

BAB 2

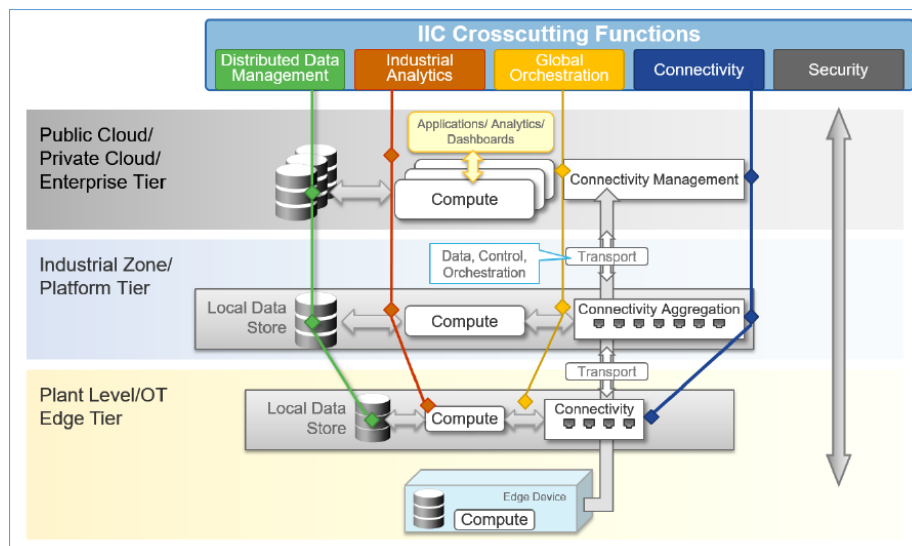
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Pada subbab ini dijelaskan teori-teori yang mendasari perancangan dan implementasi sistem pada proyek akhir ini. Pembahasan meliputi konsep edge-industrial, trainer kit sebagai media pembelajaran, Revolution Pi beserta modul pendukungnya, sensor dan aktuator, bahasa pemrograman Python, platform ThingsBoard Community Edition, integrasi PostgreSQL, serta protokol komunikasi MQTT sebagai teknologi pendukung dalam sistem monitoring dan kontrol yang dikembangkan.

2.1.1 Konsep Edge-Industrial

Konsep edge-industrial merupakan penerapan edge computing pada sistem Industrial Internet of Things (IIoT), di mana proses komputasi, analisis data, dan pengambilan keputusan dilakukan di dekat sumber data (edge), seperti pada perangkat atau controller industri, bukan sepenuhnya di cloud. Hal ini dijelaskan bahwa edge computing adalah sistem komputasi yang melakukan pemrosesan data “di tepi jaringan, dekat dengan sumber data” (Introduction to Edge Computing in IIoT, n.d.).



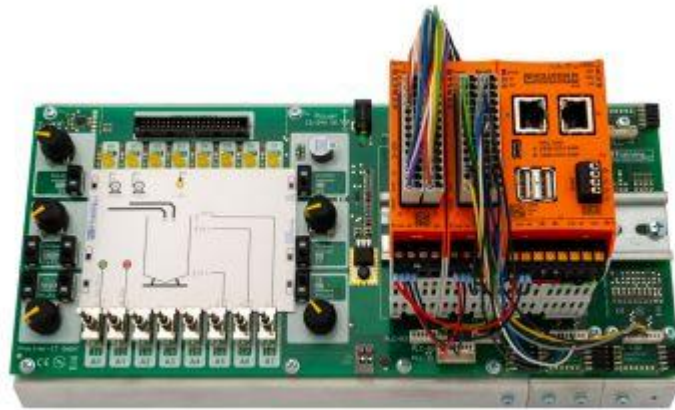
Gambar 2. 1 Konsep Edge-Industrial¹

¹ Introduction to Edge Computing in IIoT. (n.d.). Retrieved www.iiconsortium.org/IISF

Gambar 2.1 menggambarkan arsitektur edge-industrial dalam sistem IIoT yang terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu Plant/OT Edge Tier, Industrial/Platform Tier, dan Enterprise/Cloud Tier, yang saling terhubung untuk mendukung proses monitoring dan kontrol secara terintegrasi. Pada lapisan paling bawah (edge tier), perangkat seperti sensor, aktuator, dan edge device melakukan akuisisi data serta pemrosesan dan kontrol secara real-time dengan latensi rendah. Data kemudian diteruskan ke lapisan tengah (platform tier) yang berfungsi untuk agregasi konektivitas, pengolahan data lanjutan, serta orkestrasi sistem. Selanjutnya, data dikirim ke lapisan atas (cloud/enterprise tier) untuk keperluan visualisasi, analisis, dan penyimpanan dalam skala besar. Selain itu, terdapat fungsi lintas layer seperti manajemen data terdistribusi, analitik industri, orkestrasi global, konektivitas, dan keamanan yang memastikan seluruh sistem bekerja secara efisien, terintegrasi, dan andal. Dengan arsitektur ini, sistem mampu menggabungkan kecepatan pemrosesan di sisi edge dengan kemampuan analisis dan monitoring di cloud secara optimal.

2.1.2 *Trainer Kit sebagai Media Pembelajaran Sistem Kontrol Industri*

Trainer kit merupakan media pembelajaran berbasis praktikum yang digunakan untuk membantu peserta didik memahami konsep melalui penerapan langsung pada sistem nyata. Trainer kit menyederhanakan sistem kompleks menjadi bentuk yang mudah dipahami, sehingga memungkinkan siswa menghubungkan teori dengan implementasi, khususnya dalam pembelajaran sistem kontrol seperti PLC, serta meningkatkan pengalaman belajar melalui pendekatan *learning by doing* (Wicaksono, 2017).



Gambar 2. 2 PLC Trainer Kit berbasis Revolution Pi²

Dalam implementasinya, Revolution Pi digunakan sebagai controller utama yang menjalankan program kontrol, misalnya menggunakan lingkungan pengembangan Python. Program yang dibuat dapat langsung diunggah ke perangkat dan diuji secara real-time melalui trainer kit. Hal ini memungkinkan setiap fungsi program dapat disimulasikan, diuji, dan dianalisis secara langsung menggunakan berbagai perangkat input dan output yang tersedia.

2.1.3 *Revolution Pi Connect SE*

Revolution Pi Connect SE merupakan komputer industri berbasis Raspberry Pi Compute Module yang dirancang khusus untuk aplikasi otomasi industri dan Industrial Internet of Things (IIoT). Perangkat ini berfungsi sebagai pengendali industri yang mampu menjalankan berbagai aplikasi pemrosesan data, monitoring, dan kontrol dalam satu sistem yang terintegrasi. Revolution Pi Connect SE dilengkapi dengan prosesor quad-core ARM Cortex-A72 berkecepatan 1.5 GHz, memori LPDDR4, serta penyimpanan eMMC yang memungkinkan perangkat menjalankan sistem operasi berbasis Linux secara stabil.

² <https://www.plc4training.com/en/revpi-trainingsboard-v1206pi.html>



Gambar 2. 3 Revolution Pi Connect SE³

Dengan sistem operasi berbasis Linux, Revolution Pi memberikan fleksibilitas yang tinggi bagi pengembang untuk membuat dan menjalankan berbagai aplikasi industri. Pengguna dapat mengembangkan program untuk pengolahan data, sistem monitoring, maupun kontrol perangkat secara langsung pada perangkat tersebut. Kemampuan ini menjadikan Revolution Pi sebagai salah satu platform yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem otomasi industri modern, khususnya dalam implementasi konsep Industrial Internet of Things (IIoT) dan edge computing (*RevPi Connect S/SE | Industrial Raspberry Pi*, n.d.).

³ <https://revolutionpi.com/shop/en/revpi-connect-se>

Flash memory	8 GB (Item No.: 100368), 16 GB (Item No.: 100369), 32 GB (Item No.: 100370)
Number of digital inputs	1
Digital input type	24 V control voltage (e.g. for power-good signal of a UPS)
Input threshold	Approx. 3.0 V (0 → 1) resp. 2.3 V (1 → 0)
Input protection	Against overvoltage, negative voltages
Number of digital outputs	1
Output type	Relay contact, approval up to 30 V switching voltage (e.g. for power supply of a router)
Maximum current load of the contact	2 A @ 30 V DC (resistive load!)
Software interface of input and output	via GPIOs and process image. Output is optionally switched by hardware watchdog.
Hardware watchdog functionality	Can be disabled by bridging the 4-pole screw-type terminal. Reset by toggling a GPIO or alternatively a bit in the process image.
Hardware watchdog interval	Trigger after approx. 60 seconds without toggling the reset bit.
Compatible RevPi modules	• All RevPi I/O modules can be connected via the PiBridge system bus. • All RevPi Con modules can be connected via the ConBridge system bus. • Not compatible with RevPi Gateways
ESD protection	4 kV / 8 kV (according to EN 61131-2 and IEC 61000-6-2)
EMI tests	Passed (according to EN 61131-2 and IEC 61000-6-2)
Surge/Burst tests	Passed (according to EN 61131-2 and IEC 61000-6-2)
Buffer time RTC	Min. 24 h
Optical display	6 status LEDs (bi-color), two of them freely programmable
Conformity	CE, RoHS, REACH, UKCA
UL certification	UL-File-No. E494534 NOTE: The device may only be supplied from circuits that comply with Class 2 or Safety Extra Low Voltage (SELV) according to Class 9.4 of UL 61010-1.

Gambar 2. 4 Datasheet Revpi Connect SE⁴

Pada Gambar 2.4 menjelaskan bahwa perangkat ini merupakan industrial edge controller dengan memori flash 8–32 GB, memiliki 1 input digital (24 V) dengan ambang sekitar 3.0 V (ON) dan 2.3 V (OFF), serta 1 output digital berupa relay dengan kemampuan switching hingga 30 V DC dan arus maksimum 2 A (beban resistif). Perangkat ini dilengkapi proteksi input terhadap tegangan berlebih dan tegangan negatif, serta mendukung kontrol I/O melalui GPIO dan process image. Fitur tambahan meliputi watchdog hardware dengan interval sekitar 60 detik, kompatibilitas dengan modul RevPi melalui PiBridge/ConBridge,

⁴ <https://revolutionpi.com/shop/en/revpi-connect-se>

perlindungan ESD dan EMI sesuai standar industri, buffer RTC minimal 24 jam, serta indikator 6 LED. Selain itu, perangkat telah memenuhi standar sertifikasi seperti CE, RoHS, REACH, dan UL, sehingga cocok digunakan untuk aplikasi otomasi industri yang andal dan aman (*RevPi Connect S/SE | Industrial Raspberry Pi*, n.d.).

2.1.4 Revolution Pi DIO

RevPi DIO (Digital Input/Output) merupakan modul ekspansi dalam keluarga Revolution Pi yang digunakan untuk menambahkan fungsi input dan output digital pada sistem otomasi industri. Modul ini menyediakan 14 kanal digital input dan 14 kanal digital output yang dapat digunakan untuk menghubungkan berbagai perangkat seperti sensor digital, push button, relay, atau aktuator lainnya. Dengan adanya modul ini, sistem Revolution Pi dapat berfungsi lebih optimal dalam membaca sinyal dari perangkat lapangan sekaligus memberikan sinyal kontrol kepada perangkat eksternal.



Gambar 2. 5 Revolution Pi DIO⁵

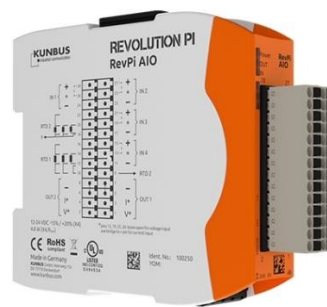
RevPi DIO terhubung dengan modul utama Revolution Pi seperti RevPi Connect atau RevPi Core melalui antarmuka PiBridge, yaitu sistem bus internal yang digunakan untuk komunikasi antar modul dalam arsitektur modular Revolution Pi. Melalui mekanisme ini, beberapa modul I/O dapat ditambahkan untuk memperluas kemampuan sistem sesuai kebutuhan aplikasi industri. Modul RevPi DIO biasanya menggunakan tegangan kerja sekitar 12–24 V DC, yang merupakan standar umum dalam sistem otomasi industri sehingga kompatibel

⁵ <https://revolutionpi.com/shop/en/digital-io-expansion-module>

dengan berbagai sensor dan aktuator industri (*RevPi DIO* | *Industrial Raspberry Pi*, n.d.).

2.1.5 Revolution Pi AIO

RevPi AIO (Analog Input/Output) merupakan modul ekspansi analog dari keluarga Revolution Pi yang digunakan untuk menambahkan kemampuan pembacaan dan pengendalian sinyal analog pada sistem otomasi industri. Modul ini menyediakan 4 kanal analog input, 2 kanal analog output, serta 2 kanal RTD (Resistance Temperature Detector) yang dapat digunakan untuk menghubungkan berbagai sensor analog seperti sensor suhu, tekanan, atau level. Dengan adanya modul ini, sistem Revolution Pi dapat membaca nilai analog dari perangkat lapangan dan juga memberikan sinyal analog untuk mengendalikan aktuator tertentu.



Gambar 2. 6 Revolution Pi AIO⁶

Selain fungsi input dan output analog, RevPi AIO juga menyediakan dua kanal RTD yang memungkinkan pengukuran suhu dengan presisi tinggi menggunakan sensor suhu seperti Pt100 atau Pt1000. Sensor tersebut dapat dihubungkan menggunakan konfigurasi kabel 2-wire, 3-wire, atau 4-wire, dengan rentang pengukuran suhu yang luas. Modul ini dirancang sesuai dengan standar industri EN 61131-2 dan memiliki perlindungan terhadap gangguan listrik sehingga dapat digunakan pada lingkungan industri (*RevPi AIO* | *Industrial Raspberry Pi*, n.d.).

⁶ <https://revolutionpi.com/shop/en/analog-io-expansion-module>

2.1.6 Signal Generator 4-20 mA

Signal generator merupakan perangkat yang digunakan untuk menghasilkan sinyal arus 4–20 mA secara presisi sebagai simulasi sinyal sensor dalam sistem kontrol. Berdasarkan datasheet, alat ini memiliki rentang output 4–20 mA (hingga 3–21 mA), akurasi $\pm 0.5\%$, resolusi 0.01 mA, menggunakan catu daya 12–24 VDC, serta dilengkapi LCD dan mode manual maupun otomatis (ProMax CSG01 4-20ma Current Signal Generator, n.d.). Dalam sistem yang dirancang, signal generator digunakan sebagai sumber sinyal uji pada modul analog Revolution Pi.



Gambar 2. 7 Signal Generator 4-20 mA⁷

2.1.7 Sensor XY-MD02

Sensor XY-MD02 merupakan sensor suhu dan kelembapan berbasis sensor SHT20 yang dilengkapi komunikasi RS485 dengan protokol Modbus RTU, sehingga cocok untuk aplikasi industri. Berdasarkan datasheet, sensor ini memiliki rentang suhu -40 hingga 60°C dengan akurasi $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, serta rentang kelembapan 0–80% RH dengan akurasi $\pm 3\%$ RH, resolusi 0.1, menggunakan tegangan kerja 5–30 VDC, dan mampu komunikasi hingga jarak ± 1000 meter (XY-MD01/XY-MD02 RS485 (Modbus) Sensor Module, n.d.). Dalam sistem yang dirancang, sensor ini digunakan sebagai sumber data utama untuk monitoring suhu dan kelembapan.



Gambar 2. 8 Sensor XY-MD02⁸

⁷ ProMax CSG01 4-20ma Current Signal Generator. (n.d.). Retrieved www.probots.co.in

⁸ XY-MD01/XY-MD02 RS485 (modbus) sensor module from HESTORE 1.Description. (n.d.).

2.1.8 RTD PT100 3 Wire

Sensor RTD PT100 merupakan sensor suhu berbasis resistansi (Resistance Temperature Detector) yang menggunakan material platinum dengan nilai resistansi 1000 Ω pada suhu 0°C, di mana nilai resistansi akan meningkat seiring kenaikan suhu. Berdasarkan datasheet, sensor ini memiliki karakteristik perubahan resistansi sekitar 3.85 $\Omega/^{\circ}\text{C}$, rentang suhu sekitar -50°C hingga 280°C, serta dikenal memiliki akurasi, stabilitas, dan repeatability yang tinggi dibandingkan sensor lain (Platinum RTD Sensor-PT1000-3 Wire 1 Meter Long, n.d.). Dalam sistem yang dirancang, sensor PT100 digunakan sebagai sensor suhu presisi yang dihubungkan ke modul analog (RTD input) pada Revolution Pi untuk memperoleh data suhu yang akurat sebagai bagian dari sistem monitoring real-time.



Gambar 2. 9 Sensor RTD PT100⁹

2.1.9 Push Button NO & NC

Push Button NO (Normally Open) merupakan push button industri tipe Harmony XB5 berdiameter 22 mm dengan mekanisme spring return (momentary), di mana kontak akan terhubung (ON) saat ditekan dan kembali terbuka saat dilepas. Berdasarkan datasheet, push button ini memiliki kontak 1NO, rating hingga 600 V dengan arus sekitar 3 A (AC-15), proteksi IP66/IP67, serta daya tahan mekanis hingga 10 juta siklus (Shape of Screw Head, 2026). Dalam sistem yang dirancang, push button NO digunakan sebagai input kontrol manual seperti tombol start atau ON perangkat yang terhubung ke digital input Revolution Pi.

⁹ *Platinum RTD Sensor-PT1000-3 Wire 1 meter long.* (n.d.). Retrieved <https://www.adafruit.com/product/3984>

Sedangkan Push Button NC (Normally Closed) merupakan push button industri tipe Harmony XB5 dengan konfigurasi 1NC, di mana kontak dalam kondisi normal terhubung (ON) dan akan terputus saat ditekan. Push button ini juga memiliki spesifikasi serupa seperti rating hingga 600 V, arus operasional sekitar 3 A, proteksi IP66/IP67, serta daya tahan tinggi hingga 10 juta siklus. Dalam sistem yang dirancang, push button NC digunakan untuk fungsi stop atau emergency, karena sifatnya yang fail-safe sehingga sistem akan otomatis berhenti jika terjadi gangguan atau tombol ditekan.



Gambar 2. 10 Push Button NO & NC¹⁰

2.1.10 Selector Switch & Emergency Switch

Selector switch merupakan saklar pemilih industri tipe Harmony XB4 dengan diameter 22 mm yang memiliki 2 posisi (stay-put) dan konfigurasi kontak 1NO + 1NC, sehingga posisi saklar akan tetap (tidak kembali otomatis) setelah diputar (Black Selector Switch Ø22 2-Position Stay Put 1NO+1NC 600V, n.d.). Dalam sistem yang dirancang, selector switch digunakan untuk memilih mode operasi seperti manual dan otomatis yang dapat dikontrol di dashboard Thingsboard.

¹⁰ Shape of screw head. (2026).



a) Selector Switch¹¹



b) Emergency Switch¹²

Gambar 2. 11 a) Selector Switch, dan b) Emergency Switch

Selain itu, terdapat Emergency switch yang digunakan merupakan push button darurat tipe Harmony XB2 dengan kepala mushroom berdiameter 22 mm dan mekanisme latching (tetap terkunci) dengan sistem turn-to-release, serta konfigurasi kontak 1NC (Normally Closed) yang bekerja secara fail-safe (*Emergency Switch*, n.d.). Dalam sistem yang dirancang, emergency switch digunakan sebagai pengaman utama untuk menghentikan sistem secara langsung saat kondisi darurat, di mana sinyal NC akan terputus ketika tombol ditekan sehingga sistem dapat segera mematikan aktuator dan meningkatkan keselamatan operasional.

2.1.11 LED Indicator & Buzzer Alarm LED

Lampu LED 24VDC merupakan salah satu komponen elektronika yang berfungsi sebagai indikator visual dengan memanfaatkan teknologi Light Emitting Diode (LED) yang bekerja pada tegangan searah (Direct Current) sebesar 24 volt (*Pilot Lamp Fort Round, Direct, LED 22 Mm White 24VDC*, n.d.).

¹¹ *black selector switch Ø22 2-position stay put 1NO+1NC 600V*. (n.d.).

¹² *Emergency Switch*. (n.d.).



a) LED 24 VDC¹³



b) Buzzer Alarm LED¹⁴

Gambar 2. 12 a) LED 24 VDC, dan b) Buzzer Alarm LED

Selain itu, terdapat Lampu buzzer LED 24VDC merupakan perangkat indikator yang menggabungkan fungsi visual dan audio dalam satu komponen, yang bekerja pada tegangan searah (Direct Current) sebesar 24 volt. Komponen ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu LED (Light Emitting Diode) sebagai indikator cahaya dan buzzer sebagai penghasil suara (*LED-BUZZER-22MM-AD22-22SMR*, n.d.).

2.1.12 Bahasa Pemrograman Python

Python merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi (high-level programming language) yang bersifat general-purpose, sehingga dapat digunakan untuk berbagai jenis aplikasi seperti analisis data, pengembangan sistem, otomatisasi proses, hingga kecerdasan buatan. Python bekerja menggunakan interpreter, yaitu program yang mengeksekusi perintah-perintah dalam kode Python secara langsung. Sebuah program Python terdiri dari serangkaian pernyataan (statements) yang diproses secara berurutan oleh interpreter untuk melakukan berbagai operasi seperti membaca data, melakukan perhitungan, membuat keputusan logika, dan menghasilkan keluaran. Dengan pendekatan ini, Python memungkinkan pengguna untuk mengembangkan program secara lebih fleksibel dan cepat dibandingkan dengan beberapa bahasa pemrograman lainnya (Raymond J. Madachy, 2025).

Dalam penelitian ini, Python digunakan sebagai backend system yang berjalan pada Revolution Pi untuk membaca data sensor melalui komunikasi Modbus RTU, mengolah data, mengendalikan aktuator melalui digital output, serta melakukan komunikasi dengan platform ThingsBoard menggunakan protokol MQTT. Dengan fleksibilitas dan kemudahan pengembangan yang dimiliki, Python

¹³ https://www.gmp-electric.com/products/pilot-lamp-for-round-direct-led-22-mm-white-24vdc?srltid=AfmBOoqr1FO0EPQRfI8Fgkr9BRIUTs6QpIWdRRyTAv-oas3f_YnxaLQ0

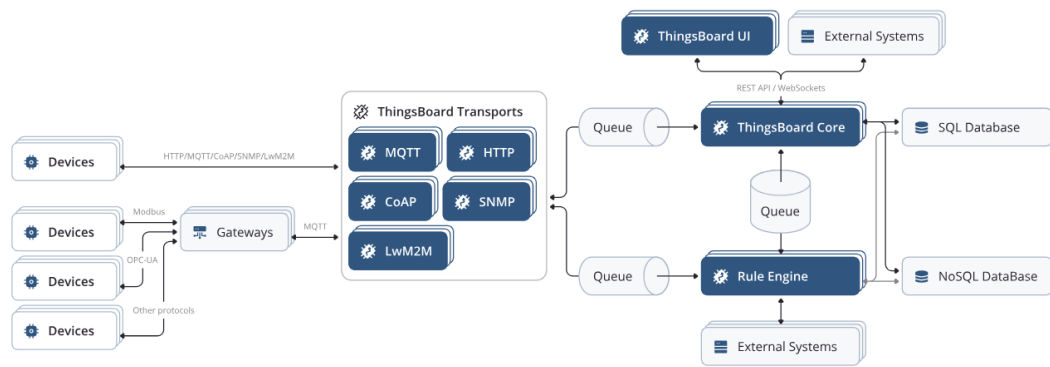
¹⁴ *LED-BUZZER-22MM-AD22-22SMR*. (n.d.).

memungkinkan sistem dapat dikembangkan secara modular dan efisien dalam lingkungan industri berbasis edge computing.

2.1.13 Thingsboard Community Edition

ThingsBoard adalah platform IoT sumber terbuka yang memungkinkan pengembangan, pengelolaan, dan penskalaan proyek IoT secara cepat. Tujuan kami adalah menyediakan solusi cloud atau on-premises IoT siap pakai yang akan memungkinkan infrastruktur sisi server untuk aplikasi IoT (Thingsboard Community Edition, n.d.). Adapun Fitur yang disediakan Thingsboard Community Edition diantara lain.

- a) Menyediakan perangkat, aset, dan pelanggan, serta mendefinisikan hubungan di antara mereka.
- b) Mengumpulkan dan memvisualisasikan data dari perangkat dan aset.
- c) Menganalisis data telemetri yang masuk dan memicu alarm dengan pemrosesan peristiwa yang kompleks.
- d) Kendalikan perangkat Anda menggunakan panggilan prosedur jarak jauh (RPC).
- e) Buat alur kerja berdasarkan peristiwa siklus hidup perangkat, peristiwa REST API, permintaan RPC, dll.
- f) Rancang dasbor yang dinamis dan responsif serta sajikan telemetri dan wawasan perangkat atau aset kepada pelanggan Anda.
- g) Aktifkan fitur khusus kasus penggunaan menggunakan rantai aturan yang dapat disesuaikan.
- h) Mengirim data perangkat ke sistem lain.



Gambar 2. 13 Arsitektur Umum Thingsboard Community Edition¹⁵

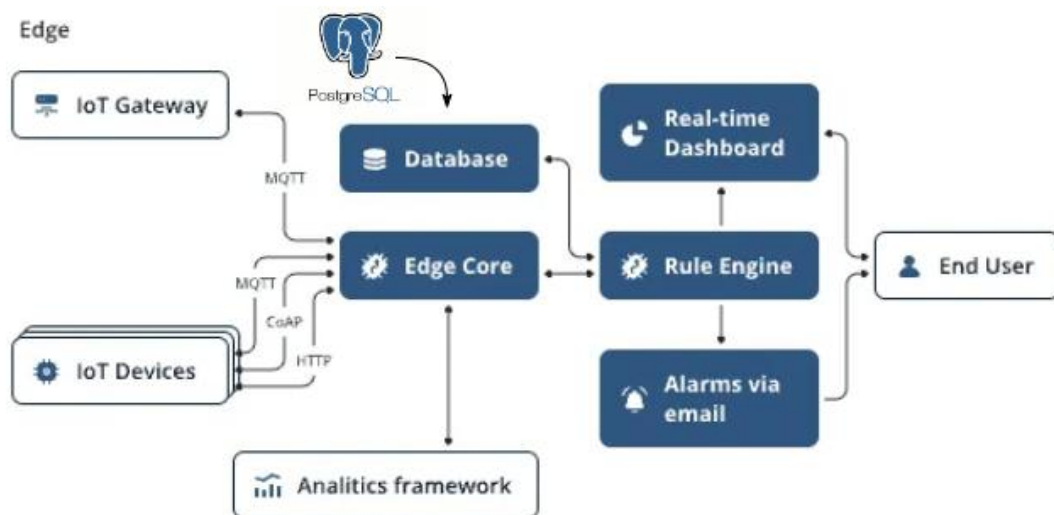
Pada Gambar 2.13 merupakan Arsitektur Umum Thingsboard Community Edition yang Dimana memiliki penjelasan sebagai berikut.

- a) **ThingsBoard Transports**, ThingsBoard menyediakan berbagai protokol komunikasi seperti MQTT, HTTP, CoAP, dan LwM2M melalui lapisan transport untuk menerima data dari perangkat. Data yang diterima akan diproses dan disimpan dalam message queue yang andal, dan pengiriman ke perangkat hanya dikonfirmasi setelah data berhasil masuk ke antrian tersebut.
- b) **ThingsBoard Core**, berfungsi untuk menangani REST API dan WebSocket, menyimpan sesi serta status konektivitas perangkat, dan mengelola komunikasi menggunakan sistem aktor yang dapat berjalan dalam arsitektur klaster untuk menangani distribusi pesan.
- c) **ThingsBoard Rule Engine**, merupakan inti sistem yang bertugas memproses pesan yang masuk dari message queue menggunakan sistem aktor, serta hanya mengonfirmasi pesan setelah diproses. Mesin ini dapat berjalan dalam klaster dan beroperasi dalam mode bersama (multi-tenant) atau terisolasi sesuai kebutuhan pengolahan data.
- d) **ThingsBoard Web UI**, ThingsBoard menyediakan komponen UI berbasis Express.js yang bersifat stateless untuk menampilkan antarmuka web, dan setelah dimuat akan berkomunikasi dengan ThingsBoard Core melalui REST API dan WebSocket.

¹⁵ <https://thingsboard.io/docs/reference/>

2.1.14 Integrasi PostgreSQL dengan Thingsboard

PostgreSQL merupakan salah satu Relational Database Management System (RDBMS) open-source yang digunakan untuk menyimpan, mengelola, dan memproses data terstruktur secara efisien. Selain itu, PostgreSQL dikenal memiliki berbagai fitur lanjutan yang mendukung pengembangan aplikasi berskala besar. Beberapa keunggulan PostgreSQL antara lain dukungan terhadap tipe data kompleks, kepatuhan yang tinggi terhadap standar SQL, serta mekanisme pengelolaan transaksi yang andal. Dengan kemampuan tersebut, PostgreSQL banyak digunakan dalam berbagai sistem informasi dan aplikasi yang membutuhkan pengelolaan data dengan tingkat keandalan, fleksibilitas, serta skalabilitas yang tinggi (Vinatalia Dachi & Suhada, 2025).



Gambar 2. 14 Integrasi PostgreSQL dengan Thingsboard¹⁶

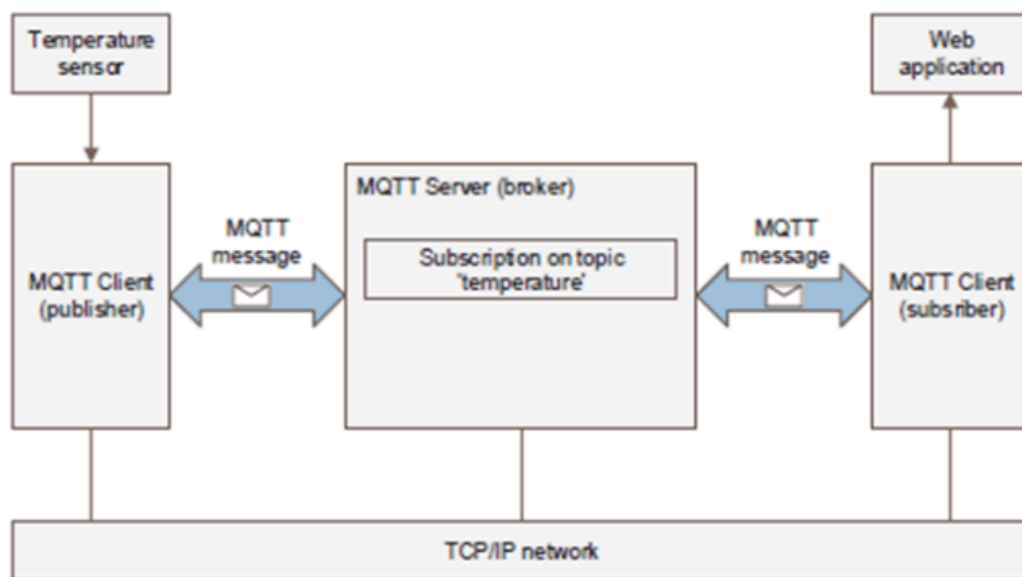
Pada Gambar 2.14 menggambarkan Integrasi PostgreSQL dengan ThingsBoard yang berfungsi sebagai sistem penyimpanan utama yang digunakan untuk menyimpan data telemetry, atribut perangkat, dan log yang diterima dari Edge Core. Data yang tersimpan di PostgreSQL kemudian diakses dan diproses oleh Rule Engine untuk menghasilkan visualisasi pada dashboard secara real-time serta mendukung pembuatan notifikasi atau alarm. Dengan demikian, PostgreSQL

¹⁶ <https://thingsboard.io/docs/edge/getting-started-guides/what-is-edge/>

menjadi komponen penting dalam pengelolaan dan pemrosesan data pada platform ThingsBoard.

2.1.15 Protokol Komunikasi MQTT

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) merupakan protokol komunikasi berbasis jaringan yang dirancang khusus untuk pertukaran data pada sistem dengan keterbatasan bandwidth, daya, dan sumber daya komputasi, sehingga sangat cocok digunakan dalam aplikasi Internet of Things (IoT) maupun Industrial Internet of Things (IIoT). MQTT bekerja dengan model komunikasi publish-subscribe, di mana perangkat tidak saling berkomunikasi secara langsung, melainkan melalui perantara yang disebut broker. Dalam mekanisme ini, perangkat yang mengirim data disebut publisher, sedangkan perangkat yang menerima data disebut subscriber, dan komunikasi dilakukan melalui topik tertentu (topic) yang telah ditentukan (Oktaria et al., n.d.).



Gambar 2. 15 Arsitektur Protokol Komunikasi MQTT¹⁷

Pada Gambar 2.15 merupakan Arsitektur protokol komunikasi MQTT yang dirancang untuk mendukung pertukaran data yang ringan, efisien, dan real-time pada sistem IoT, terutama pada perangkat dengan keterbatasan sumber daya dan

¹⁷ Susanto, B. M., Setiyawan, E., Atmadji, J., Brenkman, W. L., Studi, P., Komputer, T., Informasi, J. T., & Jember, P. N. (2018). IMPLEMENTASI MQTT PROTOCOL PADA SMART HOME SECURITY BERBASIS WEB (Vol. 4).

jaringan. Dengan menggunakan model publish–subscribe, MQTT memungkinkan perangkat untuk saling berkomunikasi secara tidak langsung melalui perantara berupa broker, sehingga sistem menjadi lebih fleksibel dan mudah dikembangkan. (Susanto et al., 2018). Adapun Komponen Utama MQTT yaitu sebagai berikut.

- a) **Publisher (MQTT Client – Publisher)**, yaitu Perangkat seperti sensor suhu yang bertugas mengirimkan data ke broker dalam bentuk pesan MQTT.
- b) **Broker (MQTT Server)**, yaitu Pusat pengelola komunikasi yang menerima pesan dari publisher, lalu mendistribusikannya ke subscriber berdasarkan topik tertentu (misalnya: *temperature*).
- c) **Subscriber (MQTT Client – Subscriber)**, yaitu Pihak penerima, seperti aplikasi web, yang berlangganan (subscribe) pada topik tertentu untuk menerima data secara real-time.

Alur komunikasi pada protokol MQTT dimulai ketika publisher mengirimkan data ke broker menggunakan protokol MQTT melalui jaringan TCP/IP. Selanjutnya, broker menerima pesan tersebut, menyimpannya sementara, serta melakukan proses penyaringan berdasarkan topik yang sesuai. Setelah itu, broker akan mendistribusikan pesan kepada subscriber yang telah melakukan subscribe pada topik tersebut, sehingga subscriber dapat menerima data secara otomatis tanpa perlu terhubung langsung dengan publisher.

Berdasarkan karakteristik tersebut, MQTT menjadi salah satu protokol komunikasi yang banyak digunakan pada sistem IoT dan IIoT karena ringan, efisien, dan mendukung komunikasi real-time. Selain MQTT, terdapat beberapa protokol komunikasi lain seperti OPC UA, AMQP, dan HTTP/REST yang memiliki karakteristik berbeda sesuai kebutuhan sistem. Oleh karena itu, tabel berikut menunjukkan perbandingan MQTT dengan beberapa protokol komunikasi lainnya berdasarkan aspek komunikasi, keamanan, kemampuan real-time, dan kebutuhan sumber daya.

Tabel 2. 1 Perbandingan Protokol Komunikasi MQTT dengan Lainnya

Features	IoT Protocols			
	<i>OPC UA</i>	<i>MQTT</i>	<i>AMQP</i>	<i>HTTP/ REST</i>
Release Year	2008	1999	2006	2000
Developer	OPC Foundation	IBM	JP Morgan	Apache
Architecture	Server/ Client	Broker/ Client	Broker/ Client	Server/ Client
Transport Protocol	TCP/IP	TCP/IP	TCP/IP	TCP/IP
Standards	IEC62541	OASIS, ISO/IEC PRF 20922	OASIS, ISO/IEC 19464	IETF RFC 7231
Pattern	Request/ Response, Publisher/ Subscriber	Publisher/ Subscriber	Request/ Response, Publisher/ Subscriber	Request/ Response
QoS	None	3 Levels	3 Levels	None
Security	TLS	TLS/SSL	TLS/SSL	TLS/SSL
Interoperability	Yes	No	No	No
Real-Time Capability	Yes	Yes	Yes	No
Scalability	Yes	Yes	Yes	No
Need for Resources	Moderate	Low	High	High

Pada Tabel 2.1 menjelaskan bahwa MQTT memiliki keunggulan dibandingkan OPC UA, AMQP, dan HTTP/REST karena bersifat lightweight, membutuhkan resource yang rendah, serta mendukung komunikasi real-time dengan mekanisme publish-subscribe dan QoS yang fleksibel. Dalam aspek industri, MQTT banyak digunakan pada sistem Industry 4.0 dan IIoT karena mampu mendukung komunikasi data antara sensor, perangkat edge, dan platform monitoring secara efisien dengan latensi rendah dan penggunaan bandwidth yang kecil. OPC UA unggul pada interoperabilitas sistem industri namun lebih kompleks, sedangkan AMQP membutuhkan resource lebih tinggi dan HTTP/REST kurang optimal untuk komunikasi real-time. Oleh karena itu, MQTT lebih sesuai digunakan pada sistem edge-industrial berbasis Revolution Pi dan ThingsBoard (Deveci et al., n.d.).

2.2 Penelitian Terdahulu

Zuna et al. (2025) mengembangkan sistem monitoring berbasis edge IIoT untuk pemantauan kondisi lingkungan dengan memanfaatkan sensor suhu dan kelembapan. Data sensor dikirim menggunakan protokol MQTT dan divisualisasikan melalui platform ThingsBoard. Sistem yang dikembangkan mampu menampilkan data secara real-time serta memberikan notifikasi ketika parameter melewati batas tertentu. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi MQTT dan ThingsBoard efektif digunakan dalam sistem monitoring berbasis IIoT.

Selain itu, Penelitian oleh Windarto et al. (2020) membahas implementasi sistem monitoring berbasis IIoT menggunakan ThingsBoard sebagai platform visualisasi dan MQTT sebagai protokol komunikasi. Sistem mampu mengirimkan data sensor secara real-time dan menampilkan informasi dalam bentuk dashboard interaktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ThingsBoard mempermudah proses monitoring serta mendukung pengambilan keputusan secara cepat.

Penelitian oleh Sahifa et al. (2020) menunjukkan bahwa protokol MQTT sangat efektif digunakan dalam sistem IIoT karena menggunakan mekanisme publish-subscribe yang ringan dan efisien. Dalam penelitian tersebut, data sensor dikirim ke server dan divisualisasikan menggunakan ThingsBoard, sehingga sistem mampu melakukan monitoring secara real-time dengan konsumsi bandwidth yang rendah.

Penelitian oleh Tanjungbalai & Kunci (2026) membahas penerapan edge computing dalam sistem monitoring industri berbasis IIoT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa edge computing mampu mengurangi latensi, meningkatkan kecepatan respon sistem, serta meningkatkan keandalan operasi. Pemrosesan data yang dilakukan di sisi edge juga memungkinkan sistem tetap berjalan meskipun koneksi ke jaringan eksternal terbatas.

Penelitian lain oleh Wanti (n.d.) menunjukkan bahwa implementasi edge computing pada sistem monitoring energi mampu meningkatkan efisiensi bandwidth, mengurangi latensi, serta meningkatkan keamanan sistem dibandingkan dengan pendekatan terpusat. Sistem yang dikembangkan memproses data secara

lokal sebelum ditampilkan atau disimpan sehingga performa sistem menjadi lebih optimal untuk kebutuhan industri.

Penelitian yang dilakukan oleh Aghenta & Iqbal (2019) mengembangkan sistem SCADA berbasis IIoT menggunakan platform open-source ThingsBoard Community Edition yang dijalankan secara self-hosted pada perangkat lokal. Sistem ini menggunakan MQTT sebagai protokol komunikasi dan PostgreSQL sebagai basis data. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan monitoring dan kontrol secara real-time dengan tingkat keamanan yang lebih tinggi karena data diproses secara lokal tanpa ketergantungan pada cloud.

Penelitian oleh Prathama et al. (2021) membahas implementasi framework IoT berbasis ThingsBoard, dimana PostgreSQL digunakan sebagai database untuk menangani data telemetry dalam skala kecil hingga menengah. Dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa PostgreSQL cocok digunakan pada ThingsBoard untuk sistem dengan beban data tidak terlalu besar, sedangkan untuk skala besar dapat dikombinasikan dengan database lain seperti Cassandra. Hal ini menunjukkan bahwa PostgreSQL merupakan bagian penting dalam arsitektur ThingsBoard, terutama pada implementasi self-hosted.

Penelitian oleh Traboulsi & Knauth (2020) menunjukkan bahwa ThingsBoard sebagai platform open-source dapat digunakan dalam sistem monitoring dan kontrol berbasis IIoT dengan dukungan berbagai protokol komunikasi seperti MQTT, HTTP, dan CoAP. Implementasi ThingsBoard secara lokal (self-hosted) memungkinkan sistem bekerja secara real-time dengan tingkat fleksibilitas dan skalabilitas yang tinggi, sehingga cocok untuk aplikasi industri.

Penelitian yang dilakukan oleh Al Abror & Satria (2023) membahas rancang bangun basic digital trainer kit sebagai media pembelajaran pada mata kuliah praktikum teknik digital. Dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa trainer kit digunakan sebagai modul praktikum yang mampu membantu mahasiswa dalam mengimplementasikan konsep teori ke dalam bentuk rangkaian nyata. Trainer kit dirancang dengan mengintegrasikan berbagai komponen seperti gerbang logika, encoder, decoder, dan flip-flop yang dilengkapi dengan jobsheet sebagai panduan praktikum.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, sebagian besar sistem monitoring dan kontrol berbasis IIoT masih berfokus pada fungsi monitoring data sensor dan visualisasi dashboard secara real-time. Selain itu, implementasi sistem umumnya hanya menitikberatkan pada aspek komunikasi data tanpa mengintegrasikan media pembelajaran berbasis praktik secara langsung. Pada penelitian ini, sistem yang dirancang tidak hanya berfungsi sebagai monitoring dan kontrol industri berbasis edge computing, tetapi juga dikembangkan dalam bentuk trainer kit interaktif yang dapat digunakan sebagai media pembelajaran edge-industrial.

Perbedaan utama penelitian ini dibandingkan penelitian sebelumnya terletak pada integrasi Mode Local (Hardware) dan Mode Remote (Dashboard) dalam satu sistem terintegrasi menggunakan Revolution Pi, MQTT, PostgreSQL, dan ThingsBoard berbasis self-hosted. Mode Local (Hardware) menggunakan push button, selector switch, dan emergency switch pada trainer kit, sedangkan Mode Remote (Dashboard) dilakukan melalui dashboard ThingsBoard menggunakan komunikasi MQTT. Dengan demikian, trainer kit yang dikembangkan diharapkan mampu memberikan pengalaman pembelajaran yang lebih aplikatif dan mendekati implementasi sistem industri modern berbasis IIoT dan edge computing.