

Sistem Pemantauan Gas *Gunungapi* Berbasis IoT dan Energi Surya untuk Mitigasi Bencana di Gunung Bromo

Hartawan Abdillah ^{a,1,*}, Wahyu Andrian Kusuma ^{b,2}, Mas Ahmad baihaqi ^{a,3}, Alief Muhammad ^{a,4}, Indah Noor Dwi Kusuma Dewi ^{a,5}

^aUniversitas Panca Marga, Jln. Yos Sudarso, No. 107, Pabean, Dringu Probolinggo, Indonesia

^bPusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana, Cemorolawang Desa Ngadisari, Kec. Sukapura, Kab. Probolinggo, Jawa Timur 67254

¹ hartawanabdillah@upm.ac.id*; ²wahyu.kusuma091992@esdm.go.id; ³baihaqi@upm.ac.id;

⁴aliefmuhammad@upm.ac.id; ⁵indahnoordwi@gmail.com

* Penulis Koresponden

INFO ARTIKEL

Histori Artikel

Pengajuan 2025-10-23

Diperbaiki 2025-12-23

Diterima 2025-12-24

Kata Kunci

Gunungapi

IoT

Mitigasi

PLTS

Sensor Gas

ABSTRAK

Penelitian ini menyajikan perancangan sistem pemantauan gas *gunungapi* berbasis IoT dengan sumber daya energi surya. Sistem ini mengintegrasikan sensor H₂S dan CO₂ dengan mikrokontroler ESP32, yang mengirimkan data secara *real-time* ke *dashboard cloud* melalui protokol MQTT/HTTP. Panel surya 100–300 Wp menghasilkan rata-rata 21 V dan 2,1 A (≈ 529 Wh/hari), jauh melampaui kebutuhan energi sensor sebesar ≈ 24 Wh/hari. Uji lapangan di Gunung Bromo mencatat konsentrasi rata-rata H₂S = 0 ppm dan CO₂ = 599 ppm, masih di bawah ambang batas berbahaya namun tetap memerlukan pemantauan berkelanjutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini efisien, stabil dalam berbagai kondisi, dan efektif untuk memberikan peringatan dini, sehingga mendukung mitigasi bencana *gunungapi* serta sejalan dengan SDGs 9 dan 13.

ABSTRACT

Keyword

Gas Sensors

IoT

Mitigation

Solar Power Plants

Volcanoes

This study presents the design of an IoT-based volcanic gas monitoring system powered by solar energy. The system integrates H₂S and CO₂ sensors with an ESP32 microcontroller, transmitting data in real time to a cloud dashboard via MQTT/HTTP protocols. A 100–300 Wp solar panel generated an average of 21 V and 2.1 A (≈ 529 Wh/day), significantly exceeding the sensor's energy demand of ≈ 24 Wh/day. Field testing at Mount Bromo recorded average concentrations of H₂S = 0 ppm and CO₂ = 599 ppm, which are below hazardous thresholds but require continuous observation. The results demonstrate that the system is energy-efficient, stable under variable conditions, and effective in providing early warning alerts, thus supporting volcanic disaster mitigation and aligning with SDGs 9 and 13.

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi [CC-BY-SA](#).



1. Pendahuluan

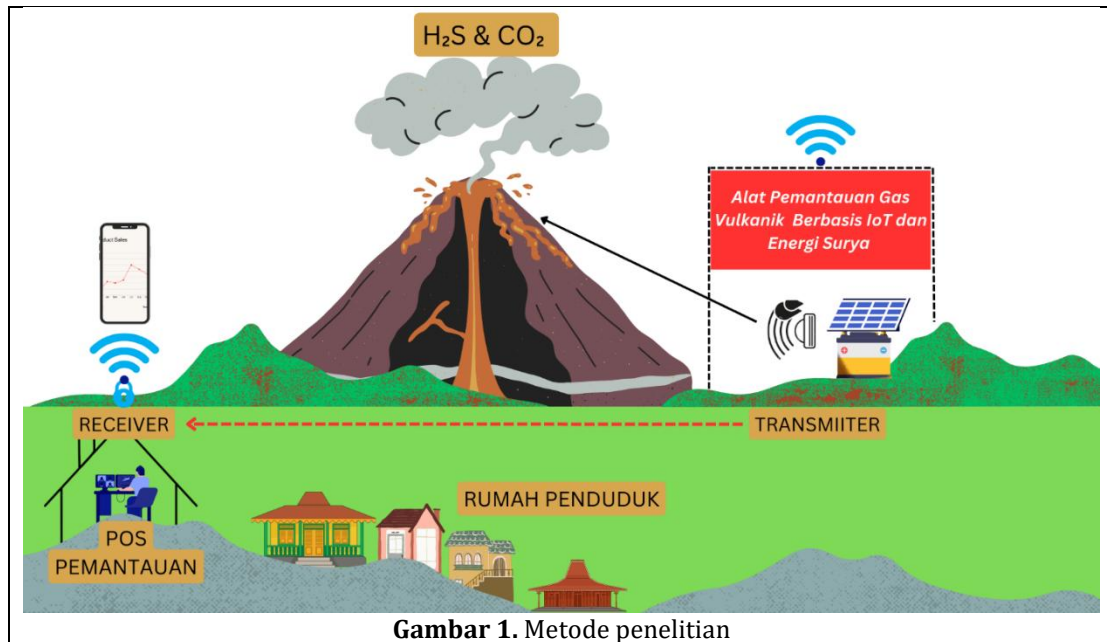
Gunungapi merupakan fenomena geologi dengan potensi bahaya besar bagi lingkungan dan masyarakat sekitarnya [1]–[4]. Aktivitas vulkanik dapat menimbulkan bencana seperti erupsi eksplosif, aliran lava, serta pelepasan gas beracun yang berdampak serius pada kesehatan manusia, ekosistem, dan infrastruktur [5]–[7]. Gas vulkanik seperti hidrogen sulfida (H_2S) dan karbon dioksida (CO_2) merupakan indikator utama peningkatan aktivitas *gunungapi* yang perlu dipantau secara kontinu [8]–[10]. Namun, pemantauan gas vulkanik di lapangan menghadapi tantangan besar, seperti keterbatasan aksesibilitas lokasi, minimnya infrastruktur komunikasi, serta kebutuhan energi mandiri untuk mengoperasikan sensor di wilayah terpencil, termasuk kawasan Gunung Bromo [11], [12].

Gunung Bromo sebagai salah satu *gunungapi* aktif dengan aktivitas vulkanik yang fluktuatif dan jumlah wisatawan yang tinggi memerlukan sistem pemantauan modern, adaptif, dan *real-time* guna memperkuat mitigasi bencana [13]. Hal ini sejalan dengan kebijakan nasional seperti Undang-Undang No. 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana, Peraturan Pemerintah No. 21 Tahun 2008, serta Peraturan Presiden No. 93 Tahun 2019 yang menekankan pemanfaatan teknologi dalam pemantauan *gunungapi*. Selain itu, upaya ini mendukung *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya poin ke-13 (Penanganan Perubahan Iklim) dan poin ke-9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur) [14]–[21]. Dalam penelitian ini diusulkan pengembangan sistem pemantauan gas *gunungapi* berbasis *Internet of Things (IoT)* menggunakan sensor H_2S dan CO_2 , sebagai parameter utama untuk deteksi gas berbahaya. Data sensor dikirimkan melalui modul komunikasi modul internet sebagai jaringan internet utama yang mampu bekerja di daerah dengan keterbatasan infrastruktur komunikasi [22]–[24].

Sistem dirancang agar beroperasi secara mandiri menggunakan panel surya dan baterai *lithium* sebagai sumber daya utama, sehingga tidak bergantung pada listrik konvensional [25][26]–[28]. Data hasil pemantauan divisualisasikan dalam *dashboard* web dan aplikasi mobile, yang dilengkapi dengan sistem peringatan dini otomatis. Notifikasi dikirimkan kepada pihak PVMBG dan masyarakat sekitar apabila konsentrasi gas mencapai level berbahaya. Keberadaan sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas deteksi dini aktivitas vulkanik di Gunung Bromo, mempercepat respons mitigasi bencana, serta mendukung kebijakan nasional dalam penguatan infrastruktur pemantauan *gunungapi* berbasis teknologi modern, adaptif, dan berkelanjutan [22], [23], [29].

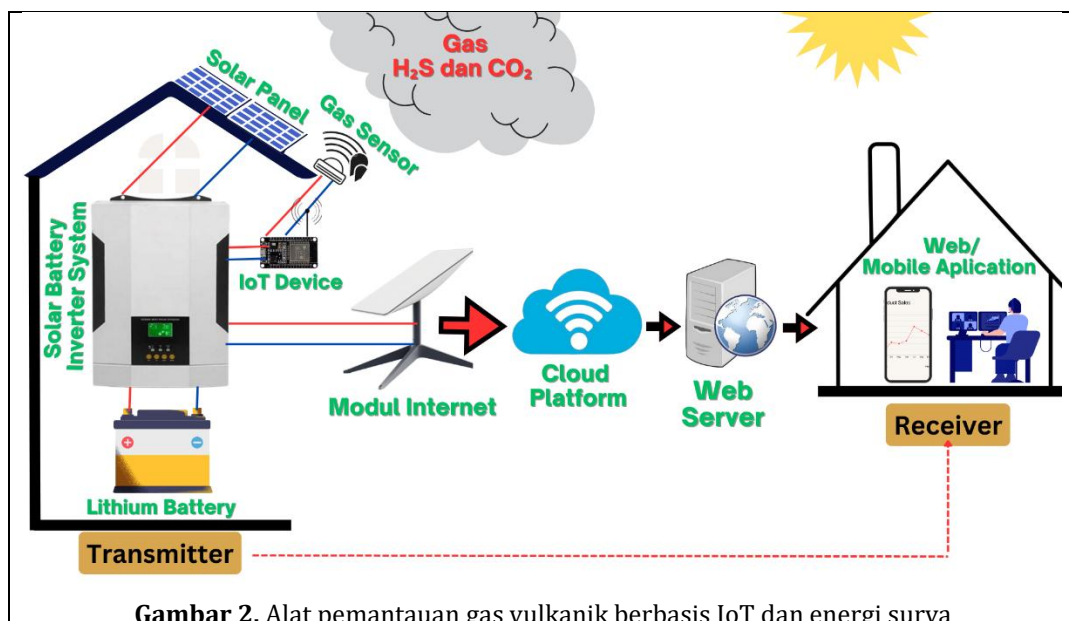
2. Metode

Metode penelitian pada Gambar 1 ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem berbasis *Internet of Things (IoT)* untuk mengembangkan sistem pemantauan gas *gunungapi* yang *real-time*, efisien, dan adaptif. Tahapan dimulai dengan perancangan serta integrasi perangkat keras berupa sensor gas (H_2S , dan CO_2), mikrokontroler ESP32, modul internet sebagai sistem komunikasi, serta sumber energi surya yang dilengkapi inverter dan baterai. Data hasil pengukuran sensor dikirimkan secara nirkabel melalui modul internet ke *platform cloud* untuk diproses dan divisualisasikan melalui *dashboard* berbasis web [24], [30], [31]. Tahap pengujian dilakukan menggunakan *dashboard* tersebut untuk mengukur akurasi sensor, kestabilan konektivitas, dan efisiensi daya sebelum diterapkan secara penuh di kawasan Gunung Bromo. Selain itu, metode ini juga mencakup evaluasi kinerja sistem dan pengembangan algoritma peringatan dini berbasis ambang batas konsentrasi gas berbahaya guna meningkatkan efektivitas mitigasi bencana secara tepat waktu.



Gambar 1. Metode penelitian

Alat pemantauan gas *gunungapi* pada gambar 2 menggunakan TB600C- H_2S -100 *Hydrogen Sulfide* sensor (rentang 0–1000 ppm) dan MH-Z19B *Infrared Sensor Gas CO2 Carbon Dioxide* (rentang 0–5000 ppm) sebagai pendeteksi utama perubahan konsentrasi gas vulkanik. Data dari sensor diproses menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan dukungan konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth, sehingga mendukung komunikasi data secara nirkabel. Informasi hasil pengukuran kemudian dikirimkan melalui modul internet, yang memungkinkan transmisi data secara *real-time* meskipun berada di lokasi terpencil. Sumber energi utama sistem ini berasal dari panel surya *monocrystalline* berkapasitas 500 Wp–1 kWp, yang dipadukan dengan *inverter* 1500W/1,5 kW untuk mengubah arus searah (DC) dari baterai menjadi arus bolak-balik (AC), serta mengatur pengisian daya ke baterai *lithium* 12V 100Ah. Dengan dukungan sistem ini, perangkat tambahan maupun sensor yang memerlukan daya AC tetap dapat beroperasi secara optimal. Seluruh data kemudian dikirimkan ke *platform cloud* dan divisualisasikan melalui *dashboard* web berbasis *cloud* yang terintegrasi dengan sistem peringatan dini otomatis berbasis ambang batas gas berbahaya.



Gambar 2. Alat pemantauan gas vulkanik berbasis IoT dan energi surya

3. Hasil dan Analisis

Pengujian sistem pemantauan gas *gunungapi* dilakukan secara bertahap pada komponen sensor, perangkat IoT, sistem komunikasi, dan sumber energi untuk memastikan keandalan operasional. Sensor TB600C-H₂S-100 dan MH-Z19B CO₂, diuji sensitivitas serta akurasi dalam mendeteksi konsentrasi gas sesuai rentang ppm yang ditentukan, dengan hasil menunjukkan respons yang stabil terhadap variasi konsentrasi gas. Mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan diuji dalam hal kestabilan konektivitas dan kecepatan transmisi data, dengan hasil pengujian menunjukkan pengiriman data ke server *cloud* berjalan *real-time* tanpa kehilangan paket data yang signifikan. Modul internet diuji kestabilannya melalui pengukuran *uptime* yang mencapai lebih dari 95%, sehingga menjamin ketersediaan data *monitoring* secara kontinu. Panel surya *monocrystalline* berkapasitas 500Wp–1KWp diuji melalui pengukuran arus dan tegangan keluaran, dengan hasil menunjukkan kinerja sesuai spesifikasi teknis. Power station berbasis baterai *lithium* 12V/60Ah diuji pada aspek kapasitas penyimpanan dan durasi suplai daya, dengan hasil mampu mempertahankan operasi sistem minimal selama 24 jam tanpa cahaya matahari. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini memiliki keandalan yang memadai untuk diimplementasikan dalam pemantauan gas vulkanik secara *real-time*.

Pengujian PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya)

Pengujian dilakukan untuk memastikan ketersediaan energi yang cukup bagi sistem pemantauan. Panel surya 100 Wp–300 Wp *monocrystalline* dipasang pada sudut optimal sesuai posisi matahari di lokasi penelitian. Parameter yang diuji meliputi tegangan dan arus keluaran panel (DC) pada kondisi pagi, siang, dan sore serta daya keluaran *inverter* (AC) serta kestabilannya saat memberikan suplai untuk perangkat sensor dan modul komunikasi.



Gambar 3. Pengukuran Daya Modul Surya, Baterai dan Sensor

Gambar 3 menunjukkan hasil pengukuran keluaran sistem yang terdiri dari panel surya, baterai penyimpanan energi, serta beban sensor gas. Panel surya *monocrystalline* berkapasitas 100–300 Wp dipasang pada sudut optimal sesuai posisi matahari, dengan tegangan rata-rata terukur sekitar 21 V dan arus 2,1 A pada periode siang hari, sehingga mampu menghasilkan daya ± 44 W.

Energi yang dihasilkan panel kemudian disalurkan ke baterai melalui *charge controller* untuk stabilisasi, sehingga baterai dapat menyimpan energi dan menjaga kontinuitas suplai listrik saat malam atau cuaca mendung. Baterai yang digunakan berfungsi sebagai *buffer* dengan tegangan keluaran yang diatur agar sesuai dengan kebutuhan beban, yaitu sensor gas.

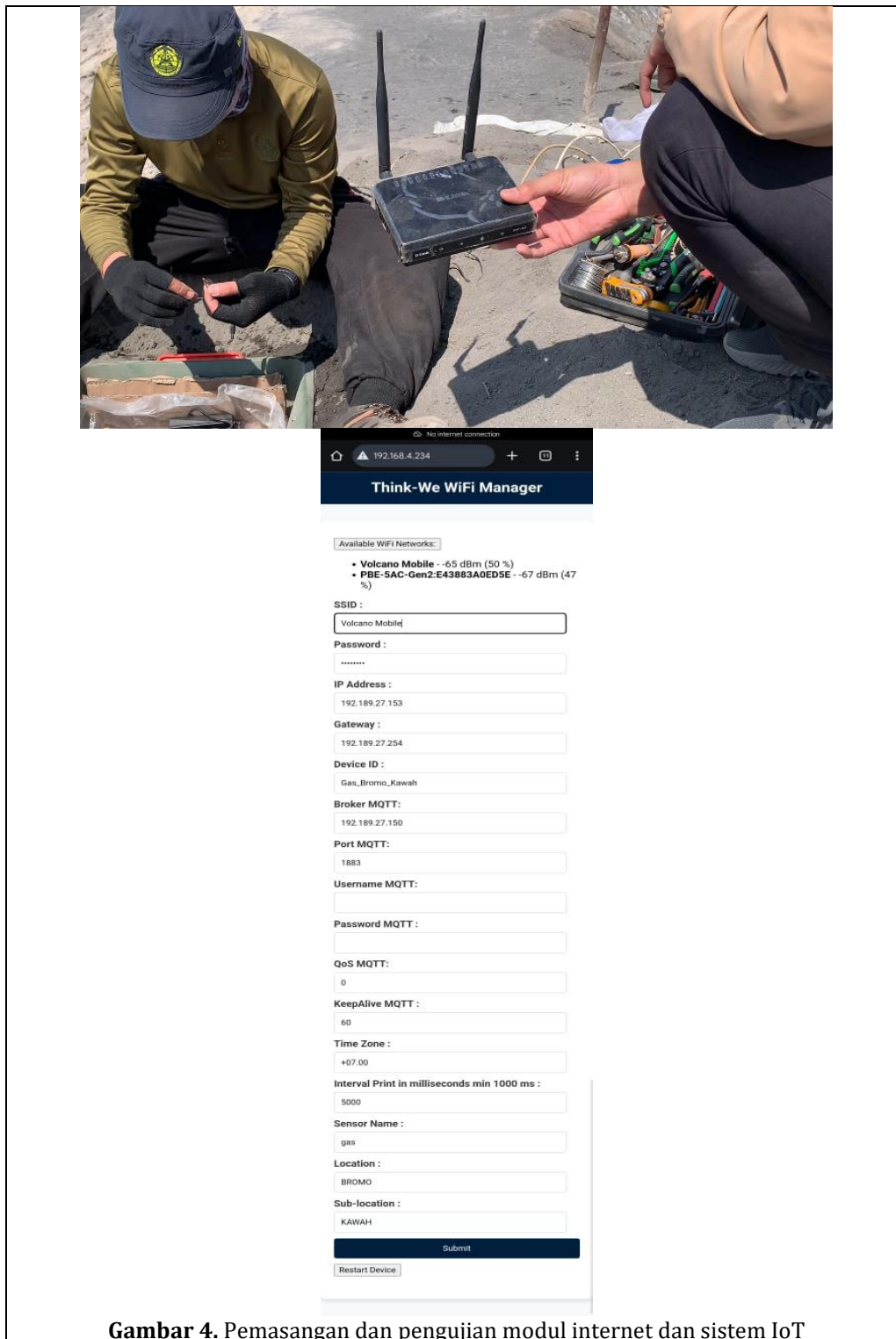
Tabel 1. Kinerja pembangkit listrik tenaga surya dengan beban sensor

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	Daya Sensor (W)	Energi Panel (Wh/jam)	Energi Sensor (Wh/jam)
00:00–05:00	0	0	0	1	0	1
6:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
7:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
8:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
9:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
10:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
11:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
12:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
13:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
14:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
15:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
16:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
17:00	21	2.1	44.1	1	44.1	1
18:00–23:00	0	0	0	1	0	1

Tabel 1 menunjukkan panel surya *monocrystalline* dengan keluaran rata-rata 21 V dan 2,1 A mampu menghasilkan daya sekitar 44,1 W selama 12 jam efektif penyinaran (06:00–17:00), sehingga total energi hariannya mencapai 529,2 Wh. Sementara itu, sensor gas dengan kebutuhan kerja 5 V dan 200 mA hanya memerlukan daya 1 W secara kontinu atau sekitar 24 Wh per hari. Perbandingan ini menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan panel surya jauh melampaui kebutuhan sensor (lebih dari 20 kali lipat), sehingga sistem memiliki surplus energi yang besar. Grafik kumulatif memperlihatkan kenaikan tajam energi panel di siang hari dan konsumsi sensor yang konstan sepanjang hari, di mana pada akhir periode panel tetap unggul signifikan. Dengan demikian, panel surya 100–300 Wp tidak hanya cukup untuk mengoperasikan sensor gas CO₂ dan H₂S secara berkelanjutan, tetapi juga memberikan cadangan energi yang dapat disimpan dalam baterai untuk pemakaian malam hari atau dialokasikan pada beban tambahan lain seperti modul komunikasi dan perangkat *monitoring* pendukung.

Pengujian Modul Internet dan Sistem IoT

Pengujian sistem IoT dilakukan untuk memastikan integrasi antara sensor gas, mikrokontroler, panel surya, baterai, dan modul internet dapat berfungsi secara optimal dalam mendukung pemantauan jarak jauh. Sensor gas (CO₂ dan H₂S) dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali sekaligus *data logger*. Data hasil pengukuran sensor kemudian dikirimkan secara *real-time* melalui modul internet menuju platform *cloud monitoring*. Parameter utama yang diuji meliputi kekuatan sinyal jaringan (*Received Signal Strength Indicator*/RSSI), latensi transmisi (ms), serta tingkat keberhasilan pengiriman data yang ditunjukkan oleh persentase *data loss*.



Gambar 4. Pemasangan dan pengujian modul internet dan sistem IoT

Pengujian sistem IoT pada gambar 4 dilakukan konfigurasi jaringan dan perangkat yang meliputi pengaturan *gateway*, broker MQTT, zona waktu, interval pengiriman data, serta penentuan lokasi pengukuran. Berikut penjelasan poin-poin gambar 4 yaitu :

1. Gateway : 192.189.27.254

- Alamat ini berfungsi sebagai gerbang jaringan lokal tempat perangkat IoT (ESP32 atau sensor *node*) terhubung sebelum meneruskan data ke server.

- *Gateway* memastikan perangkat dapat berkomunikasi dalam jaringan intranet atau internet.
- 2. Broker MQTT : 192.189.27.150**
 - Broker MQTT adalah server komunikasi data berbasis *protokol Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT).
 - Semua data dari sensor dikirim ke broker ini, lalu diteruskan ke subscriber (misalnya aplikasi *cloud monitoring* atau *dashboard web*).
 - MQTT dipilih karena ringan, andal, dan cocok untuk kondisi jaringan terbatas seperti di daerah terpencil.
 - 3. Time Zone : 07.00 (WIB, UTC+7)**
 - Pengaturan zona waktu penting agar data sensor memiliki stempel waktu (timestamp) yang akurat sesuai lokasi geografis (Bromo, Indonesia).
 - Hal ini memudahkan analisis historis dan sinkronisasi dengan data cuaca atau aktivitas vulkanik.
 - 4. Interval Print : 5000 ms (5 detik)**
 - Menunjukkan bahwa data sensor dikirim dan dicetak/log setiap 5 detik.
 - Interval ini cukup ideal: tidak terlalu sering sehingga boros energi dan *bandwidth*, namun cukup cepat untuk mendeteksi perubahan kadar gas secara *real-time*.
 - Interval minimum 1000 ms tersedia, tetapi 5000 ms dipilih agar sistem lebih stabil dan efisien.
 - 5. Location : Bromo — Sub-location : Kawah**
 - Lokasi pengukuran ditempatkan di area rawan emisi gas berbahaya (CO_2 , H_2S) di kawah Gunung Bromo.
 - Penempatan lokasi ini sangat strategis untuk mendukung pemantauan aktivitas vulkanik dan keselamatan wisatawan maupun peneliti.

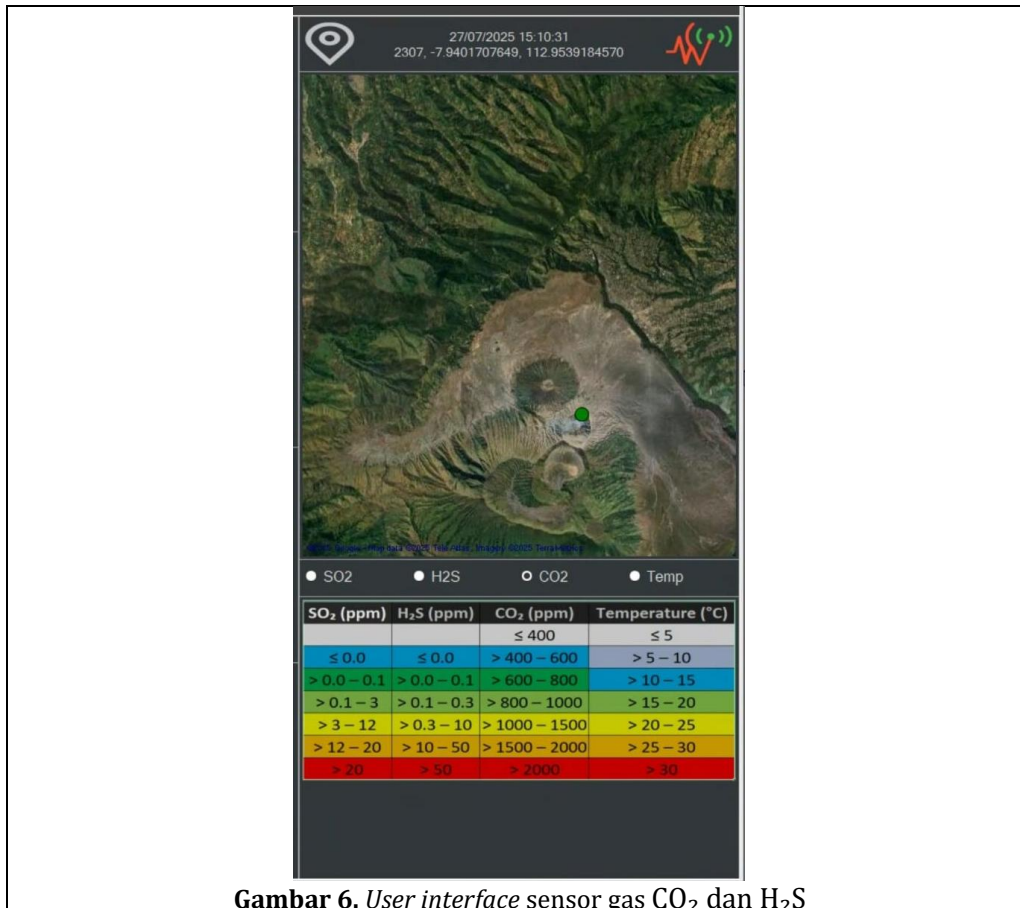
Pengujian Sensor Gas CO_2 dan H_2S dengan Sistem IoT

Pengujian sensor gas dilakukan untuk memastikan akurasi, sensitivitas, dan stabilitas perangkat sebelum diimplementasikan di lapangan. Sensor yang digunakan adalah TB600C- H_2S -100 untuk gas hidrogen sulfida (H_2S) dan MH-Z19B untuk karbon dioksida (CO_2). Uji lapangan pada gambar 5 di area sekitar kawah Gunung Bromo untuk mengevaluasi kinerja sensor pada kondisi nyata lingkungan vulkanik.



Gambar 5. Pemasangan dan pengujian sensor gas CO_2 dan H_2S dengan Sistem IoT

Dalam mendukung transmisi data secara *real-time*, sensor dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32 yang memiliki dukungan Wi-Fi dan Bluetooth, sementara sistem *interface* IoT dirancang agar data dari sensor gas dapat dikirimkan ke platform *cloud* melalui modul internet nirkabel yang terhubung ke jaringan berbasis modul internet. Tahap pengujian *interface* IoT mencakup pengiriman data sensor ke *cloud* menggunakan protokol komunikasi MQTT/HTTP. Selain itu, sistem juga diuji integrasinya dengan *dashboard* web yang menampilkan data H₂S dan CO₂ secara *real-time*, lengkap dengan indikator warna hijau, kuning, dan merah sebagai penanda status ambang bahaya yang ditampilkan pada gambar 6 berikut.



Gambar 6. User interface sensor gas CO₂ dan H₂S

Hasil pengukuran rata-rata selama satu hari menunjukkan konsentrasi H₂S berada pada 0 ppm, sedangkan konsentrasi CO₂ berkisar antara 584–615 ppm dengan rata-rata sekitar 599 ppm. Nilai ini relatif aman karena berada jauh di bawah ambang batas bahaya yang telah ditetapkan (CO₂ > 2000 ppm; H₂S > 30 ppm) [23], [29], [32]. Meskipun demikian, konsentrasi CO₂ yang lebih tinggi dari nilai ambien normal atmosfer (~400 ppm) menunjukkan adanya aktivitas vulkanik difus yang tetap perlu dimonitor secara kontinu. Analisis ini menegaskan pentingnya penggunaan sistem pemantauan *real-time* berbasis IoT untuk mendeteksi lonjakan mendadak yang berpotensi menimbulkan risiko kesehatan maupun bahaya akumulasi gas di area cekungan.

Sistem notifikasi berbasis ambang dirancang untuk memberikan peringatan bertingkat mulai dari status hijau (aman), kuning (peringatan awal), oranye (waspada), hingga merah (evakuasi). Implementasi prosedur ini memungkinkan otoritas PVMBG dan pengelola kawasan wisata Gunung Bromo untuk mengambil langkah cepat dan terukur ketika konsentrasi gas melampaui ambang tertentu. Dengan demikian, hasil pengujian ini tidak hanya menunjukkan kondisi relatif aman pada periode pengambilan data, tetapi juga membuktikan kesiapan sistem *monitoring* dalam mendukung mitigasi bencana vulkanik secara efektif.

4. Simpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan menguji sistem pemantauan gas *gunungapi* berbasis IoT yang terintegrasi dengan sensor H₂S dan CO₂, modul komunikasi internet, serta panel surya sebagai sumber daya mandiri. Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel surya dengan keluaran rata-rata 21 V dan 2,1 A mampu menghasilkan daya sekitar 44,1 W atau setara 529 Wh per hari, jauh melebihi kebutuhan sensor gas yang hanya memerlukan tegangan 5 V, arus 200 mA, dan daya 1 W (24 Wh per hari). Sementara itu, pengujian sensor gas mencatat konsentrasi rata-rata H₂S sebesar 0 ppm dan CO₂ sebesar 599 ppm, nilai yang masih di bawah ambang batas berbahaya namun tetap perlu dipantau secara berkelanjutan dengan interval pengiriman data 5000 ms (5 detik) ke *dashboard* pemantauan. Sistem yang dirancang terbukti andal dalam transmisi data *real-time*, efisien dalam konsumsi energi, dan akurat dalam mendeteksi gas vulkanik, sehingga mampu memberikan peringatan dini berbasis *cloud dashboard*. Kontribusi penelitian ini adalah menghadirkan solusi pemantauan gas *gunungapi* yang adaptif, berkelanjutan, serta mendukung mitigasi bencana, khususnya di kawasan Gunung Bromo, sekaligus sejalan dengan prioritas riset nasional dan tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs) poin 9 dan 13

Pengakuan dan Penghargaan

Penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi (Kemendiknas) melalui Departemen Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM) atas dukungan berupa dana hibah yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) Gunung Bromo atas bantuan, dukungan, dan izin yang telah diberikan dalam pelaksanaan penelitian di kawasan Gunung Bromo.

Referensi

- [1] A. Zurohman, K. M. Noviantoro, Khofifaturrohmah, and S. N. Firdausi, "Potensi Daya Tarik Wisata Taman Nasional Bromo Tengger Semeru," *J. Pendidik. dan Sains*, vol. 2, no. 2, pp. 281–291, 2021.
- [2] G. Chiodini *et al.*, "Hydrothermal pressure-temperature control on CO₂ emissions and seismicity at Campi Flegrei (Italy)," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 414, p. 107245, 2021, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107245.
- [3] G. Williams-Jones and H. Rymer, *Hazards of Volcanic Gases*, Second Edi. Elsevier Inc., 2015. doi: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00057-2.
- [4] R. W. Henley and T. P. Fischer, "Sulfur sequestration and redox equilibria in volcanic gases," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 414, p. 107181, 2021, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107181.
- [5] F. Amalia, A. N. Rusydi, and F. Masitoh, "Perubahan Resapan Airtanah Pasca *Gunungapi* Semeru 4 Desember 2021," *J. Ilmu Lingkung.*, vol. 21, no. 3, pp. 594–602, 2023, doi: 10.14710/jil.21.3.594-602.
- [6] H. G. Hartono and A. Sudrajat, "Karakteristik Geomorfologi *Gunungapi* Aktif dan *Gunungapi* Padam : Kasus G. Merapi & G. Gajahmungkur, Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah," *Bull. Sci. Contrib.*, vol. 16, no. 2, pp. 109–116, 2018, [Online]. Available: <http://jurnal.unpad.ac.id/bsc>
- [7] C. Cimarelli and K. Genareau, "A review of volcanic electrification of the atmosphere and volcanic lightning," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 422, p. 107449, 2022, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107449.
- [8] B. L. Jennifer Lewicki, C. Kern, P. J. Kelly, P. A. Nadeau, T. Elias, and L. E. Clor, "Volcanic Gas Monitoring Chapter E of Recommended Capabilities and Instrumentation for Volcano Monitoring in the United States," 2024.
- [9] M. Zimmer and J. Erzinger, "Continuous H₂O, CO₂, 222Rn and temperature

- measurements on Merapi Volcano, Indonesia," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 125, no. 1–2, pp. 25–38, 2003, doi: 10.1016/S0377-0273(03)00087-8.
- [10] T. Page, "Sulfur dioxide Papandayan and Bromo , two Indonesian," pp. 1895–1912, 2013, doi: 10.5194/nhessd-1-1895-2013.
- [11] V. F. Amaliya *et al.*, "Development of IoT-Based Volcano Early Warning System," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1772, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1772/1/012009.
- [12] H. B. Pasandi, J. A. Fraire, S. Ratnasamy, and H. Rivano, "A Survey on Direct-to-Device Satellite Communications: Advances, Challenges, and Prospects," *LEONET 2024 - Proc. 2nd ACM Work. LEO Netw. Commun. Part ACM MobiCom 2024*, pp. 7–12, 2024, doi: 10.1145/3697253.3697265.
- [13] R. A. Atmoko, H. Y. Riskiawan, D. P. S. Setyohadi, and S. Kautsar, "The online monitoring system of toxic gas levels in the Ijen Mountain area," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2278, no. July 2020, 2020, doi: 10.1063/5.0014799.
- [14] W. L. Filho *et al.*, "Sustainable development goal 13 and switching priorities: addressing climate change in the context of pandemic recovery efforts," *Environ. Sci. Eur.*, vol. 35, no. 1, 2023, doi: 10.1186/s12302-022-00701-4.
- [15] Q. Rohmawati *et al.*, "Program Konservasi Mangrove di Pantai Glagah Wangi Demak Ditinjau dari Upaya Mencapai Sustainable Development Goals (SDGs)," *J. Kualita Pendidik.*, vol. 3, no. 3, pp. 168–175, 2022, doi: 10.51651/jkp.v3i3.168.
- [16] G. Leontinus, "PROGRAM DALAM PELAKSANAAN TUJUAN PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN (SDGs) DALAM HAL MASALAH PERUBAHAN IKLIM DI INDONESIA," *J. Samudra Geogr.*, vol. 5, no. 1, pp. 43–52, 2022, doi: 10.33059/jsg.v5i1.4652.
- [17] A. Mortimer, I. Ahmed, T. Johnson, L. Tang, and M. Alston, "Localizing Sustainable Development Goal 13 on Climate Action to Build Local Resilience to Floods in the Hunter Valley: A Literature Review," *Sustain.*, vol. 15, no. 6, 2023, doi: 10.3390/su15065565.
- [18] R. Nabila, "Green Accounting for Sustainable Development: Case Study of Indonesiaâ€™s Manufacturing Sector," *Akunt. Dewantara*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 2021, doi: 10.26460/ad.v5i1.9147.
- [19] M. HARTATI and E. HARIYONO, "EFEKTIFITAS PEMBELAJARAN FISIKA TERINTEGRASI DENGAN AKSI IKLIM PADA PRINSIP SDGs (SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS) DALAM MENINGKATKAN KARAKTER PEDULI LINGKUNGAN," *IPF: Inovasi Pendidikan Fisika*, vol. 9, no. 3. pp. 349–355, 2020. doi: 10.26740/ipf.v9n3.p349-355.
- [20] F. Junirianto, M. C. Tapilouw, and S. Suchahyo, "Climate Flashcard: Inovasi Pembelajaran IPA terintegrasi dengan SDGs 'Climate Action' pada Materi Pemanasan Global," *LENZA (Lentera Sains) J. Pendidik. IPA*, vol. 13, no. 2, pp. 100–109, 2023, doi: 10.24929/lensa.v13i2.351.
- [21] M. T. Ladan, "Achieving Sustainable Development Goals Through Effective Domestic Laws and Policies on Environment and Climate Change," *Environ. Policy Law*, vol. 48, no. 1, pp. 42–63, 2018, doi: 10.3233/EPL-180049.
- [22] S. Gurrieri, R. M. R. Di Martino, M. Camarda, and V. Francofonte, "Monitoring CO2 Hazards of Volcanic Origin: A Case Study at the Island of Vulcano (Italy) during 2021–2022," *Geosci.*, vol. 13, no. 9, 2023, doi: 10.3390/geosciences13090266.
- [23] H. Takahashi, T. Shibata, T. Yamaguchi, R. Ikeda, N. Okazaki, and F. Akita, "Volcanic strain change prior to an earthquake swarm observed by groundwater level sensors in Meakandake, Hokkaido, Japan," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 215–216, pp. 1–7, 2012, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.11.006.
- [24] I. Shayea *et al.*, "Integration of 5G, 6G and IoT with Low Earth Orbit (LEO) networks: Opportunity, challenges and future trends," *Results Eng.*, vol. 23, no. February, p. 102409, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102409.
- [25] D. Teknik and U. G. Mada, "Analisis Kinerja Sistem Photovoltaic Management Platform pada Implementasi Sistem PLTS Hybrid Berbasis Internet of Things Area R & D Syngenta Cikampek," vol. 5, no. 2, pp. 75–83, 2024.
- [26] H. Abdillah, A. N. Afandi, Aripriharta, Y. Rahmawati, M. Z. Falah, and G. Fujita, "Monitoring the potential of horizontal axis wind power plants based on the internet of things," *AIP*

- Conf. Proc.*, vol. 2926, no. 1, pp. 1–10, 2024, doi: 10.1063/5.0183360.
- [27] H. Abdillah, A. N. Afandi, Aripriharta, Y. Rahmawati, M. Z. Falah, and G. Fujita, “Monitoring the potential of horizontal axis wind power plants based on the internet of things,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2926, no. 1, 2024, doi: 10.1063/5.0183360.
- [28] H. Abdillah, T. Asrori, M. A. Baihaqi, D. H. T. Prasetyo, and A. Muhammad, “Sistem Monitoring dan Manajemen Energi pada Pembangkit Hybrid PLTS, PLTB, dan PLN berbasis Internet of Things,” *JASIEK (Jurnal Apl. Sains, Informasi, Elektron. dan Komputer)*, vol. 5, no. 2, pp. 41–50, 2023, doi: 10.26905/jasiek.v5i2.10920.
- [29] B. Rosado *et al.*, “Volcano-tectonic dynamics of Deception Island (Antarctica): 27 years of GPS observations (1991–2018),” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 381, pp. 57–82, 2019, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.05.009.
- [30] L. Royer *et al.*, “Lessons Learnt from Monitoring the Etna Volcano Using an IoT Sensor Network through a Period of Intense Eruptive Activity,” *Sensors*, vol. 24, no. 5, 2024, doi: 10.3390/s24051577.
- [31] Y. Nie and G. Zhang, “Research on Terminal Access Performance of Beam-Hopping Satellite in IoT Scenario,” *Sensors*, vol. 23, no. 3, 2023, doi: 10.3390/s23031428.
- [32] M. R. Burton, G. M. Sawyer, and D. Granieri, “Deep carbon emissions from volcanoes,” *Rev. Mineral. Geochemistry*, vol. 75, pp. 323–354, 2013, doi: 10.2138/rmg.2013.75.11.