



RAGAM PENERAPAN DIGITAL TWIN DAN FUNGSINYA DALAM PENGELOLAAN KOTA: KAJIAN SISTEMATIS STUDI KASUS GLOBAL

Novia Arismawati^{1*}, Muhammad Sani Roychansyah²

^{1,2}Departemen Teknik Arsitektur dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

*Email Koresponden: noviaarismawati@mail.ugm.ac.id

Diterima: 25-07-2025, Revisi: 17-09-2025, Disetujui: 25-09-2025

©2025 Universitas Hamzanwadi

Abstrak. Pengelolaan kota cerdas menghadapi tantangan kompleks yang memerlukan integrasi data *real-time* dan kolaborasi lintas sektor. Penelitian ini bertujuan mengkaji ragam penerapan teknologi *Digital Twin* (DT) dalam pengelolaan kota melalui pendekatan tinjauan literatur sistematis berbasis kerangka PRISMA. Sebanyak 3.057 literatur awal diidentifikasi, 19 literatur terpilih yang terdiri dari 16 studi kasus kota dari berbagai negara dianalisis secara mendalam menggunakan metode analisis konten. Hasil penelitian menunjukkan bahwa DT diterapkan dalam berbagai bidang, seperti perencanaan tata ruang, pengelolaan transportasi dan mobilitas, pemantauan infrastruktur, pengelolaan energi dan lingkungan, kebencanaan, perumahan dan permukiman, keamanan serta partisipasi publik. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa DT berfungsi sebagai alat strategis dalam mendukung fungsi pengelolaan kota, terutama dalam konteks perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, dan pengendalian. Kajian ini berkontribusi dalam memberikan pemahaman menyeluruh mengenai praktik pengembangan DT dalam pengelolaan kota berbasis data.

Kata kunci: Digital Twin, Smart City, Pengelolaan Kota, POAC, PRISMA

Abstract. Smart city management faces complex challenges that require real-time data integration and cross-sector collaboration. This study aims to examine the various applications of Digital Twin (DT) technology in urban management through a systematic literature review approach based on the PRISMA framework. A total of 3,057 initial publications were identified, and 19 selected sources covering 16 city case studies from various countries were analyzed in depth using content analysis methods. The results indicate that DT is applied in multiple domains, such as spatial planning, transportation and mobility management, infrastructure monitoring, energy and environmental management, disaster management, housing and settlements, security, and public participation. The findings show that DT functions as a strategic tool in supporting urban management functions, particularly in planning, organizing, actuating, and controlling. This study contributes to a comprehensive understanding of DT development practices in data-driven urban management.

Keywords: Digital Twin, Smart City, Urban Management, POAC, PRISMA

PENDAHULUAN

Pengelolaan kota modern dihadapkan pada kompleksitas permasalahan perkotaan, mulai dari pertumbuhan penduduk, keterbatasan infrastruktur, hingga dinamika lingkungan, sosial, dan ekonomi. Penggunaan teknologi digital dalam manajemen kota muncul sebagai salah satu solusi strategis untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas pelayanan publik. Konsep kota cerdas (*smart city*) telah diadopsi di berbagai wilayah sebagai respon terhadap tantangan tersebut, dengan memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi guna meningkatkan kualitas hidup warga, efisiensi layanan, serta keberlanjutan kota. Menurut Djunaedi (2014), *smart city* didefinisikan sebagai kota yang sistem dan manajemennya mampu mendeteksi dan merespon masalah secara otomatis. Implementasi kota cerdas mencakup berbagai dimensi pembangunan kota, antara lain pemerintahan (*smart governance*), ekonomi (*smart economy* dan *branding*), lingkungan (*smart environment* dan *smart mobility*), serta sosial (*smart living* dan *smart society*) (Rachmawati, 2018). Integrasi teknologi digital seperti *Internet of Things* (IoT), *Big Data*, dan

kecerdasan buatan dalam kota cerdas memungkinkan pengelolaan kota secara *real-time*, prediktif, dan partisipatif.

Salah satu inovasi teknologi dalam inisiatif kota cerdas adalah *Digital Twin* (DT), yaitu teknologi yang memungkinkan representasi digital dari entitas fisik secara *real-time* melalui koneksi data antara objek fisik dengan kembarannya di dunia virtual. Teknologi ini menciptakan integrasi antara dunia fisik dan digital secara dinamis dan sinkron. DT adalah representasi virtual dari objek fisik dan dapat dihubungkan dengan objek fisiknya (Enders, 2019). Sementara itu, Kritzinger et al. (2018) mendefinisikan DT sebagai entitas digital yang terhubung erat dengan sistem fisik melalui arsitektur data yang memungkinkan pertukaran informasi secara dua arah. Lebih lanjut, Deren (2021) menegaskan bahwa pembangunan kota berbasis DT merupakan langkah inovatif dalam transformasi layanan publik, perencanaan, dan pengelolaan kota cerdas. Dalam konteks kota, DT menjadi landasan operasionalisasi kota cerdas dengan menyediakan alat visualisasi, simulasi, prediksi, hingga optimalisasi sistem perkotaan (Shahat et al., 2021).

Konsep DT pertama kali diperkenalkan oleh Michael Grieves pada awal 2000-an dalam konteks rekayasa manufaktur, dengan tujuan mengoptimalkan desain dan siklus hidup produk. NASA merupakan salah satu pelopor awal yang menerapkan konsep ini dalam pengelolaan sistem wahana antariksa, sehingga pengendalian dan pemantauan kondisi sistem dapat dilakukan secara jarak jauh dan *real-time*. Seiring waktu, pemanfaatan DT meluas ke berbagai sektor di luar industri, termasuk energi, transportasi, kesehatan, dan khususnya pengelolaan kota. Transformasi menuju *Urban Digital Twin* (UDT) dan *Digital Twin City* (DTC) mulai berkembang pada dekade 2010-an seiring kemajuan IoT, komputasi awan, dan AI, yang memungkinkan pemodelan sistem perkotaan kompleks secara terpadu.

Pada tahun 2017, konsep DTC diperkenalkan oleh *China Academy of Information and Communication Technology* (CAICT) dan diimplementasikan dalam perencanaan dan pembangunan kota cerdas di Tiongkok. Hal ini menandai dimulainya adopsi DT dalam skala kota secara lebih luas, di mana kota fisik dan virtual dapat beroperasi paralel untuk meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan perkotaan. Secara konseptual, penerapan DT dalam pengelolaan kota menawarkan peluang integrasi lintas sektor dan fungsi manajemen.

Pengelolaan kota (*urban management*) didefinisikan sebagai serangkaian proses perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, dan pengendalian berbagai kegiatan pembangunan serta sumber daya perkotaan untuk mencapai pembangunan berkelanjutan dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat. Regulasi nasional di Indonesia (Permendagri No. 24 Tahun 2024) menyebut pengelolaan perkotaan mencakup kegiatan perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian layanan perkotaan oleh pemerintah dan masyarakat secara efektif dan efisien. Model manajemen klasik POAC (*Planning, Organizing, Actuating, Controlling*) yang diperkenalkan oleh Koontz dan O'Donnell (1964) umum digunakan sebagai kerangka dalam mengelola organisasi kompleks seperti kota. Fungsi POAC mencakup: Perencanaan (*Planning*), yaitu proses menentukan tujuan dan menyusun strategi untuk mencapainya; Pengorganisasian (*Organizing*), yaitu pengaturan sumber daya manusia, finansial, dan fisik secara terstruktur; Pelaksanaan (*Actuating*), yaitu implementasi rencana yang telah disusun; serta Pengendalian (*Controlling*), yaitu pemantauan dan evaluasi kinerja agar sesuai rencana. Kerangka POAC merepresentasikan siklus manajerial kota, mulai dari perumusan rencana hingga kontrol pelaksanaannya.

Dalam konteks kota modern, pengelolaan perkotaan menuntut pendekatan yang kolaboratif dan berbasis data, keterlibatan multiaktor, regulasi adaptif, keputusan partisipatif-transparan, serta koordinasi lintas sektor sangat diperlukan. Teknologi DT dipandang mampu menjawab kebutuhan tersebut dengan menghadirkan platform integratif berbasis data *real-time*. Penelitian terbaru menekankan bahwa integrasi DT dalam kota cerdas dapat mengatasi tantangan interoperabilitas antar sistem informasi, sehingga terwujud manajemen kota yang lebih terpadu, efisien, dan adaptif (*DT-supported smart city*).

Engin (2020) menegaskan bahwa teknologi seperti *Big Data*, *AI*, *IoT*, dan *blockchain* menjadi pendorong utama terwujudnya pengelolaan kota secara *real-time* berbasis DT. Dengan kata lain, DT berpotensi mendukung seluruh siklus pengelolaan kota (POAC) secara adaptif. Teknologi ini tidak hanya membantu visualisasi kota secara *real-time*, tetapi juga mendukung simulasi prediktif untuk

perencanaan, integrasi data untuk pengorganisasian lintas sektor, penggerakan aksi melalui sistem otomatis maupun partisipasi warga, serta pengendalian melalui pemantauan berkelanjutan.

Meki demikian, kajian akademis tentang implementasi DT dalam pengelolaan kota masih terbatas dan cenderung parsial. Kajian yang ada umumnya fokus pada satu aspek atau sektor tertentu (misalnya hanya transportasi, atau hanya lingkungan), dan belum banyak yang meninjau penerapan DT secara komprehensif lintas bidang dan lintas wilayah. Penelitian oleh Deng et al. (2021) dan Yang et al. (2021) misalnya, lebih banyak membahas konsep DTC dalam kerangka tata kelola umum, namun belum mendetailkan ragam penerapan di berbagai sektor kota. Hal ini menciptakan kesenjangan pengetahuan mengenai bagaimana teknologi DT digunakan dalam berbagai konteks manajemen perkotaan serta peran yang dimainkan terhadap fungsi-fungsi manajerial klasik.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini dikembangkan untuk menjawab kebutuhan akan kajian komprehensif mengenai ragam penerapan teknologi DT dalam pengelolaan kota dan keterkaitannya dengan fungsi manajerial POAC. Dengan kata lain, tujuan penelitian ini adalah untuk mendeskripsikan berbagai bidang praktik penerapan DT dalam manajemen kota (pada konteks kota cerdas di berbagai studi kasus global) serta menganalisis peran DT tersebut dilihat dari sudut pandang fungsi *planning*, *organizing*, *actuating*, dan *controlling*. Melalui pendekatan tinjauan sistematis studi kasus global, diharapkan diperoleh gambaran utuh mengenai peran DT sebagai instrumen inovatif dalam manajerial kota modern, sekaligus kontribusi teoretis dalam menghubungkan teknologi *smart city* dengan kerangka manajemen kota klasik.

METODE PENELITIAN

Hasil seleksi sistematis menggunakan kerangka PRISMA menghasilkan 19 literatur yang memuat 16 studi kasus kota yang relevan. Setiap studi kasus dianalisis berdasarkan informasi mengenai beragam bidang penerapan DT dalam kerangka POAC. Studi kasus tersebut meliputi Singapura, Zurich, Dublin, Florence, Gothenburg, Jepang, Helsinki, Victoria, California, Tashkent, Basque, Bologna, Zagreb, Tiongkok, Belanda, dan Lazio.

Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur sistematis dengan mengadopsi kerangka PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) dan analisis konten. Metode PRISMA mencakup tahapan identifikasi literatur (*identification*), penyaringan (*screening*), penilaian kelayakan (*eligibility*), dan penyertaan studi yang relevan (*included*). Data diperoleh dari hasil penelusuran literatur pada dua basis data utama, yaitu Scopus dan Google Scholar menggunakan bantuan perangkat lunak Publish or Perish. Pencarian literatur dilakukan dengan kata kunci berbahasa Inggris yang mencakup terminologi DT dan konteks perkotaan, antara lain: "*Digital Twin City*", "*Urban Digital Twin*", "*Digital Twin implementation*", "*Digital Twin for City Management*", "*Digital Twin for Smart City*", dan variasi sejenis. Upaya ini menghasilkan total output awal sebanyak 3.057 artikel (termasuk kemungkinan duplikasi) yang diidentifikasi dari kedua basis data.

Selanjutnya, dilakukan penyaringan awal (*screening*) dengan menghilangkan duplikasi menggunakan perangkat *reference manager* (Mendeley) dan aplikasi daring Rayyan QCRI. Setiap judul dan abstrak publikasi ditelaah untuk menilai kesesuaiannya dengan topik penelitian, mengacu pada kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Kriteria inklusi dalam seleksi studi adalah: (1) studi berfokus pada skala kota/perkotaan (bukan objek tunggal seperti gedung atau industri semata); (2) studi menjelaskan praktik implementasi nyata teknologi DT (bukan sekadar model konseptual); (3) informasi dalam studi mencakup data yang cukup lengkap tentang proyek DT; dan (4) publikasi dapat diakses penuh (*full text* terbuka). Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi: (1) studi dari domain di luar konteks perkotaan (misal industri manufaktur); (2) publikasi tidak tersedia secara terbuka; (3) studi yang hanya membahas pemodelan atau simulasi DT tanpa implementasi di lapangan; (4) publikasi bukan berbahasa Indonesia atau Inggris; serta (5) studi berupa tinjauan literatur, pengembangan kerangka konseptual, *proof of concept*, atau prototipe awal yang tidak melaporkan implementasi praktis. Setelah penyaringan berdasarkan kriteria di atas, setiap studi yang lolos kemudian dievaluasi lebih lanjut pada tahap *eligibility* dengan membaca teks lengkapnya. Studi yang memenuhi semua kriteria substansi dan relevansi diikutsertakan sebagai sampel akhir, sedangkan studi yang tidak sesuai dikeluarkan dari pembahasan mendalam menggunakan pendekatan analisis konten.

Hasil akhir seleksi memperoleh 19 referensi yang memuat 16 studi kasus kota sebagai unit observasi untuk dianalisis lebih lanjut. Keenam belas kasus tersebut mencakup kota-kota di berbagai negara, yaitu: Basque (Spanyol), Belanda, Bologna dan Florence (Italia), California (Amerika Serikat), Dublin (Irlandia), Gothenburg (Swedia), Helsinki (Finlandia), Jepang, Lazio di Roma (Italia), Singapura, Tashkent (Uzbekistan), Xiong'an (Tiongkok), Victoria (Australia), Zagreb (Kroasia), dan Zurich (Swiss).

Teknik analisis konten diterapkan untuk mengolah data kualitatif dari literatur terpilih yang dilengkapi dengan literatur sekunder yang bersumber dari laman resmi pemerintah, laman mitra, dokumen laporan resmi, dan berita. Pertama, ragam bidang penerapan DT dalam pengelolaan kota diidentifikasi dan diklasifikasikan; selanjutnya, setiap bidang penerapan tersebut dianalisis keterkaitannya dengan fungsi manajemen POAC. Pemetaan peran DT terhadap kerangka POAC dilakukan dengan cara menghubungkan penerapan DT di berbagai bidang pengelolaan kota dengan fungsi perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, ataupun pengendalian dalam konteks pengelolaan kota. Hasil analisis kemudian disajikan secara deskriptif-kualitatif dalam bentuk narasi hasil dan pembahasan.

TEMUAN DAN PEMBAHASAN

Praktik Penerapan *Digital Twin* dalam Pengelolaan Kota

Berdasarkan identifikasi terhadap 16 studi kasus kota di berbagai negara, penerapan teknologi *Digital Twin* (DT) dalam konteks pengelolaan kota di masing-masing studi kasus adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Penerapan dan Pemanfaatan DT di Wilayah Studi

No	Kota, Negara	Penerapan
1.	Basque, Spanyol	Pemantauan Jembatan Rel Kereta Api
2.	Belanda	a. Visualisasi 3D kota b. Perencanaan kota c. Operasi logistik; d. Meningkatkan partisipasi publik e. Perizinan f. Pengelolaan keramaian dan keamanan g. Perencanaan transportasi
3.	Bologna, Italia	a. Pengelolaan fasilitas perkotaan b. Mobilitas, c. Energi, dan d. Perubahan iklim
4.	California, AS	Sistem Pemantauan Banjir
5.	Dublin, Irlandia	a. Simulasi (mobilitas, kerumunan, dampak banjir, bayangan, bangunan baru) b. Pelaporan masalah c. Perencanaan berdasarkan preferensi warga.
6.	Florence, Italia	a. Visualisasi 3D b. Mobilitas c. Energi d. Lingkungan e. Tata Ruang
7.	Gothenburg, Swedia	a. Pemodelan 3D b. Simulasi c. Monitoring <i>real-time</i> d. Partisipasi publik
8.	Helsinki, Finlandia	a. Pemodelan 3D b. Simulasi (aliran angin, cahaya matahari, kepadatan bangunan) c. Energi d. Monitoring secara <i>real-time</i> e. Perencanaan berbasis partisipasi masyarakat f. Mobilitas
9.	Jepang	Pembuatan model 3D kota sumber terbuka (PLATEAU)
10.	Lazio, Roma, Italia	Pengelolaan ruang bangunan gedung

No	Kota, Negara	Penerapan
11.	Singapura	a. Pengelolaan infrastruktur energi di gedung tua b. Pemodelan 3D nasional c. <i>Virtual Singapore</i>
12.	Tashkent, Uzbekistan	a. Pengelolaan Air Bersih b. Perencanaan Kota c. Pemantauan d. Perizinan e. Simulasi spasial f. Kolaborasi lintas sektor g. Penyediaan model kota 3D
13.	Tiongkok	a. Simulasi b. Monitoring c. <i>City Information Model (CIM)</i>
14.	Victoria, Australia	Pengelolaan air
15.	Zagreb, Kroasia	a. Web GIS 3D (ZG3D) b. Pemantauan Jaringan Air ViO Zagreb
16.	Zurich, Swiss	a. Model 3D Kota b. Simulasi sejarah dan masa depan kota c. Simulasi banjir d. Simulasi efek iklim mikro e. Simulasi bayangan f. Perencanaan gedung tinggi g. Pemantauan infrastruktur dan lalu lintas h. Perencanaan partisipatif i. Portal terbuka visualisasi DT

Sumber: Olahan Peneliti, 2025

Tabel di atas menunjukkan bahwa pengembangan teknologi DT di berbagai wilayah studi tidak terbatas pada satu sektor tunggal, melainkan mencakup berbagai domain fungsional dalam pengelolaan kota. Adopsi DT tersebar luas pada sektor-sektor seperti infrastruktur, energi, lingkungan, transportasi, tata ruang, perizinan, hingga peningkatan partisipasi publik. Keragaman ini mencerminkan sifat adaptif DT terhadap kebutuhan dan kondisi lokal masing-masing wilayah.

Sebagai contoh, beberapa kota seperti California dan Victoria menerapkan DT untuk keperluan mitigasi risiko dan tanggap darurat, khususnya dalam konteks prediksi dan pemantauan banjir secara *real-time*. Sebaliknya, kota-kota seperti Florence, Dublin, Gothenburg, dan Zurich lebih mengutamakan penggunaan DT dalam simulasi tata ruang dan perencanaan kota berkelanjutan yang mendukung pengambilan keputusan berbasis data spasial.

Peran DT juga menonjol dalam memperluas keterlibatan warga. Di kota-kota seperti Zurich, Helsinki, Gothenburg, dan Dublin, platform DT dimanfaatkan untuk meningkatkan transparansi dan partisipasi publik dalam proses perencanaan kota. Melalui simulasi kebijakan tata ruang dan mekanisme umpan balik interaktif, masyarakat diberikan kesempatan untuk turut serta dalam proses perumusan kebijakan secara lebih inklusif. Hal ini menegaskan bahwa DT tidak hanya merupakan alat teknis, tetapi juga instrumen strategis untuk mendorong tata kelola kota yang partisipatif.

Kasus Kota Zagreb memberikan ilustrasi menarik tentang penggunaan DT dalam kondisi darurat. Setelah gempa bumi berkekuatan 5,5 skala Richter mengguncang Zagreb pada tahun 2020, pemerintah kota mengadopsi sistem Web GIS berbasis model 3D (ZG3D) sebagai alat untuk merencanakan rekonstruksi infrastruktur secara akurat dan transparan kepada publik (Vučić et al., 2021). Praktik ini menegaskan bahwa DT juga dapat berfungsi sebagai sarana adaptif dalam merespons krisis.

Sementara itu, kota-kota dengan kapasitas kelembagaan dan infrastruktur digital yang lebih mapan, seperti Jepang dan Singapura, mengembangkan DT melalui pendekatan strategis nasional. Jepang, melalui proyek PLATEAU, membangun model kota 3D nasional untuk mendukung kebijakan tata ruang dan infrastruktur, sedangkan Singapura menerapkan inisiatif Smart Nation untuk mendigitalisasi seluruh siklus pengelolaan kota. Pendekatan ini menunjukkan bahwa DT juga dapat digunakan secara proaktif sebagai bagian dari transformasi tata kelola jangka panjang.

Dengan demikian, temuan ini memperlihatkan bahwa tidak terdapat satu model penerapan DT yang bersifat universal (*one-size-fits-all*). Implementasi DT bersifat kontekstual, fleksibel, dan berkembang secara dinamis mengikuti arah pembangunan dan kesiapan masing-masing kota. Perbedaan orientasi, strategi, dan fokus bidang penerapan menunjukkan pentingnya pendekatan berbasis konteks lokal yang selaras dengan strategi pembangunan wilayah.

Untuk memperoleh gambaran yang lebih sistematis mengenai variasi adopsi DT, analisis selanjutnya disajikan dalam bentuk pengelompokan bidang fungsional penerapan teknologi DT dalam pengelolaan kota sebagaimana ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 2. Kategorisasi Bidang Penerapan DT dalam Pengelolaan Kota

Bidang Pengelolaan Kota	Sub Bidang / Penerapan DT	Kota / Negara Studi Kasus
1. Infrastruktur & Utilitas	Pemantauan jembatan rel kereta api	Basque, Spanyol
	Sistem pemantauan infrastruktur pengelolaan air	California, Tashkent, Victoria, Zagreb
	Monitoring infrastruktur gedung tua	Singapura
	Pemantauan infrastruktur utilitas	Bologna, Florence, Singapura, Zurich
2. Transportasi & Mobilitas	Perencanaan dan simulasi transportasi	Belanda, Bologna, Dublin, Florence, Gothenburg, Helsinki, Tiongkok, Zurich
	Operasi logistik & pengelolaan kerumunan	Belanda, Bologna, Dublin, Tiongkok
	Monitoring mobilitas dan lalu lintas <i>real-time</i>	Dublin, Gothenburg, Helsinki, Tiongkok
3. Energi & Lingkungan	Simulasi efisiensi energi dan iklim mikro	Florence, Bologna, Florence, Helsinki, Gothenburg, Singapura, Zurich
	Pemodelan konsumsi energi gedung	Singapura
	Simulasi suhu, cahaya, aliran angin	Helsinki, Dublin, Florence, Bologna, Singapura, Tiongkok, Zurich
4. Kebencanaan	Simulasi dan monitoring banjir	California, Dublin, Florence, Gothenburg, Tiongkok, Victoria, Zurich
	Monitoring sistem pengendalian banjir <i>real-time</i>	California, Victoria
5. Perencanaan Tata Ruang	Visualisasi 3D kota	Belanda, Florence, Gothenburg, Helsinki, Jepang (PLATEAU), Tiongkok, Zagreb, Zurich
	Pemodelan dan simulasi pembangunan	Belanda, Florence, Gothenburg, Helsinki, Tashkent, Dublin, Florence
	Perizinan	Belanda, Dublin, Helsinki, Tashkent
	Simulasi spasial dan desain perkotaan	Helsinki, Singapura, Tashkent, Zurich
	<i>City Information Model</i> (CIM)	Helsinki, Tiongkok, Zurich
6. Perumahan & Permukiman	Pengelolaan ruang bangunan	Lazio, Singapura
7. Partisipasi Publik	Pelaporan masalah dan preferensi warga	Dublin, Belanda, Helsinki
	Perencanaan partisipatif dan simulasi kebijakan	Gothenburg, Helsinki, Florence, Zurich
	Umpan balik warga & edukasi kebijakan berbasis simulasi	Dublin, Helsinki, Zurich
8. Teknologi & Inovasi	Model 3D kota/nasional dan sumber terbuka (<i>open data</i>)	Belanda, Jepang (PLATEAU), Helsinki, Singapura, Tashkent, Zagreb, Zurich
	Dashboard, integrasi data, dan visualisasi kota digital	Dublin, Florence, Gothenburg, Helsinki, Tiongkok, Zurich
	Eksperimen AI dan <i>machine learning</i> dalam pengelolaan	Bologna, Gothenburg, Helsinki, Tiongkok, Zurich
9. Keamanan	Pemantauan keamanan kota	Belanda, Tashkent

Sumber: Olahan Peneliti, 2025

Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa penerapan teknologi DT di wilayah studi mencakup berbagai domain pengelolaan kota. Bidang-bidang tersebut meliputi perencanaan tata ruang, pengelolaan transportasi dan mobilitas, pemantauan infrastruktur, pengelolaan energi dan lingkungan, mitigasi bencana, perumahan dan permukiman, teknologi dan inovasi, keamanan serta fasilitasi partisipasi publik.

Dari seluruh bidang tersebut, penerapan paling dominan dijumpai pada bidang perencanaan tata ruang, visualisasi kota dalam bentuk model 3D, transportasi dan mobilitas, serta simulasi lingkungan dan monitoring infrastruktur. Temuan ini menegaskan bahwa peran DT tidak hanya berfungsi sebagai alat teknis visualisasi, tetapi juga sebagai sistem pendukung pengambilan keputusan lintas sektor. *Digital Twin* telah digunakan dalam berbagai sektor krusial pengelolaan kota, yang menunjukkan fleksibilitas dan kompleksitas perannya dalam pengelolaan kota melalui integrasi data spasial, analisis prediktif, dan simulasi kebijakan.

Keberadaan DT dalam berbagai sektor strategis seperti mitigasi bencana, pengelolaan utilitas kota (air, listrik, dan limbah), pemantauan kondisi infrastruktur, serta penguatan mekanisme partisipasi publik memperlihatkan fleksibilitas dan kompleksitas perannya dalam mendukung tata kelola kota yang responsif dan inklusif. Dominasi penerapan DT pada sektor perencanaan tata ruang, transportasi, dan energi juga mencerminkan pergeseran paradigma dalam pengelolaan kota dari pendekatan konvensional menuju pengelolaan berbasis data dan kolaborasi multi-aktor. Hal ini sejalan dengan pandangan Batty et al. (2012) tentang fondasi transformasional dalam pengelolaan kota modern melalui pemodelan, simulasi dan pengambilan keputusan berbasis data.

Keterkaitan Penerapan Digital Twin dengan Fungsi Pengelolaan Kota (POAC)

Untuk memperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai kontribusi *Digital Twin* (DT) dalam siklus pengelolaan kota, dilakukan analisis keterkaitan antara bidang penerapan DT dengan fungsi-fungsi manajerial berdasarkan kerangka teori POAC (*Planning, Organizing, Actuating, Controlling*). Pendekatan ini bertujuan untuk memetakan bagaimana peran DT berkontribusi dalam setiap tahapan pengelolaan kota, mulai dari perencanaan strategis, pengorganisasian sumber daya, pelaksanaan operasional, hingga pengendalian dan evaluasi kinerja.

Setiap bidang penerapan DT dianalisis dan dikaitkan dengan satu atau lebih fungsi dalam kerangka POAC. Misalnya, bidang perencanaan tata ruang sangat erat kaitannya dengan fungsi *planning* melalui pemodelan spasial dan simulasi kebijakan. Di sisi lain, pemantauan infrastruktur dan sistem kebencanaan cenderung berkorelasi dengan fungsi *controlling*, karena mendukung pemantauan kondisi dan pengambilan tindakan korektif secara *real-time*. Bidang monitoring lingkungan, pada gilirannya, memainkan peran dalam fungsi *actuating* melalui simulasi visual. Dengan demikian, pemetaan ini memungkinkan penggambaran yang lebih sistematis terhadap fungsi strategis DT dalam manajemen kota yang berbasis data dan teknologi. Tabel berikut menyajikan klasifikasi bidang penerapan DT berdasarkan keterkaitannya dengan fungsi-fungsi POAC dalam pengelolaan kota:

Tabel 3. Klasifikasi Penerapan DT dalam Berbagai Fungsi Pengelolaan Kota

Aspek Pengelolaan	Bidang	Sub Bidang
Perencanaan (<i>Planning</i>)	Perencanaan Tata Ruang	• Perencanaan kota • Partisipasi masyarakat dalam perencanaan • Perizinan • Penyesuaian desain perkotaan • Simulasi spasial dan desain perkotaan • Pemodelan dan simulasi pembangunan • Visualisasi rencana tata ruang
	Energi dan Lingkungan	• Pemodelan efisiensi energi • Simulasi dampak perubahan iklim • Simulasi suhu dan pencahayaan alami • Simulasi pergerakan angin
	Kebencanaan	Simulasi banjir
	Mobilitas dan	Perencanaan dan simulasi transportasi

Aspek Pengelolaan	Bidang	Sub Bidang
Pengorganisasian (<i>Organizing</i>)	Transportasi	
	Visualisasi dan Pemodelan 3D	• Pemodelan 3D Kota • <i>City Information Model</i> (CIM) • Model 3D kota sumber terbuka
	Manajemen Infrastruktur dan Bangunan	• Pengelolaan bangunan tua • Optimasi ruang gedung
	Mobilitas dan Transportasi	• Manajemen lalu lintas
Pelaksanaan (<i>Actuating</i>)	Partisipasi Publik	• Sistem pelaporan masalah warga
	Mobilitas dan Transportasi	• Operasi logistik • Monitoring lalu lintas dan kerumunan • Manajemen lalu lintas
	Manajemen Infrastruktur dan Bangunan	• Monitoring infrastruktur • Monitoring struktur bangunan • Monitoring infrastruktur pengairan • Pengelolaan ruang bangunan
	Keamanan Kebencanaan Teknologi dan Inovasi	• Monitoring keamanan kota • Monitoring banjir • Eksperimen AI dan <i>machine learning</i> • <i>Dashboard</i>, visualisasi, dan integrasi data
Pengendalian (<i>Controlling</i>)	Kebencanaan	• Monitoring infrastruktur sistem pengendalian banjir
	Perencanaan Tata Ruang	• Pemodelan dan simulasi pembangunan • Perizinan
	Partisipasi Publik	• Umpan balik warga • Pelaporan masalah dan preferensi warga • Edukasi kebijakan berbasis simulasi
	Keamanan	Monitoring

Sumber: Olahan Peneliti, 2025

Tabel di atas memperlihatkan pemetaan bidang penerapan DT dengan fungsi utama pengelolaan kota dalam kerangka teori manajemen klasik POAC (*Planning, Organizing, Actuating, Controlling*). Analisis ini dilakukan untuk memahami bahwa penerapan DT dalam pengelolaan kota tidak bersifat parsial atau terbatas pada satu fungsi teknis, melainkan mencakup seluruh siklus manajemen kota secara utuh dan terintegrasi. Pada aspek perencanaan (*planning*), DT berperan sebagai instrumen pendukung dalam proses pengambilan keputusan strategis berbasis data. Melalui fitur seperti pemodelan kota 3D, simulasi spasial, dan prediksi dampak lingkungan, DT memungkinkan perencana kota untuk merancang skenario pembangunan yang presisi dan terukur. Implementasi ini dapat ditemukan di kota-kota seperti Helsinki, Zurich, dan Dublin yang memanfaatkan DT untuk evaluasi dampak perencanaan tata ruang, simulasi mitigasi bencana, dan pelibatan publik dalam pengujian skenario spasial secara interaktif.

Dalam fungsi pengorganisasian (*organizing*), DT berperan sebagai fondasi infrastruktur data dan pengelolaan kolaboratif antar sektor. Fungsi ini terlihat pada pengembangan sistem interoperabilitas data seperti *City Information Model* (CIM) di Helsinki, Zurich, dan Tiongkok, serta platform digital berbasis *open data* seperti PLATEAU di Jepang. Kota Florence melalui sistem Snap4City dan Zagreb melalui ZG3D menunjukkan praktik serupa, di mana dashboard kota digital memungkinkan integrasi data spasial dan tematik dari berbagai instansi dalam satu sistem terpadu. Penerapan ini menegaskan peran DT dalam memperkuat struktur pengelolaan kota berbasis integrasi dan sinkronisasi data lintas lembaga. Pada fungsi pelaksanaan (*actuating*), DT mendukung operasionalisasi kota secara *real-time*, terutama dalam pengelolaan infrastruktur dan layanan publik. Integrasi antara sensor, *Internet of Things* (IoT), dan algoritma *machine learning* memungkinkan pemantauan kondisi lapangan dan pengambilan tindakan cepat secara otomatis. Sebagai contoh, sistem DT digunakan di Basque untuk pemantauan jembatan kereta api dan di California serta Victoria untuk sistem pengendalian banjir berbasis data waktu nyata.

Fungsi pengendalian (*controlling*) juga diperkuat melalui pemanfaatan DT sebagai alat evaluasi dan umpan balik kebijakan secara berkelanjutan. Platform seperti “(Re)format Z” di Zurich dan dashboard interaktif di Dublin dan Helsinki memungkinkan warga untuk terlibat dalam penilaian kebijakan kota melalui simulasi dan mekanisme umpan balik digital. Fungsi ini memperlihatkan bahwa DT dapat menjadi alat kontrol berbasis partisipasi warga, sebagaimana ditekankan oleh *World Economic Forum* (2022) yang menyatakan bahwa kemampuan DT untuk menyediakan sistem umpan balik secara *real-time* menjadi kunci dalam menciptakan tata kelola kota yang adaptif dan berkelanjutan.

Integrasi DT ke dalam kerangka POAC memperlihatkan bahwa teknologi ini tidak hanya berfungsi sebagai alat visualisasi atau simulasi teknis, tetapi telah berevolusi menjadi sistem manajerial strategis. Pemanfaatan DT dalam setiap fungsi POAC menunjukkan kontribusi signifikan terhadap pengelolaan kota yang lebih efisien, kolaboratif, dan responsif. Fungsi *planning* tercermin dalam pemanfaatan DT untuk perizinan dan perencanaan spasial berbasis data visual. Fungsi *organizing* terlihat dalam pengembangan model informasi kota (CIM), pemetaan aset, dan infrastruktur data spasial terintegrasi. Fungsi *actuating* diwujudkan dalam operasional transportasi cerdas, manajemen kerumunan, dan tanggap darurat berbasis sensor. Sementara itu, fungsi *controlling* dimanifestasikan melalui penggunaan dashboard interaktif, sistem partisipatif warga, dan gamifikasi kebijakan publik.

Selain itu, hasil klasifikasi bidang penerapan menunjukkan bahwa sektor perencanaan tata ruang, transportasi dan mobilitas, serta energi dan lingkungan merupakan domain dominan dalam penerapan DT. Pada sektor tata ruang, DT digunakan untuk menyimulasikan pembangunan baru, memvisualisasikan skenario spasial, dan menguji kebijakan tata guna lahan secara interaktif. Pada sektor transportasi, DT mendukung pengelolaan lalu lintas, analisis kepadatan populasi, dan simulasi arus kendaraan. Sementara itu, di sektor energi dan lingkungan, DT mendukung pemodelan efisiensi energi, simulasi iklim mikro, dan pemantauan kualitas udara.

Temuan ini mempertegas bahwa DT telah diimplementasikan dalam berbagai bidang strategis dan menunjukkan sifatnya yang adaptif terhadap konteks lokal. Beberapa kota memfokuskan penerapan DT untuk mitigasi risiko dan penanggulangan bencana, sedangkan kota lain mengutamakan perencanaan kota berkelanjutan dan partisipasi publik. Dengan demikian, tidak terdapat pendekatan seragam dalam pengembangan DT (*nonone-size-fits-all*), melainkan pendekatan yang kontekstual, fleksibel, dan disesuaikan dengan kondisi awal serta arah pembangunan masing-masing wilayah. Secara keseluruhan, integrasi praktik pengembangan DT ke dalam kerangka POAC tidak hanya memperluas fungsi teknis teknologi ini, tetapi juga menjadikannya sebagai instrumen manajerial yang strategis dan sistemik dalam pengelolaan kota modern.

SIMPULAN

Studi sistematis ini menyimpulkan bahwa teknologi *Digital Twin* (DT) telah diterapkan dalam beragam bidang pengelolaan kota yang luas dan berperan dalam mendukung seluruh fungsi manajerial POAC (*Planning, Organizing, Actuating, Controlling*). Teknologi DT telah diterapkan dalam berbagai bidang pengelolaan kota seperti perencanaan tata ruang, pengelolaan transportasi dan mobilitas, pemantauan infrastruktur, pengelolaan energi dan lingkungan, kebencanaan, perumahan dan permukiman, keamanan serta partisipasi publik. Pendekatan kerangka POAC menunjukkan bahwa DT berfungsi tidak hanya sebagai alat teknis, tetapi juga sebagai instrumen manajerial yang mendukung siklus pengelolaan kota dari perencanaan hingga pengendalian. Hal ini menunjukkan bahwa DT memperkuat kemampuan pemerintah kota dalam membuat keputusan berbasis data, meningkatkan efisiensi operasional, serta mendorong transparansi dan keterlibatan masyarakat. Keberadaan DT memungkinkan kota merancang kebijakan yang lebih presisi, responsif terhadap perubahan, dan partisipatif dalam pelaksanaannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adreani, L., Bellini, P., Fanfani, M., Nesi, P., & Pantaleo, G. (2024). Smart city digital twin framework for real-time multi-data integration and wide public distribution. *IEEE Access*, 12, 76277–76303. doi:10.1109/ACCESS.2024.3316659.

- Armijo, A., & Zamora-Sánchez, D. (2024). Integration of railway bridge structural health monitoring into the Internet of Things with a Digital Twin: A case study. *Sensors*, 24(7), 2115. doi:10.3390/s24072115.
- Avezbaev, S., Avezbaev, O., Tashpulatov, S., & Sharipov, S. (2023). Implementation of GIS-based Smart Community Information System and concepts of Digital Twin in the field of urban planning in Uzbekistan. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 386, Paper 05006). EDP Sciences. doi:10.1051/e3sconf/202338605006.
- Alva, P., Mosteiro-Romero, M., Miller, C., & Stouffs, R. (2024). Mitigating operational greenhouse gas emissions in ageing residential buildings using an Urban Digital Twin dashboard. *Energy and Buildings*, 322, 114681. doi:10.1016/j.enbuild.2022.112457.
- Badii, C., Bellini, P., Cenni, D., Difino, A., Nesi, P., & Pantaleo, G. (2021). Snap4City: A platform for developing smart city applications. *Sensors*, 21(4), 1270. doi:10.3390/s21041270.
- Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., ... & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, 214(1), 481–518. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>
- Bujari, A., Calvio, A., Foschini, L., Sabbioni, A., & Corradi, A. (2021). A digital twin decision support system for the urban facility management process. *Sensors*, 21(24), 8460. doi:10.3390/s21248460.
- City of Helsinki. (2019). *The Kalasatama Digital Twins Project*. Helsinki: City Executive Office.
- Deren, L. (2021). Digital Twin City: New Infrastructure and Operational System for Smart Cities. *Geospatial Information Science*, 24(2), 165–177.
- Djunaedi, A. (2014). Smart City: Solusi Permasalahan Masa Depan Perkotaan di Indonesia (Sebuah Agenda Penelitian). Makalah dipresentasikan pada Seminar Nasional Smart City: Solusi untuk Permasalahan Perkotaan Indonesia. Yogyakarta: UGM.
- Enders, M. R. (2019). Digital Twin: Mit moderner Informationstechnologie zur nachhaltigen Produktivität. Springer Vieweg.
- EverythingAboutWater. (2022, September 3). Hidroing develops smart water solutions for 144-year-old water supply network in Zagreb, Croatia. <https://www.eawater.com/casestudy/hidroing-develops-smart-water-solutions-for-144-year-old-water-supply-network-in-zagreb-croatia/>. (Diakses pada 1 Juni 2025).
- Geri, E., Graziani, C., Mencacci, M., Marrassini, E., Polistena, A., & Rotonda, M. (2024, June 28). Le applicazioni del digital twin per i Comuni: l'esperienza di Firenze. *Agenda Digitale*. <https://www.agendadigitale.eu/cittadinanza-digitale/le-applicazioni-del-digital-twin-per-i-comuni-l-esperienza-di-firenze/>. (Diakses pada 24 Mei 2025)
- Hämäläinen, M. (2021). Urban development with dynamic digital twins in Helsinki City. *IET Smart Cities*, 3(4), 201–210. doi:10.1049/smc2.12027.
- Interoperable Europe. (2023, October 9). Bologna's Digital Twin: Enhancing decisions and citizen engagement. <https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/public-sector-tech-watch/bolognas-digital-twin-enhancing-decisions-and-citizen-engagement>. (diakses pada 13 Mei 2025)
- Kementerian Dalam Negeri RI. (2024). Peraturan Menteri Dalam Negeri Nomor 24 Tahun 2024 tentang Perkotaan. Jakarta: Kemendagri.
- Koontz, H., & O'Donnell, C. (1964). *Principles of Management: An Analysis of Managerial Functions*. New York: McGraw-Hill.

- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihm, 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>
- Mazzetto, S. (2024). A review of urban digital twins integration, challenges, and future directions in smart city development. *Sustainability*, 16(19), 8337. doi:10.3390/su16198337.
- Rachmawati, D. (2018). Dimensi-dimensi kota cerdas dan implementasinya di Indonesia. *Jurnal Smart Cities*, 3(2), 45–55.
- Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The Digital Twin of the City of Zurich for urban planning. PFG – *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88, 99–112. doi:10.1007/s41064-020-00092-2.
- Seto, T., Furuhashi, T., & Uchiyama, Y. (2023). Role of 3D city model data as open digital commons: A case study of openness in Japan's Digital Twin project PLATEAU. *ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W2-2023, 201–208. doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W2-2023-201-2023.
- Tan, W. (2022). *Urban Management: Managing Cities in Uncertain Times (Vol. 5)*. Singapore: World Scientific.
- Vučić, N., Tomičić, I., & Mišetić, M. (2021). ZG3D: Digital Twin Implementation in Post-earthquake Urban Reconstruction of Zagreb. *Journal of Geoinformation and Planning*, 13(4), 205–217.
- White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110, 103064. doi:10.1016/j.cities.2020.103064.
- World Economic Forum. (2022). *Digital Twin Cities: Framework and Use Cases*. Geneva: WEF.