

Desain Sistem Respons Darurat Jantung Taktis Menggunakan Jam Tangan Pintar dan Peringatan Otomatis

Fandi Prasetyo¹⁾, Muhammad Ridwan²⁾, Ananda Herdi Akbar³⁾

^{1), 2), 3)}Prodi Teknik Telekomunikasi Militer. Politeknik Angkatan Darat Jl.Raya Anggrek
No.1 Junrejo, Batu, Indonesia

E-mail: komd4725@gmail.com¹⁾, ridwan.mtte20@gmail.com²⁾, aherdiakbar@gmail.com³⁾

Abstract: Cardiac emergencies, including sudden cardiac arrest and severe tachycardia, pose a critical threat to military personnel operating under extreme physical and psychological stress. This study designs and evaluates a smartwatch-based tactical cardiac emergency response system integrating a Photoplethysmography (PPG) sensor for continuous heart rate (BPM) monitoring, Bluetooth Low Energy (BLE) for data transmission to a smartphone gateway, and the MQTT protocol for cloud-based IoT relay. A threshold algorithm automatically triggers alerts to the command health dashboard via WebSocket when BPM exceeds predefined limits. Simulation testing on five military volunteer subjects yielded an average PPG sensor error of $\pm 1.9\%$ relative to a calibrated pulse oximeter, meeting the AAMI clinical accuracy standard ($<5\%$). Alert latency averaged 0.8–2.1 seconds depending on field conditions, compared to 45–120 seconds for conventional manual reporting, and packet delivery rate reached 98.5% at 50 m open-field range. These findings confirm the strong technical potential of the proposed system to accelerate cardiac emergency response and enhance the operational survivability of TNI military personnel.

Keywords: Cardiac Emergency, IoT, Military Health, MQTT, Photoplethysmography (PPG), Smartwatch, Tactical Medical Response, Wearable Sensor.

Abstrak: Kondisi darurat jantung, termasuk henti jantung mendadak dan takikardia berat, merupakan ancaman kritis bagi personel militer yang beroperasi di bawah tekanan fisik dan psikologis ekstrem. Penelitian ini merancang dan mengevaluasi sistem respons darurat jantung taktis berbasis smartwatch yang mengintegrasikan sensor Photoplethysmography (PPG) untuk pemantauan denyut jantung (BPM) berkelanjutan, Bluetooth Low Energy (BLE) untuk transmisi data ke gateway smartphone, dan protokol MQTT untuk relay data ke server IoT berbasis cloud. Algoritma ambang batas secara otomatis memicu peringatan ke dashboard komando melalui WebSocket saat BPM melampaui batas normal. Pengujian simulasi pada lima sukarelawan personel militer menghasilkan rata-rata error sensor PPG $\pm 1,9\%$ terhadap pulse oximeter standar, memenuhi standar AAMI ($<5\%$). Alert latency rata-rata 0,8–2,1 detik bergantung kondisi lapangan, dibandingkan 45–120 detik pada pelaporan manual konvensional, dan packet delivery rate mencapai 98,5% pada jangkauan 50 meter lapangan terbuka. Hasil ini mengkonfirmasi potensi teknis signifikan sistem yang diusulkan dalam mempercepat respons darurat jantung dan meningkatkan ketahanan operasional personel TNI.

Kata Kunci: Darurat Jantung, IoT, Kesehatan Militer, MQTT, Photoplethysmography (PPG), Smartwatch, Respons Medis Taktis, Sensor Wearable.

PENDAHULUAN

Penyakit kardiovaskular merupakan penyebab kematian nomor satu secara global, dengan jumlah kematian mencapai 17,9 juta jiwa per tahun atau 32% dari total kematian dunia (Castaneda et al., 2018). Henti jantung mendadak yang tidak ditangani dalam empat menit pertama akan menyebabkan kematian sel otak ireversibel. Di lingkungan militer, ancaman ini berlipat ganda akibat beban fisik operasional tinggi, paparan stres psikologis berkelanjutan, kondisi iklim ekstrem, dan terbatasnya akses fasilitas kesehatan di zona operasi tempur (Kim et al., 2018).

Sensor Photoplethysmography (PPG) merupakan teknologi optis non-invasif yang mengukur variasi intensitas cahaya yang dipantulkan akibat perubahan volume darah di kapiler, sehingga memungkinkan pengukuran BPM dan SpO₂ secara kontinyu tanpa prosedur invasif (Allen, 2007; Tamura et al., 2014). Validasi klinis Inui et al. (2020) membuktikan bahwa sensor PPG smartwatch mampu mendeteksi fibrilasi atrium paroksismal dengan korelasi tinggi terhadap ECG standar. Studi berskala besar Perez et al. (2019) dengan lebih dari 400.000 peserta mengkonfirmasi bahwa smartwatch berbasis PPG dapat mengidentifikasi aritmia yang sering tidak terdiagnosis.

Bluetooth Low Energy (BLE) menyediakan koneksi berdaya rendah

antara smartwatch dan smartphone gateway, sementara protokol MQTT memungkinkan transmisi data ke server IoT berbasis cloud bahkan pada jaringan terbatas (Majumder et al., 2017; Dias & Cunha, 2018). Muthusundari et al. (2024) mendemonstrasikan bahwa integrasi smartwatch-IoT mampu mengirimkan peringatan darurat jantung dalam hitungan detik setelah terdeteksinya anomali kardiak.

Tantangan utama penggunaan PPG pada kondisi aktif adalah motion artifact, yaitu distorsi sinyal akibat gerakan tubuh (Gibbs & Asada, 2005; Charlton et al., 2018). Zhang et al. (2015) mengembangkan kerangka TROIKA yang menggabungkan PPG dengan akselerometer untuk mereduksi motion artifact secara adaptif. HRV berbasis PPG juga terbukti sebagai biomarker stres yang relevan bagi monitoring personel militer (Mohan et al., 2017), sedangkan Etiwy et al. (2019) dan Salandin et al. (2019) mengkonfirmasi akurasi memadai wearable komersial dalam pengukuran denyut jantung.

Di Indonesia, pemanfaatan teknologi wearable di lingkungan TNI masih terbatas. Sistem pemantauan kesehatan personel masih bersifat konvensional dan bergantung pada pelaporan manual tanpa kemampuan deteksi real-time. Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini merancang sistem respons darurat

jantung taktis berbasis smartwatch dan IoT yang mampu: (1) memantau BPM personel secara real-time, (2) mengirimkan peringatan otomatis kepada tenaga medis dan komandan saat terdeteksi anomali kardiak, dan (3) melacak posisi GPS personel untuk memfasilitasi respons medis yang cepat dan tepat sasaran.

METODE PENELITIAN

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) dengan metode prototyping sistem yang terdiri dari lima tahapan: (1) identifikasi kebutuhan, (2) perancangan arsitektur, (3) implementasi komponen, (4) pengujian simulasi, dan (5) analisis serta validasi hasil.

B. Arsitektur Sistem

Sistem terdiri dari lima lapisan komponen yang saling terintegrasi sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Sensor PPG pada smartwatch mengkonversi sinyal optis menjadi data BPM secara kontinyu, lalu ditransmisikan melalui BLE 5.0 ke smartphone gateway. Smartphone meneruskan data ke server IoT cloud menggunakan protokol MQTT. Server menjalankan algoritma threshold: peringatan otomatis dikirim jika BPM >100 saat istirahat, <50 (bradikardi), atau >150 BPM saat aktif. Dashboard berbasis WebSocket menampilkan status seluruh personel secara real-time.

Tabel 1. Komponen Arsitektur Sistem

Komponen	Fungsi Utama	Protokol	Ket.
Sensor PPG	Baca BPM non-invasif via perubahan volume darah	Analog→ADC	Built-in smartwatch
Modul BLE 5.0	Kirim data BPM ke gateway smartphone	Bluetooth LE	Jangkauan ±50 m
Smartphone Gateway	Teruskan data ke server IoT cloud	MQTT/LTE-WiFi	Android/iOS
Server IoT Cloud	Proses & simpan data BPM, jalankan threshold	MQTT Broker	Alert otomatis
Dashboard Komando	Tampilkan status personel real-time	WebSocket	Browser/layar

C. Instrumen dan Subjek

Pengujian melibatkan lima sukarelawan personel militer aktif (4 pria, 1 wanita, usia 22–30 tahun, IMT normal, tanpa riwayat penyakit kardiovaskular). Alat ukur utama adalah smartwatch dengan sensor PPG terintegrasi; alat pembanding adalah pulse oximeter jari terkalibrasi pabrik. Setiap subjek menjalani dua sesi: (1) istirahat 5 menit, dan (2) aktif setelah berlari di tempat 2 menit. Data BPM kedua alat direkam bersamaan setiap 30 detik oleh dua operator.

D. Parameter Evaluasi

Evaluasi dilakukan berdasarkan tiga parameter: (1) **Akurasi sensor PPG**, menggunakan rumus Error (%) = |BPM^{PPG}

– $BPM_{Oxi} / BPM_{Oxi} \times 100\%$, dibandingkan standar AAMI (<5%); (2) **Alert latency**, waktu dari deteksi anomali hingga notifikasi diterima di dashboard; dan (3) **Packet delivery rate** (PDR), persentase paket MQTT yang berhasil diterima server pada berbagai skenario lapangan (Etiwy et al., 2019).

HASIL PENELITIAN

A. Akurasi Sensor PPG

Hasil pengujian pada lima subjek disajikan pada Tabel 2. Rata-rata selisih BPM antara sensor PPG dan pulse oximeter standar adalah 2,3 BPM, dengan error rata-rata 1,9%. Error minimum 1,3% terjadi pada kondisi istirahat, sedangkan error maksimum 2,7% terjadi pada kondisi aktif. Seluruh nilai error berada di bawah batas klinis AAMI (<5%), mengkonfirmasi bahwa akurasi sistem yang dirancang memenuhi standar perangkat monitoring medis non-invasif.

Tabel 2. Akurasi Sensor PPG vs. Pulse Oximeter

Subjek/Sex/Usia	Kondisi	BPM SW	BPM Oxi	Δ	Error %
S1 / Pria / 22 th	Istirahat	72	73	1	1,4%
S1 / Pria / 22 th	Aktif	138	141	3	2,1%
S2 / Pria / 25 th	Istirahat	68	69	1	1,5%
S2 / Pria / 25 th	Aktif	144	148	4	2,7%
S3 / Wanita / 23 th	Istirahat	75	76	1	1,3%
S3 / Wanita / 23 th	Aktif	132	135	3	2,2%
S4 / Pria / 28 th	Istirahat	70	71	1	1,4%
S4 / Pria / 28 th	Aktif	150	154	4	2,6%

S5 / Pria / 30 th	Istirahat	74	75	1	1,4%
S5 / Pria / 30 th	Aktif	142	146	4	2,7%
Rata-rata keseluruhan		—	—	2,3	1,9%

Peningkatan error pada kondisi aktif (rata-rata 2,5%) dibandingkan istirahat (1,4%) disebabkan oleh motion artifact. Fenomena ini merupakan tantangan inheren teknologi PPG wearable (Gibbs & Asada, 2005; Zhang et al., 2015). Meskipun demikian, nilai error kondisi aktif masih dalam batas klinis yang dapat diterima.

B. Alert Latency dan Keandalan IoT

Hasil pengujian pada tiga skenario kondisi lapangan tersaji pada Tabel 3. Pada lapangan terbuka (50 m), latency 1,2 detik dengan PDR 98,5%. Degradasi terjadi pada medan berat (100 m) dengan latency 2,1 detik dan PDR 93,2% akibat atenuasi sinyal BLE oleh vegetasi dan topografi. Seluruh latency sistem (0,8–2,1 detik) jauh lebih rendah dibandingkan pelaporan manual konvensional (45–120 detik).

Tabel 3. Alert Latency dan Packet Delivery Rate

Skenario	Jarak	Latency	PDR	Keterangan
Dalam ruangan	10 m	0,8 dtk	100%	Sinyal optimal
Lapangan terbuka	50 m	1,2 dtk	98,5%	Interferensi ringan
Hutan / medan berat	100 m	2,1 dtk	93,2%	Perlu BLE repeater
Manual (konvensional)	—	45–120 dtk	—	Pelaporan lisan/radio

PEMBAHASAN

A. Akurasi Deteksi dan Validasi Klinis

Error rata-rata 1,9% berada dalam batas klinis AAMI dan konsisten dengan studi validasi terdahulu: Inui et al. (2020) melaporkan korelasi PPG smartwatch dengan ECG standar pada pasien fibrilasi atrium; Perez et al. (2019) mengkonfirmasi sensitivitas tinggi dalam mendeteksi aritmia; Etiwy et al. (2019) menunjukkan akurasi wearable ECG setara Holter monitor; dan Salandin et al. (2019) mengkonfirmasi keandalan dua wristband komersial dalam pengukuran BPM.

Peningkatan error pada kondisi aktif mengkonfirmasi pengaruh motion artifact yang telah diidentifikasi Allen (2007). Solusi yang direkomendasikan: (a) fusi data PPG dan akselerometer menggunakan kerangka TROIKA (Zhang et al., 2015); (b) filter adaptif LMS pada lapisan pemrosesan sinyal; dan (c) penempatan sensor di lokasi dengan gerakan minimal.

B. Kecepatan Respons dan Implikasi Operasional

Alert latency 1,2 detik merupakan peningkatan 37–100 kali lipat dibandingkan pelaporan manual (45–120 detik). Kecepatan ini memungkinkan protokol pertolongan pertama dimulai dalam golden period SCA (<4 menit) yang kritis bagi keselamatan jiwa (Castaneda et al., 2018). Muthusundari et al. (2024) mengkonfirmasi efektivitas sistem IoT berbasis smartwatch dalam memangkas

waktu respons darurat jantung. Protokol MQTT terbukti tepat untuk skenario jaringan terbatas di medan militer (Majumder et al., 2017; Mohan et al., 2017).

C. Keandalan Koneksi dan Strategi Mitigasi

Penurunan PDR dari 100% menjadi 93,2% pada medan berat mengindikasikan keterbatasan jangkauan BLE yang perlu diatasi (Dias & Cunha, 2018; Charlton et al., 2018). Strategi mitigasi yang direkomendasikan: (a) arsitektur mesh LoRaWAN dengan jangkauan beberapa kilometer pada daya rendah; (b) BLE repeater portabel setiap 50–80 meter pada medan berat; dan (c) mekanisme store-and-forward pada gateway untuk menjamin pengiriman saat koneksi terputus sementara.

D. Perbandingan dengan Sistem Konvensional

Tabel 4 menyajikan perbandingan sistematis antara sistem yang diusulkan dengan praktik konvensional. Sistem usulan mengungguli sistem konvensional pada seluruh tujuh aspek evaluasi, terutama pada waktu respons, cakupan monitoring, dan beban kerja tenaga medis. Yao et al. (2018) menegaskan bahwa wearable sensor generasi terkini secara konsisten mengungguli metode manual dalam akurasi dan efisiensi monitoring kesehatan.

Tabel 4. Perbandingan Sistem Usulan vs. Sistem Konvensional

Aspek	Sistem Konvensional	Sistem Usulan (SW-IoT)
Deteksi anomali	Tidak otomatis; bergantung laporan prajurit	Otomatis real-time via sensor PPG
Waktu respons	45–120 detik	< 2,2 detik (rata-rata)
Monitor jarak jauh	Tidak tersedia	Tersedia via IoT dashboard
Lokasi personel	Radio / laporan manual	GPS terintegrasi, update otomatis
Beban tenaga medis	Tinggi; periksa satu per satu	Rendah; notifikasi otomatis
Akurasi BPM	±5–10% (manual)	Error rata-rata ±1,9%
Cakupan monitoring	Satu orang per waktu	Seluruh personel unit simultan

Meskipun menjanjikan, terdapat keterbatasan yang perlu diakui: (1) pengujian dilakukan dalam simulasi terkontrol, bukan kondisi operasional aktual; (2) jumlah subjek (n=5) terlalu kecil untuk generalisasi statistik yang robust; dan (3) durasi pengujian singkat belum mengevaluasi reliabilitas jangka panjang. Keterbatasan ini menjadi prioritas penelitian lanjutan.

PENUTUP

Penelitian ini telah berhasil merancang dan mengevaluasi sistem respons darurat jantung taktis berbasis smartwatch dan IoT untuk personel militer di lapangan. Sistem mengintegrasikan sensor PPG, konektivitas BLE, protokol

MQTT, algoritma threshold, dan dashboard WebSocket untuk pemantauan kesehatan personel secara real-time di pusat komando.

Tiga temuan utama penelitian: (1) sensor PPG mencapai error rata-rata ±1,9% terhadap pulse oximeter standar, memenuhi standar AAMI (<5%); (2) alert latency rata-rata 1,2 detik pada lapangan terbuka, 37–100 kali lebih cepat dari pelaporan manual (45–120 detik); dan (3) packet delivery rate 98,5% pada jangkauan 50 meter dengan degradasi terkontrol pada medan berat. Sistem ini memiliki fondasi teknis yang kuat untuk implementasi operasional guna meningkatkan keselamatan personel TNI.

Empat arah penelitian lanjutan yang diprioritaskan: (1) uji lapangan operasional berskala besar (n≥30) bersama satuan TNI aktif; (2) integrasi machine learning untuk klasifikasi aritmia otomatis (Zhang et al., 2015; Paradkar & Chowdhury, 2017); (3) pengembangan jaringan LoRaWAN mesh untuk jangkauan lebih luas; dan (4) kajian regulasi sertifikasi perangkat medis wearable untuk lingkungan militer Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, J. (2007). Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological Measurement*, 28(3), R1–R39. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/3/R01>
- Castaneda, D., Esparza, A., Ghamari, M., Soltanpur, C., & Nazeran, H. (2018). A review on wearable

- photoplethysmography sensors and their potential future applications in health care. *International Journal of Biosensors & Bioelectronics*, 4(4), 195–202.
<https://doi.org/10.15406/ijbsbe.2018.04.00125>
- Charlton, P. H., Birrenkott, D. A., Bonnici, T., Pimentel, M. A. F., Johnson, A. E. W., Alastruey, J., Tarassenko, L., Watkinson, P. J., Beale, R., & Clifton, D. A. (2018). Breathing rate estimation from the electrocardiogram and photoplethysmogram: A review. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 11, 2–20.
<https://doi.org/10.1109/RBME.2017.2763681>
- Dias, D., & Paulo Silva Cunha, J. (2018). Wearable health devices—Vital sign monitoring, systems and technologies. *Sensors*, 18(8), 2414.
<https://doi.org/10.3390/s18082414>
- Etiwy, M., Akhrass, Z., Gillinov, L., Alashi, A., Wang, R., Blackburn, G., & Cho, L. (2019). Accuracy of wearable electrocardiographs compared with a standard Holter monitor. *BMJ Open Heart*, 6(1), e000840.
<https://doi.org/10.1136/openhrt-2018-000840>
- Gibbs, P. T., & Asada, H. H. (2005). Reducing motion artifact in wearable bio-sensors using MEMS accelerometers for active noise cancellation. *Proceedings of the 2005 American Control Conference*, 1581–1586.
<https://doi.org/10.1109/ACC.2005.1470469>
- Inui, T., Kohno, H., Kawasaki, Y., Matsuura, K., Ueda, H., Tamura, Y., Watanabe, M., Inage, Y., Yakita, Y., Wakabayashi, Y., & Matsumiya, G. (2020). Use of a smart watch for early detection of paroxysmal atrial fibrillation: Validation study. *JMIR Cardio*, 4(1), e14857.
<https://doi.org/10.2196/14857>
- Kim, H. G., Cheon, E. J., Bai, D. S., Lee, Y. H., & Koo, B. H. (2018). Stress and heart rate variability: A meta-analysis and review of the literature. *Psychiatry Investigation*, 15(3), 235–245.
<https://doi.org/10.30773/pi.2017.08.17>
- Majumder, S., Mondal, T., & Deen, M. J. (2017). Wearable sensors for remote health monitoring. *Sensors*, 17(1), 130.
<https://doi.org/10.3390/s17010130>
- Mohan, P. M., Nagarajan, V., & Das, S. R. (2017). Stress measurement from wearable photoplethysmographic sensor using heart rate variability data. *2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, 1141–1144.
<https://doi.org/10.1109/ICCSP.2017.8286553>
- Muthusundari, S., Priyadharshii, M., Preethi, V., Priya, K., & Priyadharcini, K. (2024). Smart watch for early heart attack detection and emergency assistance using IoT. *LatIA*, 2, 109.
<https://doi.org/10.62486/latia2024109>
- Paradkar, N., & Chowdhury, S. R. (2017). Cardiac arrhythmia detection using photoplethysmography. *Proceedings of the 39th Annual International Conference of the IEEE EMBC*, 113–116.
<https://doi.org/10.1109/EMBC.2017.8036769>
- Perez, M. V., Mahaffey, K. W., Hedlin, H., Rumsfeld, J. S., Garcia, A., Ferris, T., & Turakhia, M. P. (2019). Large-scale assessment of a smartwatch to identify atrial fibrillation. *New England Journal of Medicine*, 381(20), 1909–1917.
<https://doi.org/10.1056/NEJMoa1901183>
- Salandin, A., Arnold, J., & Pagani, L. (2019). Accuracy of heart rate measurements provided by two wristband wearable devices. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 43(3), 1–7.
<https://doi.org/10.1080/03091902.2019.1612170>
- Tamura, T., Maeda, Y., Sekine, M., & Yoshida, M. (2014). Wearable photoplethysmographic sensors—Past and present. *Electronics*, 3(2), 282–302.
<https://doi.org/10.3390/electronics3020282>
- Yao, S., Swetha, P., & Zhu, Y. (2018). Nanomaterial-enabled wearable sensors for healthcare. *Advanced Healthcare Materials*, 7(1), 1700889.
<https://doi.org/10.1002/adhm.201700889>