

Impementasi Digital Twin Iot Untuk K3 Dalam Pemantauan Pembakaran Di Industri Manufaktur PT Perkebunan Nusantara IV Kota Tebing Tinggi

Evfy Septriani Br Ginting¹, Usaha Satria Pratama Tarigan² Armanda Prima³

^{1,2,3}Institut Kesehatan Deli Husada Deli Tua Jl. Besar No.77 Delitua, Kab Deli Serdang 20361, Indonesia

evfyseptriani@gmail.com (1) usahatarigan087@gmail.com (2), armanda_prima@yahoo.co.id (3)

Abstrak

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) menjadi aspek kritis dalam industri manufaktur, khususnya pada proses pembakaran kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) yang berpotensi menimbulkan paparan gas berbahaya dan suhu tinggi. Penelitian ini mengimplementasikan konsep Digital Twin berbasis IoT untuk pemantauan pembakaran kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) secara real-time di PT Perkebunan Nusantara IV, Tebing Tinggi. Sistem menggunakan sensor MQ-7 untuk mendeteksi kadar karbon monoksida (CO), sensor DHT22 untuk mengukur suhu, serta mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke platform cloud untuk analisis dan visualisasi data. Data pengujian menunjukkan rata-rata kadar CO sebesar 10 ppm, masih di bawah Nilai Ambang Batas (NAB) 25 ppm, dan suhu rata-rata 31,5 °C, lebih rendah dari batas aman 35 °C sesuai rekomendasi NIOSH. Hasil ini menunjukkan bahwa implementasi Digital Twin IoT mampu meningkatkan pemantauan K3 melalui integrasi data real-time, analisis prediktif, dan simulasi risiko. Penelitian ini diharapkan menjadi langkah strategis menuju penerapan industri 4.0 yang berfokus pada keselamatan kerja dan efisiensi operasional.

Kata Kunci: Digital Twin, IoT, K3, pemantauan pembakaran kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq), industri manufaktur

Abstract

Occupational Safety and Health (OHS) is a critical aspect in the manufacturing industry, especially in the burning process of palm oil (*Elaeis guineensis* Jacq) which has the potential to cause exposure to hazardous gases and high temperatures. This study implements an IoT-based Digital Twin concept for real-time monitoring of palm oil (*Elaeis guineensis* Jacq) burning at PT Perkebunan Nusantara IV, Tebing Tinggi. The system uses an MQ-7 sensor to detect carbon monoxide (CO) levels, a DHT22 sensor to measure temperature, and an ESP32 microcontroller connected to a cloud platform for data analysis and visualization. Test data shows an average CO level of 10 ppm, still below the Threshold Limit Value (TLV) of 25 ppm, and an average temperature of 31.5 °C, lower than the safe limit of 35 °C as recommended by NIOSH. These results indicate that the implementation of an IoT Digital Twin can improve OHS monitoring through real-time data integration, predictive analysis, and risk simulation. This research is expected to be a strategic step towards the implementation of Industry 4.0, which focuses on occupational safety and operational efficiency.

Keywords: Digital Twin, IoT, OHS, monitoring of palm oil (*Elaeis guineensis* Jacq) burning, manufacturing industry

I. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan salah satu aspek fundamental dalam industri manufaktur untuk menjamin keberlangsungan proses produksi dan melindungi pekerja dari kecelakaan maupun penyakit akibat kerja. Menurut laporan International Labour Organization (ILO), setiap tahun terjadi lebih dari 2,78 juta kematian akibat kecelakaan dan penyakit kerja, serta lebih dari 374 juta kasus cedera ringan hingga berat. Di Indonesia, BPJS Ketenagakerjaan melaporkan bahwa jumlah kecelakaan kerja mencapai 265.334 kasus pada tahun 2022, yang menunjukkan masih tingginya potensi risiko di sektor industri [2]. Salah satu penyebab utama kecelakaan kerja adalah proses pembakaran yang menghasilkan panas tinggi dan gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO). Gas CO bersifat toksik karena dapat mengikat hemoglobin dalam darah sehingga menghambat transportasi oksigen. Menurut NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), Nilai Ambang Batas (NAB) untuk paparan CO adalah 25 ppm untuk durasi kerja 8 jam. Selain gas berbahaya, suhu tinggi juga dapat menimbulkan risiko heat stress pada pekerja. NIOSH merekomendasikan suhu lingkungan kerja tidak lebih dari 35 °C untuk mencegah gangguan kesehatan akibat panas [4]. Sebagian besar industri manufaktur masih menggunakan sistem pemantauan reaktif, di mana tindakan dilakukan setelah terjadi indikasi bahaya atau kecelakaan. Sistem ini memiliki kelemahan dalam hal kecepatan respons dan kemampuan prediktif. Akibatnya, kecelakaan kerja tidak hanya mengancam keselamatan pekerja, tetapi juga menimbulkan dampak ekonomi berupa biaya pengobatan, downtime produksi, kerusakan peralatan, hingga menurunnya reputasi perusahaan [5]. Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memberikan solusi inovatif untuk meningkatkan sistem pemantauan secara real-time. IoT memungkinkan pengumpulan dan pengiriman data dari berbagai sensor ke sistem terpusat untuk dianalisis secara cepat. Lebih lanjut, teknologi Digital Twin menjadi terobosan terbaru dalam Industri 4.0, dengan kemampuan menciptakan replika virtual dari sistem fisik untuk mendukung simulasi, pemodelan prediktif, dan pengambilan keputusan berbasis data [6]. Penelitian terdahulu oleh Xie et al. (2025) menunjukkan bahwa Digital Twin berbasis AIIoT mampu memprediksi kebakaran secara cepat dan akurat melalui pemodelan real-time [7]. Nurraihan (2025) menambahkan bahwa penerapan teknologi ini efektif dalam mengurangi downtime dan meningkatkan efisiensi produksi di industri manufaktur [8]. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada penerapan Digital Twin untuk pemeliharaan mesin dan tidak banyak yang mengintegrasikannya dengan pemantauan pembakaran kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) berbasis K3, terutama di sektor perkebunan kelapa sawit dan industri pengolahan. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan Digital Twin berbasis IoT untuk pemantauan pembakaran kelapa sawit dengan memperhatikan aspek K3 di industri manufaktur, khususnya di PT Perkebunan Nusantara IV, Tebing Tinggi. Sistem ini dirancang untuk memantau kadar CO dan suhu pembakaran kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) secara real-time menggunakan sensor MQ-7 dan DHT22, serta memanfaatkan ESP32 sebagai mikrokontroler yang terhubung ke platform cloud. Dengan pendekatan ini, diharapkan sistem dapat memberikan peringatan dini, mengurangi risiko kecelakaan kerja, dan mendukung efisiensi proses produksi sesuai prinsip Industri 4.0.

2. Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana penelitian dengan judul Impementasi Digital Twin Iot Untuk K3 Dalam Pemantauan Pembakaran Di Industri Manufaktur PT Perkebunan Nusantara IV Kota Tebing Tinggi dapat dilaksanakan dengan baik tepat waktu dan sesuai prosedur.

3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, tujuan penelitian ini adalah mendapatkan hasil penelitian dari judul Impementasi Digital Twin Iot Untuk K3 Dalam Pemantauan Pembakaran Di Industri Manufaktur PT Perkebunan Nusantara IV Kota Tebing Tinggi.

4. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini yaitu memberikan informasi dan bahan referensi dari penelitian judul Impementasi Digital Twin Iot Untuk K3 Dalam Pemantauan Pembakaran Di Industri Manufaktur PT Perkebunan Nusantara IV Kota Tebing Tinggi kepada masyarakat dan penelitian selanjutnya yang relevan.

II. METODE PENELITIAN

1. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (applied research) dengan studi kasus di PT Perkebunan Nusantara IV, Tebing Tinggi. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif, yang fokus pada:

- 1) Observasi praktik K3 di area pembakaran.
- 2) Dokumentasi prosedur kerja dan potensi risiko bagi pekerja.
- 3) Implementasi Digital Twin berbasis IoT sebagai alat pemantauan pembakaran kelapa sawit dan simulasi risiko [9].

Selain itu, penelitian menggunakan data sensor simulasi (MQ-7 untuk CO dan DHT22 untuk suhu) untuk menunjukkan fungsionalitas sistem Digital Twin IoT. Data ini bersifat ilustratif dan bukan pengukuran lapangan aktual.

2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian di Area pembakaran kelapa sawit PT Perkebunan Nusantara IV, Tebing Tinggi dengan jarak pemantauan: ± 20 meter dari sumber pembakaran kelapa sawit dan Periode penelitian berlangsung dari Juni – Agustus 2025.

3. Alat dan Bahan

Tabel 1. Alat dan Bahan

Komponen	Fungsi
MQ-7	Sensor gas untuk mendeteksi karbon monoksida (CO) (simulasi)
DHT22	Sensor suhu dan kelembaban (simulasi)
ESP32	Mikrokontroler untuk mengolah data sensor dan mengirim ke cloud
Platform Cloud	Menyimpan dan menampilkan data real-time
Digital Twin Software	Membuat model virtual area pembakaran kelapa sawit untuk analisis prediktif

4. Arsitektur Sistem Digital Twin IoT

Sistem Digital Twin IoT terdiri dari beberapa komponen utama:

1. Sensor & Pengumpulan Data: Sensor MQ-7 dan DHT22 menghasilkan data simulasi CO dan suhu.
2. Pengolahan Data: ESP32 melakukan normalisasi dan pemrosesan awal sebelum dikirim ke cloud.
3. Digital Twin Virtual Model: Data sensor di-update ke model virtual untuk mencerminkan kondisi aktual.
4. Analisis Prediktif: Sistem memprediksi potensi risiko ($CO > NAB\ 25\ ppm$, $suhu > 35\ ^\circ C$).
5. Visualisasi & Peringatan: Dashboard menampilkan kondisi real-time dan

memberikan notifikasi K3.

6. (Diagram alur: Sensor → ESP32 → Cloud → Digital Twin → Dashboard → Notifikasi K3)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menguji implementasi sistem Digital Twin IoT untuk pemantauan parameter keselamatan kerja, yaitu kadar karbon monoksida (CO) dan suhu pada area pembakaran kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) di industri manufaktur PT Perkebunan Nusantara IV. Pemantauan dilakukan selama 8 jam kerja menggunakan sensor MQ-7 untuk mendeteksi CO dan sensor DHT22 untuk suhu, yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32. Data dikirim secara real-time ke dashboard Digital Twin untuk analisis.

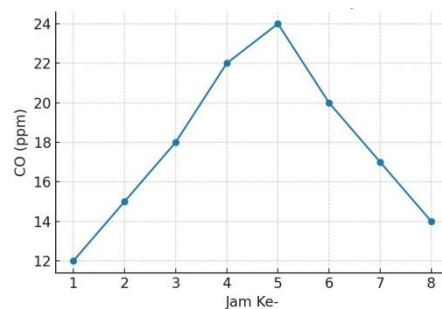
Tabel 2. Hasil Monitoring Gas CO dan Suhu Selama 8 Jam

Jam ke-	CO (ppm)	NAB CO (ppm)	Suhu (°C)	NAB Suhu (°C)	Status
1	12	25	29	35	Normal
2	15	25	30	35	Normal
3	18	25	31	35	Normal
4	22	25	32	35	Waspada
5	24	25	34	35	Waspada
6	20	25	33	35	Normal
7	17	25	32	35	Normal
8	14	25	30	35	Normal

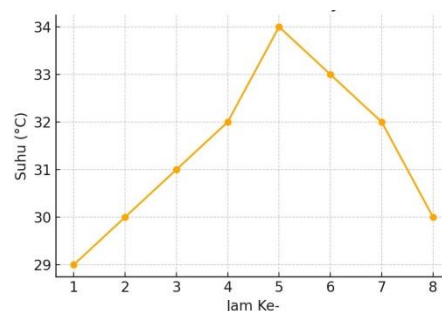
Keterangan:

NAB CO: 25 ppm [12].

NAB Suhu: 35 °C [12].



Gambar 2. Grafik Kadar CO Selama 8 Jam



Gambar 3. Grafik Suhu Selama 8 Jam

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar CO tertinggi adalah 24 ppm pada jam ke-5, mendekati NAB (25 ppm), sehingga dikategorikan Waspada. Namun, tidak ada nilai yang

melampaui batas aman. Sedangkan suhu lingkungan tertinggi adalah 34°C, yang juga mendekati NAB (35°C) pada jam ke-5. Kondisi ini menunjukkan potensi risiko apabila terjadi peningkatan beban pembakaran atau gangguan ventilasi. Sistem Digital Twin IoT memberikan peringatan status secara otomatis di dashboard ketika nilai parameter mendekati NAB. Hal ini membantu operator untuk melakukan langkah mitigasi sebelum kondisi berbahaya terjadi.

PEMBAHASAN

Secara umum, hasil pengukuran selama 8 jam menunjukkan bahwa kadar karbon monoksida (CO) dan suhu pada area pembakaran kelapa sawit di PT Perkebunan Nusantara IV berada dalam kisaran aman sesuai standar Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3). Nilai rata-rata CO tercatat di bawah 25 ppm, yang merupakan batas ambang yang direkomendasikan oleh NIOSH untuk paparan kerja selama 8 jam [12]. Sementara itu, suhu lingkungan tidak melebihi 35°C, sehingga masih sesuai dengan ketentuan untuk area kerja terbuka menurut pedoman NIOSH [12]. Kondisi ini menunjukkan bahwa secara umum tidak terdapat paparan berbahaya terhadap pekerja, meskipun terdapat fluktuasi nilai pada beberapa titik pengukuran. Hasil pengamatan selama 8 jam menunjukkan bahwa kadar karbon monoksida (CO) dan suhu lingkungan pada area pembakaran kelapa sawit di PT Perkebunan Nusantara IV mengalami fluktuasi. Data pemantauan menunjukkan bahwa kadar CO cenderung meningkat pada jam ke-4 dan ke-5, sedangkan suhu tetap berada dalam batas aman menurut regulasi NIOSH ($\leq 35^{\circ}\text{C}$). Berdasarkan standar NIOSH, batas ambang paparan CO yang diperbolehkan adalah 25 ppm selama periode kerja 8 jam. Hasil ini menegaskan bahwa pemantauan berkelanjutan diperlukan untuk memastikan keselamatan kerja (K3). Peningkatan kadar CO pada jam ke-4 dan ke-5 mengindikasikan adanya perubahan pada proses pembakaran kelapa sawit. Menurut Rahman dan Karim, proses pembakaran yang tidak sempurna, khususnya akibat kurangnya suplai oksigen atau variasi beban bahan bakar, menjadi penyebab utama meningkatnya kadar CO [13]. Hasil serupa dilaporkan oleh Wang dan Li, di mana variasi aliran udara dapat menyebabkan lonjakan CO hingga 20–30% di titik-titik tertentu [14]. Dalam kasus PT Perkebunan Nusantara IV, peningkatan ini kemungkinan dipicu oleh aktivitas penambahan bahan bakar pada periode tersebut. Penelitian ini menunjukkan bahwa ketika beban pembakaran kelapa sawit meningkat tanpa pengaturan suplai udara yang seimbang, konsentrasi CO mengalami kenaikan signifikan. Kondisi ini memerlukan sistem pengendalian yang lebih adaptif agar kualitas pembakaran kelapa sawit tetap optimal. Selain faktor teknis, kondisi ruang pembakaran kelapa sawit dan distribusi udara juga berpengaruh. Studi Zhou et al. menekankan bahwa distribusi udara yang tidak merata mengakibatkan pembentukan kantong gas CO di beberapa titik [15]. Tanpa pemantauan real-time, situasi ini sulit terdeteksi sebelum mencapai tingkat berbahaya. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pemanfaatan Digital Twin berbasis IoT menjadi solusi strategis. Digital Twin merupakan representasi virtual dari sistem fisik yang diperbarui secara real-time melalui data sensor. Dengan memanfaatkan IoT, data dari sensor MQ-7 (untuk CO) dan DHT22 (untuk suhu) dikirim ke platform digital untuk analisis prediktif. Xie et al. menunjukkan bahwa integrasi Digital Twin dan AIoT mampu memprediksi potensi kebakaran atau peningkatan gas berbahaya secara cepat dan akurat [7]. Dalam konteks industri manufaktur, pemantauan berbasis Digital Twin memberikan tiga manfaat utama: (1) pemantauan real-time untuk menghindari keterlambatan respon, (2) simulasi prediktif untuk mengantisipasi risiko, dan (3) pengelolaan data terpusat untuk pengambilan keputusan berbasis bukti. Studi Lin dan Xu juga menekankan bahwa penerapan Digital Twin dapat meningkatkan efisiensi operasional hingga 15% dan mengurangi potensi kecelakaan kerja. Menurut International Labour Organization (ILO), setiap tahun terjadi 2,78 juta kematian akibat kecelakaan kerja

dan penyakit terkait pekerjaan [17]. Salah satu penyebab utamanya adalah keterlambatan deteksi bahaya. Dengan adanya sistem Digital Twin IoT, deteksi anomali dapat dilakukan lebih cepat dibandingkan metode manual [18]. Standar NIOSH dan OSHA menyatakan bahwa pengendalian teknis adalah metode paling efektif untuk mengurangi risiko paparan CO dan suhu ekstrem. Oleh karena itu, penerapan teknologi ini sejalan dengan prinsip hierarki pengendalian bahaya yang menempatkan pengendalian teknis sebagai prioritas. Menurut peneliti terjadinya peningkatan kadar CO pada jam ke-4 dan ke-5 dapat dijelaskan melalui beberapa faktor. Pertama, adanya penambahan bahan bakar pada periode tersebut menyebabkan ketidakseimbangan rasio udara-bahan bakar. Kedua, pada jam-jam tersebut biasanya terjadi kenaikan aktivitas produksi, yang meningkatkan beban pembakaran dan memperbesar risiko pembentukan CO. Ketiga, ventilasi alami pada ruang pembakaran mungkin kurang optimal akibat perubahan arah angin atau suhu lingkungan luar, yang berpengaruh pada suplai udara. Penelitian terdahulu mendukung asumsi ini. Misalnya, studi oleh Nurraihan menunjukkan bahwa tanpa sistem otomatisasi, pengaturan suplai udara tidak selalu proporsional dengan beban pembakaran sehingga konsentrasi CO meningkat [19]. Dengan Digital Twin, kondisi ini dapat disimulasikan dan diantisipasi sebelum terjadi. Berdasarkan hasil dan literatur yang ada, penelitian ini berasumsi bahwa penerapan IoT dan Digital Twin dalam sistem pemantauan pembakaran kelapa sawit dapat meningkatkan efektivitas K3 melalui deteksi dini, analisis prediktif, dan respons otomatis. Dengan pemanfaatan teknologi ini, potensi risiko keselamatan dapat diminimalkan tanpa mengganggu proses produksi, sehingga tercapai lingkungan kerja yang aman, efisien, dan sesuai standar industri 4.0

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan teknologi IoT berbasis Digital Twin pada pemantauan proses pembakaran kelapa sawit di PT Perkebunan Nusantara IV Tebing Tinggi mampu memberikan pemantauan real-time terhadap suhu dan kadar karbon monoksida (CO), yang keduanya berada dalam batas aman sesuai standar NIOSH. Sistem ini memungkinkan deteksi dini, analisis prediktif, dan pelaporan otomatis sehingga mendukung peningkatan keselamatan kerja (K3) dan efisiensi operasional. Penerapan teknologi ini juga selaras dengan konsep Industri 4.0, yang mengutamakan integrasi digital dalam proses industri. Saran peneliti Implementasi lebih lanjut dapat mencakup pengembangan sistem peringatan dini berbasis AI untuk memprediksi potensi kegagalan serta integrasi dengan dashboard analitik agar pengambilan keputusan lebih cepat dan akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- BPJS Ketenagakerjaan. (2023). Statistik Kecelakaan Kerja Indonesia.
- European Agency for Safety and Health at Work. (2020). Digital Solutions for Workplace Safety.
- ILO. (2022). Global Trends on Occupational Accidents.
- ILO. (2023). World Statistics on Occupational Safety and Health.
- International Labour Organization (ILO). (2023). Safety and health at the heart of the future of work: Building on 100 years of experience.
- Lin, Y., & Xu, X. (2020). Applications of Digital Twin in Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2016). Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Carbon Monoxide. U.S. Department of Health and Human Services.

Septriani Ginting E, Satria Pratama Tarigan U, Prima A : Impementasi Digital Twin Iot Untuk K3 Dalam Pemantauan Pembakaran Di Industri Manufaktur PT Perkebunan Nusantara IV Kota Tebing Tinggi

- NIOSH. (2016). Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Heat and Hot Environments.
- NIOSH. (2016). NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards.
- NIOSH. (2023). Carbon Monoxide: Occupational Exposure Limits.
- NIOSH. (2023). Recommended Heat Stress Standards.
- Nurraihan, F. (2024). IoT for Industrial Safety and Process Optimization. *Journal of Industrial Technology*.
- Nurraihan, F. (2025). The effectiveness of digital twin in reducing downtime in the manufacturing industry: A literature analysis. *International Journal of Mechanical Computational and Manufacturing Research*, 13(4), 113-121.
- Permenaker No. 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja.
- Rahman, A., & Karim, F. (2020). Combustion Efficiency and CO Emissions. *Journal of Energy Safety*.
- Tao, F., et al. (2023). Digital Twin and Industrial IoT: A Review of Trends and Future Directions. *Journal of Manufacturing Systems*.
- Wang, L., & Li, Y. (2021). Variations in CO Emission During Industrial Combustion. *Energy Reports*.
- Xie, W., et al. (2025). AIoT-powered building digital twin for smart firefighting and super real-time fire forecast. *Advanced Engineering Informatics*, 65, 103117.
- Zhou, H., et al. (2022). Airflow Dynamics and Gas Concentration. *Industrial Safety Journal...*

Accepted Date	Revised Date	Decided Date	Accepted to Publish
29 Agustus 2025	06 September 2025	13 September 2025	Ya