

Pemetaan Kapabilitas Hijau ke Kecerdasan Buatan Menuju Kota Nol-Emisi Bersih (*Net Zero City*)

Asep Somantri*, M. Fadli Muttaqin**

Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan
Jln. Dr. Setiabudhi no. 193 Bandung, Jawa Barat

* somantri@unpas.ac.id, ** miftahulfadli@unpas.ac.id

Abstrak — Mewujudkan kota nol-emisi bersih (*net zero city*) menuntut pengintegrasian praktik berkelanjutan dan teknologi hijau ke dalam pembangunan perkotaan. Penelitian ini berfokus pada pemetaan kapabilitas hijau (*green capabilities*) ke solusi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) untuk mendukung tujuan tersebut. Dengan mengidentifikasi kapabilitas-kapabilitas kunci dan menyelaraskannya dengan perangkat AI mutakhir, penelitian ini bertujuan memetakan strategi pengurangan emisi gas rumah kaca di lingkungan perkotaan. Temuan kami menegaskan pentingnya pemanfaatan kecerdasan buatan dalam mengoptimalkan inisiatif hijau, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap keberlanjutan perkotaan dan memajukan tujuan iklim global.

Kata Kunci : kota nol-emisi bersih, kapabilitas hijau, kecerdasan buatan, pengurangan emisi gas rumah kaca

I. PENDAHULUAN

Urgensi penanganan perubahan iklim telah mempertajam fokus pada pengembangan kota nol-emisi bersih, yaitu lingkungan perkotaan yang menyeimbangkan gas rumah kaca yang diemisikan dengan yang dihilangkan dari atmosfer [1]. Karena kota merupakan penyumbang signifikan terhadap emisi karbon global, mengubahnya menjadi kota nol-emisi bersih menjadi krusial untuk mencapai tujuan iklim global [2]. Salah satu pendekatan inovatif dalam transformasi ini adalah dengan memanfaatkan AI untuk memperkuat integrasi kapabilitas hijau merupakan praktik dan teknologi yang mendorong keberlanjutan ke dalam infrastruktur perkotaan.

Penelitian ini bertujuan mengkaji bagaimana kapabilitas hijau dapat dipetakan secara efektif ke solusi kecerdasan buatan untuk mendukung pengembangan kota nol-emisi bersih. Tujuannya adalah mengidentifikasi kapabilitas hijau kunci yang esensial bagi keberlanjutan perkotaan dan menyelaraskannya dengan perangkat AI mutakhir. Penyelarasan ini penting untuk memastikan bahwa perencanaan kota dan pembuat kebijakan dapat menerapkan strategi berbasis AI guna mengurangi emisi dan mendorong keberlanjutan lingkungan secara efisien.

Studi-studi terdahulu telah menunjukkan potensi teknologi digital, termasuk kecerdasan buatan, dalam memajukan keberlanjutan perkotaan [3], [4], [5], [6], [7]. Namun, terdapat kesenjangan yang mencolok dalam literatur terkait pemetaan kapabilitas hijau ke solusi AI secara sistematis. Penelitian ini menjawab kesenjangan tersebut dengan menyediakan pendekatan terstruktur untuk mengidentifikasi dan menyelaraskan kapabilitas ini dengan perangkat AI yang tepat, sehingga memfasilitasi transisi menuju kota nol-emisi bersih. Signifikansi studi ini terletak pada penyediaan wawasan dan metodologi praktis bagi perencanaan kota dan pembuat kebijakan, yang memungkinkan mereka mencapai tujuan keberlanjutan secara lebih efektif melalui penerapan strategis kecerdasan buatan.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Business Architecture* yang mengacu pada *Architecture Development Method* (ADM) TOGAF, khususnya lingkup Fase B – Business Architecture [35], dipadukan dengan kerangka kategorisasi kapabilitas dari *Business Architecture Body of Knowledge* (BIZBOK) [21]. Pendekatan ini dipilih karena berfokus pada penyelarasan antara tujuan strategis pemerintah kota dengan kapabilitas bisnis keberlanjutan dan, selanjutnya, dengan kapabilitas teknologi pendukungnya, tanpa mencakup perancangan arsitektur teknologi secara rinci (Fase D TOGAF ADM), yang berada di luar cakupan penelitian ini.

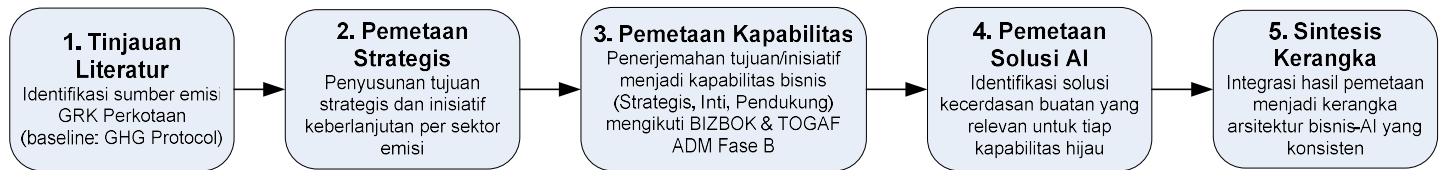
A. Desain Penelitian

Penelitian ini bersifat kualitatif dan konseptual (*conceptual/design-oriented research*) yang menghasilkan kerangka pemetaan (*mapping framework*) kapabilitas hijau ke solusi kecerdasan buatan. Objek analisis adalah kapabilitas bisnis pada domain keberlanjutan perkotaan secara umum, bukan studi empiris pada kota tertentu; validasi kerangka pada konteks kota tertentu ditempatkan sebagai arah penelitian lanjutan.

B. Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui lima tahap. Pertama, tinjauan literatur dilakukan untuk mengidentifikasi sumber-sumber emisi gas rumah kaca perkotaan dengan mengacu pada *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Inventories* [8] sebagai baseline kategori sektor emisi. Kedua, tujuan strategis dan inisiatif keberlanjutan disusun melalui pemetaan strategis berdasarkan sintesis literatur

pada masing-masing sektor emisi. Ketiga, tujuan dan inisiatif tersebut diterjemahkan menjadi kapabilitas bisnis mengikuti prinsip *capability mapping* BIZBOK [21] dan dikategorikan ke dalam tiga lapis kapabilitas—Strategis, Inti, dan Pendukung—sebagaimana lazim digunakan dalam pemodelan Business Architecture pada Fase B TOGAF ADM [35]. Keempat, setiap kapabilitas hijau dipetakan ke solusi kecerdasan buatan yang relevan melalui tinjauan literatur pada masing-masing domain kapabilitas. Kelima, hasil pemetaan disintesis menjadi kerangka arsitektur bisnis-AI terintegrasi, yang diperiksa secara konseptual terhadap konsistensi internal antar-lapisan kapabilitas dan keselarasannya dengan tujuan pengurangan emisi. Kelima tahapan tersebut diringkas pada Gambar 1. Perancangan arsitektur teknologi (Fase D TOGAF ADM)—yaitu spesifikasi platform, sistem, dan infrastruktur teknis pendukung AI secara rinci—berada di luar cakupan penelitian ini.



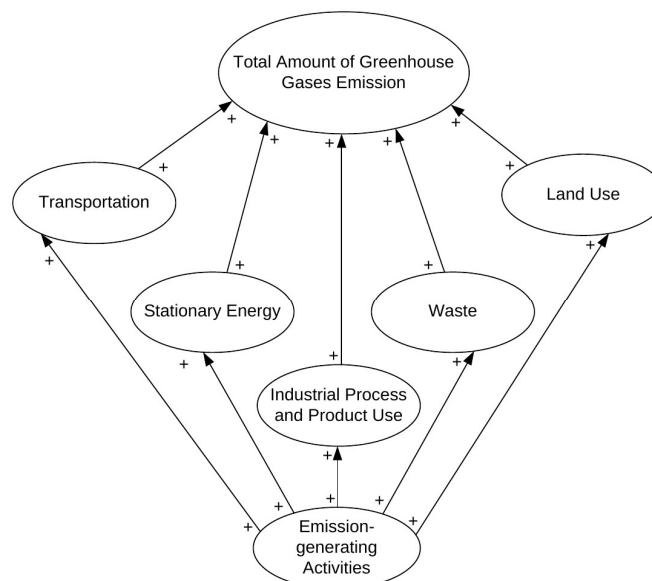
Gambar 1. Tahapan Metode Penelitian

III. KONTEKS PENELITIAN

A. Analisis Kausal Emisi Gas Rumah Kaca

Memahami faktor-faktor kausal di balik emisi gas rumah kaca sangat penting untuk menyusun strategi pengurangan yang efektif. Gambar 2 mengilustrasikan bahwa sumber emisi di kota disebabkan oleh aktivitas yang merugikan lingkungan; berbagai sektor memengaruhi total jumlah gas rumah kaca secara signifikan, masing-masing berkontribusi secara berbeda terhadap keseluruhan emisi. Analisis ini berfokus pada pengidentifikasian dan penjelasan bagaimana beragam aktivitas dalam sektor-sektor tersebut berperan. Lima sektor berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca, yaitu energi stasioner, transportasi, proses industri dan penggunaan produk, limbah, serta tata guna lahan, yang memengaruhi tingkat gas rumah kaca di kota [8].

Energi stasioner, yang mencakup energi yang digunakan pada bangunan dan fasilitas, merupakan penyumbang utama emisi perkotaan, terutama melalui pembakaran bahan bakar fosil [9]. Aktivitas transportasi semakin memperparah emisi dengan melepaskan karbon dioksida kendaraan dan polutan lainnya [10]. Proses industri dan penggunaan produk berkontribusi melalui emisi gas selama proses manufaktur dan pemakaian, sementara praktik pengelolaan limbah melepaskan metana dan gas rumah kaca lainnya [11]. Terakhir, perubahan tata guna lahan, seperti deforestasi dan perluasan perkotaan, dapat mengubah penyimpanan karbon dan melepaskan emisi tambahan [12].

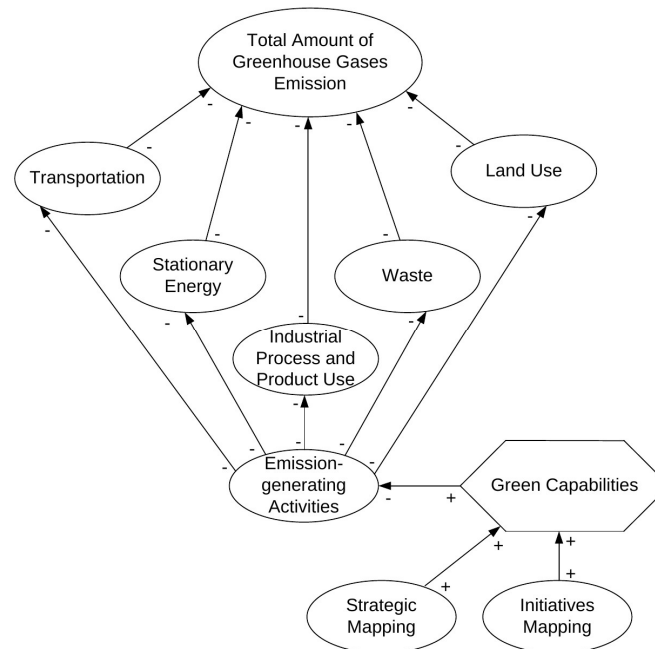


Gambar 2. Sumber Emisi Kota

B. Intervensi yang Diusulkan

Gambar 2 mengilustrasikan kondisi emisi saat ini, menyoroti bagaimana berbagai aktivitas berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca. Aktivitas-aktivitas ini, jika dibiarkan tanpa penanganan, mengakibatkan emisi yang tidak terkendali yang berdampak pada keberlanjutan lingkungan secara keseluruhan. Model saat ini mengidentifikasi sumber-sumber emisi utama dan kontribusinya, tetapi belum memiliki mekanisme untuk mengelola atau mengurangi emisi tersebut secara efektif.

Untuk mengatasi tantangan ini, solusi yang kami usulkan memperkenalkan kapabilitas hijau sebagaimana digambarkan pada Gambar 3. Model ini mengintegrasikan praktik dan teknologi keberlanjutan ke dalam model yang ada, dengan tujuan memengaruhi aktivitas penghasil emisi secara positif. Dengan mengintegrasikan kapabilitas hijau, intervensi ini berupaya memperkuat kontrol terhadap aktivitas-aktivitas tersebut, memastikan keselarasannya dengan strategi dan inisiatif yang telah ditetapkan untuk pengurangan emisi.



Gambar 3. Solusi Pengurangan Emisi yang Diusulkan

Implementasi kapabilitas hijau diharapkan membawa perbaikan signifikan dalam pengelolaan emisi. Dengan terintegrasinya kapabilitas ini, aktivitas akan dipandu oleh strategi dan inisiatif spesifik, sehingga menghasilkan operasi yang lebih terkendali dan berkelanjutan. Pendekatan ini memastikan sumber-sumber emisi dikelola secara efektif, berkontribusi pada lingkungan perkotaan yang lebih berkelanjutan dan mendukung tujuan menyeluruh pengurangan emisi gas rumah kaca.

IV. PEMETAAN KAPABILITAS HIJAU KE KECERDASAN BUATAN

Mengintegrasikan kapabilitas hijau ke dalam infrastruktur perkotaan sangat penting untuk mengembangkan kota nol-emisi bersih. Kapabilitas ini mencakup praktik dan teknologi berkelanjutan yang membantu mengurangi dampak lingkungan. Bagian ini mengkaji cara memetakan kapabilitas hijau tersebut secara efektif ke solusi kecerdasan buatan, sehingga memungkinkan perencanaan kota menerapkan strategi pengurangan emisi yang efisien.

Dengan menyelaraskan inisiatif hijau dengan perangkat AI mutakhir, kota dapat memantau dan mengelola aktivitas yang berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca secara lebih baik [13]. Pendekatan ini mendukung pengurangan dampak lingkungan secara proaktif dan memfasilitasi pengembangan lingkungan perkotaan yang berkelanjutan.

A. Pemetaan Strategis

Untuk mencapai tujuan ambisius mentransformasi lingkungan perkotaan menjadi kota nol-emisi bersih, penting untuk membangun kerangka strategis yang menguraikan tujuan spesifik beserta inisiatif yang bersesuaian. Tabel 1 menyajikan pemetaan strategis komprehensif atas tujuan dan inisiatif tersebut.

Tabel 1 menguraikan pemetaan strategis tujuan dan inisiatif yang esensial untuk mewujudkan kota nol-emisi bersih. Tujuan strategis pertama adalah mengurangi emisi gas rumah kaca, yang mencakup inisiatif seperti program efisiensi energi, proyek energi terbarukan, dan audit energi. Inisiatif-inisiatif ini bertujuan mengoptimalkan penggunaan energi dan beralih ke sumber energi yang lebih bersih, sehingga secara signifikan menekan keseluruhan emisi dari aktivitas perkotaan [14], [15].

TABEL I. TUJUAN STRATEGIS DAN INISIATIF UNTUK KOTA NOL-EMISI BERSIH

Tujuan Strategis	Inisiatif	Sumber
Mengurangi emisi gas rumah kaca	Program efisiensi energi; Energi terbarukan; Audit energi	[14], [15]
Memperbaiki proses industri	Peningkatan peralatan; Optimasi proses	[16]
Mempromosikan penggunaan produk berkelanjutan	Kampanye edukasi pelanggan; Inisiatif komunitas hijau	[17]
Meminimalkan limbah	Fasilitas daur ulang kota; Kebijakan pengurangan plastik; Pengelolaan limbah padat dan cair	[18]
Mengurangi emisi transportasi	Perluasan transportasi publik; Manajemen lalu lintas cerdas; Pemanfaatan kendaraan listrik; Pemanfaatan transportasi aktif	[19]
Meningkatkan efisiensi tata guna lahan	Perluasan ruang terbuka hijau perkotaan	[20]

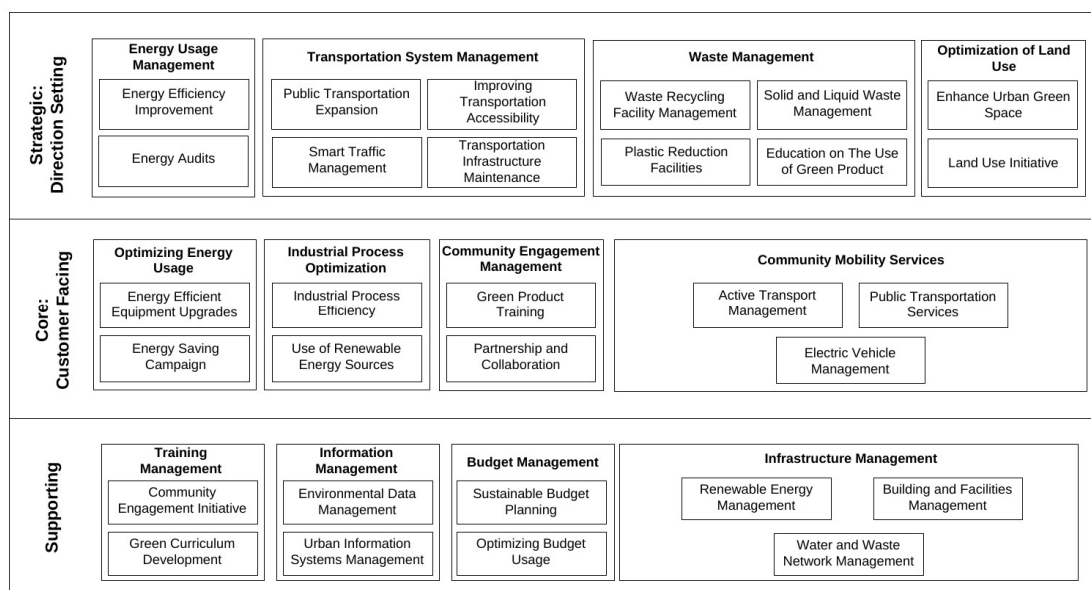
Tujuan kedua berfokus pada perbaikan proses industri melalui inisiatif seperti peningkatan peralatan (equipment upgrade) dan optimasi proses. Dengan memodernisasi operasi industri dan menyempurnakan proses, kota dapat mengurangi dampak lingkungan dari manufaktur dan produksi [16]. Tujuan ketiga, mempromosikan penggunaan produk berkelanjutan, melibatkan inisiatif seperti kampanye edukasi pelanggan dan inisiatif komunitas hijau, yang dirancang untuk menumbuhkan budaya keberlanjutan dan konsumsi ramah lingkungan di kalangan warga [17]. Tujuan strategis keempat, meminimalkan limbah, mencakup pembangunan fasilitas daur ulang kota, penerapan kebijakan pengurangan plastik, serta pengelolaan limbah padat dan cair secara efektif. Langkah-langkah ini membantu mengurangi jumlah limbah yang dihasilkan dan meningkatkan sistem pengelolaan limbah [18]. Tujuan kelima, mengurangi emisi transportasi, terdiri atas inisiatif seperti perluasan transportasi publik, penerapan manajemen lalu lintas cerdas (smart traffic management), serta mendorong penggunaan transportasi listrik dan transportasi aktif [19]. Terakhir, tujuan keenam bertujuan meningkatkan efisiensi tata guna lahan dengan memperluas ruang terbuka hijau perkotaan [20]. Inisiatif-inisiatif komprehensif ini secara kolektif mendukung tujuan menyeluruh pengembangan kota nol-emisi bersih yang berkelanjutan dengan menangani area-area kunci dampak perkotaan.

B. Kapabilitas Hijau

Gambar 4 mengilustrasikan kapabilitas hijau yang dibangun berdasarkan tujuan strategis dan inisiatif yang diuraikan pada Tabel 1. Kapabilitas ini dikategorikan ke dalam tiga bagian yang berbeda: Strategis (Strategic), Inti (Core), dan Pendukung (Supporting) [21]. Bagian Strategis berfokus pada penetapan arah dan tujuan menyeluruh untuk memandu upaya keberlanjutan. Bagian Inti menangani kapabilitas yang berhadapan langsung dengan warga—yang berdampak langsung pada komunitas dan mendorong keterlibatan dengan praktik hijau. Terakhir, bagian Pendukung mencakup fungsi-fungsi esensial yang memfasilitasi dan memperkuat implementasi inisiatif keberlanjutan. Pendekatan terstruktur ini memastikan bahwa setiap aspek kapabilitas hijau selaras secara efektif dengan tujuan strategis dan inisiatif yang diperlukan untuk bergerak menuju kota nol-emisi bersih.

Struktur Kapabilitas Hijau

Kerangka kapabilitas hijau distrukturkan ke dalam tiga kategori utama: Strategis, Inti, dan Pendukung, untuk menangani berbagai aspek keberlanjutan secara komprehensif dan mendukung transisi menuju kota nol-emisi bersih. Setiap kategori berfokus pada elemen inisiatif hijau yang berbeda, memastikan pendekatan holistik terhadap keberlanjutan perkotaan.



Gambar 4. Kapabilitas Hijau untuk Kota Nol-Emisi Bersih

Strategis: Penetapan Arah

Bagian Strategis berfokus pada penetapan arah dan kerangka keseluruhan untuk mencapai tujuan keberlanjutan. Bagian ini mencakup area kunci seperti Manajemen Penggunaan Energi, yang meliputi inisiatif seperti peningkatan efisiensi energi dan audit energi. Upaya-upaya ini bertujuan meningkatkan praktik konservasi energi dan menilai konsumsi energi saat ini untuk mengidentifikasi area yang perlu diperbaiki [14], [15]. Manajemen Sistem Transportasi meliputi perluasan transportasi publik, penerapan sistem manajemen lalu lintas cerdas, peningkatan aksesibilitas transportasi, dan pemeliharaan infrastruktur. Langkah-langkah ini dirancang untuk mengurangi emisi dari transportasi dan meningkatkan mobilitas kota secara keseluruhan [19]. Selain itu, Manajemen Limbah menangani pengelolaan fasilitas daur ulang limbah, pengurangan plastik, pengelolaan limbah padat dan cair, serta edukasi penggunaan produk hijau. Praktik pengelolaan limbah yang efektif membantu meminimalkan dampak lingkungan dari timbulan limbah [18]. Terakhir, Optimasi Tata Guna Lahan berfokus pada perluasan ruang terbuka hijau perkotaan dan penerapan inisiatif tata guna lahan untuk mendorong pembangunan lahan berkelanjutan dan penatalayanan lingkungan [20].

Inti: Berhadapan Langsung dengan Warga (Customer Facing)

Bagian Inti merepresentasikan kapabilitas yang berhadapan langsung dengan warga—yang secara langsung terlibat dengan komunitas dan mendorong upaya keberlanjutan. Optimasi Penggunaan Energi melibatkan peningkatan ke peralatan hemat energi dan menjalankan kampanye hemat energi untuk mendorong konsumsi energi yang lebih berkelanjutan di kalangan warga [14], [15]. Optimasi Proses Industri mencakup peningkatan efisiensi proses industri dan pemanfaatan sumber energi terbarukan untuk mengurangi jejak lingkungan aktivitas industri [16]. Manajemen Keterlibatan Komunitas berfokus pada pelatihan komunitas tentang produk hijau dan menjalin kemitraan serta kolaborasi untuk memperkuat upaya keberlanjutan kolektif [17]. Layanan Mobilitas Komunitas mencakup pengelolaan opsi transportasi aktif, penyediaan layanan transportasi publik, dan pengawasan manajemen kendaraan listrik untuk mendukung praktik transportasi berkelanjutan [19].

Pendukung (Supporting)

Bagian Pendukung mencakup fungsi-fungsi esensial yang memfasilitasi dan memperkuat implementasi inisiatif hijau. Manajemen Pelatihan melibatkan inisiatif keterlibatan komunitas dan pengembangan kurikulum hijau untuk mengedukasi dan melibatkan warga dalam praktik keberlanjutan [22]. Manajemen Informasi mencakup pengelolaan data lingkungan dan pengawasan sistem informasi perkotaan untuk memastikan penggunaan data yang akurat dan efektif bagi perencanaan keberlanjutan [23]. Manajemen Anggaran menekankan perencanaan anggaran berkelanjutan dan optimasi penggunaan anggaran untuk memastikan sumber daya finansial dialokasikan secara efektif pada inisiatif hijau [24]. Terakhir, Manajemen Infrastruktur menangani pengelolaan sistem energi terbarukan, pemeliharaan bangunan dan fasilitas, serta jaringan air dan limbah, memastikan bahwa infrastruktur kota mendukung tujuan keberlanjutannya [25].

C. Pemetaan Kapabilitas Hijau ke Solusi AI

Gambar 5 berfokus pada pemetaan kapabilitas hijau ke solusi kecerdasan buatan untuk mendukung tujuan pengembangan kota nol-emisi bersih. Dengan mengidentifikasi kapabilitas kunci dan menyelaraskannya dengan perangkat AI mutakhir, kami bertujuan meningkatkan efektivitas strategi pengurangan emisi gas rumah kaca di lingkungan perkotaan.

Manajemen Pelatihan: Platform e-learning bertenaga AI dapat mengembangkan kurikulum hijau dan mengelola inisiatif keterlibatan komunitas [30]. Platform ini dapat menawarkan modul pelatihan yang dipersonalisasi untuk mengedukasi warga tentang praktik keberlanjutan dan penatalayanan lingkungan [30].

Manajemen Informasi: AI dapat mengelola data lingkungan dan sistem informasi perkotaan untuk mendukung proses pengambilan keputusan [32]. Analitik prediktif dapat memperkirakan tren lingkungan, membantu pembuat kebijakan merencanakan pertumbuhan perkotaan berkelanjutan secara lebih efektif [32].

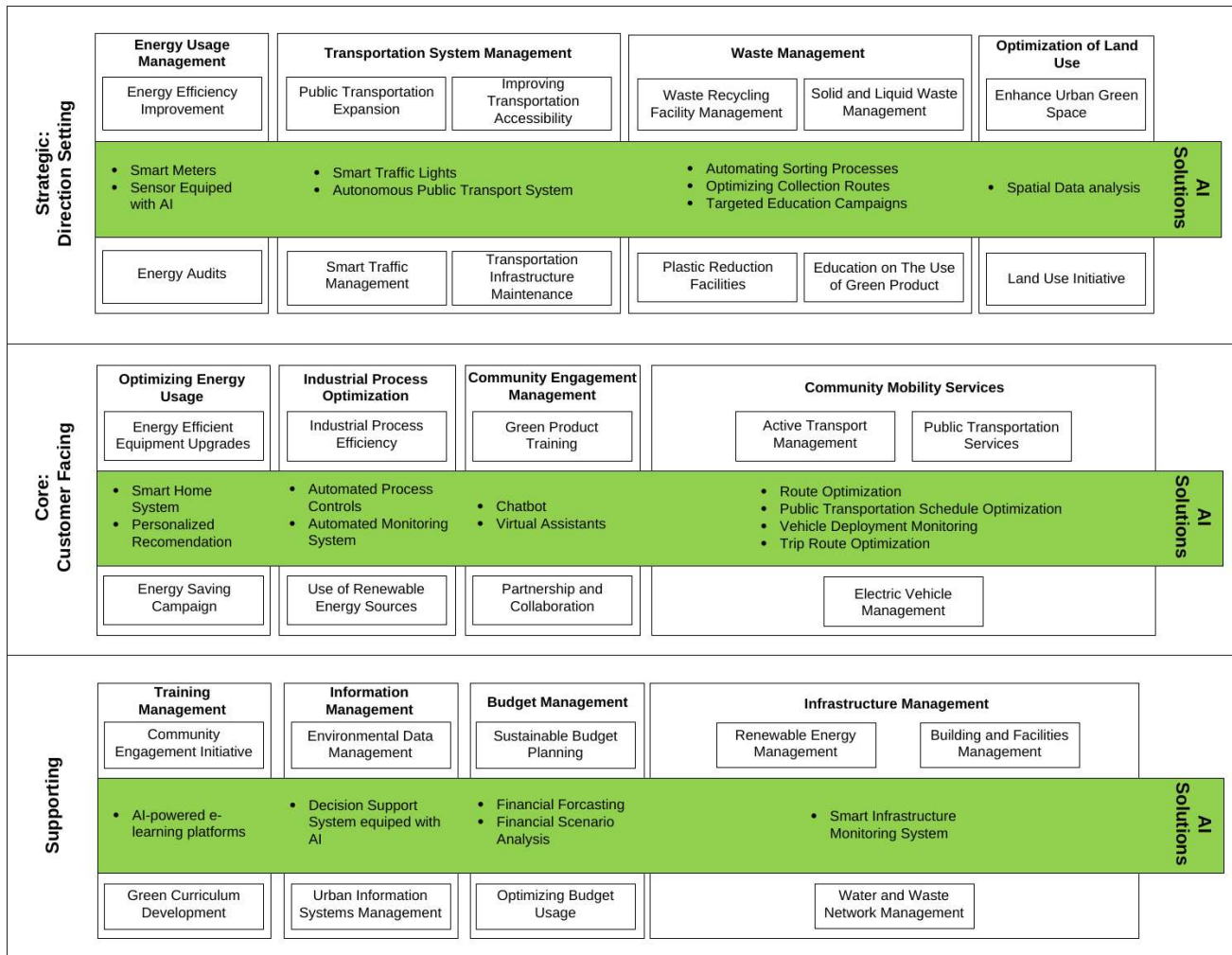
Manajemen Anggaran: AI dapat membantu perencanaan anggaran berkelanjutan dan mengoptimalkan penggunaan anggaran melalui peramalan finansial dan analisis skenario [33]. Hal ini memastikan sumber daya dialokasikan secara efisien untuk memaksimalkan dampak inisiatif hijau [33].

Manajemen Infrastruktur: AI dapat mengawasi manajemen energi terbarukan, memantau pemeliharaan bangunan, dan mengelola jaringan air dan limbah [34]. Infrastruktur cerdas bertenaga AI dapat beradaptasi terhadap kondisi yang berubah, memastikan operasi yang efisien dan dampak lingkungan yang berkurang [34].

Optimasi Tata Guna Lahan: AI dapat membantu perencanaan kota dengan menganalisis data spasial untuk mengidentifikasi area yang sesuai bagi ruang hijau dan pembangunan berkelanjutan [26]. Hal ini membantu memperluas ruang terbuka hijau perkotaan dan mendorong inisiatif tata guna lahan yang mendukung keberlanjutan lingkungan.

Optimasi Penggunaan Energi: AI dapat meningkatkan peralatan hemat energi dan mendorong kampanye hemat energi melalui rekomendasi yang dipersonalisasi dan sistem rumah pintar [27]. Model machine learning dapat memprediksi waktu penggunaan puncak dan menyarankan perubahan perilaku untuk mengurangi konsumsi [28].

Optimasi Proses Industri: AI dapat meningkatkan efisiensi industri dengan mengotomatisasi kontrol proses dan sistem pemantauan [29]. Pemanfaatan AI dalam manufaktur cerdas dapat memperkuat optimasi proses, mengurangi limbah, dan mendukung integrasi sumber energi terbarukan [29].



Gambar 5. Pemetaan Kapabilitas Hijau ke Solusi AI

Manajemen Keterlibatan Komunitas: AI dapat memfasilitasi pelatihan produk hijau dan menjalin kemitraan melalui platform kolaborasi virtual [30]. Chatbot dan asisten virtual dapat memberikan informasi kepada warga tentang praktik berkelanjutan dan inisiatif komunitas mendatang [30].

Layanan Mobilitas Komunitas: AI dapat mengelola opsi transportasi aktif, mengoptimalkan jadwal transportasi publik, dan mengawasi penempatan serta pemeliharaan armada kendaraan listrik [31]. Ini termasuk optimasi rute untuk layanan mobilitas bersama guna meminimalkan dampak lingkungan [31].

V. TEMUAN UTAMA DAN PENELITIAN LANJUTAN

Studi ini mengembangkan dan mendemonstrasikan kerangka arsitektur terintegrasi yang memadukan kapabilitas hijau dengan AI untuk memajukan tujuan mewujudkan kota nol-emisi bersih. Temuan utama menunjukkan bahwa kerangka yang diusulkan dapat menangani beberapa tantangan terkait keberlanjutan, khususnya dalam perencanaan perkotaan dan pengelolaan lingkungan. Dengan memanfaatkan teknologi berbasis AI, kerangka ini memfasilitasi pelacakan emisi yang akurat, optimasi penggunaan energi, dan menjalankan proses pengambilan keputusan di berbagai sektor, termasuk transportasi, proses industri, dan pengelolaan limbah. Selain itu, penelitian ini menyoroti peran kritis wawasan berbasis data dalam mengidentifikasi titik-titik panas emisi (emission hotspots) dan pentingnya pemantauan waktu nyata (real-time) dalam mengurangi jejak karbon. Penerapan AI dalam domain-domain ini tidak hanya meningkatkan efisiensi tetapi juga memastikan tujuan keberlanjutan tercapai secara lebih sistematis dan komprehensif.

Meskipun penelitian saat ini meletakkan fondasi yang kuat untuk mengintegrasikan AI dengan kapabilitas hijau di lingkungan perkotaan, beberapa area memerlukan penyelidikan lebih lanjut. Penelitian mendatang sebaiknya mengeksplorasi skalabilitas kerangka yang diusulkan pada berbagai ukuran dan konteks kota, dengan mempertimbangkan tingkat kesiapan infrastruktur dan teknologi yang beragam. Selain itu, studi kasus yang lebih ekstensif diperlukan untuk memvalidasi penerapan kerangka ini pada kondisi geografis dan sosio-ekonomi yang beragam. Arah potensial lainnya melibatkan penyempurnaan kerangka dengan model machine learning canggih yang dapat memprediksi dan menyimulasikan dampak jangka panjang dari berbagai intervensi lingkungan. Terakhir, kolaborasi dengan

pembuat kebijakan dan pemangku kepentingan akan sangat penting untuk menyempurnakan kerangka dan memastikan keselarasannya dengan standar keberlanjutan global, sehingga memfasilitasi adopsi dan implementasinya dalam skenario dunia nyata.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini menyediakan kerangka komprehensif yang berhasil mengintegrasikan kapabilitas hijau dengan AI untuk memfasilitasi pengembangan kota nol-emisi bersih. Temuan menegaskan efektivitas AI dalam mengoptimalkan upaya keberlanjutan perkotaan, khususnya dalam pelacakan emisi, efisiensi energi, dan pengelolaan lingkungan. Dengan menangani kesenjangan kritis dalam metodologi yang ada, kerangka yang diusulkan menawarkan solusi yang skalabel dan adaptif bagi kota-kota yang bertujuan mencapai emisi nol bersih. Penelitian mendatang dan kolaborasi dengan pemangku kepentingan kunci akan menjadi esensial untuk menyempurnakan dan mengimplementasikan kerangka ini dalam skala yang lebih luas, memastikan dampaknya terhadap upaya keberlanjutan global.

REFERENSI

- [1] Y. Noh, S. Jafarinejad, and P. Anand, "A Review on Harnessing Renewable Energy Synergies for Achieving Urban Net-Zero Energy Buildings: Technologies, Performance Evaluation, Policies, Challenges, and Future Direction," *Sustainability*, vol. 16, no. 8, p. 3444, Apr. 2024, doi: 10.3390/su16083444.
- [2] K. Sugar, "The role of municipal ownership for urban net-zero path creation," *Front. Sustain. Energy Policy*, vol. 3, p. 1355990, May 2024, doi: 10.3389/fsuep.2024.1355990.
- [3] Q. Luo and P. Feng, "Exploring artificial intelligence and urban pollution emissions: 'Speed bump' or 'accelerator' for sustainable development?," *Journal of Cleaner Production*, vol. 463, p. 142739, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142739.
- [4] W. He and M. Chen, "Advancing Urban Life: A Systematic Review of Emerging Technologies and Artificial Intelligence in Urban Design and Planning," *Buildings*, vol. 14, no. 3, p. 835, Mar. 2024, doi: 10.3390/buildings14030835.
- [5] M. R. Anwar and L. D. Sakti, "Integrating Artificial Intelligence and Environmental Science for Sustainable Urban Planning," *itsdi*, vol. 5, no. 2, pp. 179–191, Mar. 2024, doi: 10.34306/itsdi.v5i2.666.
- [6] Borade Rohan Nitin and Khairnar Mrunal Vijay, "Smart Cities: AI and IoT Integration for Urban Sustainability," *IJARST*, pp. 622–626, Jan. 2024, doi: 10.48175/IJARST-15092.
- [7] Y. Chahid, I. Chahid, and M. Benabdellah, "A Framework For Reduce Co2 Emissions And Enhancing Environmental Sustainability Protection Using Iot And Artificial Intelligence," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 100, no. 16, pp. 4979–4990, 2022.
- [8] W. Fong, *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Inventories*. Greenhouse Gas Protocol, 2021.
- [9] W. Li, "Mapping urban building fossil fuel CO2 emissions with a high spatial and temporal resolution," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 1785–1798, Mar. 2022, doi: 10.1007/s13762-021-03234-0.
- [10] M. Suner, "Analysis of air pollution from three main transportation vehicles: a case study," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 46, no. 1, pp. 1890–1906, Dec. 2024, doi: 10.1080/15567036.2024.2302374.
- [11] M. Gautam and M. Agrawal, "Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Management: A Review of Global Scenario," in *Carbon Footprint Case Studies*, S. S. Muthu, Ed., Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes. Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 123–160, doi: 10.1007/978-981-15-9577-6_5.
- [12] M. Lyu, Y. Zhou, Y. Wei, J. Li, and S. Wu, "The Impact of Land Use Changes on Carbon Flux in the World's 100 Largest Cities," *Sustainability*, vol. 15, no. 16, p. 12497, Aug. 2023, doi: 10.3390/su151612497.
- [13] A. Sara, A. K. M'hamed, and A. Soulaïmane, "Green Intelligence: Leveraging AI for Environmental Sustainability (E-Commerce Use Case)," in *Int. Conf. on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (AI2SD'2023)*, vol. 931, Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 320–326, doi: 10.1007/978-3-031-54288-6_31.
- [14] B. Boychev, "Energy efficiency and renewable energy sources," in *2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Varna, Bulgaria: IEEE, Sep. 2022, pp. 1–4, doi: 10.1109/BulEF56479.2022.10021212.
- [15] M. Andrei, P. Thollander, I. Pierre, B. Gindroz, and P. Rohdin, "Decarbonization of industry: Guidelines towards a harmonized energy efficiency policy program impact evaluation methodology," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1385–1395, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.02.067.
- [16] P. S. Bisht, B. Gopalakrishnan, R. Dahal, H. Li, and Z. Liu, "Parametric Energy Efficiency Impact Analysis for Industrial Process Heating Furnaces Using the Manufacturing Energy Assessment Software for Utility Reduction," *Processes*, vol. 12, no. 4, p. 737, Apr. 2024, doi: 10.3390/pr12040737.
- [17] V. Prieto-Sandoval, L. E. Torres-Guevara, and C. García-Díaz, "Green marketing innovation: Opportunities from an environmental education analysis in young consumers," *Journal of Cleaner Production*, vol. 363, p. 132509, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132509.
- [18] J. Xu, "Research on Innovative Models of Waste Recycling in Urban Infrastructure," *AJST*, vol. 9, no. 2, pp. 245–248, Feb. 2024, doi: 10.54097/4b1cq43.
- [19] S. Sabet and B. Farooq, "Exploring sustainable pathways for urban traffic decarbonization: vehicle technologies, management strategies, and driving behaviour," 2023, arXiv, doi: 10.48550/ARXIV.2308.14914.
- [20] P. Tao et al., "Optimization of Green Spaces in Plain Urban Areas to Enhance Carbon Sequestration," *Land*, vol. 12, no. 6, p. 1218, Jun. 2023, doi: 10.3390/land12061218.
- [21] BIZBOK, *A Guide to The Business Architecture Body of Knowledge*, 7th ed. Business Architecture Guild, 2018.
- [22] H. Oe, Y. Yamaoka, and H. Ochiai, "A Qualitative Assessment of Community Learning Initiatives for Environmental Awareness and Behaviour Change: Applying UNESCO Education for Sustainable Development (ESD) Framework," *IJERPH*, vol. 19, no. 6, p. 3528, Mar. 2022, doi: 10.3390/ijerph19063528.

- [23] M. Wu, B. Yan, Y. Huang, and M. N. I. Sarker, "Big Data-Driven Urban Management: Potential for Urban Sustainability," *Land*, vol. 11, no. 5, p. 680, May 2022, doi: 10.3390/land11050680.
- [24] Y. Wang, L. Han, J. Sun, and Z. Sun, "Financing the green transition: Mobilizing resources for efficient natural resource management," *Resources Policy*, vol. 89, p. 104522, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.resourpol.2023.104522.
- [25] M. Sánchez-Silva and J. W. Baker, "Dynamic Infrastructure Systems: advancing sustainable urbanization and climate change," *Environ Syst Decis*, Apr. 2024, doi: 10.1007/s10669-024-09969-8.
- [26] R. Marasinghe, T. Yigitcanlar, S. Mayere, T. Washington, and M. Limb, "Towards Responsible Urban Geospatial AI: Insights From the White and Grey Literatures," *J geovis spat anal*, vol. 8, no. 2, p. 24, Dec. 2024, doi: 10.1007/s41651-024-00184-2.
- [27] A. Alsalemi, A. Amira, H. Malekmohamadi, and K. Diao, "A modular recommender system for domestic energy efficiency," *Environmental Challenges*, vol. 13, p. 100741, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.envc.2023.100741.
- [28] Z. Eddaoudi, Z. Aarab, K. Boudmen, A. Elghazi, and M. D. Rahmani, "A Brief Review of Energy Consumption Forecasting Using Machine Learning Models," *Procedia Computer Science*, vol. 236, pp. 33–40, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.05.001.
- [29] S. V. Plyasov and I. O. Klopov, "Transforming Industries With Artificial Intelligence: Practical Aspects," *PI*, no. 31, pp. 49–53, Apr. 2024, doi: 10.32782/2415-3583/31.8.
- [30] D. Aggarwal, "Green Education: A Sustainable Development Initiative with the Power of Artificial Intelligence (AI)," *JIPIRS*, no. 35, pp. 39–44, Sep. 2023, doi: 10.55529/jipirs.35.39.44.
- [31] Asawari Satish Isalkar and Rajeshkumar U. Sambhe, "Artificial Intelligence in Transportation: A Review," *Int J Sci Res Sci Eng Technol*, vol. 11, no. 2, pp. 142–146, Jan. 2024, doi: 10.32628/IJSRSET2411212.
- [32] W. Leal Filho et al., "The role of artificial intelligence in the implementation of the UN Sustainable Development Goal 11: Fostering sustainable cities and communities," *Cities*, vol. 150, p. 105021, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.cities.2024.105021.
- [33] B. O. Adelakun, B. O. Antwi, A. Ntiakoh, and A. O. Eziefule, "Leveraging AI for sustainable accounting: Developing models for environmental impact assessment and reporting," *Financ. account. res. j.*, vol. 6, no. 6, pp. 1017–1048, Jun. 2024, doi: 10.51594/farj.v6i6.1234.
- [34] B. J. C. Kant Gautam, D. K. Yadav, and N. Sharma, "Utilizing Artificial Intelligence and IoT for Enhanced Renewable Energy Management in Smart Cities," *E3S Web of Conf.*, vol. 540, p. 13009, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202454013009.
- [35] The Open Group, *The TOGAF® Standard, 10th ed. – Architecture Development Method*. Zaltbommel: Van Haren Publishing, 2022.