

# SERVER CYBER-PHYSICAL SYSTEM UNTUK TEKNOLOGI SWARM USV

Pengelolaan Data dan Kontrol pada Swarm USV

Penulis : Luciano Hutapea  
6705220110

Perkembangan teknologi *Unmanned Surface Vehicle (USV)* kini mengarah pada penerapan konsep *Swarm* yang memungkinkan kolaborasi antar-wahana untuk misi pemantauan area luas. Namun, operasional *Swarm USV* menghadapi tantangan krusial terkait integrasi data terpusat dan aksesibilitas pemantauan secara *real-time*, terutama ketika server lokal beroperasi pada jaringan seluler dengan alamat *IP* dinamis. Penelitian ini bertujuan merancang bangun server *Cyber-Physical System (CPS)* dengan arsitektur *Edge Computing* menggunakan *Raspberry Pi 3* guna mengatasi kendala latensi dan konektivitas tersebut. Solusi yang ditawarkan menerapkan metode kontainerisasi menggunakan *Docker* untuk menjalankan layanan orkestrasi data *n8n* dan basis data *PostgreSQL* yang terintegrasi melalui protokol komunikasi ringan *MQTT*. Untuk menjamin keamanan dan aksesibilitas jaringan dari jarak jauh, sistem ini mengimplementasikan metode *Overlay Network* berbasis *Tailscale* guna mengatasi hambatan *Network Address Translation (NAT)* tanpa memerlukan *IP publik statis*. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, sistem mampu memproses, memvalidasi, dan menyimpan data telemetri kompleks (navigasi dan parameter lingkungan) ke dalam basis data terpusat dengan tingkat keberhasilan 100%. Pengujian kinerja jaringan melalui jalur *VPN* menunjukkan rata-rata latensi pengiriman data sebesar 145 ms, yang masih berada dalam batas toleransi operasional, serta membuktikan bahwa server mampu beroperasi stabil tanpa kegagalan layanan selama pengujian durasi 3 jam.

**Kata Kunci:** *Cyber-Physical System, Swarm USV, Edge Computing, MQTT, Docker, Tailscale.*

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi maritim mengalami akselerasi yang signifikan, didorong oleh kebutuhan akan akuisisi data lingkungan yang cepat, akurat, dan minim risiko bagi keselamatan manusia. Salah satu inovasi utama dalam bidang ini adalah pemanfaatan *Unmanned Surface Vehicle (USV)* atau kendaraan permukaan tanpa awak. Teknologi ini memungkinkan pelaksanaan misi survei hidrografi dan pemantauan perairan secara otonom. Namun, efektivitas *USV* tidak hanya bergantung pada kemampuan mekanis, melainkan juga pada keandalan infrastruktur digital yang mengintegrasikan entitas fisik tersebut dengan sistem komputasi, sebuah paradigma yang dikenal sebagai *Cyber Physical System (CPS)*. Penerapan konsep *Swarm USV* menawarkan pendekatan kolaboratif di mana sekumpulan *USV* beroperasi secara terkoordinasi untuk memperluas cakupan area misi dan meningkatkan redundansi sistem. Konsep ini sangat vital untuk aplikasi skala besar seperti pemetaan batimetri, mitigasi bencana, hingga pengawasan keamanan maritim. Untuk mewujudkan operasional *swarm* yang efektif, diperlukan sistem pemantauan terpusat (*centralized monitoring*) yang mampu mengolah aliran data telemetri dari banyak node sekaligus secara *real time*, sehingga operator dapat mengambil keputusan strategis berdasarkan kondisi aktual di lapangan.

## II. KAJIAN TEORI

Menyajikan dan menjelaskan teori-teori yang berkaitan dengan variabel-variabel penelitian. Poin subjudul ditulis dalam abjad.

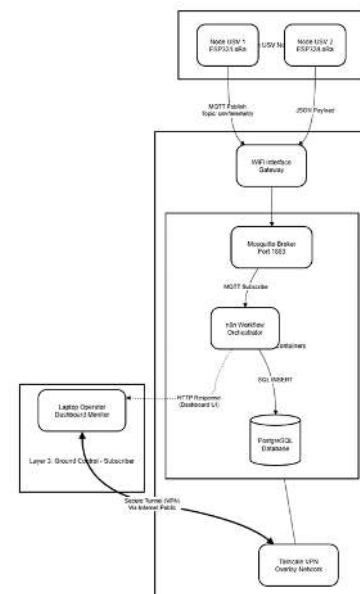
### A. USV

*Unmanned Surface Vehicle (USV)* adalah wahana tanpa awak yang beroperasi di permukaan air untuk berbagai misi seperti pemetaan batimetri, pengawasan wilayah, dan pemantauan lingkungan. Dalam perkembangannya, teknologi *USV* kini mengarah pada konsep *Swarm* (kawanan), yaitu sekumpulan *USV* yang beroperasi secara kolaboratif untuk menyelesaikan satu misi bersama. Konsep *Swarm* menawarkan keunggulan dibandingkan *USV* tunggal, antara lain redundansi sistem (jika satu kapal rusak, misi tetap berjalan) dan cakupan area survei yang lebih luas dalam waktu singkat. Tantangan utama dalam teknologi *Swarm* adalah koordinasi antar-agen dan komunikasi data yang handal di lingkungan maritim yang dinamis.

### B. Docker

Dalam pengembangan sistem *Cyber-Physical System (CPS)* yang terdistribusi, efisiensi penggunaan sumber daya komputasi menjadi faktor krusial, terutama ketika menggunakan perangkat *Edge Computing* seperti *Raspberry Pi*. Untuk mengatasi keterbatasan ini, digunakan teknologi kontainerisasi sebagai alternatif dari virtualisasi tradisional.

## III. METODE



Gambar diatas mengilustrasikan arsitektur keseluruhan dari sistem *Server Cyber Physical System (CPS)* yang dirancang ulang untuk efisiensi komunikasi data. Berbeda dengan arsitektur konvensional *Client-Server*, sistem ini

menerapkan topologi MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) dengan model Publish Subscribe.

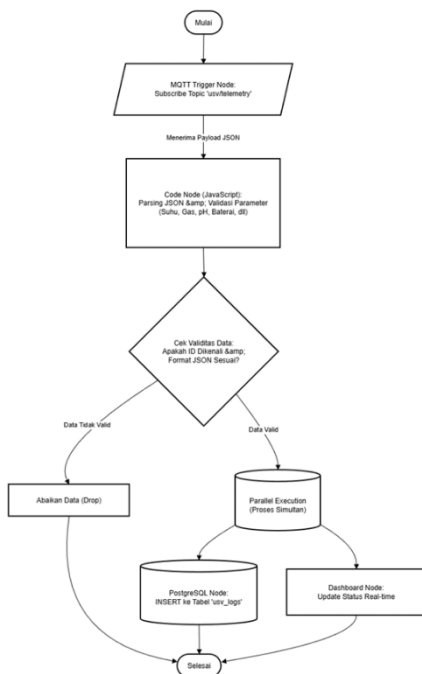
Secara struktural, arsitektur ini terbagi menjadi tiga lapisan utama yang saling terintegrasi:

1. Swarm USV Nodes (Sisi Publisher) Lapisan ini terdiri dari armada kapal tanpa awak yang beroperasi di lingkungan perairan. Setiap node USV berfungsi sebagai Publisher. Mikrokontroler pada kapal mengakuisisi data sensor (GPS, Baterai, ID), mengemasnya dalam format JSON, dan mengirimkannya ("menerbitkan") ke topik spesifik (misalnya: usv/telemetry) melalui jaringan nirkabel. Protokol MQTT dipilih karena sifatnya yang ringan (lightweight) dan hemat bandwidth, sangat ideal untuk menjaga stabilitas pengiriman data di area dengan kualitas sinyal seluler yang fluktuatif.

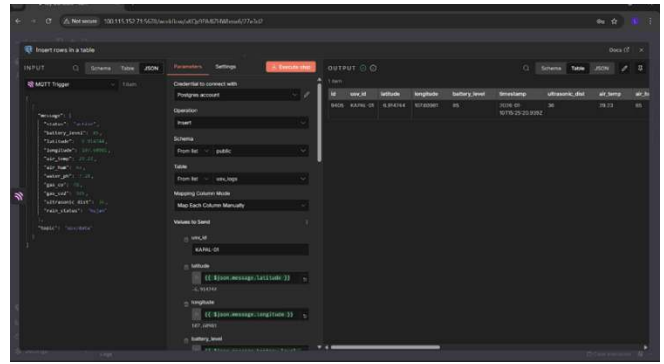
2. Lapisan Edge Server (Pusat Broker & Pemrosesan) Lapisan ini adalah inti dari sistem CPS yang dijalankan pada Raspberry Pi 4 dalam lingkungan kontainer Docker. Lapisan ini memiliki komponen kunci sebagai berikut:

- Mosquitto Broker: Bertindak sebagai "kantor pos" pusat yang menerima seluruh pesan dari USV. Broker bertanggung jawab mengantri dan mendistribusikan pesan kepada layanan yang membutuhkan.
- n8n Workflow (Subscriber): Layanan otomatisasi bertindak sebagai Subscriber yang secara aktif "mendengarkan" topik data dari Broker. Ketika pesan baru masuk, n8n akan memicu alur kerja untuk memvalidasi data dan menyimpannya ke basis data PostgreSQL.
- Tailscale VPN: Berfungsi menyediakan jaringan overlay aman, memungkinkan server lokal ini diakses dari internet publik meskipun menggunakan alamat IP dinamis.

3. Lapisan Ground Control (Sisi Operator) Operator memantau kondisi swarm menggunakan laptop yang terhubung ke jaringan privat Tailscale. Visualisasi data (Dashboard) diakses melalui peramban web yang mengambil data terkini dari server. Berkat arsitektur ini, operator mendapatkan pembaruan data secara real time (latensi rendah) segera setelah Broker meneruskannya.



#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar diatas memperlihatkan detail konfigurasi pada Postgres Node di dalam editor n8n yang berfungsi sebagai eksekutor penyimpanan data. Pada tahap ini, terjadi proses krusial yaitu transformasi data dari format JSON menjadi format baris (row) basis data.

Hasil penelitian harus disajikan secara jelas dan sistematis supaya mudah dibaca dan dipahami. Penyajian hasil penelitian dapat dilakukan dengan cara deskriptif (naratif), menggunakan tabulasi, tabel atau grafik, atau dengan menggunakan gabungan dua atau ketiganya secara sekaligus. Penggunaan ketiga cara tersebut disesuaikan dengan jenis data dan sejauh mana diskripsi data akan dijelaskan. Misalnya, pada awal peneliti memaparkan narasi temuannya, kemudian didukung dengan sajian data dalam bentuk tabulasi, tabel atau grafik. Peneliti juga menyajikan data-data hasil penelitian, kemudian didukung grafik dilanjutkan deskripsi naratif. [10 pts]. Berikan kemungkinan pengembangan atau penelitian ke depan terkait penelitian ini

##### A. Pengujian

Pengujian ini membandingkan aksesibilitas server menggunakan IP Lokal dan IP Tailscale dari jaringan operator yang berbeda.

No	Skenario Pengujian	Input Data (Payload JSON)	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Status
1	Pengiriman Data Normal	{"id": "USV-01", "batt": 90}	Data muncul di Dashboard & tersimpan di DB	Data berhasil tampil di dashboard dan masuk ke database	Berhasil
2	Pengiriman ID Tidak Valid	{"id": "UNKNOWN", "batt": 90}	Data ditolak sistem / tidak diproses	Data tidak muncul di Dashboard dan tidak tersimpan	Berhasil
3	Update Lokasi GPS	{"lat": -6.97, "long": 107.63}	Marker peta berpindah ke titik baru	Marker peta berpindah secara real-time sesuai koordinat	Berhasil
4	Cek Format Data Salah	{"id": "USV-01", "batt": "Low"}	Sistem memberikan pesan error / validasi	Sistem menolak data karena tipe data tidak sesuai (Integer vs String)	Berhasil

Hasil pengujian pada table diatas menunjukkan bahwa penggunaan Tailscale berhasil mengatasi hambatan NAT (Network Address Translation). Klien dapat mengakses dashboard n8n dan terminal server meskipun berada di jaringan internet yang berbeda dengan server.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan tahapan perancangan, implementasi, dan analisis pengujian yang telah dilakukan terhadap Server Cyber-Physical System (CPS) berbasis MQTT, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. **Arsitektur Server:** Penelitian ini berhasil mengimplementasikan arsitektur Edge Server pada Raspberry Pi 4 menggunakan teknologi kontainerisasi Docker. Arsitektur layanan mikro (microservices) yang dibangun memisahkan fungsi Mosquitto Broker, orkestrator n8n, dan basis data PostgreSQL dalam lingkungan terisolasi, sehingga memudahkan manajemen sumber daya dan pemeliharaan sistem.
2. **Mekanisme Integrasi Data:** Penerapan protokol MQTT dengan model Publish-Subscribe terbukti handal dalam menangani integrasi data telemetri yang kompleks. Mekanisme "Direct Mapping" pada n8n berhasil memvalidasi dan menyimpan seluruh parameter navigasi serta data lingkungan (kualitas air dan udara) ke dalam basis data secara real-time dengan tingkat keberhasilan penyimpanan data (success rate) mencapai 100%.
3. **Aksesibilitas Jaringan:** Kendala alamat IP dinamis dan batasan NAT pada jaringan seluler berhasil diatasi melalui implementasi jaringan overlay Tailscale VPN. Solusi ini memungkinkan operator untuk mengakses dashboard dan terminal server dari jarak jauh secara aman tanpa memerlukan penyewaan IP publik statis yang mahal.
4. **Kinerja Sistem:** Berdasarkan pengujian kinerja, server mampu beroperasi stabil dengan rata-rata latensi transmisi data sebesar 145 ms melalui jaringan VPN. Nilai latensi ini masih berada dalam batas toleransi operasional untuk kebutuhan pemantauan lingkungan maritim non-kritis.

## REFERENSI

- [1] E. A. Lee, "Cyber Physical Systems: Design Challenges," in 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-time Distributed Computing (ISORC), 2008, pp. 363–369.
- [2] Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu, and C. Yuan, "Unmanned Surface Vehicles: An Overview of Developments and Challenges," *Annual Reviews in Control*, vol. 41, pp. 71–85, 2016.
- [3] M. A. Salam, "Perancangan Sistem Manajemen Daya Pada Unmanned Surface Vehicle (USV) Dengan Penggerak Hybrid," pp. 1–115, 2019.
- [4] E. Upton and G. Halfacree, *Raspberry Pi User Guide*, 4th ed. Indianapolis, IN: John Wiley & Sons, 2016.
- [5] D. Pratama and A. Asnil, "Sistem Monitoring Panel Surya Secara Realtime Berbasis Arduino Uno," *MSI Transactions on Education*, vol. 2, no. 1, pp. 19–32, 2021, doi: 10.46574/mted.v2i1.46.
- [6] D. Merkel, "Docker: Lightweight Linux Containers for Consistent Development and Deployment," *Linux Journal*, vol. 2014, no. 239, art. 2, March 2014.
- [7] R. Fielding and J. Reschke, "Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Semantics and Content," Internet Engineering Task Force (IETF), RFC 7231, June 2014. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc7231>
- [8] ECMA International, "The JSON Data Interchange Syntax," Standard ECMA-404, 2nd ed., Dec. 2017.
- [9] J. A. Donenfeld, "WireGuard: Next Generation Kernel Network Tunnel," in *Proceedings of the 24th Annual Network and Distributed System Security Symposium (NDSS)*, San Diego, CA, 2017.