

Integrasi *Wearable Sensor* dalam Sistem K3 untuk Pemantauan Lingkungan dan Kondisi Fisiologis Pekerja di Industri Pupuk

Arief Mardiyanto¹, Siti Amra², Muhammad Kamal³, Supardin⁴, Gunawan⁵, Rahmawati^{6*}

^{1,2,3,5,6} Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe

⁴ Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe

Jln. B.Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA

¹ariefmardiyanto@pnl.ac.id

^{6*}rahmawati.gunawan@gmail.com

Abstrak— Industri pupuk memiliki risiko tinggi terhadap paparan lingkungan berbahaya, sehingga diperlukan pemantauan kondisi fisiologis pekerja untuk mendeteksi dini kelelahan dan hipoksia. Penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe wearable sensor menggunakan *Internet of Things* (IoT) yang mampu memantau lingkungan kerja dan kondisi pekerja secara real-time guna mendukung penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) digital. Metode yang digunakan adalah pendekatan Research and Development (R&D) dengan tahapan perancangan, integrasi sensor, pengembangan sistem komunikasi IoT, dan validasi laboratorium. Perangkat yang dikembangkan terdiri atas ID Card pintar dengan sensor MQ-135 untuk gas amonia dan DHT22 untuk suhu serta kelembapan, serta gelang biometrik dengan sensor MAX30102 untuk detak jantung dan SpO₂. Identifikasi pekerja dilakukan melalui barcode yang dibuat menggunakan online generator. Seluruh data diolah oleh mikrokontroler ESP32 dan dikirim ke cloud platform ThingsBoard untuk ditampilkan pada dashboard monitoring. Hasil pengujian menunjukkan sensor DHT22 memiliki akurasi baik (error $\pm 0,66$ °C dan $\pm 0,28$ %RH), MQ135/MQ137 efektif mendeteksi amonia hingga >100 ppm dengan respons linier, serta MAX30102 memiliki deviasi rata-rata 4,13% untuk HR dan $\pm 1,06$ % untuk SpO₂ dibandingkan alat standar. Algoritma if-then berhasil mengklasifikasikan kondisi kerja menjadi aman, waspada, dan berbahaya, sementara pengujian peringatan dini masih dilakukan melalui simulasi. Prototipe wearable sensor berbasis IoT ini berpotensi meningkatkan efektivitas sistem K3 digital di industri pupuk, dengan Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) berada pada level 5.

Kata kunci— industri pupuk, K3, wearable sensor, detak jantung, suhu, kelembapan

Abstract— The fertilizer industry has a high risk of exposure to hazardous environments, so monitoring the physiological conditions of workers is necessary for early detection of fatigue and hypoxia. This research aims to develop a wearable sensor prototype using the Internet of Things (IoT) that is able to monitor the work environment and worker conditions in real-time to support the implementation of digital Occupational Safety and Health (OHS). The method used is a Research and Development (R&D) approach with stages of design, sensor integration, IoT communication system development, and laboratory validation. The developed device consists of a smart ID card with an MQ-135 sensor for ammonia gas and DHT22 for temperature and humidity, as well as a biometric bracelet with a MAX30102 sensor for heart rate and SpO₂. Worker identification is carried out through a barcode created using an online generator. All data is processed by an ESP32 microcontroller and sent to the ThingsBoard cloud platform to be displayed on the monitoring dashboard. The test results show that the DHT22 sensor has good accuracy (error ± 0.66 °C and ± 0.28 %RH), the MQ135/MQ137 effectively detects ammonia up to >100 ppm with a linear response, and the MAX30102 has an average deviation of 4.13% for HR and ± 1.06 % for SpO₂ compared to standard tools. The if-then algorithm successfully classifies working conditions into safe, alert, and dangerous, while early warning testing is still being conducted through simulation. This IoT-based wearable sensor prototype has the potential to increase the effectiveness of the digital OHS system in the fertilizer industry, with a Technology Readiness Level (RTL) at level 5.

Keywords— fertilizer industry, heart rate, humidity, OSH, temperature, wearable sensors

I. PENDAHULUAN

Industri pupuk merupakan salah satu sektor strategis yang memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional. Namun, proses produksinya berpotensi menimbulkan risiko keselamatan dan kesehatan kerja (K3) akibat paparan gas berbahaya seperti amonia, kondisi suhu ekstrem dan kelembapan tinggi. Paparan tersebut tidak hanya memengaruhi kinerja pekerja, tetapi juga berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan serius dalam jangka panjang [1]. Di sisi lain, aspek fisiologis pekerja seperti detak jantung (heart rate) dan kadar oksigen dalam darah (SpO₂) juga menjadi indikator penting dalam mendeteksi kelelahan dan risiko hipoksia yang dapat mengurangi produktivitas maupun menimbulkan kecelakaan kerja. Oleh karena itu, pemantauan terpadu terhadap lingkungan kerja dan kondisi pekerja menjadi kebutuhan yang sangat mendesak.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji penerapan teknologi IoT di sektor industri memiliki potensi besar dalam meningkatkan keselamatan kerja melalui perangkat wearable [2]. Integrasi sensor pada perlengkapan kerja seperti ID card,

rompi, helm, lencana, hingga jaket pintar memungkinkan pemantauan multi-parameter, termasuk gas berbahaya, suhu, kelembapan, kebisingan, dan akselerasi. Perangkat tersebut mampu mendeteksi kondisi berbahaya serta mengirimkan peringatan secara real-time melalui sistem komunikasi nirkabel berbasis IoT, sehingga keselamatan dan kesehatan pekerja dapat ditingkatkan secara signifikan.

Helm dengan sensor multi-parameter dirancang untuk mendeteksi gas, suhu, dan akselerasi guna meningkatkan keselamatan pekerja di lingkungan industri [3]. Selain pemantauan aspek lingkungan, pengawasan parameter biometrik pekerja juga menjadi faktor penting dalam pengembangan sistem K3 yang terintegrasi. Salah satu implementasinya adalah sistem pemantauan elektrokardiogram (ECG) yang dirancang untuk mendeteksi indikasi kelelahan dan stres pada pekerja [4]. Pemantauan biometrik pekerja menjadi aspek penting K3, misalnya melalui sistem ECG untuk mendeteksi kelelahan serta perangkat wearable fisiologis yang memonitor detak jantung, suhu, dan aktivitas, dengan data dikirim via WSN ke platform IoT pusat. [5], [6].

Sebuah sistem berbasis Arduino telah dikembangkan untuk memantau kesehatan pasien dengan sensor suhu (DS18B20), oksimeter (MAX30100), dan sensor kualitas udara (MQ-135, DHT11), dan datanya dikirim ke server web menggunakan platform ThingSpeak untuk analisis [7]. Sensor gas MQ-135 banyak digunakan dalam deteksi amonia, sementara sensor DHT22 terbukti andal dalam mengukur suhu dan kelembapan. Untuk pemantauan kondisi fisiologis, sensor MAX30102 telah banyak diaplikasikan pada perangkat elektronika untuk mengukur detak jantung dan saturasi oksigen. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih terbatas pada aspek individu jarang diterapkan pada konteks industri pupuk.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan prototipe wearable sensor berbasis IoT untuk pemantauan lingkungan dan kondisi fisiologis pekerja secara real-time. Tujuan utamanya adalah menghasilkan perangkat terintegrasi dengan identifikasi barcode serta menguji akurasi sensor, klasifikasi kondisi kerja, dan efektivitas peringatan dini. Adapun manfaat penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi akademis sebagai referensi pengembangan sistem K3 berbasis IoT, tetapi juga menghadirkan solusi awal bagi industri dalam menerapkan transformasi digital untuk meningkatkan keselamatan dan kesehatan.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan tahapan studi literatur, perancangan sistem, pembuatan prototipe, pengembangan perangkat lunak, serta validasi laboratorium. Sensor yang digunakan meliputi MQ-135 untuk amonia, DHT22 untuk suhu dan kelembapan, serta MAX30102 untuk detak jantung dan SpO₂, yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 dan dashboard cloud ThingsBoard. Algoritma *if-then* dikembangkan untuk mengklasifikasikan kondisi kerja, sementara identifikasi pekerja dilakukan melalui barcode yang dibuat dengan online generator. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil sensor terhadap alat standar dan simulasi klasifikasi kondisi kerja. Prototipe yang dihasilkan telah divalidasi di laboratorium dengan Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) level 5.

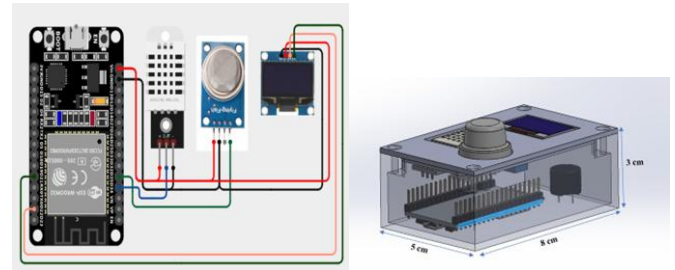
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian yang diperoleh dari proses perancangan, pembuatan, dan pengujian prototipe *wearable sensor* berbasis IoT untuk pemantauan lingkungan kerja dan kondisi fisiologis pekerja di industri pupuk dan implementasi algoritma klasifikasi serta sistem dashboard monitoring yang dikembangkan. Pemantauan dilakukan dengan sensor gas, suhu, kelembapan, serta sensor heart rate dan SpO₂ untuk memonitor kondisi lingkungan dan fisiologis pekerja secara real-time. Prototipe berupa ID card pintar dan gelang biometrik ini mampu mengukur kedua parameter secara terintegrasi, dengan data ditampilkan langsung melalui platform IoT dan dashboard pemantauan untuk mendukung penerapan sistem K3 digital.

A. *Wearable Sensor untuk Pemantauan Lingkungan*

Parameter udara yang dipantau dalam industri pupuk meliputi amonia (NH₃), temperatur, dan kelembapan [8]. Informasi hasil deteksi sensor diproses oleh mikrokontroler ESP32, kemudian ditampilkan secara real-time. Sensor MQ-135 digunakan untuk mendeteksi berbagai gas berbahaya, termasuk amonia, dan diintegrasikan dengan sensor suhu serta

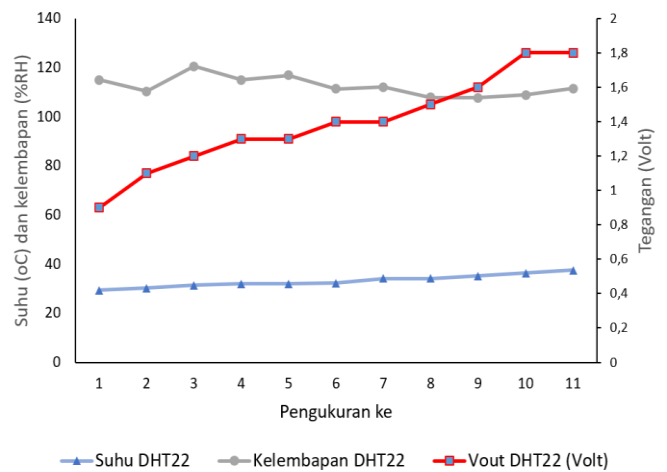
kelembapan DHT22 pada prototipe ID Card Pintar. Perangkat ini dilengkapi mikrokontroler ESP32 yang memproses data dan mengirimkannya secara nirkabel ke platform cloud Thingsboard. Desain ringkas berbentuk ID Card menjadikan prototipe nyaman digunakan pekerja tanpa mengganggu aktivitas di area industri pupuk. Skematik dasar ESP32 monitoring kualitas udara ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Perangkat monitoring kualitas udara

Perangkat sistem monitoring kualitas udara berbasis ESP32 yang mengintegrasikan sensor untuk deteksi lingkungan secara *real-time*. Rangkaian ini digunakan sebagai media uji kinerja sensor dan sistem IoT sebelum diterapkan pada prototipe wearable berukuran 8 × 5 × 3 cm.

Untuk mengetahui karakteristik sensor DHT22 terhadap variasi suhu dan kelembapan lingkungan, dilakukan serangkaian pengujian yang menghasilkan data keluaran tegangan (Vout). Sensor ini terdiri atas sensor suhu serta sensor kelembapan kapasitif dengan rentang pengukuran suhu -40°C hingga 80°C dan kelembapan 0% hingga 100%, serta tingkat akurasi masing-masing ±1°C dan ±1%. DHT22 dilengkapi mikrokontroler 8-bit internal yang berfungsi mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital dan menyajikan data suhu serta kelembapan hanya melalui satu pin. Hasil pengukuran tegangan output sensor pada beberapa nilai suhu dan kelembapan ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tegangan output sensor DHT22

DHT22 bekerja sesuai spesifikasi dengan menghasilkan sinyal output tegangan yang merepresentasikan perubahan suhu dan kelembapan. Sebelum digunakan lebih lanjut dalam sistem, diperlukan evaluasi akurasi sensor melalui uji perbandingan dengan alat ukur standar. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sensor memberikan data yang konsisten dan dapat diandalkan sebelum integrasi ke sistem utama.

Evaluasi kinerja sensor DHT22 dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran suhu dan kelembapan yang diperoleh sensor terhadap alat ukur referensi, yaitu termometer dan higrometer. Data hasil pengukuran beserta nilai galat (*error*) ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian suhu, kelembapan sensor DHT 22

Suhu (°C)			Kelembapan (%)		
DHT22	Thermometer	Error	DHT22	Higrometer	Error
29,4	30,0	0,6	85,6	85,0	0,6
30,3	31,0	0,7	80,1	80,3	0,2
31,4	32,0	0,6	89,2	89,0	0,2
31,9	32,0	0,1	83,1	83,0	0,1
32,0	33,0	0,1	84,9	85,0	0,1
32,3	33,0	0,7	79,1	79,0	0,1
34,2	35,0	0,8	77,8	77,1	0,7
34,2	35,0	0,8	73,6	73,5	0,1
35,1	36,0	0,9	72,6	72,0	0,6
36,4	37,0	0,6	72,4	72,0	0,4
37,5	38,0	0,5	74,0	74,1	0,1

Berdasarkan pengujian, menunjukkan bahwa sensor DHT22 memiliki tingkat akurasi yang baik, dengan error rata-rata $\pm 0,66$ °C untuk suhu dan $\pm 0,28$ %RH untuk kelembapan, lebih kecil dari batas toleransi pada data sheet sebesar 1 °C dan 1% RH.

Sensor MQ-135 digunakan untuk mengukur kualitas udara dengan mendeteksi konsentrasi gas. Hasil pengujian menunjukkan sensor mampu merespons keberadaan gas dari nyata mancis dengan peningkatan nilai PPM, kemudian menurun secara bertahap hingga kembali normal saat sumber gas dihentikan. Sensor MQ135 mampu mendeteksi amonia hingga konsentrasi lebih dari 100 ppm dengan karakteristik respons linier. Sensor ini menggunakan material sensitif SnO₂ yang memiliki konduktivitas rendah pada udara bersih, namun konduktivitasnya meningkat seiring bertambahnya konsentrasi gas polutan. Perubahan konduktivitas tersebut kemudian dikonversi menjadi sinyal keluaran berupa tegangan yang merepresentasikan kadar gas. Dengan sensitivitas tinggi terhadap amonia, senyawa sulfida, uap benzena, serta kemampuannya mendeteksi asap dan gas beracun lainnya, sensor MQ135 efektif digunakan dalam berbagai aplikasi pemantauan kualitas udara. Tabel 2 menyajikan data hasil pengukuran konsentrasi gas (ppm) beserta tegangan keluaran (Vout), yang sekaligus menunjukkan hubungan antara nilai konduktivitas sensor dan tegangan keluaran pada sensor gas MQ135.

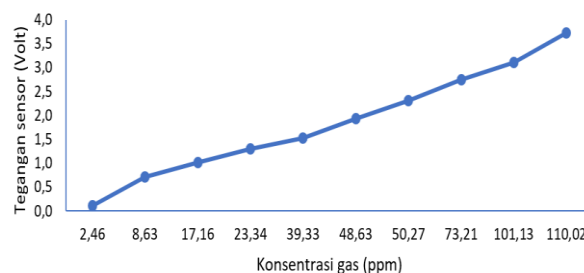
Tabel 2. Pengukuran sensor gas MQ135

Kondisi	ppm	Vout (V)
MQ135 saat ada gas	110,02	3,27
MQ135 saat tidak ada gas	2,01	0,11

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sensor MQ135 dapat mendeteksi gas polutan melalui perubahan tegangan keluaran yang signifikan. Nilai Vout meningkat dari 0,11 V tanpa gas menjadi 3,27 V saat gas terdeteksi, sesuai teori peningkatan konduktivitas sensor akibat konsentrasi gas yang lebih tinggi. Peningkatan konduktivitas ini berbanding lurus dengan penurunan resistansi sensor, yang kemudian memengaruhi besarnya tegangan keluaran. Dengan demikian,

semakin tinggi konsentrasi gas yang terdeteksi, semakin besar pula tegangan keluaran yang dihasilkan.

Untuk memahami kinerja sensor secara lebih menyeluruh, tegangan keluaran (Vout) pada sensor gas MQ135 diuji terhadap variasi konsentrasi gas, dengan hasil analisis ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Respon tegangan terhadap konsentrasi gas

Gambar 3 memperlihatkan hubungan antara konsentrasi gas (ppm) dengan tegangan keluaran sensor MQ135 (Volt). Grafik menunjukkan adanya peningkatan tegangan keluaran seiring kenaikan konsentrasi gas yang terdeteksi. Pada konsentrasi rendah 2,46 ppm, tegangan yang dihasilkan sebesar 0,11 V, sementara pada konsentrasi tertinggi 110,02 ppm, nilai tegangan mencapai 3,72 V. Hasil pengukuran ini konsisten dengan karakteristik datasheet, di mana material SnO₂ mengalami peningkatan konduktivitas akibat paparan gas polutan, yang menurunkan resistansi sensor (Rs) sekaligus meningkatkan tegangan keluarannya. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa MQ135 memiliki sensitivitas yang baik terhadap variasi konsentrasi gas pada rentang pengujian.

Pemantauan lingkungan kerja merupakan aspek krusial dalam K3 untuk menjamin keselamatan dan kesehatan pekerja. Parameter utama yang diawasi meliputi suhu udara, kelembapan relatif, dan konsentrasi gas berbahaya seperti amonia (NH₃). Kondisi lingkungan dikategorikan menjadi tiga tingkat aman, waspada, dan berbahaya berdasarkan standar nilai suhu, kelembapan, dan kadar gas, sehingga memungkinkan penerapan sistem monitoring otomatis.

Suhu udara 18–27 °C nyaman dan sesuai standar iklim tropis, sedangkan suhu 28–30 °C menurunkan produktivitas, dan >30 °C berisiko *heat stress*. Kelembapan 40–60 %RH ideal, 61–70 %RH menimbulkan rasa pengap, dan >70 %RH meningkatkan risiko jamur, gangguan pernapasan, serta korosi peralatan. Kandungan NH₃ <25 ppm aman, 25–50 ppm tercium baunya, dan >50 ppm menimbulkan iritasi dan risiko bahaya akut."

Berdasarkan kriteria tersebut, setiap pengukuran parameter lingkungan dapat dikategorikan sehingga memudahkan sistem dalam menentukan status kondisi secara otomatis. Algoritma if-then kemudian digunakan untuk menentukan kategori kondisi secara real-time berdasarkan data sensor. Kategori kondisi lingkungan terdiri dari AMAN, WASPADA, dan BERBAHAYA.

IF (Suhu >= 18 AND Suhu <= 27) AND (Kelembapan >= 40 AND Kelembapan <= 60) AND (NH₃ < 25) THEN

Kondisi = "AMAN"

ELSE IF (Suhu >= 28 AND Suhu <= 30) OR (Kelembapan >= 61 AND Kelembapan <= 70) OR (NH₃ >= 25 AND NH₃ <= 50) THEN

Kondisi = "SEDANG / WASPADA"

ELSE IF (Suhu > 30) OR (Kelembapan > 70) OR (NH₃ > 50) THEN

Kondisi = "BERBAHAYA"

ELSE

Kondisi = "TIDAK TERDEFINISI"

END IF

AMAN jika semua parameter berada dalam batas normal (suhu 18–27 °C, kelembapan 40–60 %, NH₃ < 25 ppm). WASPADA jika salah satu parameter mendekati batas atas normal (suhu 28–30 °C, kelembapan 61–70 %, NH₃ 25–50 ppm). BERBAHAYA jika salah satu parameter melebihi ambang bahaya (suhu > 30 °C, kelembapan > 70 %, NH₃ > 50 ppm).

Sistem pemantauan lingkungan kerja menggunakan sensor suhu, kelembapan, dan gas amonia (NH₃) untuk mengukur kondisi secara real-time, mendukung penerapan K3 dengan memastikan keselamatan dan kesehatan pekerja. Dengan klasifikasi kondisi menjadi aman, waspada, atau berbahaya dan penerapan algoritma if-then, sistem secara otomatis menentukan status lingkungan serta dapat diintegrasikan dengan peringatan dini, seperti indikator visual atau alarm suara, sehingga pekerja dapat segera mengambil langkah mitigasi. Pendekatan ini mempermudah pemantauan sekaligus mendukung pengambilan keputusan cepat dalam mencegah kecelakaan kerja dan gangguan kesehatan akibat paparan lingkungan yang tidak aman. Algoritma if-then untuk menentukan kondisi lingkungan kerja:

```
# Fungsi algoritma if-then
def klasifikasi(suhu, kelembapan, nh3):
    if (18 <= suhu <= 27) and (40 <= kelembapan <= 60) and (nh3 < 25):
        return "Aman"
    elif (28 <= suhu <= 30) or (61 <= kelembapan <= 70) or (25 <= nh3 <= 50):
        return "Waspada"
    elif (suhu > 30) or (kelembapan > 70) or (nh3 > 50):
        return "Berbahaya"
    else:
        return "Tidak Terdefinisi"

# Input data dari user
suhu = float(input("Masukkan suhu (°C): "))
kelembapan = float(input("Masukkan kelembapan (%RH): "))
nh3 = float(input("Masukkan kadar NH3 (ppm): "))
# Proses klasifikasi
hasil = klasifikasi(suhu, kelembapan, nh3)
# Tampilkan hasil
print("\n=== HASIL ANALISIS KONDISI LINGKUNGAN ===")
print(f"Suhu : {suhu} °C")
print(f"Kelembapan : {kelembapan} %RH")
print(f"NH3 : {nh3} ppm")
print(f"Kondisi : {hasil}")
```

Validitas algoritma if-then diuji melalui simulasi dengan data masukan dari pengguna, menggantikan data sensor, untuk menunjukkan klasifikasi kondisi lingkungan kerja berdasarkan suhu, kelembapan, dan kadar NH₃. Contoh hasil eksekusi program ditampilkan berikut:

```
Masukkan suhu (°C): 29.5
Masukkan kelembapan (%RH): 65
Masukkan kadar NH3 (ppm): 30

Hasil analisis kondisi lingkungan:
Suhu : 29.5 °C
Kelembapan : 65.0 %RH
NH3 : 30.0 ppm
Kondisi : Waspada
```

Pengukuran lingkungan kerja dilakukan menggunakan sensor suhu, kelembapan, dan gas amonia (NH₃). Data hasil pengukuran kemudian diproses menggunakan algoritma if-then untuk menentukan kondisi lingkungan kerja. Hasil pengklasifikasian ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian kategori kondisi

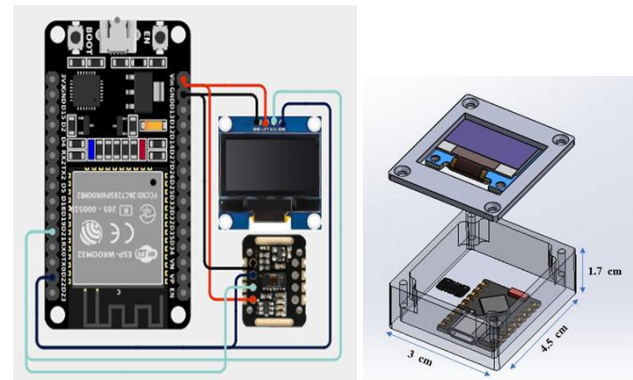
Kondisi	Suhu	Kelembapan	NH ₃	Kategori
---------	------	------------	-----------------	----------

	(°C)	(%RH)	(ppm)	Kondisi
Kondisi 1	26,5	55	15	Aman
Kondisi 2	29,2	63	20	Waspada
Kondisi 3	31,4	72	28	Berbahaya
Kondisi 4	27,8	58	12	Aman
Kondisi 5	30,5	68	22	Waspada

Pada kondisi 1 dan 4, semua parameter berada dalam batas normal sehingga dikategorikan aman. Kondisi 2 dan 5 menunjukkan kenaikan suhu (≥ 28 °C) dan kelembapan >60 %, sehingga dikategorikan waspada. Sedangkan pada kondisi 3, suhu >30 °C, kelembapan >70 %, dan kadar NH₃ 28 ppm menandakan kondisi berbahaya. Hasil implementasi algoritma menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan kondisi lingkungan secara otomatis, mendukung peringatan dini untuk mengurangi risiko gangguan kesehatan akibat suhu tinggi, kelembapan berlebih, atau paparan NH₃.

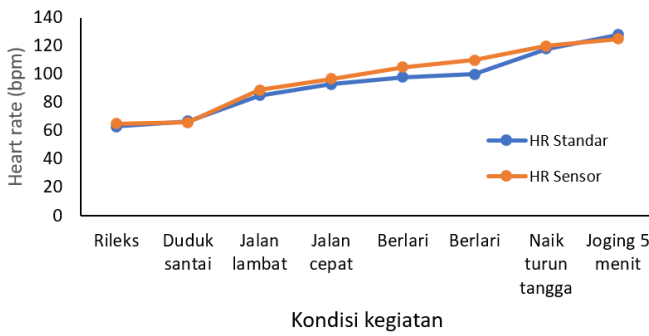
B. Wearable Sensor untuk Pemantauan Fisiologis

Rangkaian prototipe wearable sensor pemantauan fisiologis dirancang dengan mengintegrasikan sensor biometrik MAX30102, mikrokontroler ESP32, dan modul komunikasi nirkabel. Sensor MAX30102 digunakan untuk mengukur detak jantung dan saturasi oksigen (SpO₂) melalui metode fotopletismografi (PPG), dengan memanfaatkan cahaya LED merah dan inframerah yang dipantulkan kulit serta ditangkap fotodetektor untuk mendeteksi variasi volume darah. Hasil pembacaan sensor diproses oleh ESP32 yang berfungsi sebagai pusat kendali sekaligus pengirim data ke platform IoT Thingsboard. Perangkat monitoring biometrik ditunjukkan pada Gambar 4.

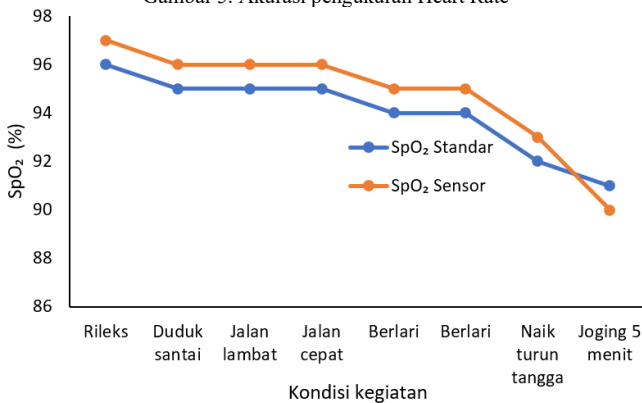


Gambar 4. Perangkat monitoring fisiologis pekerja

Dalam skematik rangkaian, sensor biometrik terhubung ke ESP32 melalui I2C untuk transfer data cepat dan akurat, dengan ESP32 terhubung ke baterai portabel dan antena WiFi agar data dapat dikirim real-time ke dashboard Thingsboard. Wearable sensor ini memantau detak jantung dan saturasi oksigen (SpO₂) pekerja, menampilkan data secara langsung, dan dikemas dalam casing berukuran 4,5 × 3 × 1,7 cm. Keakuratan pengukuran diuji dengan membandingkan hasil prototipe dengan alat standar ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Akurasi pengukuran Heart Rate



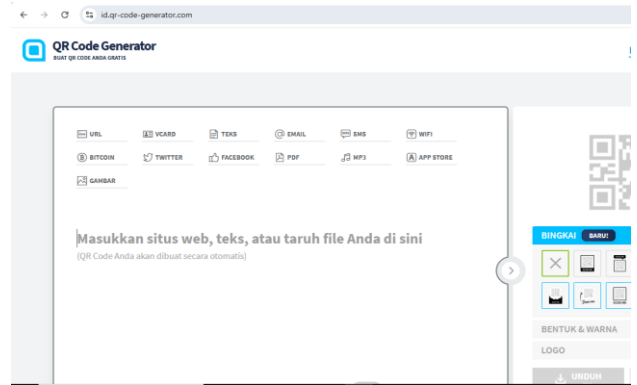
Gambar 6. Akurasi pengukuran SpO₂

Prototipe wearable sensor menunjukkan akurasi dengan deviasi rata-rata 4,13 % untuk pengukuran heart rate dan $\pm 1,06$ % untuk SpO₂. Deviasi pada prototipe wearable sensor disebabkan oleh keterbatasan sensor optik sederhana, gerakan atau aktivitas fisik pengguna, variasi kondisi kulit dan penempatan sensor, serta pengaruh lingkungan seperti cahaya dan suhu. Meskipun demikian, deviasi sebesar tersebut masih tergolong wajar dan dapat diterima untuk prototipe berbasis sensor optik sederhana.

Prototipe ini berpotensi dikembangkan untuk pemantauan real-time kondisi fisiologis dasar di lingkungan kerja industri. Pemantauan berkelanjutan memungkinkan deteksi dini risiko kelelahan atau gangguan kesehatan pekerja. Selain itu, data yang terkumpul dapat dianalisis untuk mengamati tren kesehatan individu maupun kelompok, mendukung manajemen kesehatan kerja yang lebih proaktif dan berbasis bukti.

C. Barcode Untuk Identifikasi Pekerja

Pada tahap prototipe, identifikasi pekerja dilakukan dengan membuat barcode menggunakan layanan online seperti <https://id.qr-code-generator.com/>. Skematik dasar layanan barcode generator online ditampilkan pada Gambar 7. Prompt pembuatan dan hasil barcode pada Gambar 8.



Gambar 7. Skematik dasar layanan barcode generator online

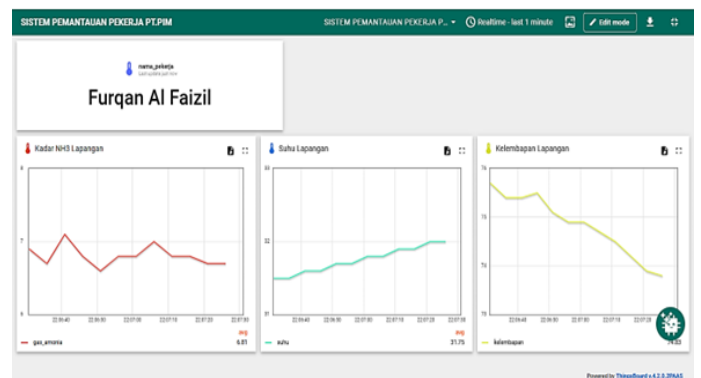


Gambar 8. Prompt pembuatan dan hasil barcode

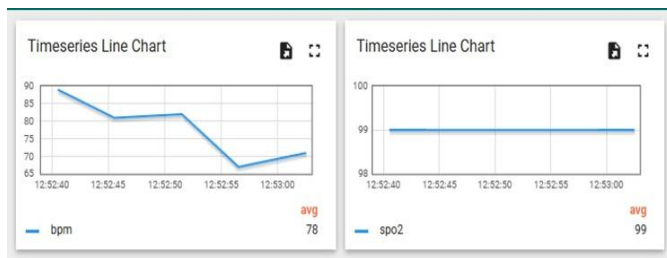
ID pekerja dimasukkan sebagai input, dan sistem menghasilkan barcode dalam bentuk gambar yang dapat diunduh, dicetak, dan ditempelkan pada kartu identitas. Pendekatan ini memungkinkan pengujian cepat sistem wearable sensor berbasis IoT tanpa perlu mengembangkan algoritma pembuat barcode sendiri, sehingga mempercepat validasi fungsi autentikasi.

D. Implementasi IoT untuk Pemantauan Kondisi Lingkungan dan Fisiologis

Implementasi sistem Internet of Things (IoT) beserta dashboard monitoring berfungsi untuk memantau kondisi operasional secara real-time. Sistem ini dirancang untuk menampilkan data dari sensor secara terintegrasi sehingga memudahkan pemantauan dan pengambilan keputusan. Tampilan sistem IoT dan dashboard monitoring ditunjukkan pada Gambar 9 dan 10.



Gambar 8. Dashboard monitoring lingkungan



Gambar 9. Dashboard monitoring fisiologis pekerja

Implementasi sistem IoT pada wearable sensor memungkinkan integrasi pemantauan kondisi lingkungan dan fisiologis pekerja secara real-time melalui dashboard monitoring berbasis cloud. Sistem ini tidak hanya menampilkan data sensor secara terintegrasi, tetapi juga mendukung klasifikasi otomatis kondisi kerja ke dalam kategori aman, waspada, dan berbahaya, sehingga mempercepat proses pengambilan keputusan di lapangan. Selain itu, penyimpanan data historis membuka peluang analisis jangka panjang untuk mengidentifikasi pola risiko dan mendukung manajemen K3 berbasis bukti.

Meskipun demikian, penerapan IoT dalam konteks industri pupuk masih menghadapi tantangan pada aspek stabilitas jaringan, keamanan data, dan ketahanan perangkat terhadap kondisi ekstrem. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut perlu difokuskan pada peningkatan reliabilitas sistem komunikasi, proteksi data, serta desain wearable yang ergonomis. Dengan demikian, IoT berpotensi menjadi fondasi bagi sistem K3 digital yang proaktif, prediktif, dan berkelanjutan.

E. Integrasi Wearable Sensor dalam Sistem K3

Integrasi wearable sensor dalam sistem K3 yang ditawarkan dengan menggabungkan dua aspek pemantauan utama:

- a) Lingkungan Kerja (*Environmental Monitoring*). Melalui ID Card pintar dengan sensor MQ-135 (amonia) dan DHT22 (suhu & kelembapan). Data dikirim secara nirkabel via ESP32 ke dashboard ThingsBoard. Tujuannya adalah memastikan pekerja tidak terpapar kondisi lingkungan yang melebihi ambang aman.
- b) Kondisi Fisiologis Pekerja (*Physiological Monitoring*). Menggunakan gelang biometrik berbasis sensor MAX30102 untuk memantau detak jantung dan SpO₂. Data ini penting untuk deteksi dini kelelahan, heat stress, atau hipoksia yang bisa memicu kecelakaan kerja.

Integrasi ini mewujudkan pendekatan K3 digital yang menghubungkan faktor eksternal (lingkungan) dengan internal (fisiologi pekerja).

Kontribusi utama penelitian ini terhadap sistem K3 terletak pada penerapan teknologi *wearable sensor* yang mampu menghadirkan pencegahan dini melalui mekanisme notifikasi sebelum kondisi berbahaya terjadi. Sistem ini juga meningkatkan efisiensi pemantauan karena data dari lingkungan dan kondisi fisiologis pekerja ditampilkan secara *real-time* pada dashboard, sehingga supervisi dapat dilakukan tanpa perlu inspeksi manual. Selain itu, integrasi barcode pada ID Card memungkinkan identifikasi personal, sehingga setiap data pemantauan lingkungan dan biometrik dapat ditelusuri langsung ke individu pekerja. Lebih jauh, penelitian ini mendorong transformasi digital K3 dengan menggeser paradigma dari sistem tradisional berbasis inspeksi manual menuju sistem otomatis berbasis IoT dan cloud monitoring

yang lebih responsif, terukur, serta mendukung pengambilan keputusan cepat.

Penelitian ini masih memiliki sejumlah keterbatasan dan tantangan yang perlu diperhatikan dalam pengembangan lebih lanjut. Prototipe yang dihasilkan baru mencapai Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) level 5 sehingga masih memerlukan uji lapangan di lingkungan industri sebenarnya untuk menguji reliabilitasnya. Akurasi sensor biometrik juga masih dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti gerakan tubuh, posisi penempatan sensor, dan kondisi cahaya di sekitar, yang dapat menimbulkan deviasi hasil pengukuran. Selain itu, integrasi peringatan dini sejauh ini baru diuji melalui simulasi dan belum diaplikasikan secara nyata dengan alarm visual atau audio di lapangan. Aspek lain yang belum dibahas secara mendalam adalah keamanan data, baik dari sisi privasi pekerja maupun perlindungan sistem terhadap ancaman siber, sehingga masih diperlukan strategi penguatan data privacy dan cybersecurity untuk mendukung implementasi sistem secara penuh di industri.

IV. KESIMPULAN

Pengembangan prototipe *wearable sensor* berbasis IoT mampu memberikan solusi awal untuk mendukung penerapan sistem K3 digital di industri pupuk. Integrasi sensor lingkungan pada ID Card dan sensor fisiologis pada gelang biometrik (fisiologis pekerja) terbukti dapat bekerja secara *real-time* serta menampilkan data pada dashboard pemantauan, sehingga mempermudah supervisi kondisi kerja maupun kondisi kesehatan pekerja. Validasi laboratorium menunjukkan bahwa sensor yang digunakan memiliki akurasi yang memadai, dengan tingkat deviasi yang masih dapat diterima untuk tahap prototipe. Implementasi algoritma *if-then* juga berhasil mengklasifikasikan kondisi kerja ke dalam kategori aman, waspada, dan berbahaya, yang berpotensi mendukung mekanisme peringatan dini. Penelitian ini sekaligus membuka peluang pengembangan lebih lanjut melalui pengujian lapangan, integrasi dengan perangkat *wearable* lain, serta pemanfaatan analitik data dan kecerdasan buatan guna mewujudkan manajemen keselamatan kerja yang lebih prediktif dan adaptif di masa mendatang.

REFERENSI

- [1] Y. Hariani, "Pengaruh Paparan Bahan Kimia Terhadap Kesehatan Reproduksi Pada Pekerja," *Babul Ilmi_Jurnal Ilm. Multi Sci. Kesehat.*, vol. 13, no. 2, pp. 95–111, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.stikes-aisyiyah.palembang.ac.id/index.php/Kep/article/view/>
- [2] M. Mardonova and Y. Choi, "Review of wearable device technology and its applications to the mining industry," *Energies*, vol. 11, no. 3, 2018, doi: 10.3390/en11030547.
- [3] T. Eldemerdash, R. Abdulla, V. Jayapal, C. Nataraj, and M. K. Abbas, "IoT based smart helmet for mining industry application," *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 1, pp. 373–387, 2020.
- [4] S. Huang, J. Li, P. Zhang, and W. Zhang, "Detection of mental fatigue state with wearable ECG devices," *Int. J. Med. Inform.*, vol. 119, no. May, pp. 39–46, 2018, doi: 10.1016/j.ijmedinf.2018.08.010.
- [5] M. Haghi, K. Thurow, and N. Stoll, "A multi-layer multi-sensor wearable device for physical and chemical environmental parameters monitoring (CO & NO2)," *Proc. Int. Conf. Inf. Digit. Technol. IDT 2017*, no. 2, pp. 137–141, 2017, doi: 10.1109/DT.2017.8024285.
- [6] M.-Ștefan Nicolae, F.-F. Bizic, N.-L. Sirbu, I. Nucă, and R.-C. P. (Nicolae), "Integrated System for Remote Health Status Monitoring and Analysis," no. 47, pp. 41–47, 2023, doi: 10.52846/AUCEE.2023.0.
- [7] J. U. N. Zhong et al., "Integrated Design of Physiological Multi-Parameter Sensors on A Smart Garment by Ultra-Elastic E-Textile," J.

Mech. Med. Biol., vol. 21, no. 9, pp. 1–23, 2021, doi: 10.1142/S0219519421400376.

- [8] E. J. Prihantoro, Sulistiyanto, and M. F. Efendi, “Perancangan Smart Klinik Berbasis Mikrokontroler Node MCU ESP32,” JEECOM, vol. 3, no. 2, pp. 89–95, 2021.