

WEB4 : EVOLUSI KONSEPTUAL, TEKNOLOGI PENDUKUNG, DAN TANTANGAN TATA KELOLA – SEBUAH TINJAUAN SISTEMATIS

Asrul Paelori Ahmad¹, Bayu Rizki²

¹ Program Studi Sistem dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sinjai

² Program Studi Ilmu Perpustakaan, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar

email: asrul48@umsi.ac.id

Abstrak

Web4 mencuat sebagai wacana generasi keempat *World Wide Web* yang mengonvergensi kecerdasan buatan otonom, infrastruktur terdesentralisasi, dan lingkungan fisik-digital yang imersif. Meskipun Komisi Eropa telah merumuskan visi kebijakannya sejak tahun 2023, landasan bukti akademis mengenai Web4 masih terbatas dan terus berkembang. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis bukti ilmiah mengenai Web4 berpatokan pada tiga aspek utama: pemetaan definisi dan posisinya terhadap generasi Web terdahulu, pemetaan tumpukan teknologi penyusun beserta tingkat kematangannya, serta analisis tantangan adopsinya. Tinjauan sistematis ini menggunakan protokol PRISMA 2020. Pengumpulan data memanfaatkan strategi pencarian Boolean dan MeSH melalui Consensus serta penelusuran pada pangkalan data IEEE Xplore, Wiley, Frontiers, dan SSRN. Dari hasil penyaringan dan deduplikasi, terpilih 20 studi relevan yang diterbitkan dalam rentang tahun 2020–2026. Hasil sintesis menunjukkan bahwa keragaman definisi Web4 terbagi ke dalam tiga kerangka konseptual: simbiosis manusia-mesin, koordinasi entitas otonom, dan logika internet berbasis kecerdasan buatan. Tumpukan teknologinya mencakup agen otonom, *blockchain*, Web Semantik, interoperabilitas agen, *Internet of Things* (IoT), dan *augmented reality* (AR), yang mayoritas masih berada pada fase prototipe hingga adopsi awal. Hambatan adopsi terberat berpusat pada masalah interoperabilitas, tata kelola kecerdasan buatan lintas yurisdiksi, dan perlindungan privasi identitas digital. Penelitian ini memberikan pemahaman komprehensif mengenai peta jalan Web4 dan ditutup dengan penyusunan agenda penelitian masa depan empat bagian serta identifikasi keterbatasan cakupan pencarian literature.

.Kata kunci: agen AI otonom, blockchain, internet of things, PRISMA 2020, Web4

Abstract

Web4 is emerging as the proposed fourth generation of the World Wide Web, converging autonomous artificial intelligence, decentralized infrastructure, and immersive physical-digital environments. Although the European Commission formulated its policy vision in 2023, academic evidence regarding Web4 remains limited and is only beginning to take shape. This study aims to synthesize scientific evidence on Web4 based on three main aspects: mapping its definitions and positioning relative to previous Web generations, identifying its foundational technology stack along with its maturity levels, and analyzing

key adoption challenges. This systematic review follows the PRISMA 2020 protocol. Data were gathered using Boolean and MeSH search strategies via Consensus, alongside searches across IEEE Xplore, Wiley, Frontiers, and SSRN. Following deduplication and relevance screening, 20 eligible studies published between 2020 and 2026 were included. The synthesis reveals a diversity of definitions structured around three conceptual frameworks: human-machine symbiosis, coordination of autonomous entities, and AI-driven internet logic. Its technology stack comprises autonomous agents, blockchain, the Semantic Web, agent interoperability, the Internet of Things (IoT), and augmented reality (AR)—all currently at prototype to early-implementation stages. Interoperability, cross-jurisdictional AI governance, and privacy-preserving digital identity present the most immature solutions. This review provides a comprehensive understanding of the Web4 roadmap, concluding with a four-part future research agenda and an acknowledgment of search coverage limitations..

Keywords: autonomous AI agents, blockchain, internet of things, PRISMA 2020, Web4

PENDAHULUAN

Perkembangan internet menunjukkan transformasi bertahap dalam hubungan antara manusia, mesin, dan informasi. **Web1** berorientasi pada akses pasif terhadap informasi melalui halaman statis, sedangkan **Web2** menghadirkan interaksi, kolaborasi, serta konten yang dihasilkan pengguna melalui platform digital. Selanjutnya, **Web3** memperkenalkan desentralisasi, kepemilikan aset digital, identitas terdesentralisasi, dan pemanfaatan *blockchain* sebagai infrastruktur ekonomi serta informasi yang lebih terdistribusi. Dalam perkembangan tersebut, **Web4** diproyeksikan sebagai generasi lanjutan yang menempatkan kecerdasan buatan (AI) otonom sebagai aktor aktif dalam ekosistem digital, bukan sekadar instrumen yang menunggu instruksi manusia.

Kajian Almeida mengenai Web4 mengidentifikasi lima dimensi yang berulang dalam literatur periode 2009–2017, termasuk komputasi pervasif dan ubikuitas, serta menunjukkan bahwa konsep Web4 telah berkembang tetapi belum terintegrasi secara komprehensif [1]. Selanjutnya, Komisi Eropa melalui Communication COM(2023) 442 memberikan perspektif kebijakan dengan menggambarkan Web4 dan dunia virtual sebagai lingkungan yang mempertemukan ruang digital dan fisik serta memungkinkan sistem cerdas bertindak secara proaktif atas nama pengguna [2].

Meskipun demikian, kajian akademik mengenai Web4 masih relatif terbatas. Klarin dan koleganya melalui pemetaan bibliometrik terhadap literatur metaverse serta tinjauan khusus Web4 menempatkan metaverse dan AI sebagai salah satu manifestasi potensial Web4 [3]. Sebagian besar penelitian lainnya masih membahas komponen secara terpisah, seperti tata kelola *blockchain*, arsitektur agen otonom, identitas digital, atau teknologi imersif. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kebutuhan terhadap kerangka analitis yang mampu mengintegrasikan aspek konseptual, teknologi, implementasi, dan tata kelola Web4 secara sistematis.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, tinjauan ini diarahkan pada tiga pertanyaan penelitian. **RQ1** mengkaji bagaimana Web4 didefinisikan dan diposisikan dalam evolusi generasi Web sebelumnya. **RQ2** mengidentifikasi teknologi yang membentuk infrastruktur inti Web4 serta mengevaluasi tingkat kematangan implementasinya. **RQ3** menganalisis

tantangan utama dalam adopsi Web4 dan mengidentifikasi area yang memerlukan penelitian lebih lanjut.

Metodologi tinjauan menggunakan **PRISMA 2020** beserta dokumen penjelasan dan elaborasinya untuk memastikan proses identifikasi, penyaringan, seleksi, dan pelaporan literatur berlangsung secara transparan dan sistematis [4][5]. Karena karakteristik penelitian Web4 mencakup aspek konseptual, teknis, dan kebijakan, penelitian ini juga mengadaptasi pedoman *systematic literature review* yang telah digunakan dalam bidang rekayasa perangkat lunak dan sistem informasi [6]. Strategi pencarian mencakup penyusunan *Boolean search string* dan istilah yang relevan untuk memperoleh literatur sesuai ruang lingkup kajian. Selanjutnya, hasil pencarian diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, kemudian disintesis berdasarkan ketiga pertanyaan penelitian. Analisis juga mempertimbangkan keterbatasan bukti empiris serta keterbatasan metodologis dalam proses tinjauan. Dengan pendekatan tersebut, penelitian diharapkan memberikan pemetaan yang lebih terstruktur mengenai perkembangan konsep, teknologi, tingkat kematangan, serta tantangan tata kelola Web4.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan sintesis tematik naratif (*narrative thematic synthesis*) yang dipandu oleh standar *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020. Alur operasional penelitian dilaksanakan melalui empat tahapan utama yang terstruktur sebagai berikut:

1. Kriteria Kelayakan (*Eligibility Criteria*)

Penyaringan literatur berpatokan pada kriteria inklusi dan eksklusi yang ditetapkan secara presisi sebelum proses pencarian dilakukan:

Kriteria Inklusi:

1. *Jenis Publikasi*: Artikel jurnal terindeks penelaah sejawat (*peer-reviewed*), prosiding konferensi IEEE/ACM, *working paper* dari repositori institusional terverifikasi (misalnya, SSRN, arXiv), atau dokumen kebijakan resmi dari lembaga pemerintah/antarpemerintah.
2. *Rentang Waktu*: Diterbitkan antara tahun 2017 hingga 2026 (merefleksikan periode pasca-pembahasan dasar konsep oleh Almeida [1]).
3. *Relevansi Substansi*: Secara eksplisit membahas *Web 4.0*, *Web4*, *Symbiotic Web*, atau *Smart Web*; atau membedah teknologi penyusun (agen AI otonom, *blockchain*, *Semantic Web*, IoT, *augmented reality*, metaverse, identitas digital) yang dihubungkan secara tegas dengan konsep Web4.
4. *Bahasa*: Bahasa Inggris atau Bahasa Indonesia.

Kriteria Eksklusi:

1. Studi yang membahas teknologi komponen secara terisolasi tanpa keterkaitan konseptual dengan Web4.
2. Artikel non-akademik (seperti blog, siaran pers, dan materi pemasaran vendor).

3. Literatur dengan metadata bibliografis (judul, penulis, tempat terbit, tahun, DOI, atau URL) yang tidak dapat diverifikasi secara independen.
4. Rekaman duplikat dari studi yang telah disertakan.

2. Strategi Pencarian Literatur (*Search Strategy*)

Pencarian literatur dilakukan secara komprehensif menggunakan mesin pencari akademik *Consensus* (yang mengintegrasikan basis data Semantic Scholar, Scopus, dan arXiv). Pencarian menerapkan kombinasi kata kunci eksplisit, istilah *free-text* pada Judul/Abstrak, serta istilah *Medical Subject Headings* (MeSH).

3. Pemilihan Studi dan Ekstraksi Data (*Study Selection & Data Extraction*)

1. Penyaringan Awal & Deduplikasi: Sebanyak 48 rekaman unik diperiksa judul dan abstraknya untuk diuji terhadap kriteria kelayakan.
2. Seleksi Akhir: Dihasilkan 20 studi relevan ($n = 20$) yang lolos kriteria inklusi ketat. Jumlah korpus yang relatif kecil ini merefleksikan bahwa kajian akademik mengenai *Web4* masih berada pada tahap awal (*emerging field*) sejak menguatnya wacana ini pada rentang 2020–2023 [3].
3. Ekstraksi Item Data: Setiap artikel yang terpilih diekstraksi ke dalam matriks data (Tabel 2) dengan variabel meliputi: (a) Identitas publikasi (penulis, tahun, lokasi, jenis publikasi), (b) Bentuk keterkaitan konseptual/komponen *Web4*, dan (c) Kontribusi penelitian inti yang memetakan Pertanyaan Penelitian (RQ1: Konsep/Definisi, RQ2: Kematangan Teknologi, dan RQ3: Tantangan Adopsi).

4. Metode Sintesis Data (*Data Synthesis*)

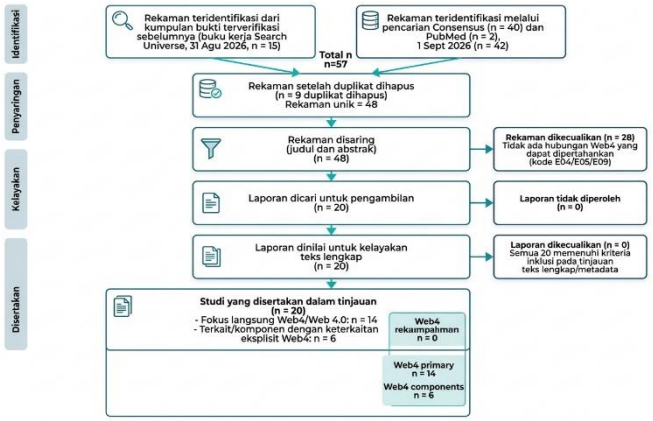
Mengingat tingginya heterogenitas desain studi yang mencakup tinjauan bibliometrik, kerangka konseptual, studi validasi empiris, dan survei teknis, penelitian ini menerapkan sintesis tematik naratif (*narrative thematic synthesis*). Data yang terkumpul dikelompokkan secara tematis berdasar pada RQ1, RQ2, dan RQ3. Khusus untuk penilaian kematangan teknologi (RQ2), kerangka *Technology Readiness Level* (TRL) dimanfaatkan sebagai lensa analitis deskriptif untuk mengategorikan tingkat kesiapan teknologi—mulai dari tahap kerangka teoritis, prototipe, hingga implementasi awal—sebagaimana dilaporkan oleh masing-masing studi sumber.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Seleksi Studi

Gambar 1 menyajikan diagram alir PRISMA 2020. Dua alur bukti yang diuraikan pada bagian metode menghasilkan 57 rekaman mentah. Sembilan rekaman teridentifikasi sebagai duplikat dan dihapus, menyisakan 48 rekaman unik untuk tahap penyaringan judul/abstrak. Sebanyak 28 rekaman dikecualikan pada tahap ini, terutama karena membahas teknologi komponen (seperti pembelajaran terfederasi berbasis blockchain untuk IoT, arsitektur agen web serbaguna, atau protokol komunikasi antargagen) tanpa keterkaitan yang dinyatakan secara eksplisit dan dapat dijustifikasi dengan konsep *Web4* (kode eksklusi E05); sejumlah kecil rekaman dikecualikan karena, setelah ditelaah lebih lanjut, topiknya sama sekali tidak berkaitan dengan konsep generasi web meskipun

memiliki kemiripan kata kunci secara superfisial (E04), atau karena berada di luar cakupan tinjauan ini (E09). Pengambilan dilakukan terhadap 20 laporan yang tersisa; seluruhnya berhasil diperoleh, baik dalam bentuk abstrak, metadata terindeks, maupun versi teks lengkap akses terbuka, dan dinyatakan memenuhi syarat berdasarkan penelaahan teks lengkap atau metadata lengkap



Gambar 1. Diagram alir PRISMA 2020

Karakteristik Studi

Tabel 2 merangkum 20 studi yang disertakan. Empat belas di antaranya membahas Web4 atau Web 4.0 secara eksplisit dan mendalam; enam merupakan studi komponen (sistem perpustakaan, pendidikan kedokteran, manajemen identitas digital, perangkat pengembangan web, pengukuran efikasi diri, dan interoperabilitas web berbasis agen) dengan keterkaitan yang dinyatakan secara eksplisit terhadap konsep Web4.[3].

Tabel 2. Ringkasan studi yang disertakan

Ref	Penulis, Tahun	Wadah / Jenis	Keterkaitan Web4	Kontribusi Inti
[3]	Klarin, Gorenskaia, Xiao & Seet, 2025	Systems Research and Behavioral Science; studi bibliometrik + konseptual	Langsung	Sintesis definisi utama; pemetaan bibliometrik kajian metaverse; mengusulkan metaverse + AI sebagai Web4
[7]	Ersöz, 2020	Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi; tinjauan	Langsung	Tinjauan awal paradigma Web 4.0 dan pembedingkaian simbiosis manusia-mesin
[8]	Permatasari, Qohar & Rachman, 2020	Virtual Archaeology Review; artikel penelitian	Langsung	Menerapkan progresi Web 1.0–4.0 pada platform warisan digital

Ref	Penulis, Tahun	Wadah / Jenis	Keterkaitan Web4	Kontribusi Inti
[9]	Wu & He, 2019	Prosiding IEEE DSA 2019; makalah konferensi	Langsung	Menganalisis perilaku akses jaringan media sosial dengan mengacu pada model Web4.0
[10]	Sharif, Samsudin & Amdan, 2020	International Journal of Interactive Mobile Technologies; artikel penelitian	Terkait (komponen)	Mengaitkan kesiapan perpustakaan akademik (Library 4.0) dengan ekosistem Web4 yang berkembang
[11]	Ibrahim, 2021	Qubahan Academic Journal; tinjauan	Langsung	Meninjau dimensi Web 1.0–4.0 (AI, big data, AR, M2M, cloud, IoT); sintesis awal yang banyak dikutip
[12]	Dineva, 2021	Makalah kerja SSRN	Langsung	Mengaitkan Web4 dengan e-learning cerdas, linked data, dan konvergensi cloud/IoT
[13]	Zhou, Li, Zhang, Sun & Xu, 2023	IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT); tinjauan	Langsung	Membandingkan infrastruktur jaringan Web3 dan Web4; mengusulkan kecerdasan terdesentralisasi native
[14]	Yadav, Khan & Tunekar, 2024	International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology; artikel penelitian	Langsung	Menerapkan teknologi Web 4.0 pada desain e-learning
[15]	Lewis, Popov & Fatima, 2024	Annals of Medicine; tinjauan	Terkait (komponen)	Menelusuri evolusi Web melalui metaverse dalam pendidikan kedokteran pascapandemi
[16]	Gürpınar, 2025	Frontiers in Blockchain; perspektif/kerangka kerja	Langsung	Kerangka enam lapis untuk agen AI otonom dan koordinasi perusahaan terdesentralisasi di bawah Web4

Ref	Penulis, Tahun	Wadah / Jenis	Keterkaitan Web4	Kontribusi Inti
[17]	Klarin, Gorenskaia, Xiao & Seet, 2025	Academy of Management Proceedings; makalah konferensi	Langsung	Membingkai metaverse sebagai Web4 dan membahas implikasinya bagi penelitian manajemen
[18]	Mester & Toth, 2025	Discover Artificial Intelligence; tinjauan	Terkait (komponen)	Meninjau peran AI dalam evolusi pengembangan web menuju teknologi web masa depan
[19]	Al Smadi, Salhi dkk., 2026	Computers, Materials & Continua; artikel penelitian	Langsung	Model keamanan dan kepercayaan hibrida AI-blockchain yang secara eksplisit dibingkai untuk Web 4.0
[20]	Duradoni, La Gamma, Serritella, Severino, Prifti & Guazzini, 2026	Psychological Reports; studi validasi	Terkait (komponen)	Memvalidasi skala efikasi diri internet yang secara eksplisit ditempatkan pada “era Web 4.0”
[21]	Jha dkk., 2025	International Journal of Scientific Research in Engineering and Management; tinjauan	Langsung	Meninjau kemajuan teknologi web; secara eksplisit menyebut Symbiotic Web (Web 4.0)
[22]	Abou Ali dkk., 2026	Big Data and Cognitive Computing; tinjauan integratif berbasis PRISMA	Langsung	Kerangka CET-WAIP yang memodelkan koevolusi AI-Web melalui tujuh tingkat kecerdasan melalui Web4
[23]	Xia dkk., 2026	Praprint arXiv (Sistematikasi Pengetahuan)	Langsung	Kerangka kepercayaan dua arah antara agen AI otonom dan blockchain di bawah Web4
[24]	Petrova, Bliznioukov, Puzikov & State, 2025/2026	Praprint arXiv; survei evolusioner terpadu	Terkait (komponen)	Menelusuri garis keturunan Multi-Agent Systems dan Semantic Web ke AI agentik; interoperabilitas Web of Agents

Ref	Penulis, Tahun	Wadah / Jenis	Keterkaitan Web4	Kontribusi Inti
[25]	Yang, Xu & Hui, 2025	Telecommunications Policy; kerangka konseptual	Terkait (komponen)	Kerangka multidimensi untuk tata kelola identitas digital/metaverse yang relevan dengan lapisan identitas Web4

RQ1: Evolusi Konseptual Web4.

Literatur memandang evolusi Web1–Web4 sebagai peningkatan otonomi, dari konsumsi informasi (*read-only*), produksi konten (*read-write*), kepemilikan terdesentralisasi (*read-write-own*), hingga eksekusi mandiri oleh AI (*read-write-own-execute*) [3], [11], [13]. Web4 mengintegrasikan big data, AR, M2M, komputasi awan, dan agen cerdas, meskipun definisinya belum terstandar secara universal [11]. Secara tematis, literatur ilmiah memetakan konseptualisasi Web4 ke dalam tiga kerangka utama:

1. Kerangka Simbiosis Manusia-Mesin: Berpatokan pada arahan kebijakan Komisi Eropa, kerangka ini menekankan konvergensi *ambient intelligence*, *Internet of Things* (IoT), transaksi terverifikasi *blockchain*, dan AR dalam menciptakan ekosistem imersif yang memadukan kapasitas kognitif manusia dan mesin [2], [3], [21].
2. Kerangka Koordinasi Entitas Otonom: Sebagaimana diartikulasikan oleh Gürpınar, paradigma ini berfokus pada pembentukan ekosistem perusahaan otonom, tempat agen AI saling berinteraksi, bertransaksi, dan mengorganisasi diri secara mandiri lintas domain fisik dan digital dengan intervensi manusia yang minimal
3. Kerangka Logika Internet Berbasis AI: Berakar dari diskursus *Web-of-Agents* terkini, perspektif ini menandai pergeseran mendasar dari logika internet yang berpusat pada manusia (*human-centric*) menuju sistem berbasis AI (*AI-driven logic*), di mana agen otonom bertindak sebagai partisipan primer jaringan, bukan sekadar instrumen pasif

RQ2: Teknologi Pendukung dan Kematangan Implementasi.

Secara tematis, literatur ilmiah memetakan konseptualisasi Web4 ke dalam tiga kerangka utama:

- **Kerangka Simbiosis Manusia-Mesin:** Berpatokan pada arahan kebijakan Komisi Eropa, kerangka ini menekankan konvergensi *ambient intelligence*, *Internet of Things* (IoT), transaksi terverifikasi *blockchain*, dan AR dalam menciptakan ekosistem imersif yang memadukan kapasitas kognitif manusia dan mesin [2], [3], [21].
- **Kerangka Koordinasi Entitas Otonom:** Sebagaimana diartikulasikan oleh Gürpınar, paradigma ini berfokus pada pembentukan ekosistem perusahaan otonom, tempat agen AI saling berinteraksi, bertransaksi, dan mengorganisasi diri secara mandiri lintas domain fisik dan digital dengan intervensi manusia yang minimal.

- **Kerangka Logika Internet Berbasis AI:** Berakar dari diskursus *Web-of-Agents* terkini, perspektif ini menandai pergeseran mendasar dari logika internet yang berpusat pada manusia (*human-centric*) menuju sistem berbasis AI (*AI-driven logic*), di mana agen otonom bertindak sebagai partisipan primer jaringan, bukan sekadar instrumen pasif.

Blockchain dan infrastruktur terdesentralisasi.

Dalam literatur Web4, *blockchain* dipandang sebagai fondasi kepercayaan utama yang memperluas fungsinya dari sebatas kepemilikan aset di Web3 menuju verifikasi identitas agen dan eksekusi transaksi otonom [13]. Berbagai studi—seperti model keamanan Al Smadi et al. berbasis AI/ML dan *zero-knowledge proof*, serta kerangka kepercayaan Xia et al. Menunjukkan bahwa implementasi teknologi ini masih berada pada tahap awal. Evaluasi tematis dan survei literatur menegaskan bahwa *blockchain* merupakan pendorong vital koordinasi antar-mesin [31], tetapi ekosistem standar khusus agen serta arsitektur ekonominya masih sangat belum matang dan belum terintegrasi di tingkat protokol

Semantic Web dan interoperabilitas agen.

Zhou dan koleganya berpendapat bahwa Web4 memerlukan kecerdasan bawaan yang tertanam dalam lapisan infrastruktur jaringan itu sendiri, termasuk jaringan komputasi terdesentralisasi dan perutean semantik, yang mereka bedakan dari arsitektur lapisan aplikasi pada Web3 [13]. Kajian evolusioner Petrova dan koleganya menelusuri kebutuhan ini melalui tiga generasi “upaya semantik” (koordinasi multiagen di sisi platform, anotasi semantic web di sisi data, dan interpretasi di sisi model oleh large language model), serta mengidentifikasi interoperabilitas antaragen berskala web sebagai masalah utama yang belum terpecahkan dan terus berlanjut hingga era AI berbasis agen saat ini

IoT, augmented reality, dan metaverse.

IoT berperan menyediakan kemampuan penginderaan dan aktuasi lingkungan bagi agen otonom, sedangkan augmented reality (AR) berfungsi sebagai antarmuka imersif untuk interaksi pengguna dalam ekosistem Web4 [3]. Klarin dan koleganya menempatkan metaverse sebagai manifestasi utama Web4, didukung lingkungan virtual persisten, avatar, dan ekonomi aset digital [3]. Penerapan teknologi tersebut juga berkembang pada pendidikan kedokteran dan tata kelola identitas digital, meskipun implementasinya masih berada pada tahap awal dan eksploratif

RQ3: Tantangan Implementasi.

Interoperabilitas menjadi salah satu kendala utama dalam pengembangan Web4. Heterogenitas protokol agen, standar platform yang bersifat proprietary, serta belum tersedianya lapisan komunikasi universal menghambat integrasi ekosistem *Web-of-Agents*. Selain itu, infrastruktur komputasi terdesentralisasi masih menghadapi

keterbatasan *throughput* dan latensi dibandingkan layanan *cloud* terpusat [13]. Dari perspektif standarisasi, integrasi identitas, aset digital, dan antarmuka memerlukan standar bersama yang hingga kini belum terbentuk secara komprehensif

Tata kelola dan kepercayaan.

Pengelolaan agen otonom yang mampu bertransaksi dan menyimpan aset digital dengan pengawasan manusia minimal menghadirkan tantangan tata kelola baru. Literatur menunjukkan bahwa mekanisme kepercayaan, keselarasan regulasi, akuntabilitas, dan tata kelola yang skalabel masih belum memadai. Studi lain juga menegaskan bahwa tata kelola XR dan agen AI terdesentralisasi masih bersifat antisipatif, dengan persoalan akuntabilitas, principal-agent, interoperabilitas, serta ketegangan antara sifat *trustless* dan otonomi agen berbasis LLM yang belum terselesaikan

Privasi dan identitas digital.

Yang, Xu, dan Hui mengidentifikasi lima tantangan utama identitas dalam Web4, yaitu interoperabilitas, aspek hukum, privasi dan manajemen identitas, risiko *deepfake* serta identitas sintetis, dan fragmentasi identitas. Sementara itu, Duradoni dan koleganya menyoroti dimensi psikologis dan kesiapan manusia menghadapi era Web4. Kajian mengenai *decentralized identifier* (DID) dan *verifiable credential* (VC) juga menunjukkan bahwa identitas *self-sovereign* masih berada pada tahap awal, dengan persoalan keamanan dan keterbatasan adopsi praktis

Kesetaraan dan akses.

Tidak satu pun studi yang disertakan menjadikan kesetaraan atau kesenjangan digital sebagai pertanyaan penelitian utama, meskipun beberapa menyebutkan secara singkat bahwa persyaratan komputasi dan infrastruktur untuk berpartisipasi dalam Web4 terdistribusi secara tidak merata. Tinjauan sistematis Effing mengenai etika metaverse, meskipun tidak secara khusus membahas Web4, menemukan kesenjangan serupa dalam literatur dunia virtual yang lebih luas mengenai topik ini, yang menunjukkan bahwa kesenjangan tersebut merupakan karakteristik bidang penelitian yang lebih luas.

Interpretasi Umum.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa Web4 masih merupakan konsep yang berkembang dan belum menjadi kategori teknologi yang mapan. Web4 merepresentasikan konvergensi berbagai arah penelitian, meliputi agen otonom, blockchain, interoperabilitas semantik, dan antarmuka imersif, tetapi belum menghasilkan sistem terintegrasi dengan interoperabilitas penuh. Landasan utama berasal dari kebijakan Komisi Eropa [2] dan kajian Klarin dkk. [3]. Sementara itu, sebagian besar penelitian lainnya masih berfokus pada komponen teknologi tertentu tanpa mengembangkan arsitektur Web4 secara menyeluruh

Keterbatasan Bukti. Dua keterbatasan dalam basis bukti yang mendasari tinjauan ini perlu dinyatakan secara jelas. Pertama, beberapa studi “Web4” yang paling menonjol

hanyalah makalah konferensi pendek, makalah kerja, atau opini, bukan penelitian yang tervalidasi secara empiris; hal ini membatasi tingkat keyakinan terhadap klaim mengenai tingkat kematangan yang dirangkum sebelumnya. Kedua, dimensi kesetaraan dan kesenjangan digital dalam adopsi Web4 lebih sering dinyatakan daripada diukur; tidak satu pun studi yang disertakan melaporkan data primer mengenai disparitas akses. Oleh karena itu, klaim mengenai aspek tata kelola dan hukum dalam literatur ini sebaiknya dipandang sebagai bersifat sementara.

Agenda Penelitian Masa Depan.

Empat area prioritas penelitian teridentifikasi. Pertama, kerangka konseptual terintegrasi yang menghubungkan simbiosis, koordinasi korporat, dan AI-native melalui pendekatan lintas disiplin [3]. Kedua, arsitektur tata kelola agen otonom yang perlu divalidasi secara empiris, khususnya terkait infrastruktur, perilaku, dan mekanisme kepercayaan. Ketiga, standar interoperabilitas Web-of-Agents yang mencakup komunikasi, discovery, dan manajemen status pada skala web. Keempat, identitas digital yang menjaga privasi, dengan fokus pada ketahanan terhadap serangan, kesetaraan, dan kesenjangan akses.

KESIMPULAN

Tinjauan ini, yang disusun sesuai dengan pedoman PRISMA 2020, mensintesis 22 studi yang diverifikasi secara independen (2019–2026) yang membahas Web4, baik secara langsung maupun melalui keterkaitan komponen yang dinyatakan secara eksplisit. Tiga simpulan dapat ditarik. Secara konseptual, Web4 cenderung mengarah pada konvergensi yang berpusat pada partisipasi otonom AI dalam proses jaringan dan integrasi fisik-digital; namun, belum ada definisi yang disepakati secara universal, dan literatur akademik yang menggunakan istilah ini masih terbatas dan baru berkembang. Dari sudut pandang teknologi, rangkaian teknologi pendukungnya, yang terdiri atas agen AI otonom, lapisan kepercayaan blockchain, interoperabilitas semantic-web-ke-agentic, IoT, dan extended reality, menunjukkan kemajuan nyata tetapi masih berada pada tahap awal, dengan interoperabilitas paling sering disebut sebagai tantangan teknis yang belum terselesaikan. Secara struktural, tata kelola AI lintas yurisdiksi dan identitas digital penjaga privasi merepresentasikan tantangan dengan solusi yang diusulkan paling belum matang dalam literatur yang ditinjau.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. L. Almeida, “Concept and dimensions of Web 4.0,” *International Journal of Computers & Technology*, vol. 16, no. 7, pp. 7040–7046, 2017, doi: 10.24297/ijct.v16i7.6446.
- [2] European Commission, *Communication COM(2023) 442: Web 4.0 and Virtual Worlds: A Head Start in the Next Technological Transition*, Brussels: European Commission, 2023.

- [3] A. Klarin, E. Gorenskaia, Q. Xiao, and P.-S. Seet, “Metaverse and artificial intelligence as Web 4.0: The next generation of the internet,” *Systems Research and Behavioral Science*, 2025, doi: 10.1002/sres.3209.
- [4] M. J. Page et al., “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews,” *BMJ*, vol. 372, p. n71, 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [5] M. J. Page et al., “PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews,” *BMJ*, vol. 372, p. n160, 2021, doi: 10.1136/bmj.n160.
- [6] B. Kitchenham and S. Charters, “Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering,” *Keele University and University of Durham, Tech. Rep. EBSE-2007-01*, 2007.
- [7] B. Ersöz, “Yeni Nesil Web Paradigması – Web 4.0,” *Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi*, 2020. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/bibtet/article/796030>
- [8] P. A. Permatasari, A. A. Qohar, and A. F. Rachman, “From web 1.0 to web 4.0: The digital heritage platforms for UNESCO's heritage properties in Indonesia,” *Virtual Archaeology Review*, vol. 11, no. 23, 2020, doi: 10.4995/var.2020.13121.
- [9] Q. Wu and L. He, “Analysis of social media user network access behavior based on Web4.0,” in *Proc. 2019 6th Int. Conf. Dependable Systems and Their Applications (DSA)*, 2019, doi: 10.1109/DSA.2019.00023.
- [10] S. M. Sharif, A. Z. H. Samsudin, and A. S. Amdan, “Evaluating the readiness of Malaysian academic university libraries towards Library 4.0,” *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 14, no. 6, 2020, doi: 10.3991/ijim.v14i06.13477.
- [11] A. K. Ibrahim, “Evolution of the Web: From Web 1.0 to 4.0,” *Qubahan Academic Journal*, vol. 1, no. 3, pp. 20–28, 2021, doi: 10.48161/qaj.v1n3a75.
- [12] S. Dineva, “Intelligent e-learning with new web technologies,” *SSRN Electronic Journal*, 2021, doi: 10.2139/ssrn.3983423.
- [13] Z. Zhou, Z. Li, X. Zhang, Y. Sun, and H. Xu, “A review of gaps between Web 4.0 and Web 3.0 intelligent network infrastructure,” in *2023 IEEE 9th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 2023, doi: 10.1109/WF-IoT58464.2023.10539509.
- [14] T. S. Yadav, M. Z. Khan, and M. K. Tungekar, “E-learning using Web 4.0,” *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 12, no. 9, 2024, doi: 10.22214/ijraset.2024.63733.
- [15] K. O. Lewis, V. Popov, and S. S. Fatima, “From static web to metaverse: Reinventing medical education in the post-pandemic era,” *Annals of Medicine*, vol. 56, no. 1, 2024, doi: 10.1080/07853890.2024.2305694.