

Integrasi *Circular Economy* Dan *Maintenance*: Pemetaan Tren, Tema, Dan Arah Pengembangan Menuju Infrastruktur Berkelanjutan

Nectaria Putri Pramesti^{1*}, Imam Basuki², Agustina Kiky Angraini³

^{1*}Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Yogyakarta
e-mail: nectaria.putri@uajy.ac.id

²Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Yogyakarta
e-mail: imam.basuki@uajy.ac.id

³Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Yogyakarta
e-mail: agustina.kiky@uajy.ac.id

ABSTRAK

Penerapan *Circular Economy* (CE) di sektor konstruksi berpotensi besar mendukung keberlanjutan infrastruktur melalui efisiensi sumber daya, pengurangan limbah, dan perpanjangan umur aset. Namun, sebagian besar kajian masih berfokus pada daur ulang material, sementara peran pemeliharaan (*maintenance*) sebagai strategi inti CE belum banyak diteliti. Penelitian ini menggunakan pendekatan *scoping review* terhadap 57 artikel terindeks Scopus untuk memetakan tren, tema utama, dan kesenjangan riset terkait integrasi CE dan *maintenance*. Hasil analisis bibliometrik dan konten menunjukkan lima tema dominan, yaitu *lifecycle & sustainability*, *material & waste management*, *infrastructure & performance*, *economic & cost efficiency*, serta *digitalization & smart technology*. Tiga kesenjangan utama juga teridentifikasi: terbatasnya dimensi sosial-kebijakan, belum adanya standarisasi indikator keberlanjutan, dan rendahnya integrasi antara analisis ekonomi dan teknologi digital. Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini menghasilkan *Circular Maintenance Framework* sebagai model konseptual yang menghubungkan strategi pemeliharaan, prinsip CE, dan indikator keberlanjutan untuk memperkuat penerapan ekonomi sirkular dalam pengelolaan infrastruktur berkelanjutan.

Kata kunci: *Circular Economy*, *Maintenance*, Infrastruktur Berkelanjutan, *Scoping Review*, *Framework*

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur berperan penting dalam pertumbuhan ekonomi dan peningkatan kualitas hidup masyarakat. Namun, dominasi pembangunan baru dengan pendekatan linear *bangun-pakai-rusak-ganti* menimbulkan persoalan keberlanjutan, seperti peningkatan konsumsi sumber daya alam, emisi karbon, serta akumulasi limbah konstruksi dan pembongkaran (C&D waste). Kondisi ini menegaskan perlunya perubahan paradigma menuju sistem yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Konsep *circular economy* (CE) menawarkan pendekatan tersebut melalui perpanjangan umur aset dan efisiensi sumber daya berdasarkan prinsip *reduce, reuse, repair, refurbish*, dan *recycle* (Kirchherr dkk, (2017); Potting dkk, (2017)). Dalam sektor konstruksi, implementasi CE umumnya berfokus pada daur ulang material, padahal kegiatan pemeliharaan dan *retrofit* memiliki potensi strategis untuk menekan kebutuhan pembangunan baru sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Sejumlah penelitian, seperti Mahpour (2023b), Byers (2025), dan Gryspanowicz (2023), menunjukkan kontribusi signifikan kegiatan *repair, refurbish*, dan pemanfaatan kembali material terhadap efisiensi siklus hidup aset, meskipun penerapannya masih terkendala oleh faktor regulasi, biaya awal, dan resistensi budaya (C. Connolly, 2023); (Vetnes, 2024)).

Secara konseptual, pemeliharaan sejalan dengan prinsip CE, namun kajian akademik masih terbatas pada *reuse* dan *retrofit*, sementara *preventive* dan *predictive maintenance* jarang mendapat perhatian, khususnya di negara berkembang. Oleh karena itu, penelitian ini menegaskan pemeliharaan sebagai strategi inti *circular economy* yang mendukung keberlanjutan infrastruktur melalui efisiensi biaya siklus hidup, pengurangan limbah, dan perpanjangan umur layanan aset. Mengacu pada temuan Pramesti dkk (2024) mengenai indikator *Level of Service* (LOS) dan integrasi digitalisasi dalam evaluasi pemeliharaan, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi tren penerapan CE dalam *maintenance*, mengelompokkan tema utama literatur, menemukan *research gap*, serta menyintesis *Circular Maintenance Framework* yang menghubungkan strategi pemeliharaan, prinsip CE, dan indikator keberlanjutan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Circular economy dalam sektor konstruksi

Circular Economy (CE) dalam sektor konstruksi awalnya difokuskan pada pengelolaan limbah, daur ulang, dan desain berkelanjutan di tahap akhir siklus hidup (Kirchherr et al., 2017); (Potting et al., 2017). Namun, arah kajian kini

bergeser ke fase penggunaan (*use phase*), di mana strategi perpanjangan umur aset melalui pemeliharaan dan retrofit dipandang sebagai bagian penting dari ekonomi sirkular (Rao, Shankar, & Kaur, 2025); (Torres Curado, Costa, & Pereira, 2024).

Maintenance sebagai strategi circular economy

Pemeliharaan berperan penting dalam penerapan prinsip CE melalui R-strategies seperti *repair*, *refurbish*, dan *reuse*. Mahpour (2023) menunjukkan bahwa estimasi biaya pemeliharaan berbasis machine learning dapat meningkatkan efisiensi sumber daya dan mendukung keputusan berkelanjutan dalam pengelolaan aset bangunan. Pendekatan ini memperluas implementasi CE dari sekadar pengelolaan limbah ke arah manajemen aset jangka panjang.

Penerapan CE dalam pemeliharaan jalan

Penerapan CE pada infrastruktur jalan dilakukan melalui penggunaan kembali material bongkaran, recycling asphalt pavement, serta optimalisasi sumber daya lokal. Connolly (2023) mengidentifikasi bahwa otoritas jalan di Eropa mulai menerapkan praktik sirkular, namun masih menghadapi hambatan regulasi dan resistensi budaya. Penerapan konsep CE terbukti menekan biaya pemeliharaan sekaligus mengurangi dampak lingkungan jangka panjang.

Retrofit dan Refurbishment

Retrofit menjadi strategi penting dalam mewujudkan CE karena dapat memperpanjang umur bangunan, menurunkan emisi karbon, dan meningkatkan efisiensi energi. Pietrangeli dkk (2023) menyoroti konsep smart retrofit dengan integrasi sensor dan digital twin, sedangkan Oyebamiji dkk (2025) menekankan praktik global retrofit berbasis CE yang memanfaatkan desain modular dan material reused.

Teknologi pendukung

Integrasi teknologi digital memperkuat implementasi CE dalam pemeliharaan aset infrastruktur. IoT, *digital twin*, dan AI digunakan untuk *predictive maintenance* serta pengambilan keputusan berbasis data (Pietrangeli et al., 2023); (Shahidi Hamedani, Toossi, & Khosravi, 2025). Pendekatan ini mendorong efisiensi energi, pengurangan limbah, dan peningkatan ketahanan aset secara berkelanjutan.

3. METODE PENELITIAN

Pendekatan penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *scoping review* dengan mengacu pada kerangka Arksey (2005) dan diperkuat oleh pedoman JBI (2019) serta PRISMA-ScR (Tricco et al., 2018). Pendekatan ini dipilih karena sesuai untuk memetakan bidang penelitian yang masih berkembang, memberikan gambaran umum mengenai tren, tema utama, dan *research gap* dalam penerapan *Circular Economy (CE)* pada konteks *maintenance* infrastruktur.

Identifikasi pertanyaan riset

Perumusan pertanyaan penelitian dilakukan berdasarkan kerangka PCC (*Population–Concept–Context*) sebagaimana direkomendasikan oleh JBI (2019): Population (P): Infrastruktur (bangunan, jembatan, jalan, dan infrastruktur air) yang memerlukan pemeliharaan berkelanjutan. Concept (C): *Circular Economy (CE)* dikaitkan dengan strategi pemeliharaan (*maintenance*) untuk memperpanjang umur aset. Context (C): Sektor konstruksi berkelanjutan yang berorientasi pada efisiensi sumber daya.

Berdasarkan kerangka tersebut, rumusan pertanyaan penelitian adalah: Bagaimana tren publikasi mengenai penerapan *Circular Economy* dalam *maintenance* infrastruktur? Apa saja tema utama yang muncul dari literatur terkait CE dan *maintenance*? dan *Research gap* apa yang dapat diidentifikasi untuk pengembangan penelitian selanjutnya?

Identifikasi dan seleksi studi

Pencarian literatur dilakukan melalui basis data Scopus dengan kata kunci utama “Circular Economy” AND “Maintenance” pada bidang title–abstract–keywords. Kriteria inklusi mencakup: (1) artikel dalam konteks konstruksi/infrastruktur; (2) publikasi berbahasa Inggris; dan (3) diterbitkan pada jurnal atau prosiding bereputasi. Kriteria eksklusi meliputi: (1) studi di luar konteks konstruksi (mis. manufaktur, pertanian); (2) lecture notes atau publikasi sementara; dan (3) duplikasi hasil pencarian. Proses seleksi dilakukan melalui: penghapusan duplikasi, screening judul dan abstrak, dan eksklusi berdasarkan kriteria tambahan. Hasil akhir diperoleh 57 artikel yang memenuhi kriteria dan menjadi dasar analisis lebih lanjut.

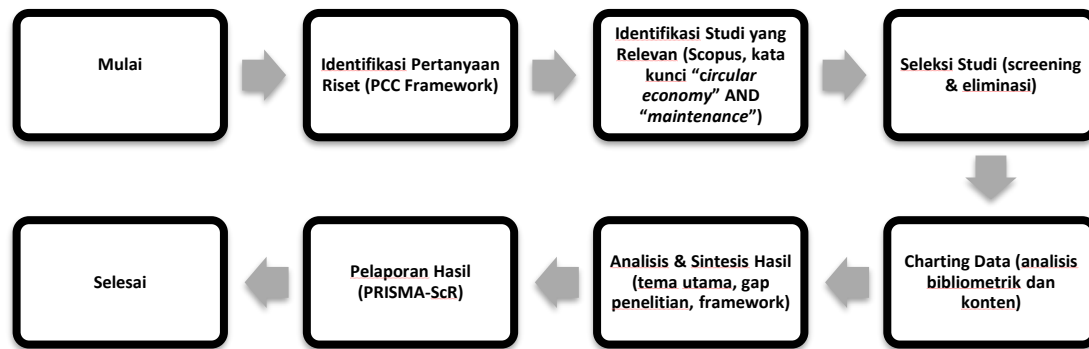
Charting dan analisis data

Data dari artikel terpilih diekstraksi dalam dua tahap: Analisis bibliometrik menggunakan *VOSviewer* untuk memetakan tren publikasi, kata kunci, dan kolaborasi penulis. Dan Analisis konten (content analysis) dengan teknik

open coding terhadap abstrak dan sebagian *full text* untuk mengidentifikasi tema utama. Hasil *charting* menghasilkan peta tema yang dikelompokkan menjadi tiga kategori: strategi pemeliharaan, prinsip CE, dan indikator keberlanjutan.

Sintesis dan pelaporan hasil

Tahap akhir berupa sintesis hasil analisis dalam bentuk grafik tren publikasi, peta kluster kata kunci, tabel tema utama, dan model hierarki tematik. Pelaporan hasil mengikuti pedoman PRISMA-ScR, Tricco (2018) untuk memastikan transparansi dan replikasi proses *scoping review*.



Gambar 1. Flowchart Metode Penelitian (Scoping Review CE–Maintenance)

4. ANALISIS DATA

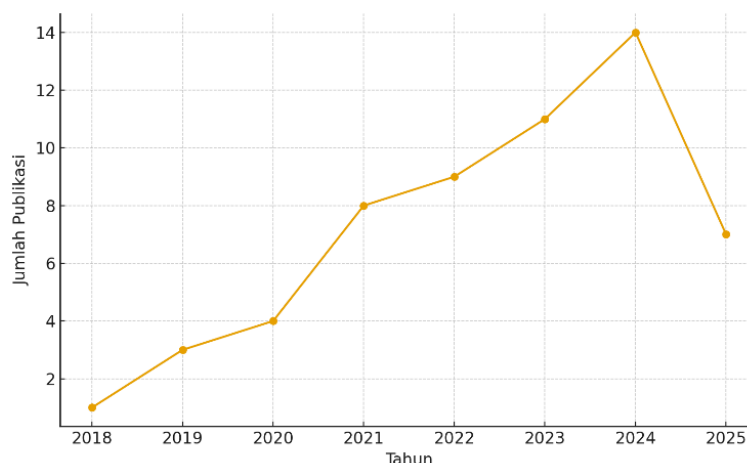
Data publikasi diperoleh dari Scopus dengan menggunakan kata kunci “*circular economy*” dan “*maintenance*”. Pencarian dilakukan pada judul, abstrak, dan kata kunci artikel. Dari hasil pencarian awal, terkumpul sejumlah artikel yang kemudian diseleksi berdasarkan relevansi dengan topik CE pada sektor konstruksi dan infrastruktur. Artikel yang tidak relevan serta publikasi dalam *Lecture Notes* dieliminasi. Setelah proses penyaringan, diperoleh 57 artikel yang digunakan sebagai dasar analisis bibliometrik ini.

Analisis tren penerapan *circular economy* (CE) dalam *maintenance*

Isu *Circular Economy* (CE) semakin mendapat perhatian dalam bidang konstruksi dan infrastruktur karena mampu menjawab tantangan keberlanjutan, efisiensi sumber daya, serta pengurangan limbah. Salah satu sektor yang sangat terkait dengan penerapan CE adalah *maintenance* (pemeliharaan), mengingat siklus hidup infrastruktur sangat dipengaruhi oleh strategi operasi, pemeliharaan, dan rehabilitasi. Oleh sebab itu, penting untuk memahami bagaimana tren penelitian global mengenai CE dalam konteks *maintenance* berkembang, baik dari sisi jumlah publikasi, sebaran negara dan institusi, maupun fokus topik yang diteliti.

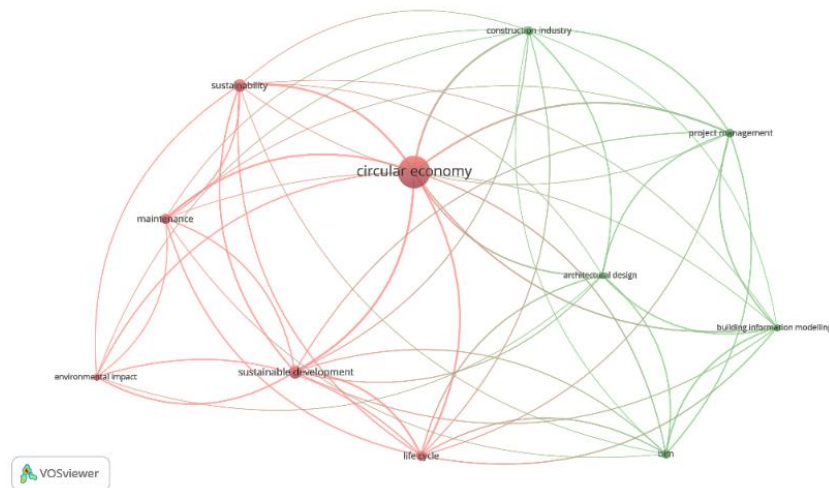
Analisis bibliometrik dilakukan menggunakan perangkat lunak VOSviewer terhadap 57 artikel terpilih. Fokus analisis mencakup pertumbuhan jumlah publikasi, keterkaitan topik melalui kata kunci, tren temporal, serta area penelitian dominan.

Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan signifikan jumlah publikasi sejak 2019, dengan puncaknya pada tahun 2024. Sementara itu, publikasi tahun 2025 masih relatif rendah karena data belum sepenuhnya terindeks (Gambar 2).



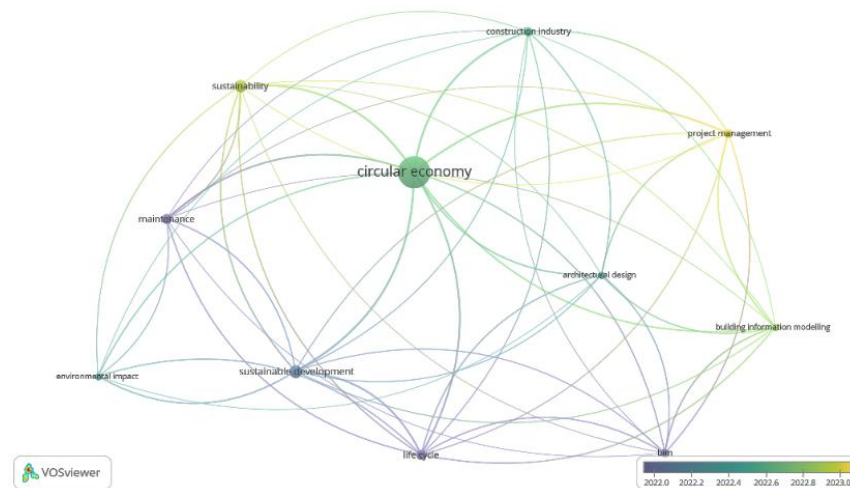
Gambar 2. Grafik tren publikasi per tahun.

Analisis network visualization kata kunci mengidentifikasi dua cluster utama (Gambar 3): Cluster konseptual (merah) berfokus pada kata kunci *circular economy*, *sustainability*, *maintenance*, *sustainable development*, *life cycle*. Dan Cluster teknis (hijau) berfokus pada kata kunci *BIM*, *project management*, *construction industry*, *building information modelling*.



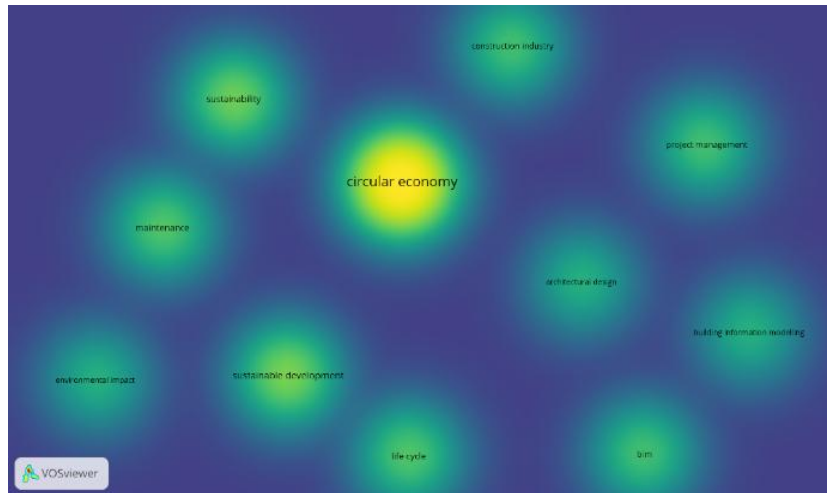
Gambar 3. Peta distribusi kata kunci (*network visualization*).

Selanjutnya, *overlay visualization* menambahkan dimensi temporal (Gambar 4). Dari visualisasi terlihat bahwa *maintenance* dan *sustainability* mendominasi publikasi terdahulu, sedangkan *BIM* dan *project management* menjadi tren penelitian terkini. Hal ini mengindikasikan adanya pergeseran fokus riset dari aspek konseptual keberlanjutan menuju integrasi teknologi digital dalam CE.



Gambar 4. Peta tren temporal kata kunci (*overlay visualization*).

Terakhir, *density visualization* menyoroti intensitas riset pada topik tertentu (Gambar 5). Kata kunci *circular economy* muncul sebagai pusat penelitian (zona kuning terang), dengan dukungan kata kunci *maintenance*, *sustainability*, dan *life cycle* pada zona hijau. Sementara itu, kata kunci seperti *architectural design* dan *environmental impact* masih berada di zona biru-hijau, menandakan peluang riset lanjutan yang relatif jarang dieksplorasi.



Gambar 5. Peta kepadatan kata kunci (*density visualization*).

Dengan demikian, hasil analisis bibliometrik telah menjawab tujuan penelitian melalui penyajian grafik tren publikasi, peta jaringan kata kunci, tren temporal, dan peta kepadatan yang menggambarkan arah serta fokus penelitian Circular Economy dalam maintenance

Analisis konten literatur *circular economy* (CE) dan *maintenance*

Untuk menjawab pertanyaan penelitian “Apa saja tema utama yang muncul dari literatur terkait Circular Economy (CE) dan maintenance?”, dilakukan analisis terhadap 57 literatur yang relevan. Hasilnya menunjukkan bahwa penerapan CE dalam konteks maintenance telah berkembang menjadi pendekatan strategis dalam pengelolaan aset infrastruktur berkelanjutan. Kajian-kajian tersebut menyoroti keterkaitan erat antara keberlanjutan, efisiensi sumber daya, dan digitalisasi sebagai elemen utama dalam perawatan aset sepanjang siklus hidupnya.

Secara umum, hasil analisis mengelompokkan temuan literatur ke dalam lima tema utama: (A) Lifecycle & Sustainability, (B) Material & Waste Management, (C) Infrastructure & Performance, (D) Economic & Cost Efficiency, dan (E) Digitalization & Smart Technology.

Tema *Lifecycle & Sustainability* mendominasi sebagian besar publikasi. Pendekatan *life cycle thinking* dan *life-cycle assessment* (LCA) digunakan untuk menilai dampak lingkungan dan memperpanjang umur layanan aset. *Maintenance* tidak lagi dipandang sebagai tahap akhir, melainkan bagian integral dari siklus keberlanjutan yang berulang.

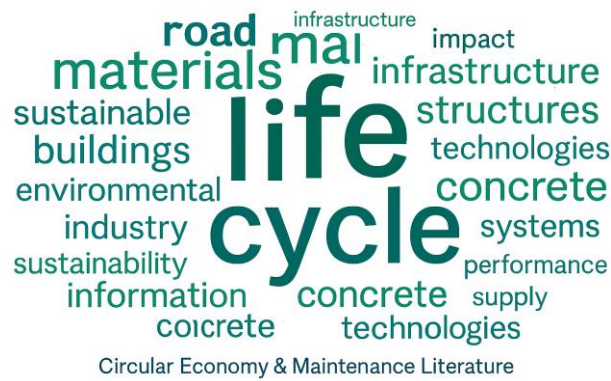
Tema *Material & Waste Management* menunjukkan bahwa prinsip CE diterapkan melalui *reuse*, *recycling*, dan *design for disassembly*. Penggunaan kembali material seperti beton dan aspal daur ulang menjadi praktik umum dalam upaya mengurangi limbah konstruksi dan meningkatkan efisiensi sumber daya.

Tema *Infrastructure & Performance* menyoroti hubungan antara CE dan peningkatan kinerja infrastruktur. Banyak penelitian berfokus pada perawatan jalan, bangunan, dan struktur beton dengan tujuan mempertahankan kinerja jangka panjang melalui pemeliharaan berbasis keberlanjutan.

Selanjutnya, tema *Economic & Cost Efficiency* memperlihatkan bahwa pendekatan CE dapat menekan biaya total pemeliharaan melalui optimasi sumber daya dan penerapan *life-cycle costing* (LCC). Hal ini menunjukkan bahwa CE tidak hanya bermanfaat dari sisi ekologis, tetapi juga ekonomis.

Terakhir, tema *Digitalization & Smart Technology* menggarisbawahi peran teknologi seperti BIM, GIS, IoT, dan *Decision Support System* (DSS) dalam mendukung *smart maintenance*. Inovasi digital memungkinkan monitoring kondisi aset secara real-time dan memperkuat pengambilan keputusan berbasis data.

Word cloud pada Gambar 6 memperlihatkan dominasi istilah *life*, *cycle*, *sustainable*, *road*, *materials*, *waste*, dan *cost*, yang menegaskan keterkaitan antara keberlanjutan, material reuse, dan efisiensi operasional dalam penerapan CE. Sementara itu, Gambar 7 menampilkan peta tematik (*theme map*) yang memvisualisasikan hubungan antar tema utama CE dan *maintenance*.



Gambar 6. Visualisasi Word Cloud

Selain dua visualisasi tersebut, hasil analisis konten juga dirangkum secara kuantitatif dalam **Tabel 1** berikut.

Tabel 1. Ringkasan Tematik Circular Economy dan Maintenance

Kode Tema	Kategori Utama	Fokus/Subtema	Kata Dominan yang Muncul	Persentase Kemunculan
A	<i>Lifecycle & Sustainability</i>	<i>Life-Cycle Assessment (LCA), Carbon Reduction, Sustainable Design</i>	<i>life, cycle, sustainability, climate, impact, environmental</i>	88%
B	<i>Material & Waste Management</i>	<i>Material Reuse, Recycling, Waste Minimization, Design for Disassembly</i>	<i>materials, waste, recycling, concrete, asphalt</i>	79%
C	<i>Infrastructure & Performance</i>	<i>Road/Pavement Maintenance, Building Retrofit, Service Life Evaluation</i>	<i>road, buildings, infrastructure, performance</i>	72%
D	<i>Economic & Cost Efficiency</i>	<i>Life-Cycle Costing (LCC), Value Engineering, Resource Optimization</i>	<i>cost, costs, development, supply, chain</i>	63%
E	<i>Digitalization & Smart Technology</i>	<i>BIM/GIS Integration, IoT Monitoring, Decision Support System (DSS)</i>	<i>information, systems, technologies, data, monitoring</i>	58%

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa tema-tema utama yang muncul dari literatur CE dan *maintenance* mencerminkan pergeseran paradigma menuju pemeliharaan berkelanjutan dan cerdas (*smart sustainable maintenance*) yang mengintegrasikan aspek teknis, ekonomi, dan teknologi dalam satu kerangka sirkular.

Research gap

Dari hasil pengelompokan konten literatur, muncul lima tema utama: (1) *Lifecycle & Sustainability*, (2) *Material & Waste Management*, (3) *Infrastructure & Performance*, (4) *Economic & Cost Efficiency*, dan (5) *Digitalization & Smart Technology*.

Kelima tema tersebut menunjukkan bahwa kajian *Circular Economy* (CE) dalam konteks *maintenance* telah mencakup aspek teknis, lingkungan, dan ekonomi secara cukup luas. Namun, analisis hubungan antar-tema memperlihatkan bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimalisasi teknis dan lingkungan (tema 1–3), sementara dimensi sosial, kebijakan, dan tata kelola belum banyak diintegrasikan. Selain itu, tema tentang indikator kinerja keberlanjutan (tema 3) belum menghasilkan standar pengukuran yang seragam, dan keterhubungan antara analisis ekonomi (tema 4) serta digitalisasi (tema 5) masih terbatas.

Oleh karena itu, dari kelima tema tersebut muncul tiga kesenjangan utama sebagaimana dijelaskan berikut. Pertama, sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi teknis dan lingkungan (tema 1–2), sementara dimensi sosial dan kebijakan seperti partisipasi pemangku kepentingan, perilaku pengguna, serta dukungan regulasi belum banyak dibahas (Rashidi, Wuni, & Hosseini, 2023). Kedua, indikator kinerja *Circular Economy* (CE) pada tahap pemeliharaan belum memiliki standar yang konsisten (tema 3), karena setiap studi menggunakan ukuran dan terminologi berbeda seperti *circularity rate* atau *recoverability index* (Akinade & Oyedele, 2019); (Akanbi, Oyedele, Davila Delgado, & Bilal, 2020). Ketiga, integrasi antara analisis ekonomi dan teknologi digital (tema 4–5) masih terbatas; model *Life*

Cycle Costing (LCC) jarang terhubung langsung dengan *Building Information Modelling* (BIM) atau *Decision Support System* (DSS), sehingga keputusan pemeliharaan belum sepenuhnya berbasis data dan nilai sirkular (Marzouk & Abdelaty, 2014); (Hosseini, Zhang, Wuni, & Tetteh, 2022). Secara keseluruhan, kesenjangan ini menunjukkan bahwa penerapan CE dalam maintenance masih didominasi oleh pendekatan teknis lingkungan, sementara aspek sosial–kebijakan, standarisasi indikator, serta integrasi digital ekonomi menjadi area penting untuk pengembangan riset selanjutnya.

Kerangka konseptual *Circular Maintenance Framework*

Kerangka konseptual ini dibangun berdasarkan sintesis antara temuan empiris dari analisis literatur dan landasan teoritis yang telah mapan dalam bidang manajemen aset, *Circular Economy* (CE), serta keberlanjutan infrastruktur. Hasil pemetaan literatur menunjukkan lima tema utama *life cycle & sustainability, material & waste management, infrastructure & performance, economic & cost efficiency*, serta *digitalization & smart technology* yang menggambarkan perkembangan penerapan CE dalam konteks pemeliharaan aset. Dari hubungan antar-tema, teridentifikasi tiga kesenjangan penting: (1) dominasi aspek teknis–lingkungan dan lemahnya dimensi sosial–kebijakan, (2) belum adanya standarisasi indikator CE, dan (3) terbatasnya integrasi antara analisis ekonomi dan teknologi digital.

Tabel 2 Konsep hubungan pada *Circular Maintenance Framework*

Hubungan	Teori Pendukung	Makna
Maintenance Strategies ↔ CE Principles	(ISO 55000, 2015); (Ellen MacArthur Foundation, 2013)	Maintenance adalah cara menjalankan prinsip CE di fase operasional aset.
CE Principles ↔ Sustainability Indicators	LCSA ((Guinee, Heijungs, & Huppes, 2011); Triple Bottom Line (Elkington, 1997)	Dampak penerapan prinsip CE dapat diukur melalui indikator keberlanjutan.
Sustainability Indicators ↔ Maintenance Strategies	RCM; ISO 21929	Indikator berfungsi sebagai umpan balik untuk memperbaiki strategi maintenance agar lebih berkelanjutan.

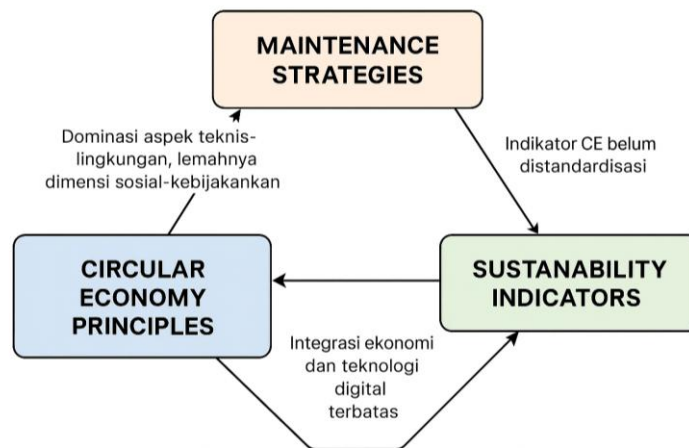
Penjelasan pertama terkait hubungan *Maintenance Strategies* dan *Circular Economy Principles*, berdasarkan teori asset management dan reliability-centered maintenance (ISO 55000, 2015); (Nowlan & Heap, 1978), kegiatan *preventive, corrective*, dan *predictive maintenance* berfungsi sebagai mekanisme utama dalam menjaga nilai aset sepanjang siklus hidupnya. Dalam kerangka CE, strategi ini menjadi sarana penerapan prinsip *reuse, repair, recycle*, dan *redesign* (Ellen MacArthur Foundation, 2013); (Kirchherr et al., 2017). Selama ini, penelitian tentang *Circular Economy* (CE) dan maintenance berkembang secara terpisah, CE lebih berfokus pada tahap desain dan pengelolaan limbah, sedangkan maintenance berfokus pada pemeliharaan aset selama masa pakai. Integrasi keduanya menempatkan *maintenance* sebagai motor operasional dalam penerapan prinsip sirkular, karena melalui kegiatan *preventive, corrective*, dan *predictive maintenance*, prinsip *reuse, repair, recycle*, dan *redesign* dapat dijalankan secara nyata dalam fase penggunaan aset.

Kedua hubungan antara *Circular Economy Principles* dan *Sustainability Indicators*, Prinsip CE berakar pada konsep industrial ecology dan performance economy (Stahel, 2016); (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017), yang menekankan perpanjangan umur aset melalui strategi material sirkular. Dampak penerapan prinsip tersebut diukur menggunakan sustainability indicators yang mengacu pada *Triple Bottom Line* (Elkington, 1997) Dan *Life-Cycle Sustainability Assessment* (Guinee et al., 2011). Prinsip Circular Economy didasarkan pada konsep industrial ecology dan performance economy, yang menekankan pentingnya memperpanjang umur aset melalui penggunaan material dan sumber daya secara sirkular. Untuk menilai keberhasilan penerapan prinsip ini, diperlukan indikator keberlanjutan yang mengintegrasikan dimensi teknis, ekonomi, lingkungan, dan sosial, sebagaimana dijelaskan dalam kerangka Triple Bottom Line dan Life Cycle Sustainability Assessment. Dengan demikian, pengukuran kinerja CE dalam kegiatan maintenance menjadi lebih objektif dan dapat dibandingkan antar proyek atau sistem.

Ketiga, hubungan antara Sustainability Indicators dan Maintenance Strategies, menjelaskan bagaimana indikator keberlanjutan tidak berhenti sebagai ukuran kinerja, tetapi dipakai kembali untuk memperbaiki strategi pemeliharaan (*maintenance strategies*) secara berkelanjutan dan berbasis data. Mengacu pada konsep continuous improvement dari Total Productive Maintenance (Nakajima, 1988) dan standar ISO 21929, indikator keberlanjutan berperan sebagai feedback loop bagi strategi pemeliharaan. Data teknis, biaya, dan sosial yang dikumpulkan secara digital (BIM/DSS) digunakan untuk memperbarui strategi preventive, corrective, dan predictive maintenance.

Bagian ini menjelaskan bahwa data hasil kinerja pemeliharaan (indikator keberlanjutan) tidak hanya menjadi ukuran keberhasilan, tetapi digunakan kembali untuk memperbaiki strategi maintenance berikutnya secara terus-menerus. Melalui dukungan sistem digital seperti BIM dan DSS, siklus perbaikan ini berlangsung adaptif dan berbasis data, sehingga sistem pemeliharaan tidak hanya efisien, tetapi juga sejalan dengan prinsip Circular Economy —

memperpanjang umur aset dan meminimalkan pemborosan sumber daya.



Gambar 7. *Circular Maintenance Framework*

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa integrasi antara *Circular Economy* (CE) dan maintenance merupakan strategi penting dalam mewujudkan pengelolaan infrastruktur berkelanjutan. Melalui pendekatan *scoping review* terhadap 57 artikel terindeks Scopus, ditemukan bahwa penelitian global mengenai topik ini terus berkembang, dengan fokus utama pada efisiensi sumber daya, pengurangan limbah, dan perpanjangan umur aset. Hasil analisis bibliometrik dan konten mengidentifikasi lima tema utama: *Lifecycle & Sustainability* menekankan pentingnya pemeliharaan sepanjang siklus hidup aset, *Material & Waste Management* terkait penerapan prinsip *reuse* dan *recycling*, *Infrastructure & Performance* menyoroti peningkatan kinerja layanan aset, *Economic & Cost Efficiency* menekankan efisiensi biaya sepanjang umur layanan, dan *Digitalization & Smart Technology* menunjukkan peran teknologi seperti BIM, IoT, dan DSS dalam mendukung pemeliharaan cerdas (*smart maintenance*). Dari sintesis kelima tema tersebut, muncul tiga kesenjangan penelitian utama, yaitu: lemahnya dimensi sosial dan kebijakan dalam penerapan CE, belum adanya standarisasi indikator keberlanjutan, dan terbatasnya integrasi antara analisis ekonomi dan digitalisasi dalam praktik pemeliharaan. Sebagai respon terhadap temuan tersebut, penelitian ini mengusulkan *Circular Maintenance Framework*, yaitu kerangka konseptual yang menghubungkan strategi pemeliharaan, prinsip *Circular Economy*, dan indikator keberlanjutan dalam satu sistem tertutup. *Framework* ini menempatkan maintenance sebagai penggerak utama implementasi prinsip sirkular melalui *preventive*, *corrective*, dan *predictive maintenance* yang dikendalikan oleh indikator keberlanjutan dan diperkuat oleh teknologi digital. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi konseptual penting bagi pengembangan model pengelolaan aset infrastruktur yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan, serta membuka peluang bagi studi lanjutan dalam bentuk validasi empiris dan penerapan kebijakan sirkular di sektor konstruksi dan infrastruktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Davila Delgado, M., & Bilal, M. (2020). Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. *Resources, Conservation & Recycling*, 153, 104585. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104585>
- Akinade, O. O., & Oyedele, L. O. (2019). Integrating construction waste into design decisions for sustainable building: A BIM-based circular economy framework. *Journal of Cleaner Production*, 223, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.120>
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Byers, E. (2025). Repair and refurbish strategies for post-disaster infrastructure recovery. *Construction Management and Economics*, 43(2), 120–135.
- Connolly, C. (2023). Circular economy practices among National Road Authorities (NRAs) in Europe. *Transportation Research Procedia*, 69, 221–229.
- Connolly, D., Jensen, P., & Berg, M. (2023). Circular economy in road construction and maintenance. *Transportation Research Procedia*, 78, 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.10.068>
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Capstone Publishing.
- Ellen MacArthur Foundation, E. M. (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an*

- accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Gryszpanowicz, M. (2023). Reuse of road demolition materials for sustainable maintenance in Poland. *Journal of Infrastructure Systems*, 29(3), 4023021.
- Guinee, J. B., Heijungs, R., & Huppes, G. (2011). Life Cycle Assessment: Past, present, and future. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 90–96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- Hosseini, M. R., Zhang, P., Wuni, I. Y., & Tetteh, D. E. (2022). Digitalization and circular economy in construction: A systematic literature review. *Journal of Building Engineering*, 52, 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>
- Institute, J. B. (2019). *JBIR Reviewer's Manual: Methodology for Scoping Reviews*. University of Adelaide.
- ISO. (2015). INTERNATIONAL STANDARD ISO 5500 Asset management — Overview, principles and terminology. *International Organization for Standardization*, 10406-1:20, 3–6.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the Circular Economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232.
- Mahpour, A. (2023a). Building maintenance cost estimation and circular economy: A machine learning approach. *Journal of Building Engineering*, 73, 106794. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106794>
- Mahpour, A. (2023b). Maintenance cost estimation using machine learning for circular construction. *Journal of Cleaner Production*, 396, 136419.
- Marzouk, M., & Abdelaty, A. (2014). BIM-based life cycle cost analysis for infrastructure projects. *Automation in Construction*, 55, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.013>
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to Total Productive Maintenance (TPM)*. Productivity Press.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability-Centered Maintenance*. U.S. Department of Defense.
- Oyebamiji, O., Akpan, E., & Rahman, M. (2025). Integrating circular economy in retrofit: Global practices in sustainable construction. *Journal of Cleaner Production*, 470, 140982.
- Pietrangeli, D., Caputo, F., & Rinaldi, A. (2023). Smart retrofit: An innovative and sustainable solution. *Machines*, 11(5), 523. <https://doi.org/10.3390/machines11050523>
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Primesti, N. P. (2024). Evaluation of Bridge Level of Service (LOS) Based on Technical and Non-Technical Indicators Using NVivo Analysis. *Proceedings of the International Conference on Smart Civil Engineering Research (ICSCER 2024)*. Paris.
- Rao, P. S., Shankar, S., & Kaur, R. (2025). Adopting circular economy in construction: A systematic review of drivers and challenges. *Frontiers in Built Environment*, 11, 1519219. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1519219>
- Rashidi, A., Wuni, I. Y., & Hosseini, M. R. (2023). A systematic review of circular economy adoption in the built environment: Toward a framework for sustainable asset management. *Resources, Conservation & Recycling*, 193, 106885. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106885>
- Shahidi Hamedani, M., Toossi, H., & Khosravi, S. (2025). Advancing the circular economy in construction through sustainable business models. *Frontiers in Built Environment*, 11, 1629769. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1629769>
- Stahel, W. R. (2016). *The Circular Economy: A user's guide*. Routledge.
- Torres Curado, R., Costa, D., & Pereira, C. (2024). Circular economy: Current view from the construction sector. *International Journal of Construction Management*. <https://doi.org/10.1080/15623599.2024.2364954>
- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., & Moher, D. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- Vetnes, S. (2024). Stakeholder perspectives on circular economy in road maintenance. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 128, 103711.