

## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Landasan Teori

Pada bagian ini, dipaparkan teori-teori pendukung yang relevan dengan komponen penyusun sistem. Penjelasan meliputi karakteristik mikrokontroler dan sensor untuk akuisisi data, mekanisme protokol komunikasi CANBus dan MQTT untuk transmisi data yang efisien, serta arsitektur *backend* dan *frontend* modern yang digunakan dalam pembangunan *dashboard* pemantauan.

##### 2.1.1 Building Energy Management System (BEMS)

*Building Energy Management System* (BEMS) merupakan sistem yang dirancang untuk melakukan pemantauan kondisi lingkungan secara terus-menerus guna menjaga kualitas ruang serta memastikan keamanan operasional [10]. Sistem ini banyak diterapkan pada gedung perkantoran, fasilitas pendidikan, laboratorium, hingga area industri yang memerlukan pengawasan kondisi lingkungan secara ketat. Parameter yang biasanya dipantau mencakup suhu, kelembapan, intensitas cahaya, konsentrasi gas, tingkat kebisingan, serta getaran. Pemantauan parameter tersebut bertujuan mendeteksi perubahan abnormal yang dapat mengindikasikan potensi bahaya atau gangguan operasional [11].

Secara umum, BEMS terdiri atas empat komponen utama yaitu sensor, pengendali, sistem akuisisi data, dan antarmuka visualisasi. Sensor berfungsi sebagai perangkat pengukuran yang menangkap data fisik dari lingkungan. Data yang dikumpulkan kemudian melalui proses akuisisi dan *preprocessing* untuk memastikan bahwa informasi yang dikirimkan akurat dan representatif [12]. Tahap ini meliputi penyaringan data, normalisasi satuan, hingga pengemasan data ke dalam format yang sesuai untuk ditransmisikan. Selanjutnya, antarmuka visualisasi seperti *dashboard* menyediakan tampilan data secara *real-time* agar pengguna dapat dengan mudah memonitor kondisi lingkungan dan penggunaan energi. Integrasi yang baik antar komponen tersebut sangat menentukan keandalan sistem pemantauan.

Selain fungsi dasar pemantauan, BEMS juga digunakan untuk mendukung deteksi dini terhadap potensi bahaya. Misalnya, konsentrasi gas yang meningkat secara tiba-tiba dapat menunjukkan adanya kebocoran, sinyal getaran yang tidak

normal dapat menjadi indikator kerusakan mekanis, dan lonjakan tingkat kebisingan dapat mengindikasikan gangguan operasional atau ancaman keamanan [13]. Sistem pemantauan ini berperan dalam menjaga stabilitas lingkungan kerja dan keselamatan pengguna, sehingga menjadi komponen penting dalam manajemen risiko bangunan modern [14].

Data lingkungan yang dikumpulkan melalui sensor umumnya berubah terhadap waktu sehingga sering direpresentasikan menggunakan pendekatan matematis atau pemodelan data [15]. Salah satu bentuk representasi umum dari sinyal sensor ditunjukkan pada Rumus 2.1.

$$S = \int_{t_0}^{t_1} f(t), dt \quad (2.1)$$

dengan  $S$  menyatakan nilai kumulatif,  $f(t)$  menunjukkan nilai sensor pada waktu  $t$ , serta  $t_0$  dan  $t_1$  merupakan batas waktu pengamatan. Representasi ini berguna untuk mengevaluasi tren jangka pendek maupun jangka panjang serta mengidentifikasi kondisi lingkungan yang menyimpang dari pola operasional normal.

Pendekatan berbasis data dalam BEMS umumnya dimanfaatkan untuk analisis tren, evaluasi performa sistem, serta identifikasi kondisi yang menyimpang berdasarkan pola historis. Metode ini mencakup analisis statistik deskriptif, pemodelan deret waktu sederhana, serta perbandingan nilai ambang batas operasional untuk mendukung pengawasan kondisi lingkungan dan konsumsi energi [16]. Pendekatan tersebut membantu operator dalam memahami dinamika sistem dan melakukan tindakan korektif secara tepat waktu.

Secara keseluruhan, BEMS berkembang menuju platform pemantauan yang lebih terstruktur, andal, dan mudah diintegrasikan dengan teknologi modern. Sistem ini tidak hanya berfungsi untuk membaca data sensor, tetapi juga menyediakan informasi yang relevan untuk mendukung pengelolaan energi, keselamatan operasional, serta pemantauan kondisi lingkungan secara berkelanjutan.

### 2.1.2 Teknologi Komunikasi untuk Building Energy Management System

Teknologi komunikasi merupakan komponen penting dalam BEMS karena berfungsi menghubungkan sensor, perangkat akuisisi data, dan pusat pemantauan. Pemilihan protokol komunikasi yang tepat sangat memengaruhi keandalan, *latency*, serta efisiensi sistem dalam mengirimkan data kondisi lingkungan dan konsumsi

energi secara kontinu [17, 18].

Pada BEMS, komunikasi berkabel menggunakan media fisik seperti kabel tembaga, serat optik, atau jalur serial dengan protokol standar seperti Modbus RTU/TCP, BACnet, dan IEC 61850. Jenis komunikasi ini dikenal memiliki *latency* rendah dan keandalan tinggi sehingga banyak diterapkan pada sistem yang menuntut stabilitas serta kontinuitas data, termasuk pemantauan lingkungan dan energi pada bangunan modern [17].

Sebaliknya, komunikasi *wireless* menggunakan standar seperti ZigBee, Wi-Fi, dan Bluetooth. *Wireless Sensor Networks* berbasis ZigBee atau 6LoWPAN menawarkan fleksibilitas instalasi dan konsumsi daya rendah, meskipun interoperabilitas antarstandar masih menjadi tantangan [18]. Pada BEMS, komunikasi *wireless* umum digunakan untuk sensor energi atau sensor lingkungan yang tersebar atau ditempatkan pada area yang sulit dijangkau oleh kabel.

Meskipun menawarkan fleksibilitas, komunikasi *wireless* menghadapi beberapa kelemahan. Variasi *latency* dapat muncul akibat kondisi jaringan yang berubah, dan efisiensi energi sering kali lebih baik jika persyaratan waktu tidak terlalu ketat [19]. Interferensi dari perangkat lain seperti Wi-Fi atau microwave oven dapat meningkatkan *packet error rate* dan menurunkan kualitas sinyal ZigBee [20, 21]. Hambatan fisik seperti dinding bata atau material logam juga dapat mengurangi jarak komunikasi yang dapat diandalkan [18].

Agar BEMS dapat berfungsi dengan baik, teknologi komunikasi harus memenuhi persyaratan keandalan, *latency*, keamanan, serta fleksibilitas. Mekanisme *fault tolerance* diperlukan agar *node* sensor tetap dapat berkomunikasi meskipun terjadi gangguan jaringan [22]. Selain itu, *latency* harus ditekan seminimal mungkin pada aplikasi pemantauan *real-time* seperti pencatatan energi instan atau deteksi anomali konsumsi [18]. Pemilihan *channel* komunikasi yang optimal, kemampuan menambah *node* baru, serta perlindungan data melalui enkripsi menjadi faktor penting untuk menjaga performa sistem [23].

### 2.1.3 Controller Area Network (CANBus)

*Controller Area Network* (CANBus) pertama kali dikembangkan oleh Robert Bosch GmbH pada dekade 1980-an sebagai solusi untuk mengatasi kompleksitas sistem kabel pada kendaraan bermotor. [24] menjelaskan bahwa dengan semakin banyaknya subsistem elektronik yang terintegrasi ke dalam kendaraan modern, kompleksitas pengkabelan, biaya, dan risiko kegagalan sistem

meningkat. Pengembangan protokol komunikasi CAN dimulai pada tahun 1983 untuk menyediakan komunikasi *real-time* antar unit elektronik. Standar ini kemudian diadopsi secara internasional dan distandardisasi melalui ISO 11898 pada tahun 1993, dengan pembagian lebih lanjut pada tahun 2003: ISO 11898-1 untuk *data link layer* dan ISO 11898-2 untuk *physical layer high-speed CAN* [25].

Secara fundamental, CANBus merupakan *message-based protocol* yang memungkinkan komunikasi data antar *node* tanpa menggunakan alamat perangkat secara langsung. Sistem ini beroperasi dengan mekanisme *multi-master*, dimana setiap *node* memiliki kesempatan yang sama untuk mengirim data. Proses arbitrase menggunakan *bitwise arbitration* yang non-destruktif, sehingga pesan dengan prioritas lebih tinggi dapat dikirim lebih dahulu meskipun ada banyak *node* aktif secara bersamaan [26, 27]. Hal ini memungkinkan pemenuhan waktu respons dalam sistem kontrol *real-time* dengan kecepatan bus yang relatif rendah [24, 28].

Lebih lanjut, CANBus menawarkan sistem komunikasi yang bersifat deterministik karena menggunakan metode akses media CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) dengan mekanisme *Non-Destructive Bitwise Arbitration* [29]. Sifat deterministik ini menjamin bahwa waktu tunda (*latency*) pengiriman data dapat diprediksi, yang sangat krusial untuk sistem *real-time* [30, 31]. *Temporal determinism* dan *low latency* ini dijamin sepenuhnya oleh proses arbitrase CAN yang efisien [32].

Mekanisme kerjanya didasarkan pada prioritas *Message ID*. Pada bus CAN, logika '0' adalah dominan dan logika '1' adalah resesif. Jika dua *node* mengirim data secara bersamaan, proses arbitrase akan membandingkan bit ID dari kedua pesan [33]. *Node* yang mengirim bit resesif (1) akan mendeteksi adanya bit dominan (0) dari *node* lain di bus, sehingga ia akan mengalah dan menghentikan transmisi seketika tanpa merusak pesan dari *node* pemenang [34]. Hal ini memastikan pesan dengan prioritas lebih tinggi (ID lebih kecil) selalu terkirim tanpa *delay* tambahan akibat tabrakan data [30, 33].

Dari sisi arsitektur teknis, CANBus mendukung efisiensi dan keandalan komunikasi. [24] menyebutkan bahwa sistem ini bekerja pada kecepatan hingga 1 Mbps, dengan batas panjang bus maksimal 40 meter pada kecepatan tersebut. Mekanisme deteksi kesalahan canggih seperti *cyclic redundancy check (CRC)*, *acknowledgment*, dan *error frame* menjadikan protokol ini toleran terhadap gangguan. Setiap *node* juga memiliki fitur deteksi kesalahan, sinyalisasi, dan pemeriksaan diri untuk menjaga reliabilitas [28, 35].

Keunggulan utama CANBus adalah biaya implementasi yang rendah

dibandingkan protokol komunikasi industri lain. Dengan hanya dua kabel *twisted pair*, sistem ini menyediakan komunikasi yang cepat, andal, dan hemat biaya. Desain sederhana namun *robust* membuatnya fleksibel diterapkan pada berbagai skala jaringan. [36] menekankan bahwa CANBus menyediakan platform ideal untuk integrasi modul dengan perangkat lunak seperti LABVIEW untuk *system monitoring*. Protokol ini juga mendukung mekanisme *error checking* dan *fault tolerance*, sehingga cocok untuk aplikasi otomasi dan kontrol motor [37].

Dalam perkembangannya, pemanfaatan CANBus meluas ke otomasi industri dan sistem bangunan pintar. Protokol ini diimplementasikan pada sistem pencahayaan, HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*), serta *monitoring* energi secara *real-time*. Fleksibilitas dan keandalannya menjadikan CANBus salah satu protokol komunikasi yang relevan untuk pengelolaan energi modern.

#### 2.1.4 Protokol MQTT

*Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) merupakan protokol *messaging* berbasis *publish/subscribe* yang dirancang untuk lingkungan *Internet of Things* (IoT) dan sistem *Machine-to-Machine* (M2M) [38]. Protokol ini ideal untuk perangkat dengan sumber daya terbatas, beroperasi pada kondisi *bandwidth* rendah, serta menghadapi latensi jaringan yang tinggi [38, 39]. Sifatnya yang ringan, sederhana, dan efisien menjadikannya protokol yang sesuai untuk mentransmisikan data sensor secara kontinu dan *real-time* [38].

Berbeda dengan model *client/server* tradisional, MQTT menggunakan arsitektur *publish/subscribe* yang melibatkan tiga komponen utama, yaitu *Publisher*, *Subscriber*, dan *Broker* [40]. *Publisher* berfungsi mengirimkan data sensor, sementara *Broker* bertindak sebagai perantara pusat yang meneruskan pesan dari *Publisher* ke *Subscriber* berdasarkan *Topic* tertentu [40]. Pemisahan ini menciptakan *decoupling* spasial dan temporal yang baik, sehingga sistem menjadi lebih fleksibel dan skalabel [41].

Efisiensi MQTT didukung oleh ukuran *header* pesan sekecil 2 *byte* yang secara signifikan mengurangi *overhead* komunikasi [39, 42]. Selain itu, MQTT menyediakan tiga tingkat *Quality of Service* (QoS), yaitu QoS 0 (*at most once*), QoS 1 (*at least once*), dan QoS 2 (*exactly once*), yang memungkinkan penyesuaian jaminan pengiriman data sesuai dengan tingkat *criticality* yang dibutuhkan sistem [43].

Terakhir, MQTT dirancang untuk menghadapi kondisi koneksi jaringan



yang tidak stabil, menjadikannya protokol yang kuat untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan dan keamanan [39, 43]. Fitur kuncinya adalah *Last Will and Testament* (LWT), yang memungkinkan perangkat mendaftarkan pesan yang akan dikirimkan oleh *Broker* ketika perangkat tersebut terputus secara tiba-tiba [44]. Fitur LWT ini sangat penting dalam sistem pemantauan karena membantu mendeteksi kegagalan pada *node* sensor [44].

#### **2.1.5 Peran Sensor dalam Building Energy Management System**

Sensor merupakan elemen fundamental dalam BEMS karena menyediakan data dasar yang digunakan untuk menilai kondisi lingkungan dan pola konsumsi energi secara menyeluruh [45, 46]. Sistem ini biasanya mengintegrasikan berbagai jenis sensor yang masing-masing dirancang untuk memantau satu atau lebih parameter fisik tertentu. Kombinasi beberapa sensor dalam satu platform memungkinkan BEMS mendapatkan gambaran operasional bangunan yang lebih lengkap serta mendukung deteksi dini terhadap potensi risiko yang berkaitan dengan efisiensi energi maupun keselamatan [45].

Sensor suhu dan kelembapan digunakan untuk memantau kondisi termal ruang dan mengidentifikasi perubahan yang dapat memengaruhi kenyamanan, beban energi HVAC, atau keamanan lingkungan [47]. Sensor ini umumnya bekerja dengan mendeteksi perubahan resistansi atau kapasitansi yang berhubungan dengan variasi suhu dan kandungan uap air di udara.

Sensor cahaya berfungsi mengukur intensitas pencahayaan di lingkungan. Data ini dapat digunakan untuk menilai kecukupan cahaya dalam ruangan, melakukan optimasi penggunaan lampu berdasarkan tingkat cahaya alami, serta mendeteksi perubahan intensitas cahaya yang dapat memengaruhi efisiensi energi atau kenyamanan pengguna [45].

Sensor gas digunakan untuk mendeteksi keberadaan atau peningkatan konsentrasi gas tertentu di udara [48]. Pada BEMS, informasi ini penting untuk memastikan kualitas udara dalam ruangan tetap sesuai standar, memantau potensi polutan (seperti PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub>), serta mendeteksi kebocoran gas yang dapat mengancam kesehatan atau keselamatan penghuni gedung [47, 48].

Sensor kebisingan berfungsi memantau tingkat suara di lingkungan bangunan [49]. Sensor ini membantu mengidentifikasi pola kebisingan, mengevaluasi kualitas akustik ruang, serta mendeteksi suara yang berada di luar batas normal yang dapat mengindikasikan potensi gangguan operasional atau

kondisi tidak aman [49].

Sensor getaran digunakan untuk memantau aktivitas fisik atau perubahan struktural pada objek atau permukaan tempat sensor dipasang [50]. Dalam konteks BEMS, data getaran dapat memberikan informasi mengenai aktivitas mekanis peralatan, potensi keausan mesin, atau indikasi awal kerusakan struktural, sehingga berperan penting dalam *Structural Health Monitoring* [50].

Integrasi berbagai sensor ini memungkinkan BEMS bekerja secara komprehensif [46]. Data dari setiap sensor memberikan perspektif berbeda tentang kondisi lingkungan dan operasional bangunan, dan jika digabungkan dapat menghasilkan analisis yang lebih akurat. Dengan demikian, sensor tidak hanya berfungsi sebagai perangkat pengukur, tetapi juga sebagai sumber informasi penting yang mendukung pengambilan keputusan, peningkatan efisiensi energi, serta deteksi dini terhadap kondisi lingkungan atau sistem yang tidak normal.

#### **2.1.6 Monitoring dan Visualisasi Data pada Building Energy Management System**

Monitoring dan visualisasi data merupakan komponen inti dalam BEMS karena berfungsi memastikan kondisi lingkungan tetap aman, efisien secara energi, serta sesuai dengan standar operasional bangunan modern. Data lingkungan yang dikumpulkan dari berbagai sensor perlu diproses, dianalisis, dan divisualisasikan secara informatif agar operator BEMS dapat mengambil keputusan yang tepat. *Visual feedback* terhadap parameter lingkungan dan energi terbukti efektif dalam meningkatkan kesadaran pengguna terhadap perubahan kondisi ruang maupun potensi bahaya, sebagaimana dievaluasi melalui enam bentuk visualisasi pada studi *randomized controlled trial* untuk menentukan media visualisasi yang optimal [51]. Salah satu pendekatan yang umum diterapkan pada BEMS adalah pengembangan *dashboard* interaktif, yang memungkinkan pengguna memantau parameter lingkungan dan energi secara real-time, mengidentifikasi pola konsumsi, serta mendeteksi perilaku sistem yang menyimpang dari kondisi normal. Dalam praktiknya, *environmental dashboard* mampu menyederhanakan ribuan *data point* sensor menjadi tampilan yang lebih mudah dipahami, meskipun masih terdapat tantangan seperti deteksi kerusakan sensor atau identifikasi perangkat *monitoring* yang bermasalah [52].

Teknik visualisasi berperan penting dalam membantu interpretasi data lingkungan dan energi yang kompleks pada BEMS. Beberapa metode visualisasi

yang umum digunakan mencakup grafik berbasis waktu untuk melihat tren perubahan *parameter*, *heatmap* untuk menunjukkan intensitas kejadian pada lokasi tertentu, serta diagram komposisi untuk membandingkan kontribusi tiap *parameter* seperti tingkat kebisingan, kualitas udara, intensitas cahaya, atau beban energi. Analisis korelasi menggunakan *heatmap* juga sering digunakan untuk memahami hubungan antar *parameter* lingkungan dan operasional bangunan, di mana warna pada matriks korelasi menunjukkan tingkat keterkaitannya [53]. Evaluasi faktor manusia terhadap *visualization dashboard* pada usaha kecil juga menunjukkan bahwa kualitas visual, beban kerja kognitif, dan efektivitas representasi sangat memengaruhi performa serta tingkat pemahaman pengguna [54]. Representasi visual semacam ini sangat membantu dalam mengidentifikasi kondisi abnormal seperti peningkatan gas berbahaya, getaran berlebih, lonjakan kebisingan, maupun pola konsumsi energi yang tidak wajar.

Studi implementasi sistem pemantauan pada *smart building* menunjukkan bahwa penggunaan *dashboard* interaktif dalam BEMS dapat meningkatkan kesadaran dan respons operator terhadap perubahan kondisi lingkungan serta pola konsumsi energi secara signifikan. Sistem pemantauan cerdas yang terintegrasi dengan layanan tambahan seperti prediksi cuaca bahkan mampu memberikan rekomendasi tindakan, misalnya mengoptimalkan ventilasi, pencahayaan, atau beban energi berdasarkan kondisi luar ruang [55]. Pada tingkat laboratorium, sistem IoT untuk *monitoring* kondisi lingkungan juga terbukti mampu melakukan pemantauan otomatis berdasarkan *parameter* seperti jadwal, keberadaan manusia, maupun batas ambang tertentu [56].

Di sektor industri, visualisasi data lingkungan dan energi melalui BEMS membantu operator mengidentifikasi potensi risiko dan menjaga efisiensi operasional melalui pengambilan keputusan yang lebih cepat dan berbasis data. Desain antarmuka *dashboard* yang memanfaatkan elemen 2D, 3D, hingga fitur *gamification* terbukti dapat meningkatkan pemahaman pengguna terhadap kondisi lingkungan serta memperkuat motivasi dalam menjaga keselamatan ruang [57]. Sistem IoT untuk pemantauan lingkungan secara *real-time* juga mampu menjaga tingkat kesalahan relatif pada batas rendah, sehingga meningkatkan keandalan sistem BEMS [58]. Implementasi *dashboard monitoring* berbasis web pada institusi pendidikan bahkan terbukti mampu memenuhi standar pemantauan formal dan mendukung operasional fasilitas melalui pelaporan kondisi lingkungan yang akurat dan mudah dipantau [59].



## 2.2 Systematic Literature Review



UMN

U N I V E R S I T A S  
M U L T I M E D I A  
N U S A N T A R A

Tabel 2.1. Integrasi CANBus, IoT, dan Sistem Sensor pada BEMS

No	Referensi	Fokus Penelitian	Metodologi & Dataset	Temuan Utama & Metrik	Keterbatasan	Relevansi
1	Asadzadeh et al. (2020)	Integrasi sistem sensor dan manajemen gedung untuk keselamatan ruang	<i>Systematic review</i> , literatur 2010–2020	Integrasi sensor meningkatkan deteksi dini bahaya dan efisiensi pengelolaan fasilitas	Minim studi implementasi operasional	Dasar integrasi sensor pada BEMS
2	Matin et al. (2023)	IoT untuk manufaktur berkelanjutan dan keselamatan operasional gedung	<i>Systematic review</i> , literatur IoT industri	IoT meningkatkan pemantauan kondisi dan efisiensi operasional	Isu interoperabilitas perangkat	Relevan untuk arsitektur BEMS berbasis IoT
3	Bibri et al. (2023)	IoT dan sistem sensor untuk smart building	<i>Systematic review</i> , 235 dokumen	Sensor terdistribusi meningkatkan pemantauan lingkungan dan energi	Kompleksitas integrasi sistem	Relevan untuk pengembangan BEMS
4	Wang & Chung (2021)	Sistem keselamatan kritikal dengan komunikasi deterministik	<i>Systematic review</i> , 92 artikel	CANBus unggul dalam komunikasi real-time dan keandalan tinggi	Kurang studi pada gedung	Dasar penggunaan CANBus pada BEMS
5	Almehdhar et al. (2023)	Keamanan jaringan CANBus	<i>Systematic review</i> , studi CANBus	CANBus rentan serangan tanpa mekanisme keamanan tambahan	Dataset uji terbatas	Relevan untuk keandalan komunikasi BEMS
6	Reddy & Muralidhar (2023)	Arsitektur jaringan kendaraan berbasis CAN	<i>Systematic review</i>	CANBus mendukung transmisi data deterministik	Fokus kendaraan, bukan gedung	Referensi adaptasi CANBus ke BEMS
7	Xu et al. (2023)	Digital twin dan monitoring IIoT	<i>Systematic review</i> , aplikasi IIoT	Monitoring real-time meningkatkan keandalan sistem	Integrasi kompleks	Relevan untuk BEMS industri
8	Albaseer et al. (2023)	Keamanan komunikasi CANBus	Survey dan taksonomi	Dibutuhkan mekanisme deteksi anomali jaringan	Belum standar	Penting untuk BEMS berbasis CANBus
9	Miller et al. (2025)	IoT untuk pemantauan lingkungan gedung	<i>Systematic review</i> , 2010–2024	IoT meningkatkan efisiensi energi dan respons sistem	Interoperabilitas perangkat	Sangat relevan untuk BEMS
10	Tamascelli et al. (2024)	Deteksi kesalahan sistem industri	<i>Systematic review</i> , 308 paper	Monitoring sensor penting untuk sistem industri	Ketergantungan kualitas sensor	Relevan untuk fault monitoring BEMS
11	Wang et al. (2023)	Monitoring lingkungan industri multimodal	Sensor lingkungan dan visual	Respons sistem cepat pada kondisi abnormal	Uji lokasi terbatas	Relevan untuk BEMS skala besar

Lanjut ke halaman berikutnya

Lanjutan dari Tabel 2.1

No	Referensi	Fokus Penelitian	Metodologi & Dataset	Temuan Utama & Metrik	Keterbatasan	Relevansi
12	Hino et al. (2018)	Monitoring kualitas lingkungan berbasis data inspeksi	Analisis data lingkungan	Peningkatan efektivitas pengawasan lingkungan	Potensi bias data	Relevan untuk modul lingkungan BEMS
13	Potharaju et al. (2025)	Keandalan sensor lingkungan	Analisis kegagalan sensor	Pendekatan sistematis meningkatkan reliabilitas sensor	Perlu validasi luas	Relevan untuk sensor BEMS
14	Chen et al. (2025)	Monitoring kualitas air fasilitas industri	Spektroskopi dan sistem monitoring	Akurasi pemantauan tinggi	Fokus parameter tertentu	Relevan untuk BEMS air limbah
15	Liu & Wang (2021)	Arsitektur sistem keselamatan lingkungan	Pendekatan microservice	Sistem fleksibel dan terukur	Tidak ada evaluasi lapangan	Relevan untuk arsitektur BEMS
16	Ramadan et al. (2025)	Monitoring polusi industri terdistribusi	Sistem terdistribusi dan blockchain	Integritas data meningkat	Latensi sistem	Relevan untuk BEMS industri
17	Kumar (2025)	Pemantauan kualitas air minum	Sistem sensor real-time	Pemantauan kontinu efektif	Parameter terbatas	Relevan untuk fasilitas BEMS
18	Dey et al. (2021)	Monitoring bahaya lingkungan ekstrem	Sistem pemantauan lingkungan	Respons cepat terhadap kondisi ekstrem	Validasi terbatas	Relevan untuk area berisiko
19	Priyadharshini & Ramesh (2025)	Monitoring kualitas air berbasis IoT	IoT-WSN	Sistem efektif memantau variasi lingkungan	Akurasi bervariasi	Relevan untuk BEMS berbasis sensor

Temuan utama dari tinjauan pustaka ini menegaskan peran penting protokol CANBus sebagai tulang punggung komunikasi data dalam sistem pemantauan dan manajemen gedung modern. CANBus digunakan secara luas untuk mengumpulkan serta mentransmisikan data sensor secara real-time dari berbagai subsistem pemantauan energi dan lingkungan bangunan. Karakteristik komunikasi deterministik dan keandalan tinggi menjadikan CANBus sesuai untuk sistem dengan kebutuhan respons cepat dan stabilitas operasional [60, 61, 62, 63].

Data sensor yang diperoleh melalui jaringan CANBus dan IoT kemudian diproses pada lapisan sistem pemantauan untuk mendukung fungsi observasi kondisi lingkungan, pengawasan konsumsi energi, serta pemberian peringatan dini. Informasi ini disajikan melalui *dashboard* pemantauan, grafik tren, dan sistem notifikasi yang membantu operator gedung dalam memahami kondisi operasional secara menyeluruh.

Integrasi jaringan sensor dan CANBus berkontribusi signifikan terhadap peningkatan efisiensi operasional dan keandalan sistem bangunan. Pemantauan *real-time* memungkinkan identifikasi dini gangguan sensor, kegagalan perangkat, serta kondisi lingkungan yang tidak normal. Pendekatan ini telah diterapkan pada berbagai konteks seperti keselamatan industri, manajemen fasilitas, dan sistem infrastruktur berskala besar [63, 64, 65].

Meskipun demikian, sejumlah tantangan masih dihadapi dalam implementasi BEMS berbasis CANBus dan IoT. Tantangan utama meliputi interoperabilitas antar perangkat dari berbagai vendor, skalabilitas sistem saat jumlah sensor meningkat, serta keamanan data dalam proses transmisi dan penyimpanan [60, 61, 66]. Selain itu, banyak studi menekankan perlunya validasi sistem pada lingkungan operasional nyata untuk memastikan keandalan jangka panjang.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa integrasi jaringan sensor, IoT, dan CANBus merupakan fondasi utama dalam pengembangan BEMS modern. Pendekatan ini memungkinkan sistem pemantauan yang terstruktur, andal, dan mampu beroperasi secara kontinu pada kondisi lingkungan bangunan yang dinamis, serta menjadi dasar yang kuat untuk pengembangan fitur analitik lanjutan pada tahap penelitian berikutnya.