

Sistem Monitoring dan Peringatan Dini Gas SO₂ Real-Time pada Area Tapping Furnace Industri Nikel

Real-Time SO₂ Gas Monitoring and Early Warning System for Nickel Industry Furnace Tapping Areas

Moh. Afandy*¹, Aloisius Leonardo G¹, Muhammad Ikbal Rianto¹, Abdul Haris Mubarak¹

¹Prodi Teknik Listrik dan Instalasi, Politeknik Industri Logam Morowali, Morowali, Indonesia

Info Artikel

Diserahkan:
15 Juni 2026
Direvisi:
13 Agustus 2026
Diterima:
31 Agustus 2026

ABSTRAK

Penelitian ini menyajikan hasil perancangan dan implementasi sistem monitoring gas sulfur dioksida (SO₂) secara real-time untuk mendukung pemantauan kualitas udara pada area Tapping Furnace industri pengolahan nikel. Sistem dikembangkan untuk meningkatkan efektivitas deteksi dini paparan gas berbahaya sehingga dapat mendukung penerapan keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Penelitian menggunakan pendekatan rekayasa eksperimental dengan mengintegrasikan sensor MQ-136 sebagai pendeteksi SO₂ dan mikrokontroler Arduino Uno sebagai pengolah data. Sebelum implementasi lapangan, sensor dikalibrasi menggunakan Gas Detector DZ-10 sebagai alat referensi untuk memastikan keandalan pengukuran. Pengujian dilakukan pada area Tapping Furnace 10 lantai 3 di perusahaan pengolahan bijih nikel selama proses tapping. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor MQ-136 memiliki tingkat akurasi yang memadai setelah proses kalibrasi, sehingga mampu mendeteksi perubahan konsentrasi SO₂ secara representatif terhadap kondisi aktual di lapangan. Sistem juga berhasil melakukan pemantauan secara real-time dan mengaktifkan mekanisme peringatan dini sesuai perubahan konsentrasi gas yang terjadi selama proses tapping. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu meningkatkan efektivitas pemantauan kualitas udara serta memberikan informasi kondisi lingkungan secara cepat kepada operator. Dengan biaya implementasi yang relatif rendah dan kemudahan integrasi, sistem berpotensi menjadi alternatif solusi monitoring SO₂ yang mendukung pengendalian risiko paparan gas berbahaya pada industri pengolahan nikel.

Kata Kunci : Sulfur Dioksida (SO₂), Sensor MQ-136, Monitoring Real-Time, Sistem Peringatan Dini, Tapping Furnace.

ABSTRACT

This study presents the design and implementation of a real-time sulfur dioxide (SO₂) monitoring system to support air quality monitoring in the Tapping Furnace area of a nickel processing industry. The system was developed to improve the early detection of hazardous gas exposure and to support the implementation of occupational health and safety (OHS) practices. An experimental engineering approach was employed by integrating an MQ-136 gas sensor for SO₂ detection with an Arduino Uno microcontroller for data processing. Prior to field deployment, the sensor was calibrated against a DZ-10 Gas Detector as the reference instrument to ensure measurement reliability. Field testing was conducted at Tapping Furnace 10, located on the third floor of a nickel processing plant, during the tapping operation. The results demonstrate that the calibrated MQ-136 sensor provides adequate measurement accuracy and is capable of representing actual SO₂ concentration changes under industrial operating conditions. The developed system successfully performed real-time monitoring and activated the early warning mechanism according to variations in SO₂ concentration during the tapping process. These findings indicate that the proposed system can improve the effectiveness of workplace air quality monitoring by providing timely environmental information to operators. Owing to its low implementation cost and ease of integration, the proposed system offers a practical alternative for supporting hazardous gas exposure control and occupational safety in nickel processing industries.

Keywords : Sulfur Dioxide (SO₂), MQ-136 Sensor, Real-Time Monitoring, Early Warning System, Tapping Furnace.

Corresponding author email: Afandy@pilm.ac.id



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri pengolahan mineral dan logam telah memberikan kontribusi yang besar terhadap pertumbuhan ekonomi, namun di sisi lain juga meningkatkan potensi pencemaran udara akibat emisi gas hasil proses termal[1]. Salah satu gas yang menjadi perhatian utama adalah sulfur dioksida (SO_2), yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar mengandung sulfur maupun proses peleburan dan pemurnian logam[2]. Paparan SO_2 dalam konsentrasi tertentu dapat menimbulkan gangguan kesehatan pada sistem pernapasan, menurunkan kualitas lingkungan, serta meningkatkan risiko kecelakaan kerja apabila tidak dilakukan pemantauan secara berkelanjutan[3], [4]. Oleh karena itu, pemantauan konsentrasi SO_2 menjadi bagian penting dalam penerapan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) pada lingkungan industri modern [5], [6], [7].

Indonesia merupakan salah satu produsen nikel terbesar di dunia dengan pertumbuhan fasilitas pengolahan dan pemurnian nikel yang terus meningkat[8], [9], [10]. Salah satu tahapan proses yang memiliki potensi tinggi menghasilkan emisi gas adalah *tapping furnace*, yaitu proses pengeluaran logam cair dari tungku peleburan. Aktivitas tersebut berlangsung pada temperatur tinggi sehingga berpotensi melepaskan gas hasil pembakaran, termasuk sulfur dioksida, ke area kerja[11]. Kondisi ini menyebabkan pekerja yang berada di sekitar furnace memiliki risiko lebih besar terhadap paparan gas berbahaya, sehingga diperlukan sistem pemantauan kualitas udara yang mampu mendeteksi perubahan konsentrasi gas secara cepat dan berkelanjutan sebagai dasar pengambilan tindakan mitigasi [12].

Perkembangan teknologi sensor dan Internet of Things (IoT) telah mendorong lahirnya berbagai sistem monitoring gas berbasis sensor untuk mendeteksi konsentrasi SO_2 maupun gas berbahaya lainnya. Sensor elektrokimia banyak digunakan karena memiliki sensitivitas dan selektivitas yang tinggi, namun biaya implementasi dan pemeliharaannya relatif besar[13], [14], [15]. Sebaliknya, sensor berbasis *metal oxide semiconductor* (MOS) menawarkan biaya yang lebih rendah, kemudahan integrasi dengan mikrokontroler, serta fleksibilitas dalam pengembangan sistem monitoring secara real-time. Selain itu, beberapa penelitian telah mengintegrasikan sistem monitoring dengan komunikasi berbasis IoT sehingga memungkinkan pengiriman data secara daring dan penyimpanan data berbasis cloud[16], [17],[18].

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada peningkatan akurasi sensor, pengembangan sistem komunikasi data, atau implementasi pada kondisi laboratorium dan lingkungan umum. Kajian mengenai implementasi sistem monitoring SO_2 secara langsung pada area *tapping furnace* industri pengolahan nikel masih sangat terbatas. Padahal lingkungan operasi tersebut memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan lingkungan pengujian laboratorium, yaitu temperatur tinggi, konsentrasi debu yang besar, serta pola dispersi gas yang berubah secara dinamis sehingga dapat memengaruhi performa sensor dan keandalan sistem monitoring. Selain itu, integrasi sistem pemantauan dengan mekanisme peringatan dini (*early warning system*) yang dapat memberikan informasi visual secara langsung kepada operator lapangan juga masih jarang dilaporkan

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu sistem monitoring yang tidak hanya mampu mengukur konsentrasi SO_2 secara *real-time*, tetapi juga mampu memberikan peringatan dini kepada pekerja ketika konsentrasi gas telah melewati ambang batas yang ditetapkan[19], [20]. Pada penelitian ini dipilih sensor MQ-136 berbasis *metal oxide semiconductor* karena memiliki sensitivitas terhadap gas sulfur dioksida, biaya implementasi yang relatif rendah, mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler Arduino Uno, serta sesuai untuk pengembangan sistem monitoring pada lingkungan industri. Untuk meningkatkan keandalan pengukuran, sensor terlebih dahulu dikalibrasi menggunakan Gas Detector DZ-10 sebagai alat referensi sebelum diterapkan pada lokasi penelitian.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada implementasi langsung sistem monitoring SO_2 berbasis sensor MQ-136 pada area *tapping furnace* industri pengolahan nikel yang dikombinasikan dengan sistem peringatan dini visual menggunakan LED Matrix P10 dan warning light, serta evaluasi performa sistem melalui proses kalibrasi dan pengujian lapangan pada kondisi operasi sebenarnya. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih banyak menitikberatkan pada pengukuran konsentrasi gas atau transmisi data, penelitian ini mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendukung deteksi dini paparan SO_2 pada lingkungan kerja dengan karakteristik operasional yang kompleks. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring gas sulfur dioksida secara *real-time* yang mampu meningkatkan efektivitas pemantauan kualitas udara sekaligus mendukung penerapan keselamatan dan kesehatan kerja pada industri pengolahan nikel.

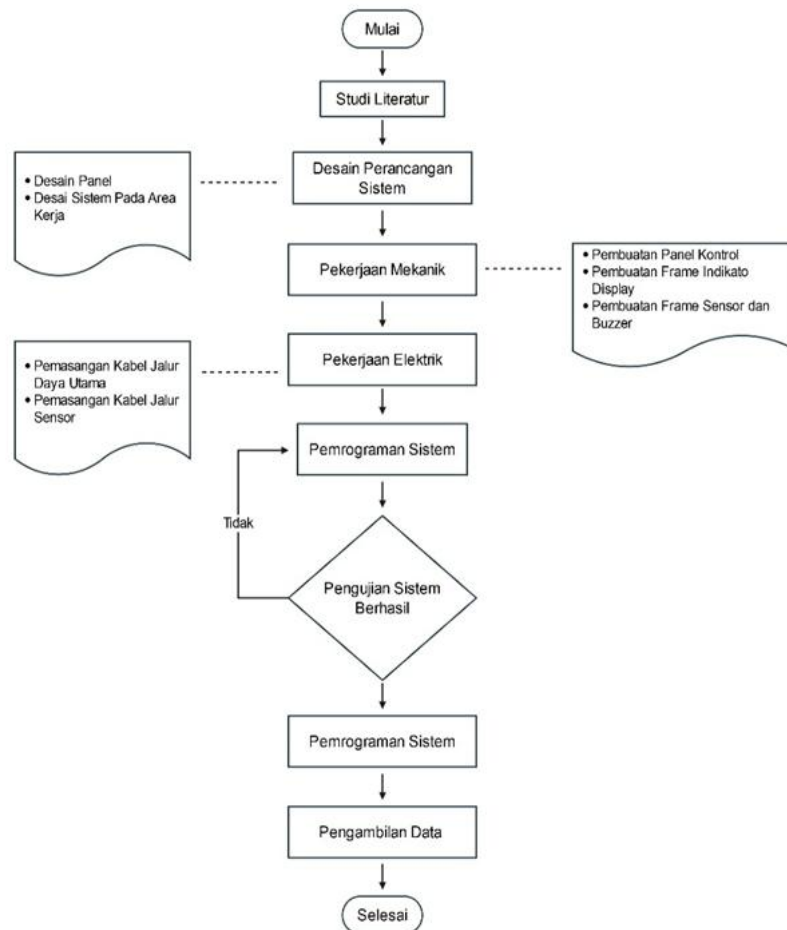
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa eksperimental (*engineering experimental research*) yang bertujuan merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem monitoring gas sulfur dioksida (SO_2) secara real-time pada area *Tapping Furnace* industri pengolahan nikel. Tahapan penelitian meliputi perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, integrasi sistem monitoring, kalibrasi sensor menggunakan alat referensi, implementasi sistem pada lokasi penelitian, serta pengujian performa sistem pada kondisi operasi sebenarnya. Objek penelitian adalah sistem monitoring berbasis sensor MQ-136 dengan mikrokontroler Arduino Uno yang diintegrasikan dengan LED Matrix P10 dan *warning light* sebagai media informasi dan peringatan dini. Pengujian dilakukan pada area *Tapping Furnace 10* lantai 3 di industri pengolahan nikel dengan parameter utama berupa

konsentrasi gas SO_2 , tingkat kesalahan hasil kalibrasi sensor, dan respons sistem terhadap perubahan konsentrasi gas selama proses *tapping*. Selanjutnya, data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam melakukan monitoring secara real-time.

2.1. Tahapan Penelitian

Untuk memberikan gambaran tentang alur penelitian yang dilakukan, berikut adalah flowchart penelitian yang dilakukan:



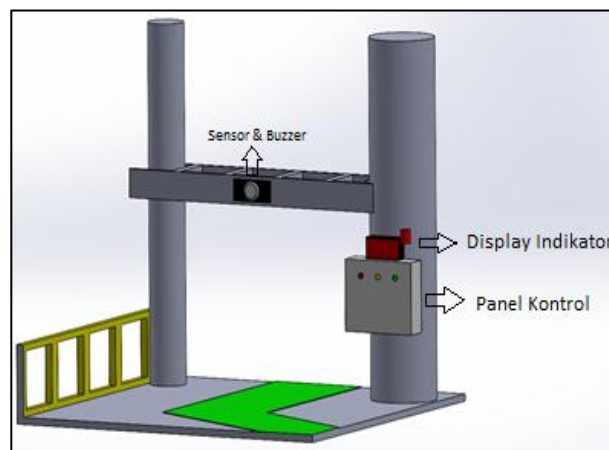
Gbr. 1. Flowchart Penelitian

Penelitian dibagi dalam beberapa tahapan pekerjaan antara lain:

- 1) Studi Literatur dilakukan untuk memperoleh beberapa referensi pendukung dalam melaksanakan penelitian. Pada tahapan ini, dilakukan pencarian informasi awal untuk mendukung kerangka penelitian seperti karakteristik gas sulfur dioksida (SO_2), teknologi sensor gas, sistem monitoring kualitas udara, dan metode pengolahan data secara real-time dan juga beberapa aturan tentang kebijakan pemerintah dan penelitian yang relevan serta. Hasil dari tahapan berikut, digunakan sebagai dasar dalam menentukan spesifikasi sistem, metode penelitian, pemilihan komponen perangkat keras dan perangkat lunak, serta parameter pengujian yang digunakan pada penelitian ini. Dengan demikian, penelitian yang dilakukan memiliki dasar ilmiah yang kuat dan mampu memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem monitoring gas sulfur dioksida yang lebih optimal dalam mendukung keselamatan dan kesehatan kerja di lingkungan industri.
- 2) Desain Perancangan meliputi desain panel control dan desain perancangan pada area kerja untuk memberikan gambaran sistem yang akan diterapkan di area kerja.
- 3) Pekerjaan Mekanik meliputi pengerjaan panel control, frame display indikator dan frame sensor dan buzzer.
- 4) Pekerjaan Elektrik meliputi pemasangan jalur daya pada panel control, serta wiring jalur komunikasi data sensor, kontroler, dan display indikator, buzzer.
- 5) Pemrograman dilakukan dengan menyesuaikan data analog sensor terproses untuk dilakukan scaling data. Pada tahapan ini sensor akan dikalibrasi dengan alat pembanding DZ-10 Gas Detector. Hasil data akan ditampilkan pada display indikator berupa dot matrix yang terintegrasi dengan buzzer.
- 6) Pengambilan data dilakukan pada area tapping PT X saat dilakukan peleburan nikel ore.

2.2. Perancangan Sistem

Perancangan sistem monitoring gas sulfur dioksida (SO_2) dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik lingkungan kerja pada area tungku furnace di divisi tapping furnace yang memiliki temperatur tinggi, tingkat emisi gas hasil pembakaran yang fluktuatif, serta aktivitas operasional yang padat. Area ini dipilih karena merupakan salah satu titik kerja yang memiliki potensi paparan gas sulfur dioksida cukup tinggi akibat proses pembakaran dan pengolahan material pada furnace. Oleh karena itu, perancangan sistem dilakukan secara khusus agar mampu menghasilkan pembacaan konsentrasi gas yang lebih akurat, responsif, dan sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Dalam proses perancangan, karakteristik fisik dan kimia gas sulfur dioksida menjadi salah satu aspek utama yang dipertimbangkan. Gas SO_2 memiliki sifat toksik, korosif, dan mudah terdispersi mengikuti pola aliran udara serta perubahan temperatur lingkungan. Pada area furnace, temperatur tinggi dapat memengaruhi stabilitas pembacaan sensor gas sehingga diperlukan penempatan sensor pada titik yang relatif representatif terhadap paparan gas namun tetap berada pada batas temperatur kerja sensor yang aman. Selain itu, efek termal dari furnace juga berpotensi menyebabkan gangguan pada komponen elektronik apabila sistem ditempatkan terlalu dekat dengan sumber panas.



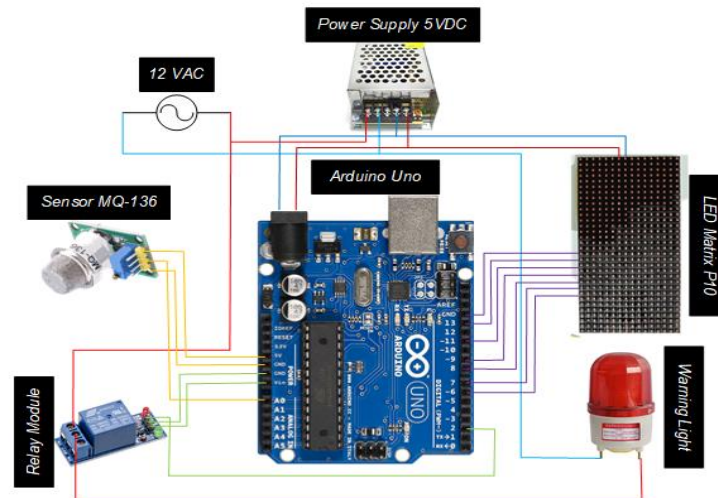
Gbr. 2. Perancangan Sistem pada area Kerja

Penempatan sensor gas dilakukan pada area yang memiliki kemungkinan akumulasi gas sulfur dioksida paling tinggi, yaitu di sekitar jalur keluaran gas dan area aktivitas operator tapping furnace. Posisi sensor dirancang pada ketinggian tertentu dengan mempertimbangkan pola sirkulasi udara dan arah penyebaran gas di lingkungan kerja. Penempatan ini bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas deteksi serta meminimalkan kesalahan pembacaan akibat pengaruh turbulensi udara atau paparan panas langsung dari furnace. Selain itu, sensor dilengkapi pelindung khusus untuk mengurangi pengaruh debu, temperatur ekstrem, dan gangguan mekanis selama proses operasional berlangsung. Sistem peringatan berupa buzzer ditempatkan pada area yang mudah terdengar oleh operator dan pekerja di sekitar tungku furnace. Penempatan buzzer dirancang agar sinyal alarm tetap dapat diterima dengan jelas meskipun terdapat kebisingan mesin dan aktivitas produksi di area kerja. Buzzer akan aktif secara otomatis ketika konsentrasi gas sulfur dioksida melebihi ambang batas yang telah ditentukan, sehingga dapat memberikan peringatan dini kepada pekerja untuk segera melakukan tindakan pengamanan. Selain itu, panel kontrol dan display indikator dirancang pada posisi yang mudah dijangkau dan diamati oleh operator namun tetap berada pada area yang relatif aman dari paparan panas langsung furnace. Display indikator digunakan untuk menampilkan informasi konsentrasi gas secara real-time sehingga operator dapat melakukan pemantauan kondisi lingkungan kerja secara langsung. Penempatan panel kontrol juga mempertimbangkan aspek ergonomi, keamanan operasional, dan kemudahan pemeliharaan sistem agar proses monitoring dapat berjalan secara efektif dan berkelanjutan. Dengan mempertimbangkan karakteristik gas sulfur dioksida, kondisi termal area furnace, serta tata letak perangkat monitoring, sistem yang dirancang diharapkan mampu meningkatkan efektivitas pengawasan kualitas udara pada area tapping furnace. Selain mendukung keselamatan dan kesehatan kerja, sistem ini juga diharapkan dapat membantu proses mitigasi risiko paparan gas berbahaya pada lingkungan industri pengolahan.

2.3. Rancangan Hardware

Perancangan perangkat keras (hardware) pada sistem monitoring gas sulfur dioksida (SO_2) dilakukan untuk mendukung proses pendeteksian gas secara real-time pada area kerja tungku furnace divisi tapping furnace. Sistem dirancang dengan mengintegrasikan beberapa komponen utama, yaitu sensor gas MQ-136, mikrokontroler Arduino Uno, modul relay, LED matrix P10 sebagai media display, warning light sebagai sistem peringatan, serta catu daya (power supply) 5 VDC dan sumber tegangan 12 VAC. Komponen utama dalam sistem ini adalah sensor MQ-136 yang berfungsi untuk mendeteksi konsentrasi gas sulfur dioksida di lingkungan kerja. Sensor MQ-136 dipilih karena memiliki sensitivitas yang cukup baik terhadap gas SO_2 dan mampu digunakan pada sistem monitoring

kualitas udara industri. Sensor bekerja dengan mendeteksi perubahan resistansi akibat adanya paparan gas sulfur dioksida di udara, kemudian menghasilkan sinyal analog yang dikirimkan ke mikrokontroler untuk diproses lebih lanjut. Arduino Uno digunakan sebagai pusat pengendali sistem (main controller) yang bertugas membaca data dari sensor MQ-136, melakukan pengolahan data, serta mengendalikan perangkat output lainnya. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh Arduino untuk menentukan tingkat konsentrasi gas sulfur dioksida berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Selain itu, Arduino juga mengatur aktivasi sistem peringatan dan tampilan informasi monitoring secara real-time.



Gbr. 3. Perancangan Sistem pada area Kerja

Untuk menampilkan informasi hasil monitoring digunakan LED Matrix P10 sebagai display indikator. Display ini berfungsi menampilkan nilai konsentrasi gas sulfur dioksida dan status kondisi area kerja sehingga operator dapat memantau kondisi lingkungan secara langsung. Penggunaan LED matrix dipilih karena memiliki tingkat visibilitas yang baik pada area industri dengan intensitas cahaya tinggi dan jarak pandang yang relatif jauh. Sistem juga dilengkapi warning light yang berfungsi sebagai indikator peringatan dini ketika konsentrasi gas sulfur dioksida melebihi ambang batas aman. Warning light akan aktif secara otomatis berdasarkan perintah dari Arduino Uno sehingga pekerja dapat segera mengetahui adanya potensi bahaya paparan gas di area furnace. Selain indikator visual, sistem peringatan dapat dikembangkan lebih lanjut dengan penambahan alarm suara untuk meningkatkan respons operator terhadap kondisi darurat. Modul relay digunakan sebagai saklar elektronik untuk mengendalikan perangkat output dengan kebutuhan daya yang lebih besar. Relay memungkinkan sistem mikrokontroler mengontrol aktivasi warning light secara aman tanpa membebani rangkaian utama Arduino Uno.

2.4. Kalibrasi Sensor MQ136

Pada tahapan berikut, kalibrasi sensor dilakukan untuk memastikan bahwa nilai keluaran sensor memiliki tingkat akurasi yang memadai dan mampu merepresentasikan kondisi konsentrasi gas yang sebenarnya. Pada penelitian ini, kalibrasi dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor MQ-136 terhadap nilai konsentrasi gas yang diperoleh dari alat ukur referensi terstandarisasi yaitu Gas detector DZ-10. Selanjutnya proses kalibrasi dan pengambilan data dilakukan berulang sebanyak 5 kali percobaan dengan menggunakan bahan belerang yang dibakar pada ruang tertutup. Nilai selisih hasil kalibrasi dihitung menggunakan rumus error berikut.

$$\text{error} = \frac{\text{nilai MQ 136} - \text{Gas Detector DZ10}}{\text{nilai Gas Detektor DZ10}} \times 100 \quad (1)$$

Tabel 1. Data Hasil Kalibrasi

Pengukuran	MQ 136 (ppm)	Gas Detector DZ-10 (ppm)	Error (%)
1	4.7	5	0.06%
2	17.2	18	0.04%
3	22.4	23	0.02%
4	44.4	45	0.01%
5	24.6	25	0.01%

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah proses perancangan dan kalibrasi sensor selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah implementasi sistem monitoring gas sulfur dioksida (SO₂) pada lingkungan kerja sebenarnya. Pemasangan instalasi dilakukan pada area Tapping Furnace 10 lantai 3 di perusahaan pengolahan bijih (ore processing plant). Lokasi tersebut dipilih

karena merupakan area dengan aktivitas peleburan dan tapping yang berpotensi menghasilkan emisi gas sulfur dioksida dalam jumlah yang signifikan akibat proses termal yang berlangsung pada tungku furnace. Implementasi sistem dilakukan dengan memasang sensor gas MQ-136 pada titik yang mewakili area paparan gas di sekitar furnace, sedangkan LED Matrix P10 dipasang pada lokasi yang mudah diamati oleh operator dan pekerja. Posisi display dirancang agar informasi konsentrasi gas dapat terlihat secara langsung dari area kerja dengan jarak pandang sekitar 6 meter. Penempatan sensor dan display mempertimbangkan aspek keselamatan kerja, kemudahan pemantauan, serta efektivitas sistem peringatan dini terhadap potensi paparan gas berbahaya. Instalasi sistem monitoring yang telah terpasang pada area kerja dapat dilihat pada Gbr.4.

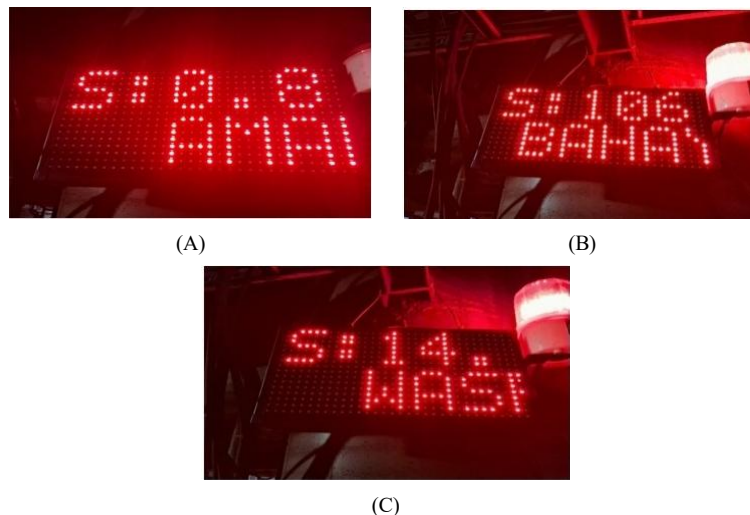


Gbr. 4. Pemasangan Perangkat pada Area Tapping Tungku Furnace

Pada pengujian sistem yang dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan alat dalam memonitor perubahan konsentrasi gas sulfur dioksida selama aktivitas operasi furnace. Pengambilan data dilakukan pada tiga kondisi operasional, yaitu sebelum proses tapping dimulai, selama proses tapping berlangsung, dan setelah proses tapping selesai. Pengamatan dilakukan secara kontinu selama periode pengujian untuk memperoleh karakteristik perubahan kadar gas SO_2 pada setiap tahapan proses produksi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi gas sulfur dioksida mengalami peningkatan seiring berlangsungnya proses tapping. Pada kondisi awal sebelum tapping, kadar gas SO_2 masih berada pada tingkat yang relatif rendah dan berada dalam batas aman. Namun, setelah proses tapping berlangsung, terjadi peningkatan konsentrasi gas akibat pelepasan emisi dari material yang diproses pada furnace. Sistem peringatan dini mulai aktif pada menit ke-10 setelah proses tapping berlangsung. Aktivasi warning light menunjukkan bahwa konsentrasi gas sulfur dioksida telah memasuki kategori waspada sesuai dengan batas yang telah ditetapkan pada sistem monitoring. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pekerja yang berada di sekitar area furnace perlu meningkatkan kewaspadaan terhadap potensi paparan gas. Konsentrasi gas sulfur dioksida terus mengalami peningkatan selama proses tapping berlangsung dan mencapai nilai maksimum sebesar 129 ppm pada menit ke-45. Peningkatan ini menunjukkan bahwa aktivitas tapping memiliki pengaruh langsung terhadap kenaikan emisi gas sulfur dioksida di area kerja. Setelah proses tapping selesai, konsentrasi gas mulai mengalami penurunan secara bertahap akibat berkurangnya sumber emisi dan adanya proses dispersi gas di lingkungan sekitar. Meskipun demikian, hasil pengukuran menunjukkan bahwa hingga 15 menit setelah proses tapping berakhir, konsentrasi gas sulfur dioksida masih berada pada kategori waspada. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa gas SO_2 masih terakumulasi di area kerja dan memerlukan waktu lebih lama untuk kembali ke kondisi normal. Temuan ini mengindikasikan pentingnya sistem monitoring secara real-time sebagai sarana peringatan dini guna meningkatkan keselamatan pekerja dan mendukung pengendalian risiko paparan gas berbahaya pada area tapping furnace. Data lengkap hasil pengujian konsentrasi gas sulfur dioksida pada setiap interval pengamatan disajikan pada Tabel.2 sedangkan warning light perubahan konsentrasi gas selama proses tapping dapat ditunjukkan melalui pada Gbr.5.

Tabel 2. Data hasil pengujian pada 3 interval proses.

Waktu	SO_2 (ppm)	Warning Light	Keterangan pada LED Matrix P10
5 menit sebelum Tapping	0.8	Mati	Aman
5 menit Tapping	4.3	Mati	Aman
10 menit Tapping	9.2	Nyala	Waspada
15 menit Tapping	22	Nyala	Bahaya
30 menit Tapping	76	Nyala	Bahaya
45 menit Tapping	129	Nyala	Bahaya
60 menit Tapping	106	Nyala	Bahaya
5 menit setelah Tapping	61	Nyala	Bahaya
10 menit setelah Tapping	24	Nyala	Bahaya
15 menit setelah Tapping	14	Nyala	Waspada



Gbr. 5.. Tampilan Sistem pada area Kerja (A).Kondisi Area Kerja Berstatus Aman ,(B) Kondisi Area Kerja Berstatus Bahaya, (C) Kondisi Area Kerja Berstatus Waspada

Peningkatan konsentrasi gas sulfur dioksida selama proses tapping menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara aktivitas operasi furnace dengan emisi gas hasil pembakaran. Temperatur tinggi yang terjadi selama proses tapping mempercepat pelepasan senyawa sulfur dari material yang diproses sehingga menghasilkan konsentrasi SO_2 yang lebih tinggi dibandingkan kondisi normal. Nilai puncak sebesar 129 ppm yang terukur pada menit ke-45 mengindikasikan bahwa periode pertengahan hingga akhir proses tapping merupakan fase dengan risiko paparan gas tertinggi bagi pekerja.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring gas sulfur dioksida (SO_2) berbasis sensor MQ-136 dan mikrokontroler Arduino Uno untuk pemantauan kualitas udara secara real-time pada area Tapping Furnace 10 lantai 3 di perusahaan pengolahan bijih nikel. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan sensor gas, LED Matrix P10 sebagai media informasi visual, serta warning light sebagai sistem peringatan dini untuk meningkatkan keselamatan kerja di lingkungan industri. Hasil kalibrasi sensor MQ-136 terhadap alat referensi Gas Detector DZ-10 menunjukkan tingkat kesalahan yang relatif kecil dengan rentang error antara 0,01% hingga 0,06%, sehingga sensor dinilai memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk digunakan dalam monitoring konsentrasi gas sulfur dioksida pada area kerja. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu memberikan informasi konsentrasi gas yang representatif terhadap kondisi aktual di lapangan. Pengujian lapangan menunjukkan bahwa konsentrasi gas sulfur dioksida mengalami peningkatan signifikan selama proses tapping berlangsung. Konsentrasi awal sebesar 0,8 ppm meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum sebesar 129 ppm pada menit ke-45 proses tapping. Sistem peringatan dini mulai aktif pada menit ke-10 ketika konsentrasi SO_2 mencapai 9,2 ppm dan terus memberikan peringatan selama konsentrasi gas berada pada kategori waspada dan bahaya. Setelah proses tapping selesai, konsentrasi gas mengalami penurunan secara bertahap, namun hingga 15 menit setelah tapping berakhir masih terdeteksi pada kategori waspada dengan konsentrasi sebesar 14 ppm. Hasil penelitian membuktikan bahwa aktivitas tapping furnace memiliki pengaruh langsung terhadap peningkatan emisi sulfur dioksida di area kerja, sehingga diperlukan sistem monitoring secara kontinu untuk mendukung penerapan keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Sistem yang dikembangkan mampu memberikan informasi kondisi lingkungan secara real-time, mendeteksi peningkatan konsentrasi gas secara cepat, serta memberikan peringatan dini kepada pekerja ketika konsentrasi SO_2 melebihi batas aman. Dengan demikian, sistem monitoring yang dihasilkan berpotensi menjadi solusi yang ekonomis, mudah diterapkan, dan efektif dalam mendukung pengendalian risiko paparan gas sulfur dioksida pada industri pengolahan nikel.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Orellano, J. Reynoso, and N. Quaranta, "Short-term exposure to sulphur dioxide (SO_2) and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis," *Environ. Int.*, vol. 150, p. 106434, May 2021, doi: 10.1016/j.envint.2021.106434.
- [2] S. Nurhisana and H. Hasyim, "Environmental health risk assessment of sulfur dioxide (SO_2) at workers around in combined cycle power plant (CCPP)," *Heliyon*, vol. 8, no. 5, p. e09388, May 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09388.
- [3] E. Fazakas, I. A. Neamtiu, and E. S. Gurzau, "Health effects of air pollutant mixtures (volatile organic compounds, particulate matter, sulfur and nitrogen oxides) – a review of the literature," *Rev. Environ. Health*, vol. 39, no. 3, pp. 459–478, Sep. 2024, doi: 10.1515/reveh-2022-0252.
- [4] S. Maji, S. Ahmed, M. Kaur-Sidhu, S. Mor, and K. Ravindra, "Health Risks of Major Air Pollutants, their Drivers and Mitigation Strategies: A Review," *Air, Soil and Water Research*, vol. 16, Jan. 2023, doi: 10.1177/11786221231154659.

- [5] K. Muzaini, S. M. Yasin, Z. Ismail, and A. R. Ishak, "Systematic Review of Potential Occupational Respiratory Hazards Exposure Among Sewage Workers," *Front. Public Health*, vol. 9, Mar. 2021, doi: 10.3389/fpubh.2021.646790.
- [6] M. Elwood, "The Scientific Basis for Occupational Exposure Limits for Hydrogen Sulphide—A Critical Commentary," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 6, p. 2866, Mar. 2021, doi: 10.3390/ijerph18062866.
- [7] H. Fang *et al.*, "A CuO/MoO₃-based SO₂ gas sensor with moisture resistance and ultra-fast response at 90°C," *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 422, p. 136627, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.snb.2024.136627.
- [8] G. Guan *et al.*, "Development and Field Deployment of a ppb-Level SO₂/NO₂ Dual-Gas Sensor System for Agricultural Early Fire Identification," *ACS Sens.*, vol. 9, no. 12, pp. 6728–6740, Dec. 2024, doi: 10.1021/acssensors.4c02405.
- [9] V. Kale, C. Chavan, C. Bhongale, K. G. Giriya, and S. N. Kale, "Resonance-based detection of perilous sulphur dioxide using TiO₂ nanoparticles and unit-cell ring resonator," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 331, p. 112898, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.sna.2021.112898.
- [10] S. Dhall, B. R. Mehta, A. K. Tyagi, and K. Sood, "A review on environmental gas sensors: Materials and technologies," *Sensors International*, vol. 2, p. 100116, 2021, doi: 10.1016/j.sintl.2021.100116.
- [11] L. García, A.-J. García-Sánchez, R. Asorey-Cacheda, J. García-Haro, and C.-L. Zúñiga-Cañón, "Smart Air Quality Monitoring IoT-Based Infrastructure for Industrial Environments," *Sensors*, vol. 22, no. 23, p. 9221, Nov. 2022, doi: 10.3390/s22239221.
- [12] Y. Xiong, K. Wu, G. Yu, Z. Chen, L. Liu, and F. Li, "Real-Time Monitoring of SO₂ Emissions Using a UV Camera with Built-in NO₂ and Aerosol Corrections," *Sensors*, vol. 22, no. 10, p. 3900, May 2022, doi: 10.3390/s22103900.
- [13] J. Ma *et al.*, "A novel YSZ-based impedancemetric SO₂ sensor based on non-stoichiometric La₂CuO₄ sensing electrode," *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 427, p. 137138, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.snb.2024.137138.
- [14] R. Gond *et al.*, "Fe₂O₃-Functionalized MoS₂ Nanostructure Sensor for High-Sensitivity and Low-Level SO₂ Detection," *ACS Sens.*, vol. 10, no. 5, pp. 3412–3422, May 2025, doi: 10.1021/acssensors.4c03297.
- [15] P. Zhang, Y. Xiao, J. Zhang, B. Liu, X. Ma, and Y. Wang, "Highly sensitive gas sensing platforms based on field effect Transistor-A review," *Anal. Chim. Acta*, vol. 1172, p. 338575, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.aca.2021.338575.
- [16] R. Gond *et al.*, "Fe₂O₃-Functionalized MoS₂ Nanostructure Sensor for High-Sensitivity and Low-Level SO₂ Detection," *ACS Sens.*, vol. 10, no. 5, pp. 3412–3422, May 2025, doi: 10.1021/acssensors.4c03297.
- [17] P. D. Bharathi, V. A. Narayanan, and P. B. Sivakumar, "Fog computing enabled air quality monitoring and prediction leveraging deep learning in IoT," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 43, no. 5, pp. 5621–5642, Sep. 2022, doi: 10.3233/JIFS-212713.
- [18] A. Rossi *et al.*, "SO₂ Detection over a Wide Range of Concentrations: An Exploration on MOX-Based Gas Sensors," *Chemosensors*, vol. 12, no. 6, p. 111, Jun. 2024, doi: 10.3390/chemosensors12060111.
- [19] R. B. Onyancha *et al.*, "A systematic review on the detection and monitoring of toxic gases using carbon nanotube-based biosensors," *Sens. Biosensing Res.*, vol. 34, p. 100463, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.sbsr.2021.100463.
- [20] Y. Jing, C. Feng, R. Cui, J. Xue, L. Dong, and H. Wu, "A compact portable photoacoustic sensor for sub-ppm level SO₂ detection with a DUV-LED and a non-resonant photoacoustic cell," *Front. Phys.*, vol. 11, Dec. 2023, doi: 10.3389/fphy.2023.1328256.