fertilization of Winter Wheat. *Communications in Computer and Information Science*, 1355 CCIS, 245–256. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71903-6_24
- Komatsuzaki, M. (2011). Agro-ecological Approach for Developing a Sustainable Farming and Food System. *Journal of Developments in Sustainable Agriculture*, 6, 54–2011.
- 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>
- Legner, C., Eymann, T., Hess, T., Matt, C., Böhm, T., Drews, P., Mädche, A., Urbach, N., & Ahlemann, F. (2017). Digitalization: Opportunity and Challenge for the Business and Information Systems Engineering Community. *Business and Information Systems Engineering*, 59(4), 301–308. <https://doi.org/10.1007/s12599-017-0484-2>
- Li, B., Zhong, H., Chen, Y., & Leung, C. (2019). Farming Decision Support Systems with Digital Twin and Internet of Things: A Desiderata. *International Journal of Information Technology*, 25(2), 1–11. <https://www.reuters.com/article/us-china-swinefever-reporting-insight/piles-of-pigs-swine-fever-outbreaks-go->
- Lima, A. C., Royer, E., Bolzonella, M., & Pastres, R. (2022). Digital twins for land-based aquaculture: A case study for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Open Research Europe*, 2(February). <https://doi.org/10.12688/openreseurope.14145.1>
- Loaiza, J. H., & Cloutier, R. J. (2022). Analyzing the Implementation of a Digital Twin Manufacturing System: Using a Systems Thinking Approach. *Systems*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/systems10020022>
- Machl, T., Donaubaue, A., & Kolbe, T. H. (2019). Planning agricultural core road networks based on a digital twin of the cultivated landscape. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 2019(4), 316–327. <https://doi.org/10.14627/537663034>
- Mellos Carlos, L., ScharDOSim Simão, J. P., Saliyah-Hassane, H., Silva, J. B. da, & Mota Alves, J. B. da. (2020). Design and Implementation of an Architecture for Hybrid Labs. In *Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 80). https://doi.org/10.1007/978-3-030-23162-0_13
- Moghadam, P., Lowe, T., & Edwards, E. J. (2020). *Digital Twin for the Future of Orchard Production Systems*. 92. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019036092>
- Monteiro, J., Barata, J., Veloso, M., Veloso, L., & Nunes, J. (2018). Towards sustainable digital twins for vertical farming. *2018 13th International Conference on Digital Information Management, ICDIM 2018*, 234–239. <https://doi.org/10.1109/ICDIM.2018.8847169>
- Neethirajan, S., & Kemp, B. (2021). Digital twins in livestock farming. *Animals*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/ani11041008>
- Nemtinov, K., Eruslanova, M., Zazulya, A., Nemtinova, Y., & Salih, H. S. (2020). Creating a digital twin of an agricultural machine. *MATEC Web of Conferences*, 329, 05002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032905002>
- Nwaizu, C. C., Olanrewaju, T. O., & Christiana, I. (2022). Application of digital twin in evaluating quality changes in tomato value-chain in Nigeria. *2022 ASABE Annual International Meeting*, July. <https://doi.org/10.13031/aim.202200719>
- Onile, A. E., Machlev, R., Petlenkov, E., Levron, Y., &

- Belikov, J. (2021). Uses of the digital twins concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management: A review. *Energy Reports*, 7(November), 997–1015. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.090>
- Onwude, D. I., Chen, G., Eke-Emezue, N., Kabutey, A., Khaled, A. Y., & Sturm, B. (2020). Recent advances in reducing food losses in the supply chain of fresh agricultural produce. *Processes*, 8(11), 1–31. <https://doi.org/10.3390/pr8111431>
- Pang, T. Y., Restrepo, J. D. P., Cheng, C., Yasin, A., Lim, H., dan Miletic, M. (2021). Developing a *Digital twin* and Digital Thread Framework for an 'Industry 4.0' Shipyard. *Applied Science*, 11, 1097. <https://doi.org/10.3390/app11031097>
- 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(1), 959–964. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558>
- Prawiranto, K., Carmeliet, J., & Defraeye, T. (2021). Physics-Based Digital Twin Identifies Trade-Offs Between Drying Time, Fruit Quality, and Energy Use for Solar Drying. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(January). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.606845>
- Pylaniadis, C., Osinga, S., & Athanasiadis, I. N. (2021). Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184(July 2020), 105942. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105942>
- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58(October), 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>
- Searle, R., McBratney, A., Grundy, M., Kidd, D., Malone, B., Arrouays, D., Stockman, U., Zund, P., Wilson, P., Wilford, J., Van Gool, D., Triantafyllis, J., Thomas, M., Stower, L., Slater, B., Robinson, N., Ringrose-Voase, A., Padarian, J., Payne, J., ... Andrews, K. (2021). Digital soil mapping and assessment for Australia and beyond: A propitious future. *Geoderma Regional*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00359>
- Sheldon, I. M. (2017). The competitiveness of agricultural product and input markets: A review and synthesis of recent research. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 49(1), 1–44. <https://doi.org/10.1017/aae.2016.29>
- Sivalingam, K., Sepulveda, M., Spring, M., & Davies, P. (2018). A Review and Methodology Development for Remaining Useful Life Prediction of Offshore Fixed and Floating Wind turbine Power Converter with Digital Twin Technology Perspective. *Proceedings - 2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA 2018, April*, 197–204. <https://doi.org/10.1109/ICGEA.2018.8356292>
- Skobelev, P. O., Mayorov, I. V., Simonova, E. V., Goryanin, O. I., Zhilyaev, A. A., Tabachinskiy, A. S., & Yalovenko, V. V. (2020). Development of models and methods for creating a digital twin of plant within the cyber-physical system for precision farming management. *Journal of Physics: Conference Series*, 1703(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1703/1/012022>
- Söderström, M., Sohlenius, G., Rodhe, L., & Piiikki, K. (2016). Adaptation of regional digital soil mapping for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 17(5), 588–607. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9439-8>
- Sugihono, C., Juniarti, H. A., & Nugroho, N. C. (2022). Digital Transformation in The Agriculture Sector: Exploring The Shifting Role of Extension Workers. *STI Policy and Management Journal*, 7(2), 139–159. <https://doi.org/10.14203/stipm.2022.350>
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12), 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- Tsolakis, N., Bechtsis, D., & Bochtis, D. (2019). Agros: A robot operating system based emulation tool for agricultural robotics. *Agronomy*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy9070403>
- 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. <https://doi.org/10.1155/2011/154798>
- Tzachor, A., Richards, C. E., & Jeen, S. (2022). Transforming agrifood production systems and supply chains with digital twins. *Npj Science of Food*, 6(1), 1–5. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00162-2>
- Vadlamani, S. R., Scientist, D., International, S., Mittal, P., Leader, D. B., Manufacturing, T., & Equipment, F. (2023). *Climate Smart Farming – Deployment of Digital Twin Concepts in Agricultural Seed Value Chain*. 215–227. <https://doi.org/10.46254/an12.20220049>
- van der Ploeg, J. D., Ploeg, J. D. van der, & van der Ploeg, J. D. (2013). Peasants and the Art of Farming: A Chayanovian Manifesto. In *Peasants and the Art of Farming*. www.fernwoodpublishing.ca
- Verdouw, C., & Kruijze, J. W. (2017). Digital twins in farm management: illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals. *7th Asian-Australasian Conference on Precision Agriculture, June 2018*, 1–5. <https://www.researchgate.net/publication/322886729>
- Wadoux, A. M. J. C., & McBratney, A. B. (2021). Digital soil science and beyond. *Soil Science Society of America Journal*, 85(5), 1313–1331. <https://doi.org/10.1002/saj2.20296>
- Weckesser, F., Beck, M., Hülsbergen, K. J., & Peisl, S. (2022). A Digital Advisor Twin for Crop Nitrogen Management. *Agriculture (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/agriculture12020302>
- Xiao, Y., & Watson, M. (2019). Guidance on Conducting a Systematic Literature Review. *Journal of Planning Education and Research*, 39(1), 93–112. <https://doi.org/10.1177/0739456X17723971>
- Yang, Y., Ng, E. J., Chen, Y., Flader, I. B., & Kenny, T. W. (2016). A Unified Epi-Seal Process for Fabrication of High-Stability Microelectromechanical Devices. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 25(3), 489–497. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2016.2537829>
- Zhang, L., & Shi, L. S. (2018). The Platform Design and Implementation of Campus Fire Safety Knowledge Based on Unity3D. *Procedia Computer Science*, 154, 832–837. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.06.071>
- Zhao, J., Yu, Y., Lei, J., & Liu, J. (2023). Multi-Objective Lower Irrigation Limit Simulation and Optimization Model for Lycium Barbarum Based on NSGA-III and ANN. *Water (Switzerland)*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/w15040783>
- Zong, X., Luan, Y., Wang, H., & Li, S. (2021). A multi-robot monitoring system based on digital twin. *Procedia Computer Science*, 183, 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.035>

Halaman ini sengaja dikosongkan