

## PERKEMBANGAN INTEGRASI DIGITAL TWIN DAN ROBOTIK DI INDUSTRI KONSTRUKSI

Dian Laras Wati<sup>1</sup>, Prima Ranna<sup>2</sup>, dan Oei Fuk Jin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
*dian.327231012@stu.untar.ac.id*

<sup>2</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
*prima.327231016@stu.untar.ac.id*

<sup>3</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
*fukjin.untar@gmail.com*

Masuk: 20-10-2023, revisi: 01-12-2023, diterima untuk diterbitkan: 02-12-2023

### ABSTRACT

*The development and advancement of digital technology, such as Digital Twin, providing real-time updates, and automation technologies like robotics, have been extensively explored in the construction industry. The capabilities of robotics, including enhanced safety features and the ability to perform tasks beyond human capacity, have led to widespread applications in design, construction management, autonomous transportation, and automated structural assembly. However, the limitations of robotics in adapting to changes on the field have prompted researchers to explore the integration of Digital Twin with robotics in the construction industry, aiming to enhance efficiency and safety for human workers. This research methodology is categorized into three stages: literature review, literature selection, and review process. The objective is to provide insights into the extent of Digital Twin and robotics utilization in the construction industry. The current integration of Digital Twin and robotics in ensuring workplace safety and fabrication tasks is still limited. Further research is needed to explore the application of Digital Twin and robotics in combination with other digital technologies such as AI, VR, IoT, and others. This holistic approach will contribute to the maximal development of these technologies.*

*Keywords: digital twin; robotic; digital construction*

### ABSTRAK

Pengembangan dan kemajuan teknologi digital seperti *Digital Twin* yang dapat memberikan pembaruan waktu secara nyata. Teknologi otomasi seperti robotik juga sudah banyak dikembangkan untuk industri konstruksi, kemampuannya dalam memberikan keamanan dan membantu melakukan tugas-tugas diluar kapasitas manusia membuat robotik banyak diterapkan untuk desain, manajemen konstruksi, transportasi otonom, dan perakitan struktur otomatis. Keterbatasan robotik dalam menyesuaikan diri terhadap perubahan di lapangan, memberikan gagasan baru oleh para peneliti untuk mulai mengembangkan integrasi antara *Digital Twin* dengan robotik dalam industri konstruksi untuk memberikan kemudahan dan keamanan bagi manusia dalam melaksanakan pekerjaannya. Metode penelitian ini dikelompokkan menjadi tiga tahap: Pengambilan literatur, Pemilihan literatur, dan Proses peninjauan. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi makalah penelitian ini akan memberikan pandangan tentang sejauhmana penggunaan *Digital Twin* dan robotik untuk industri konstruksi. Pengembangan integrasi *Digital Twin* dan robotik masih sangat terbatas pengaplikasiannya pada keselamatan kerja dan pekerjaan fabrikasi. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait dengan pengaplikasian *Digital Twin* dan robotik dengan adanya kombinasi terhadap teknologi digital seperti AI, VR, IoT dan lainnya, sehingga pengembangan teknologi tersebut dapat menjadi lebih maksimal.

Kata kunci: *digital twin; robotik; konstruksi digital*

## 1. PENDAHULUAN

Pengembangan dan kemajuan teknologi konstruksi masih sangat terlambat apabila dibandingkan dengan bidang lain seperti manufaktur dan otomotif, dalam praktiknya teknologi komputer seperti AutoCAD, Sketchup, ETABS, SAP2000, STAADPro, HEC-RAS, Global Mapper, Microsoft Project, dan Plaxis 2D masih menjadi yang utama dalam membantu pekerjaan di lapangan. Dalam industri konstruksi kesenjangan produktivitas, citra industri yang buruk, prediktabilitas yang rendah, fragmentasi struktural, kurangnya penelitian dan pengembangan serta investasi dalam inovasi menjadi tantangan tersendiri bagi industri ini (Farmer, 2016). Barbosa (2017) menyampaikan bahwa

kesenjangan produktivitas dapat diatasi melalui peningkatan kinerja industri yang salah satunya dengan menerapkan teknologi digital dalam fase siklus proyek.

Sebelum berkembangnya teknologi digital, teknologi otomasi seperti robotik juga sudah banyak dikembangkan untuk industri konstruksi, kemampuannya dalam memberikan keamanan dan membantu melakukan tugas-tugas diluar kapasitas manusia membuat robotik banyak diterapkan untuk desain, manajemen konstruksi, transportasi otonom, dan perakitan struktur otomatis. Robot banyak digunakan untuk desain, manajemen konstruksi, manufaktur robot, transportasi otonom, dan perakitan struktural otomatis. Pada tahun 2016 penggunaan alat berat otomasi mulai diterapkan untuk eskavator, dozer, dan truk yang dapat terhubung bersama dalam sistem pengangkutan dengan bantuan teknologi *Building Information Modeling* (BIM), seperti *automatic self-climbing crane* (Parascho, 2023), Yang et al. (2019) menemukan dan memvisualisasikan proses konstruksi modular. Shahmiri dan Ficca (2016) mengembangkan model parametrik yang dapat secara langsung mengontrol robot industri untuk merakit struktur, Bruckmann et al. (2016) memprogram robot paralel yang digerakkan oleh kabel untuk membangun bangunan pasangan bata, Usmanov et al. (2017) memprogram lengan robot industri untuk memasang batu bata (Selva et al., 2021), sistem konstruksi otomatis (BIMAC) berbasis BIM dikembangkan untuk pekerjaan prafabrikasi (Chea et al., 2020), perakitan balok baja dengan sistem perakitan robot baut (Kerber et al., 2018). Namun, robot otomasi masih sulit untuk menyesuaikan dengan kondisi proyek yang bersifat dinamis dan keterbatasannya dalam memahami perubahan lingkungan secara cepat, diperlukan suatu sistem baru agar robot tersebut dapat memahami perubahan lingkungan dengan cepat.

Pada tahun 90-an, teknologi digital sudah mulai berkembang, ide-ide baru para praktisi untuk memberikan kemudahan dalam penggunaannya, seperti *Digital Twin* (DT), *Internet of Things* (IoT), *Artificial Intelligence* (AI), jaringan sensor nirkabel, *Radio Frequency Identification* (RFID), dan 5G banyak diterapkan diberbagai sektor industri. *Digital Twin* merupakan salah satu teknologi digital yang mulai banyak digunakan dalam sektor seperti manufaktur, pemeliharaan prediktif, manajemen kesehatan struktural, dan industri penerbangan (Opoku et al., 2021). Pada tahun 2020, Para praktisi industri konstruksi baru mulai mengembangkan penggunaan *Digital Twin* untuk pemodelan informasi bangunan, integritas sistem struktural, manajemen fasilitas, pemantauan, proses logistik dan simulasi energy, dalam membantu mengatasi tantangan yang kompleks dan memenuhi permintaan pasar (Opoku et al., 2021).

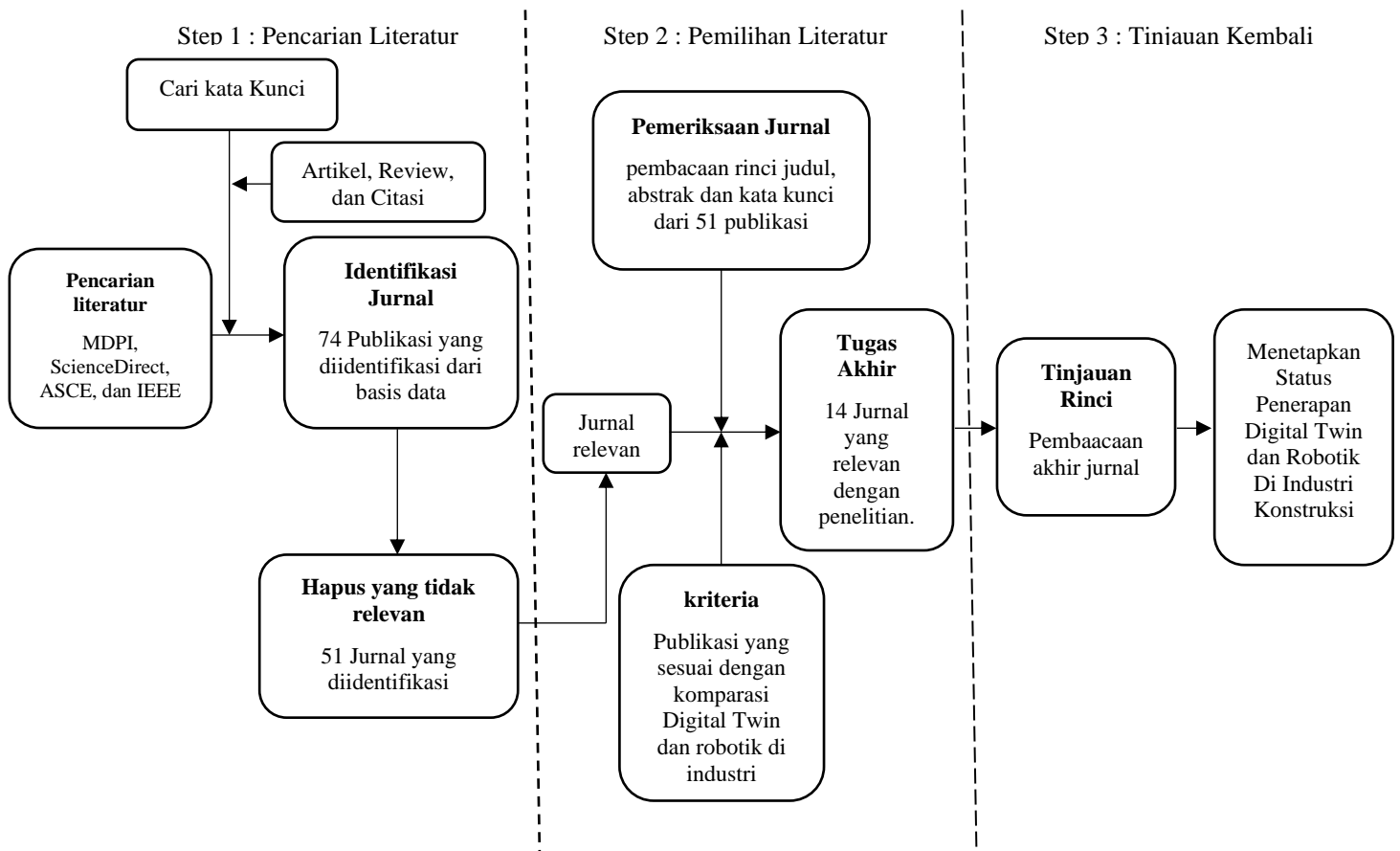
*Digital Twin* didefinisikan sebagai representasi virtual dari aset fisik menggunakan teknologi yang mendukung *Digital Twin* untuk mendapatkan pembaruan waktu nyata dengan melakukan koordinasi dua arah sehingga aset virtual dapat berfungsi *real time* (Madubuike et al., 2022). Dengan kemampuan *Digital Twin* yang dapat memberikan pembaruan waktu secara nyata dan keterbatasan robotik dalam menyesuaikan diri terhadap perubahan di lapangan, maka para peneliti mulai mengembangkan kolaborasi antara *Digital Twin* dengan robotik dalam industri konstruksi untuk memberikan kemudahan dan keamanan bagi manusia dalam melaksanakan pekerjaannya. Kepraktisan dan keamanan manusia dalam bekerja. Berdasarkan tinjauan literature yang komprehensif dan sistematis, penelitian ini akan memberikan pandangan tentang sejauhmana penggunaan *Digital Twin* dan robotik untuk industri konstruksi.

## 2. METODE PENELITIAN

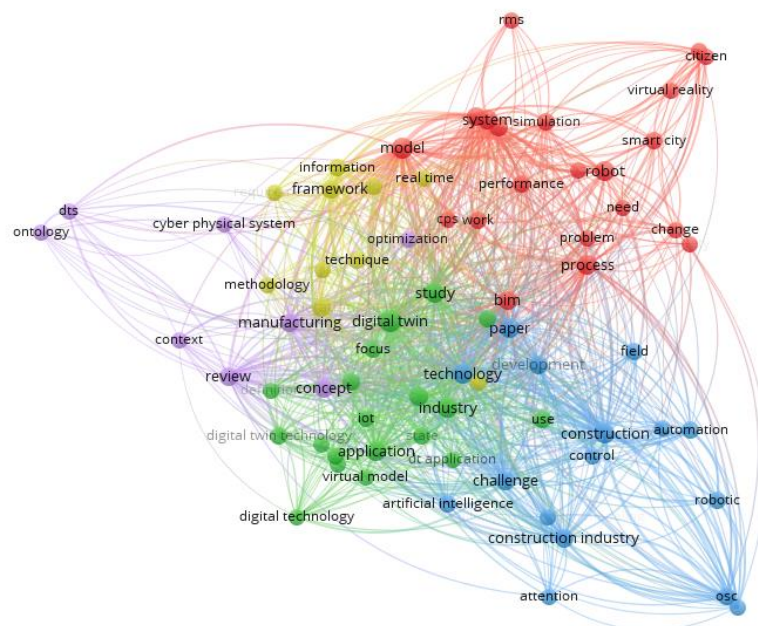
Metode penelitian ini dikelompokkan menjadi tiga tahap: Pengambilan literatur, Pemilihan literatur, dan Proses peninjauan. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi makalah penelitian ini akan memberikan pandangan tentang sejauhmana penggunaan *Digital Twin* dan robotik untuk industri konstruksi.

Basis data utama yang digunakan untuk mengumpulkan artikel dari situs web seperti *ScienceDirect*, *American Society of Civil Engineers* (ASCE), *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (MDPI), *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) dan *Springer Nature*. Basis data ini merupakan platform penelitian multidisiplin dan mapan yang berisi berbagai jurnal dengan informasi terkini. Daftar referensi makalah yang relevan disaring untuk dianalisis selanjutnya.

Langkah pertama dari metodologi adalah pengambilan literatur. Tujuan dari langkah ini untuk menemukan literatur yang berkaitan dengan topik penelitian secara akurat. Langkah-langkah dalam pengambilan literatur yaitu pertama pencarian literatur menggunakan basis data. Dari basis data terdapat 74 jurnal, kemudian digunakan *software* VOSviewer untuk mencari relevansi kata kunci untuk memperoleh jaringan dan frekuensi dengan menggunakan format RIS dari Mendeley yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram alir *review* literatur

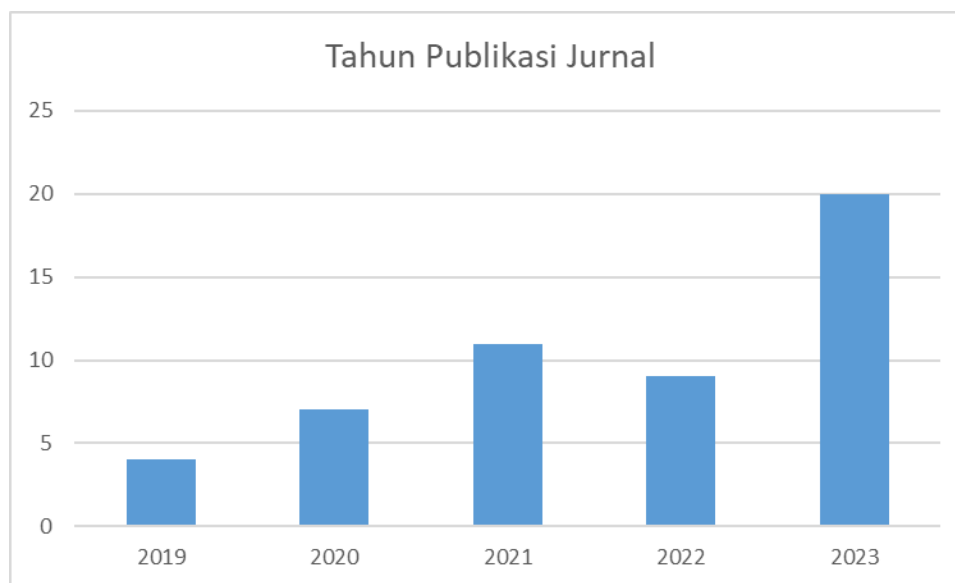


Gambar 2. Distribusi jurnal berdasarkan kata kunci

Untuk membuat visualisasi jaringan kemunculan kata kunci dan relevansinya, dilakukan langkah-langkah sebagai berikut : pertama pilih "Create a map based on text data", lalu pilih "format data source" dengan type "file RIS", selanjutnya upload data format RIS, kemudian "choose fields" dengan memilih "title dan abstrak", setelah itu, "choose counting method full counting", lalu pilih "minimum number of occurrences of a term 5". Terakhir verifikasi kata-kata yang ingin dimunculkan sebagai hasil visualisasi jaringan sebanyak 74 kata yang digunakan untuk mendapatkan hasil analisis jaringan.

Hasil visualisasi jaringan pada VOSviewer terdapat 5 cluster : cluster 1 berwarna merah sebanyak 21 item, cluster 2 berwarna hijau sebanyak 19 item, cluster 3 berwarna biru sebanyak 16 item, cluster 4 berwarna kuning sebanyak 10 item, dan cluster 5 berwarna ungu. Hasil visualisasi jaringan ini kemudian dipilih lagi agar sesuai dengan topik pembahasan yang terkait dengan *Digital Twin, industry construction, robotic, BIM, and real time* yang menjadi kata dasar untuk topik penelitian ini.

Dari 74 jurnal, 51 jurnal yang diambil yang diterbitkan 5 tahun terakhir dari jurnal yang memiliki ranking publikasi Q1 sampai dengan Q3 sebagai pendukung penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik tahun publikasi jurnal

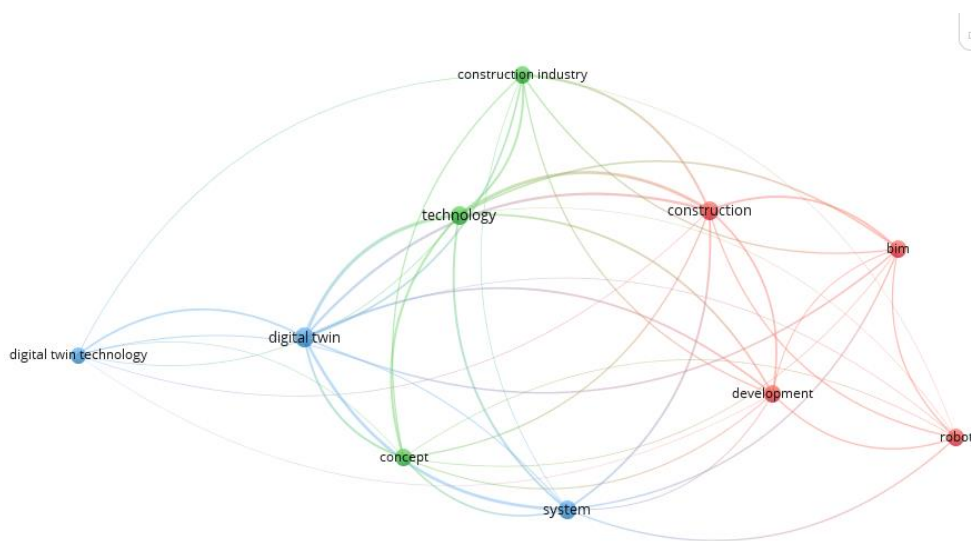
Tabel 1. Jurnal yang Terindeks Scopus

No	Publikasi	Nama Jurnal	Peringkat
1	IEEE	<i>IEEE Access</i>	Q1
2	ASCE	<i>Journal of Computing in Civil Engineering</i>	Q1
3	ASCE	<i>Journal of Management in Engineering</i>	Q1
4	Elsevier	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	Q1
5	Elsevier	<i>Advanced Engineering Informatics</i>	Q1
6	Annual Reviews Inc.	<i>Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems</i>	Q1
7	Elsevier	<i>Automation in Construction</i>	Q1
8	MDPI	<i>Buildings</i>	Q1
9	Elsevier	<i>CIRP Annals</i>	Q1
10	Elsevier	<i>Cities</i>	Q1
11	MDPI	<i>Drones</i>	Q1
12	CellPress	<i>Heliyon</i>	Q1
13	IEEE	<i>IEEE Communications Surveys &amp; Tutorials</i>	Q1
14	Elsevier	<i>Journal of Building Engineering</i>	Q1
15	ASCE	<i>Journal of Computing in Civil Engineering</i>	Q1
16	ASCE	<i>Journal of Construction Engineering and Management</i>	Q1
17	Springer	<i>Journal of Intelligent Manufacturing</i>	Q1
18	Elsevier	<i>Journal of Manufacturing Systems</i>	Q1

Tabel 2 (Lanjutan). Jurnal yang Terindeks Scopus

No	Publikasi	Nama Jurnal	Peringkat
19	ASCE	<i>Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems</i>	Q1
20	Elsevier	<i>Robotics and Computer Integrated Manufacturing</i>	Q1
21	MDPI	<i>Sensors</i>	Q1
22	Emerald Insight	<i>Smart and Sustainable Built Environment</i>	Q1
23	MDPI	<i>sustainability</i>	Q1
24	Elsevier	<i>Technovation</i>	Q1
25	Elsevier	<i>Energy Reports</i>	Q2
26	Fuji Technology Press	<i>International Journal of Automation Technology</i>	Q2
27	International Council for Research and Innovation in Building and Construction	<i>Journal of Information Technology in Construction</i>	Q2
28	MDPI	<i>System</i>	Q2
29	Hindawi	<i>Advances in Civil Engineering</i>	Q3

Langkah kedua yaitu pemilihan literatur. Lima puluh satu (51) jurnal dilakukan pemeriksaan lebih lanjut untuk mengidentifikasi topik penelitian yang relevan. Gambar 4 menunjukkan hasil dari 14 jurnal yang relevan dengan penelitian ini. Berdasarkan hasil terdapat robotik, konstruksi, dan *Digital Twin*, keterkaitan antara ketiga topik tersebut yang menjadi pembahasan lebih lanjut dalam penelitian ini. Penghapusan jurnal tertentu untuk memastikan bahwa jurnal tersebut relevan dengan penelitian yang akan dibahas. Dengan 14 jurnal, penelitian ini mampu memberikan informasi yang memadai terkait penerapan *Digital Twin* dan robotik di industri konstruksi.



Gambar 4. Relevansi kata kunci dengan topik

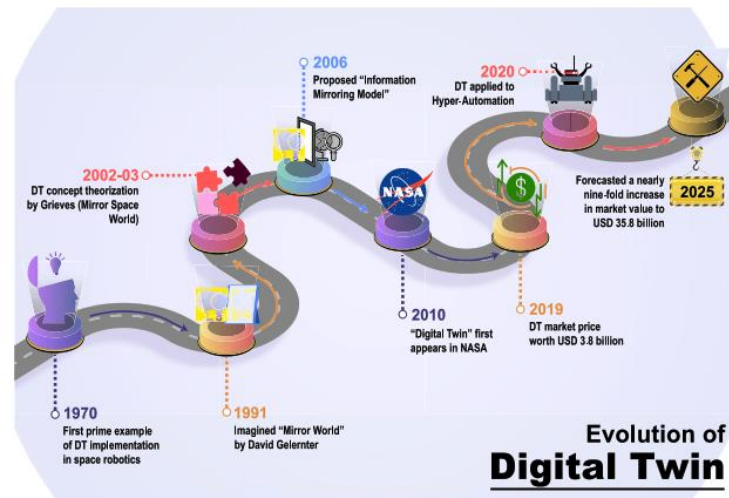
Langkah ketiga tinjauan kembali. Hal ini dilakukan untuk memastikan konsep dan teknologi Digital Twin, penggunaan robotik, serta penerapannya dalam industri konstruksi. Selanjutnya,

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Definisi *Digital Twin*

Sejarahnya, *Digital Twin* pertama kali digunakan oleh NASA pada tahun 1970 untuk robotik luar angkasa, berfokus pada infrastruktur fisik dalam sistem cyber-fisik multi simulator. Pada tahun 1991, David Gelernter mengggagas konsep serupa dengan menciptakan model perangkat lunak yang mencerminkan realitas fisik yang disebut “Mirror World”. Pada tahun 2022, John Vicker dari Nasa memperkenalkan “Mirror Space World” dan berkolaborasi dengan Dr. Michael Grivers untuk mengadaptasi Digital Twin dalam manajemen siklus hidup produk disektor manufaktur. Sejak tahun 2010, istilah *Digital Twin* versi NASA mulai dikenal dan mengalami pertumbuhan yang signifikan (Kerber et al., 2018). Glassgen dan Stargel (2012) dari NASA mendefinisikan *Digital Twin* sebagai simulasi probabilistik multi fisika, multi skala, dari sistem kompleks dengan menggunakan model fisik terbaik yang tersedia, pembaruan sensor,

dan sebagainya untuk mereplikasikan kehidupannya, dengan melakukan transfer data dua arah, perkembangan *Digital Twin* tersebut tergambar seperti pada gambar 5. (Mazumder et al., 2023).



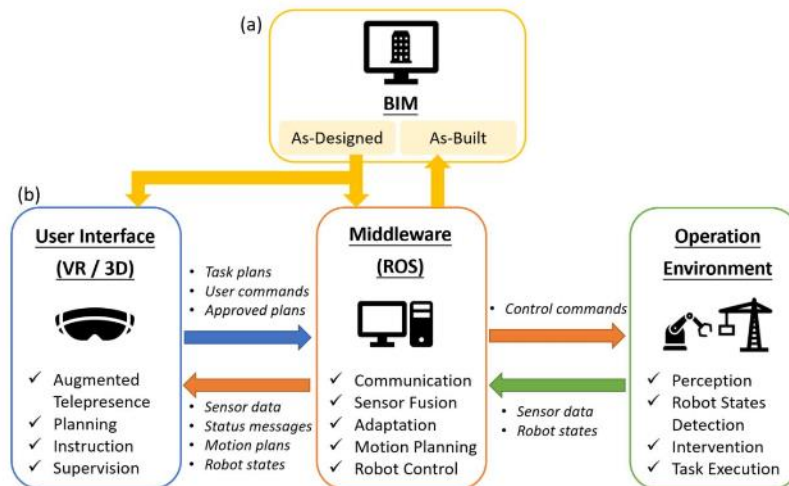
Gambar 5. Sejarah Digital Twin (Mazumder et al., 2023)

Industri konstruksi telah mengembangkan *Digital Twin* dengan *Virtual Reality* (VR) sebagai media untuk menilai postur kerja pekerja konstruksi untuk pencegahan terjadinya cedera bagi para pekerja dan meningkatkan kesadaran akan risiko ergonomis terkait postur tubuh mereka (Dawood et al., 2020). *Digital twin* dan alat sensor yang digunakan untuk peringatan berat kendaraan pada jembatan (Adibfar & Costin, 2022). Pemantauan progress pekerjaan konstruksi secara digital dan otomatis disebut dengan DRX, dalam penggunaannya dapat membantu membuat desain, memvisualisasikan informasi dan pelaporan proyek, dan menyediakan informasi konstruksi (Alizadehsalehi & Yitmen, 2023). Kolaborasi Digital Twin dan BIM dalam sektor *Architecture Engineering and Construction* (AEC) dapat dikembangkan untuk mengoptimalkan desain energi, mengurangi biaya, dan mengurangi dampak lingkungan dalam konstruksi bangunan (Nguyen & Adhikari, 2023).

### Kolaborasi Robotik dan Digital Twin dalam Industri Konstruksi

Perkembangan industri 4.0 telah merubah paradigma teknologi dengan menyatukan industri, otomasi, dan interaksi manusia-robotik secara sinergis, sektor penelitian yang mengalami kemajuan signifikan adalah integrasi *Digital Twin* dalam bidang robotika. Pada tahun 1960 integrasi *Digital Twin* dengan robotik telah berkembang pesat seperti robotik luar angkasa, robotik medis dan rehabilitasi, robotik perangkat lunak, robotik industri dan interaksi manusia robot (Mazumder et al., 2023). *Digital Twin* dalam robotik, didefinisikan oleh Karber et al. (2018), adalah replika digital sistem robot yang memungkinkan simulasi eksperimen *multi-fidelity*, ketelitian tinggi, dan multi skala, memungkinkan simulasi eksperimen dengan tingkat ketelitian tinggi, dan skala ganda sepanjang siklus hidup sistem aktif (Mazumder et al., 2023). Pada industri konstruksi, Penerapan teknologi robotik banyak dikembangkan dengan BIM dengan keterbatasannya terhadap interoperabilitas untuk mendukung perencanaan tugas robot konstruksi dalam ketidakpastian yang mungkin muncul selama pelaksanaan proyek konstruksi. Untuk mengatasi hal tersebut, dengan keahlian manusia dalam mengimprovisasi teknologi yang ada, dilakukan beberapa penelitian untuk mengkolaborasikan *Digital Twin* dengan robotik (Wang et al., 2023), diantaranya :

- a. *Digital Twin* dan HRC untuk Keselamatan Kerja  
Kolaborasi *Digital Twin* dan *Human-Robot Collaboration* (HRC) dapat mengatasi masalah keselamatan di industri konstruksi. Pada gambar 6 menunjukkan kolaborasi *Digital Twin* dan HRC yang dioperasikan dari jarak jauh melalui antarmuka teleoperasi sehingga dapat mengurangi kebutuhan tenaga kerja *on site* dan mendukung pembatasan sosial. Teknik VR dan *Augmented Reality* (AR) memfasilitasi kolaborasi, sementara VR imersif memungkinkan partisipasi individu penyandang disabilitas. HRC, dengan teleoperasi dan perangkat haptik, menjembatani kesenjangan antara manusia dan robot, meskipun ada keterbatasan. Integrasi *Digital Twin* meningkatkan efektivitas dengan visualisasi, perencanaan tugas, dan komunikasi dua arah dalam pekerjaan konstruksi kolaboratif manusia-robotik. Eksperimen *human-in-the-loop* menunjukkan keefektifan sistem ini (Wang et al., 2023).



Gambar 6. Ikhtisar sistem *Digital Twin* dan Robotik (Wang et al., 2023)

b. *Digital Twin* dan Robotik untuk Fabrikasi

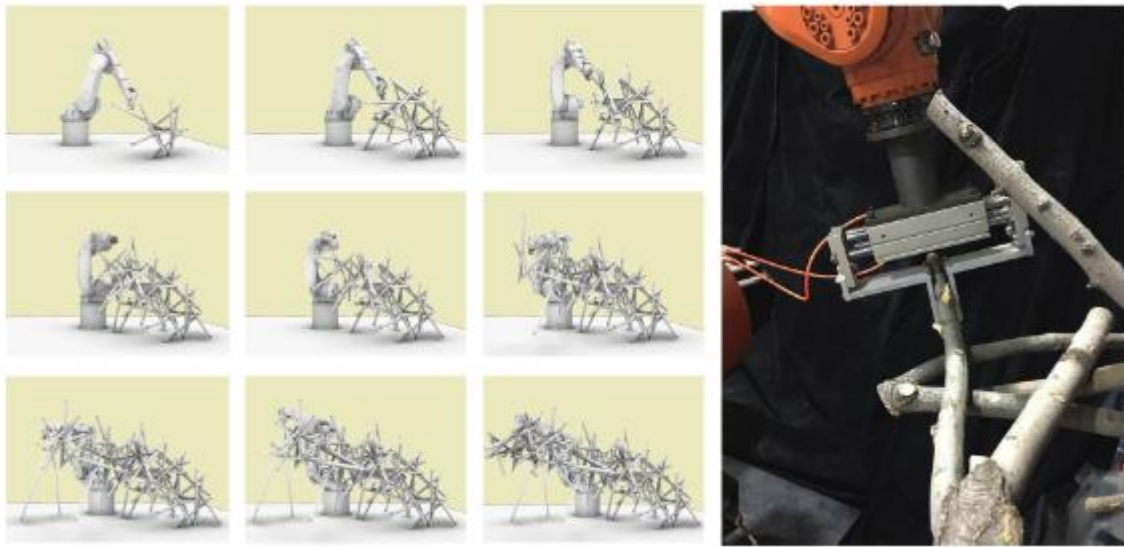
Robotik dan BIM juga bisa dikolaborasikan dengan *Mixed Reality* (MR) dan *Digital Twin*, Integrasi diantaranya memungkinkan interaksi *real-time* antara objek virtual dan lingkungan fisik, sehingga meningkatkan kolaborasi antara manusia dan robot untuk proses konstruksi robotik dalam industri konstruksi. *Digital Twin* yang memungkinkan untuk sinkronisasi *real-time* antara lingkungan fisik dan digital sehingga dapat digunakan untuk pemantauan, pengendalian, diagnostik, dan prediksi dalam proses konstruksi. Konsep MR yang melibatkan augmentasi objek virtual di dunia nyata menggunakan perangkat yang dipasang dikepala, bersama dengan komputasi spesial, memungkinkan terjadinya interaksi objek virtual dengan dunia nyata. Percobaan dilakukan dengan menggunakan prototipe model The KUKA KRI 120 seperti pada gambar 7, studi kasus yang dilakukan dalam proses konstruksi pemasangan dinding dengan robotik untuk memvalidasi alur kerja yang diusulkan, kolaborasi ini dapat digunakan dalam pekerjaan fabrikasi (Jyun et al., 2022).



Gambar 7. The KUKA KRI 120 *Robotik Arm* untuk robot fisik (Jyun et al., 2022)

c. *Digital Twin* dan Robotik untuk Fabrikasi Robotik Konstruksi Kayu

Fabrikasi robotik konstruksi kayu seperti gambar 8, merupakan hasil pertukaran data digital dengan memanfaatkan potensi kayu sebagai bahan konstruksi berkelanjutan, interaksi antara lapisan fisik dan virtual memungkinkan pengumpulan data secara *real time* dari lingkungan fisik dan umpan balik dari model virtual. *Digital Twin* didukung oleh IoT, *cloud system*, dan algoritma mesin, memungkinkan robotik arm mempertahankan representasi virtualnya dan menerima informasi *real time* melalui sensor. Fabrikasi robotik dalam konstruksi kayu, mencakup tugas perakitan komponen, digitalisasi ide desain melalui analisis data, dan konsep konstruksi *cyber-fisik* yang mengintegrasikan produksi fisik dengan komputasi virtual. Mekanisme interaksi dua arah secara *real time* antara desain digital dan konstruksi fisik, meningkatkan adaptasi dan kelayakan konstruksi robot di lokasi (Zhang et al., 2021).



Gambar 8 Proses Konstruksi Robot (Zhang et al., 2021)

#### 4. KESIMPULAN

Perkembangan *Digital Twin* dan robotik dalam industri konstruksi sudah banyak diaplikasikan dalam berbagai sektor industri konstruksi yang kemudian dikembangkan dengan mengintegrasikan *Digital Twin* dan robotik untuk menghasilkan robot konstruksi yang dapat menyesuaikan secara *real time* terhadap perubahan-perubahan yang terjadi di proyek. Namun, didapatkan bahwa pengembangan integrasi *Digital Twin* dan robotik masih sangat terbatas pengaplikasiannya pada keselamatan kerja dan pekerjaan fabrikasi. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait dengan pengaplikasian *Digital Twin* dan robotik dengan adanya kombinasi terhadap teknologi digital seperti AI, VR, IoT dan lainnya, sehingga pengembangan teknologi tersebut dapat menjadi lebih maksimal.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Adibfar, A., & Costin, A. M. (2022). Creation of a mock-up bridge digital twin by fusing Intelligent Transportation Systems (ITS) data into Bridge Information Model (BrIM). *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(9), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0002332](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0002332)
- Alizadehsalehi, S., & Yitmen, I. (2023). Digital twin-based progress monitoring management model through reality capture to extended reality technologies (DRX). *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(1), 200–236. <https://doi.org/10.1108/SASBE-01-2021-0016>
- Chea, C. P., Bai, Y., Pan, X., Arashpour, M., & Xie, Y. (2020). An integrated review of automation and robotic technologies for structural prefabrication and construction. *Transportation Safety and Environment*, 2(2), 81–96. <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa007>
- Farmer, M. (2016). The Farmer Review of the UK Construction Labour Model. *Modernise or Die: The Framer Review of the UK Construction Labour Market*. Retrieved From, 76. <https://www.gov.uk/government/publications/constructionlabour-%0Amarket-in-the-uk-farmer-review>.
- Jyun, C., Wes, L., Carol, M., & Vineet, C. M. (2022). Real - time state synchronization between physical construction robots and process - level digital twins. *Construction Robotics*, 6(1), 57–73. <https://doi.org/10.1007/s41693-022-00068-1>
- Kerber, E., Heimig, T., Stumm, S., Oster, L., & Reisgen, U. (2018). *Towards robotic fabrication in joining of steel*. *Isarc*.
- Madubuike, O. C., Anumba, C. J., & Khallaf, R. (2022). A review of digital twin applications in construction. *Journal of Information Technology in Construction*, 27, 145–172. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.008>
- Mazumder, A., Sahed, M. F., Tasneem, Z., Das, P., Badal, F. R., Ali, M. F., Ahamed, M. H., Abhi, S. H., Sarker, S. K., Das, S. K., Hasan, M. M., Islam, M. M., & Islam, M. R. (2023). Heliyon towards next generation digital twin in robotics: Trends, scopes, challenges, and future. *Heliyon*, 9(2), e13359. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13359>
- Nguyen, T. D., & Adhikari, S. (2023). The role of BIM in integrating digital twin in building construction: A literature review. *Sustainability*, 15(13), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su151310462>
- Opoku, D. G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102726. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102726>



- Parascho, S. (2023). Construction Robotics: From Automation to Collaboration. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 6, 183–204. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-080122-090049>
- Ravi, K. S. D., Ibáñez, J. M., & Hall, D. M. (2021). Real-time digital twin of on-site robotic construction processes in mixed reality. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 38, pp. 451-458). IAARC Publications. <https://doi.org/10.22260/ISARC2021/0062>
- Wang, X., Yu, H., McGee, W., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2023). *Enabling BIM-Driven Robotic Construction Workflows with Closed-Loop Digital Twins*. <http://arxiv.org/abs/2306.09639>
- Zhang, Y., Meina, A., Lin, X., Zhang, K., & Xu, Z. (2021). Digital twin in computational design and robotic construction of wooden architecture. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-14.

