

Analisa Karakteristik dan Optimasi Sensor Gas TGS-2201 yang Direkomendasikan Sebagai Instrumen Penginderaan pada Sistem Peringatan Dini Gas Beracun

Bima Romadhon Parada Dian Palevi¹⁾, Citra Dewi Megawati²⁾

¹⁾Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Malang
Kampus II ITN Malang, Jl. Raya Karanglo KM. 2, Tasikmadu, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65153

²⁾Desain Grafis, Universitas Brawijaya Malang
Jl. Komplek Universitas Brawijaya Kampus II, Kalisongo, Malang, Jawa Timur 65145
Email : bimarpdp@lecturer.itn.ac.id

Abstrak. Sensitifitas sensor TGS-2201 terhadap senyawa gas CO, H₂S, dan SO₂ dapat digunakan pada sistem mitigasi bencana gas beracun yang dihasilkan oleh aktivitas gunung berapi. Kekurangan sensor TGS-2201 adalah pengukuran konsentrasi gas secara logaritmik dalam PPM, sehingga mikrokontroler Arduino yang hanya memiliki resolusi ADC internal 10 bit pada arsitektur ATmega328P, akan mengalami pergeseran dan bahkan kesalahan pengukuran konsentrasi gas yang disebabkan terbatasnya akurasi ADC. Hal ini dapat diatasi dengan penggunaan modul ADC 16 bit yang dibangun berdasarkan arsitektur ADS1115, yang akan meningkatkan akurasi pengukuran hingga 76.29 μ Volt/bit dibandingkan ADC ATmega328P yang hanya memiliki akurasi 4.88 mVolt/bit. Penggunaan ADC 16 Bit yang dibangun berdasarkan arsitektur ADS1115 memiliki keunggulan dalam hal akurasi pembacaan sinyal analog hingga 76.29 μ Volt/bit dibandingkan penggunaan ADC internal pada arsitektur ATmega328P yang hanya 4.88 mVolt/bit. Tingkat error pada pengukuran kadar gas konsentrasi rendah maupun tinggi, dapat ditekan menggunakan mendekati nilai ideal, dimana error terendah pembacaan konsentrasi gas pada ADC arsitektur ADS1115 sebesar 0.00% dan error tertinggi sebesar 0.08%. Sedangkan pada ADC internal yang dibangun berdasarkan arsitektur ATmega328P, memiliki tingkat error terendah sebesar 0.02% dan tertinggi 1.99%.

Katakunci: Analog to Digital Converter, ATmega328P, Gas Beracun, Sensor Gas, TGS2201.

1. Pendahuluan

Transisi keadaan dari gunung berapi berstatus aktif normal ke aktif, tidak hanya ditandai oleh kenaikan aktifitas geofisika, tetapi juga oleh aktifitas geokimia. Peningkatan aktifitas geokimia memiliki potensi yang relevan sehubungan dengan letusan, karena gas yang dilepaskan akibat depressurisasi progresif magma mencapai permukaan sebelum keluarnya magma induk[1]. Dalam fumarol kawah temperatur tinggi atau dalam gumpalan gas vulkanik, emisi gas paling sering ditemukan adalah komposisi gas H₂O-CO₂, SO₂-CO₂, dan SO₂-HCl, gas lain yang sering tercatat meskipun dengan konsentrasi lebih rendah terdiri dari CO₂, H₂S, N₂, gas mulia (seperti He, Ar, Rn), H₂, CH₄, CO dan gas-gas lain[2][3][4]. Emisi gas ini menandai adanya anomali termal bawah permukaan dan/atau aktifitas patahan, di mana gunung berapi berstatus aktif normal, umumnya dipantau dengan mengukur konsentrasi gas yang berdifusi dari dalam tanah. Pada konsentrasi tinggi, gas ini bahkan tidak dapat tercium oleh indra penciuman, sehingga manusia dan hewan yang menghirup gas tidak akan menyadari adanya potensi bahaya. Pada konsentrasi di atas ambang batas tertentu, emisi gas akan bersifat racun yang dapat menyebabkan pingsan hingga kematian pada manusia dan hewan[5]. Potensi bahaya gas beracun pada aktivitas gunung berapi sering terabaikan, sehingga perlu mendapat perhatian dikarenakan tidak dapat dideteksi secara kasat mata[6]. Penggunaan sensor TGS-2201 dan mikrokontroler Arduino merupakan salah satu metode dapat direkomendasikan sebagai mitigasi potensi bencana gas beracun yang murah dan dapat diterapkan pada sistem pemantauan aktifitas geokimia gunung berapi. Sensor TGS-2201 memiliki sensitifitas terhadap konsentrasi gas NO₂, SO₂, H₂S, CO, CH₃OH, dan C₄H₁₀, yang merupakan gas emisi hasil pembakaran bahan bakar jenis Petrol dan Diesel. Sensitifitas sensor terhadap gas CO, H₂S, dan SO₂ dapat digunakan pada sistem mitigasi bencana gas beracun yang dihasilkan oleh aktivitas gunung berapi. Kekurangan sensor TGS-2201 adalah pengukuran konsentrasi gas secara logaritmik dalam PPM[7][8][4], sehingga mikrokontroler Arduino yang hanya memiliki resolusi ADC internal 10 bit pada arsitektur ATmega328P, akan mengalami pergeseran dan bahkan kesalahan pengukuran konsentrasi gas yang disebabkan terbatasnya akurasi ADC[9]. Hal ini dapat diatasi dengan penggunaan modul ADC 16 bit

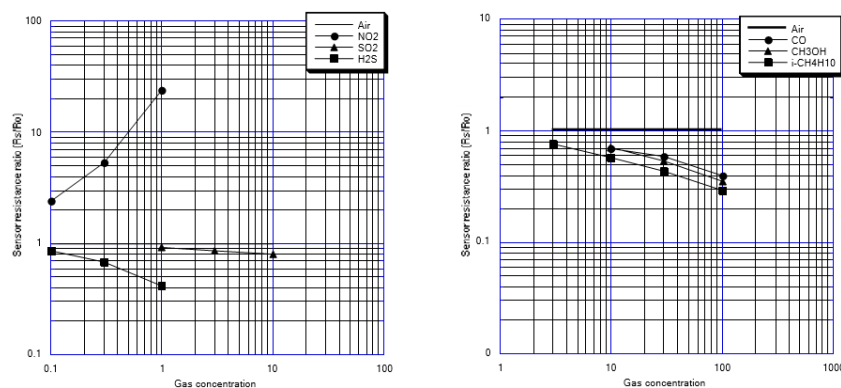
yang dibangun berdasarkan arsitektur ADS1115, yang akan meningkatkan akurasi pengukuran hingga 76.29 $\mu\text{Volt/bit}$ [10] dibandingkan ADC ATmega328P yang hanya memiliki akurasi 4.88 mVolt/bit. Penggunaan modul ADS1115 mampu meningkatkan akurasi pengukuran sensor TGS-2201 hingga 64 kali, sehingga diharapkan dapat memperkecil kesalahan pengukuran sensor akibat terbatasnya resolusi ADC ATmega328P dan menjadi solusi mitigasi potensi bahaya gas beracun yang murah namun handal.

2. Pembahasan

Gas beracun merupakan senyawa kimia yang menyebabkan gejala keracunan kepada makhluk hidup apabila senyawa tersebut terhirup oleh paru-paru (manusia dan hewan) sehingga menimbulkan kegagalan organ yang ditandai dengan cedera sel, anestetik (hilang kesadaran dikarenakan korban tidak mendapatkan asupan oksigen yang cukup), dan cedera organ[11]. Pada konsentrasi tinggi diatas ambang batas aman, gas beracun yang terhirup manusia dan/atau hewan dapat menyebabkan pingsan, kesulitan bernapas, dan detak jantung yang meningkat, pada kondisi paling parah, bahkan dapat menyebabkan kematian. Dalam pengukuran konsentrasi gas, dan menentukan ambang batas aman paparan gas beracun pada makhluk hidup, dinyatakan dalam satuan *Part per Million* (PPM), yang mana merupakan perbandingan massa jenis gas per satu juta bagian dari udara *ambient*[12][13][14]. Pada emisi gas beracun yang dihasilkan oleh aktivitas gunung berapi, dapat bervariasi jenis dan konsentrasi gas yang dihasilkan tergantung dari aktifitas magma dan komposisi batuan yang ada pada kawah aktif gunung api. Tetapi komposisi gas paling umum yang sering ditemukan dalam pengukuran kadar gas yang dihasilkan oleh aktivitas gunung berapi terdiri dari senyawa H_2O , SO_2 , HCl , CO_2 , H_2S , N_2 , gas mulia (He, Ar, Rn), H_2 , CH_4 , CO dan gas-gas lainnya dalam konsentrasi sangat rendah. Diperlukan suatu sistem pemantauan atau sistem peringatan dini terkait bahaya emisi gas beracun yang dihasilkan oleh aktivitas gunung berapi, sehingga dapat mengurangi potensi bahaya yang dapat terjadi[2][3]. Sensor gas TGS-2201 dan mikrokontroler Arduino memiliki potensi yang dapat dikembangkan sebagai sistem pemantauan dan peringatan dini, yang memiliki kelebihan dalam hal biaya dan kesederhanaannya dalam instrumentasi, meskipun masih memiliki keterbatasan dalam hal akurasi pengukuran konsentrasi gas dalam satuan PPM.

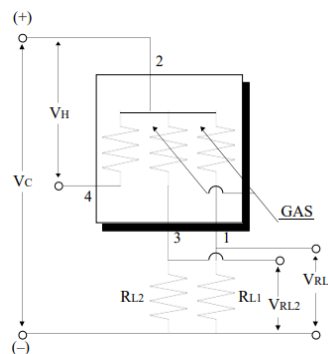
2.1. Instrument Penginderaan

Sensor gas TGS-2201 merupakan elemen penginderaan di mana terdiri dari lapisan semikonduktor oksida logam yang dibentuk pada substrat alumina, dan dibuat menjadi sebuah keping semikonduktor oksida logam yang memiliki sensitifitas terhadap beberapa jenis gas buang yang dihasilkan oleh bahan bakar Petrol dan Diesel. TGS-2201 bekerja ketika keping semikonduktor oksida logam memiliki suhu kerja tertentu, sehingga diperlukan penambahan elemen pemanas pada modul sensor untuk memastikan kinerjanya optimal. Sensor gas TGS-2201 bekerja berdasarkan perubahan konduktivitas bahan dalam satuan resistansi (Ω) yang dipengaruhi oleh perubahan konsentrasi gas yang menerpa keping semikonduktor oksida logam. TGS-2201 memiliki dua elemen penginderaan independen pada satu substrat sehingga menghasilkan sinyal output terpisah untuk merespons gas buang Diesel dan Petrol. Fitur ini menjadikan TGS-2201 sebagai sensor yang ideal untuk aplikasi pendeteksi emisi gas buang dengan kepekaan terhadap jenis gas NO_2 , SO_2 , H_2S , CO, CH_3OH , dan C_4H_{10} [8][7].



Gambar 1. Kurva Karakteristik Sensor[8]

Karakteristik sensitifitas sensor gas TGS-2201 ditunjukkan pada Gambar 1, dimana sumbu Y pada kurva karakteristik menunjukkan rasio resistansi sensor (R_S/R_O). Jika diamati pada kurva karakteristik, sensor gas TGS-2201 memiliki sensitifitas terhadap senyawa gas SO_2 , H_2S , dan CO , yang merupakan senyawa gas yang dihasilkan dalam aktivitas gunung berapi, sehingga penggunaan sensor gas TGS-2201 dapat direkomendasikan dalam penggunaan sistem peringatan dini terkait bahaya emisi gas beracun yang dihasilkan oleh aktivitas gunung berapi. Sensor gas TGS-2201 memiliki keunggulan dalam biaya yang murah, instrumentasi yang sederhana, serta usia pakai yang panjang. Kekurangan utama pada sensor gas TGS-2201 adalah sensitifitas pengukuran konsentrasi gas dalam satuan PPM yang logaritmik terhadap rasio R_S/R_O . Untuk mendapatkan nilai konsentrasi gas, diperlukan instrumentasi rangkaian dasar pengukuran pada sensor TGS-2201. Sensor membutuhkan dua input tegangan, yaitu tegangan pemanas (V_H) dan tegangan rangkaian sensor (V_C). V_H merupakan tegangan pemanas internal sensor untuk mempertahankan suhu optimal keping semikonduktor, dan V_C diterapkan untuk menghasilkan tegangan pengukuran V_{RL1} dan V_{RL2} pada masing-masing resistor external R_{L1} dan R_{L2} yang dirangkai secara seri pada keping semikonduktor untuk membentuk rangkaian pembagi tegangan (Gambar 2). Nilai R_L ditentukan berdasarkan sensitifitas penginderaan sensor untuk mengoptimalkan nilai ambang pengukuran konsentrasi gas dan menjaga disipasi daya (P_S) semikonduktor di bawah batas 15mW. P_S akan memiliki nilai tertinggi ketika nilai R_S sama dengan R_L pada paparan gas berkonsentrasi tinggi.



Gambar 2. Rangkaian Dasar Instrumentasi Sensor[8]

Untuk mendapatkan kadar konsentrasi gas berdasarkan kurva karakteristik (Gambar 1), pendekatan matematis dapat merekomendasikan meskipun sebatas nilai nilai asumsi, sehingga diperlukan metode kalibrasi menggunakan alat ukur ter-standar. Tahap pertama adalah menentukan nilai *Slope* yang ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$Slope(m) = \frac{\log \log Y_2 - \log \log Y_1}{\log \log X_2 - \log \log X_1} \dots \dots \dots (1)$$

Persamaan 1 merupakan persamaan logaritma, mengingat karakteristik sensor gas TGS-2201 bersifat logaritmik pada sumbu X terhadap rasio R_S/R_O pada sumbu Y[8]. Oleh karena itu jika mengacu pada kurva karakteristik, nilai Y_1 , X_1 , Y_2 , X_2 , dapat ditentukan, dan nilai *Slope* dapat dihitung menggunakan Persamaan 1, sehingga hasil perhitungan dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai X, Y, dan Slope pada TGS-2201

Jenis Gas	Axis				Slope
	X_1	Y_1	X_2	Y_2	
Udara	0.10	1.00	10.00	1.00	0.00
SO_2	1.00	0.92	10.00	0.78	-0.07
H_2S	0.10	0.85	1.00	0.44	-0.29
CO	10.00	0.71	100.00	0.41	-0.24

Setelah menghitung nilai *Slope*, kemudian dilanjutkan dengan menghitung nilai R_O dan R_S pada kondisi udara bersih menggunakan Persamaan 2 dan 3, untuk mendapatkan nilai awal rasio R_S/R_O sebelum sensor digunakan untuk melakukan pengukuran kadar gas.

$$Clean \ air \ fact . R_O = \frac{V_C - V_{RL}}{V_{RL}} . R_L \dots \dots \dots (2)$$

$$R_S = \frac{V_C - V_{RL}}{V_{RL}} \cdot R_L \dots \dots \dots (3)$$

Dimana R_0 merupakan resistansi internal keping semikonduktor oksida logam pada sensor saat kalibrasi dalam kondisi udara bersih, sedangkan R_S merupakan resistansi internal keping semikonduktor oksida logam pada sensor saat kondisi sensor bekerja mendeteksi gas. Nilai resistansi R_S berubah berbanding terbalik, tetapi nilai V_{RL} berubah berbanding lurus terhadap konsentrasi gas. Hasil nilai R_S atau R_0 dinotasikan sebagai V_{RL} yang didapatkan dari hasil rangkaian instrumen pembagi tegangan dengan resistor R_L yang ditunjukkan pada Gambar 2. Instrumen ini memerlukan sumber tegangan V_C sebesar 5.0 Volt, dan ketika sensor mendeteksi senyawa gas tertentu maka nilai V_{RL} akan berubah, yang disebabkan oleh bergesernya nilai resistansi R_S , sehingga rasio R_S/R_0 akan berubah. Untuk mendapatkan nilai konsentrasi gas dalam PPM berdasarkan nilai rasio R_S/R_0 , maka diperlukan persamaan logaritma yang ditunjukkan pada Persamaan 4.

$$\text{Konsentrasi Gas (PPM)} = 10^{\frac{\log \log \frac{R_S}{R_0} - \log \log Y_1}{\text{Slope (m)}} + \log \log X_1} \dots \dots \dots (4)$$

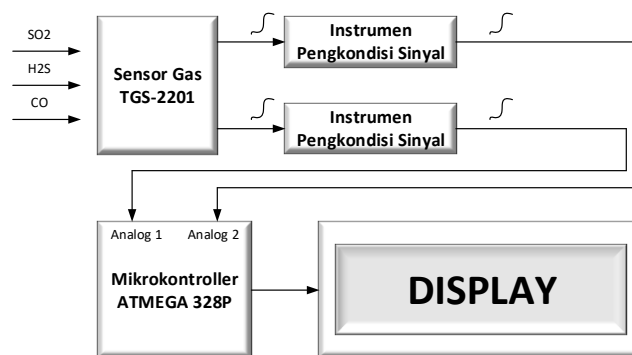
Sehingga jika kita menggunakan patokan kalibrasi udara bersih dengan asumsi rasio $R_S/R_0 = 1.0$, maka hasil perhitungan nilai konsentrasi gas SO_2 , H_2S , dan CO adalah sebagai berikut (Tabel 2).

Tabel 2. Konsentrasi Gas dalam PPM Berdasarkan Nilai Rasion R_S/R_0 pada TGS-2201

Jenis Gas	R_S/R_0	Konsentrasi Gas (PPM)	Tegangan V_{RL} (Volt)
Udara	1.0	$1 \times 10^6 <$	0.3666
SO_2	1.0	0.312536718	0.3666
H_2S	1.0	0.056647911	0.3666
CO	1.0	2.378365352	0.3666

2.2. Proses

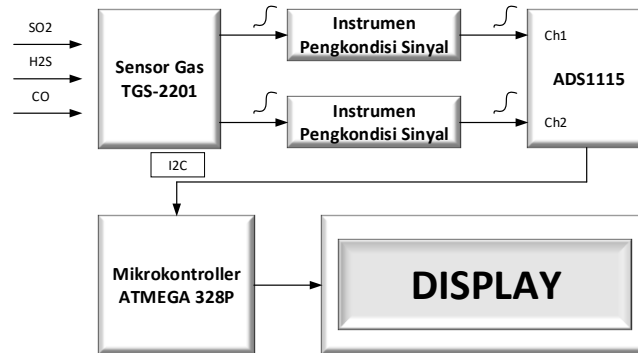
Model instrumentasi sensor gas TGS-2201 untuk mendapatkan data pengukuran kadar gas, menggunakan ADC internal dari arsitektur ATmega328P (Gambar 3) memiliki kekurangan dalam hal resolusi pembacaan yang hanya 10 bit, sehingga tegangan V_{RL} dari sensor hanya akan disampling sebanyak 1024 data[9]. Hal ini menyebabkan kesalahan pembacaan konsentrasi gas dalam satuan PPM cukup tinggi, karena akurasi pembacaan sinyal analog hanya sebesar 4.88 mVolt/bit[15].



Gambar 3. Instrumentasi Sensor TGS-2201 ADC Internal

Untuk mendapatkan akurasi yang tinggi dalam pembacaan konsentrasi gas, mikrokontroler ATmega328P akan dilengkapi modul ADC external, yang dibangun berdasarkan arsitektur ADS1115 (Gambar 4). Modul ADS1115 memiliki resolusi 16 bit, sehingga akan meningkatkan akurasi pembacaan sinyal analog hingga 76.29 μ Volt/bit, yang berarti tegangan V_{RL} dari sensor akan disampling sebanyak 65536 data[10]. Penggunaan modul ADS1115 meningkatkan pembacaan akurasi data sensor hingga 64 kali lebih baik dibanding ADC internal pada jenis sensor yang sama. Jika menggunakan pendekatan matematis yang mengacu pada kurva karakteristik sensor pada Gambar 1, dengan asumsi nilai R_S/R_0 pada kondisi konsentrasi gas terendah dan konsentrasi gas tertinggi, maka kita dapat membandingkan

hasil pembacaan konsentrasi gas antara ADC internal dan ADC ADS1115 yang dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.



Gambar 4. Instrumentasi Sensor TGS-2201 ADS1115

2.3. Hasil

Pada Tabel 3 dan 4 menunjukkan hasil pengukuran yang didapatkan dari pendekatan matematis, sehingga nilai diatas merupakan nilai tidak mutlak yang masih memerlukan kalibrasi menggunakan alat ukur terstandar. Tetapi dari hasil pendekatan didapatkan bahwa nilai error yang diperoleh dari ADC menggunakan arsitektur ADS1115 16 Bit memiliki nilai error lebih rendah dibandingkan dengan ADC internal ATMEGA328P, perhitungan error didapat berdasarkan perbandingan nilai sensor dan nilai yang terbaca pada ADC. Pada Tabel 3 yang merupakan perhitungan berdasarkan konsentrasi gas terendah, memiliki tingkat error terendah sebesar 0.00% pada jenis gas H₂S dengan konsentrasi sebesar 0.1000 PPM, dan nilai error tertinggi 0.04% pada jenis gas SO₂ dengan konsentrasi sebesar 0.9960 PPM pada ADC yang menggunakan arsitektur ADS1115. Sedangkan pada ADC internal ATMEGA328P, nilai error terendah didapatkan sebesar 0.02% pada jenis gas SO₂ dengan konsentrasi sebesar 0.9962 PPM dan nilai error tertinggi sebesar 1.99% pada jenis gas CO dengan konsentrasi sebesar 10.1918 PPM.

Tabel 3. Perbandingan Kesalahan Pembacaan Sensor pada Konsentrasi Gas Rendah

Jenis Gas	Rasio R _s /R ₀			Konsentrasi Gas (PPM)			Error (%)	
	ADC 10 Bit	ADC 16 Bit	Nilai Sensor	ADC 10 Bit	ADC 16 Bit	Nilai Sensor	ADC 10 Bit	ADC 16 Bit
Udara	1.0002	1.0225	1.0001	1.10 ⁶ <	1.10 ⁶ <	1.10 ⁶ <	-	-
SO ₂	0.9202	0.9202	0.9202	0.9962	0.9960	0.9964	0.02%	0.04%
H ₂ S	0.8513	0.8500	0.8500	0.0995	0.1000	0.1000	0.50%	0.00%
CO	0.7067	0.7100	0.7101	10.191	9.9957	9.9931	1.99%	0.03%

Kemudian pada Tabel 4 yang merupakan perhitungan berdasarkan konsentrasi gas tertinggi, memiliki tingkat error terendah sebesar 0.02% pada jenis gas CO dengan konsentrasi sebesar 99.4725 PPM dan nilai error tertinggi 0.08% pada jenis gas SO₂ dengan konsentrasi sebesar 9.8191 PPM pada ADC yang menggunakan arsitektur ADS1115. Sedangkan pada ADC internal ATMEGA328P, nilai error terendah didapatkan sebesar 0.95% pada jenis gas CO dengan konsentrasi sebesar 98.5051 PPM dan nilai error tertinggi sebesar 1.88% pada jenis gas SO₂ dengan konsentrasi sebesar 9.6425 PPM.

Tabel 4. Perbandingan Kesalahan Pembacaan Sensor pada Konsentrasi Gas Tinggi

Jenis Gas	Rasio R _s /R ₀			Konsentrasi Gas (PPM)			Error (%)	
	ADC 10 Bit	ADC 16 Bit	Nilai Sensor	ADC 10 Bit	ADC 16 Bit	Nilai Sensor	ADC 10 Bit	ADC 16 Bit
Udara	80.870	99.648	100.08	1.10 ⁶ <	1.10 ⁶ <	1.10 ⁶ <	-	-
SO ₂	0.7820	0.7810	0.7809	9.6425	9.8191	9.8269	1.88%	0.08%
H ₂ S	0.4431	0.4407	0.4407	0.9755	0.9940	0.9938	1.84%	0.02%
CO	0.4114	0.4105	0.4105	98.505	99.472	99.454	0.95%	0.02%

3. Simpulan

Kesimpulan dari tulisan ini dirangkum berdasarkan point-point sebagai berikut:

1. Penggunaan ADC 16 Bit yang dibangun berdasarkan arsitektur ADS1115 memiliki keunggulan dalam hal akurasi pembacaan sinyal analog hingga 76.29 μ Volt/bit dibandingkan penggunaan ADC internal pada arsitektur ATmega328P yang hanya 4.88 mVolt/bit.
2. Penggunaan ADC 16 Bit mampu meningkatkan resolusi pembacaan sinyal analog sensor TGS-2201 hingga 64 kali lebih baik dibandingkan dengan ADC internal ATmega328P, dengan perbandingan resolusi 65536 berbanding 1024 data sampling.
3. Tingkat error pada pengukuran kadar gas konsentrasi rendah maupun tinggi, dapat ditekan menggunakan mendekati nilai ideal, dimana error terendah pembacaan konsentrasi gas pada ADC arsitektur ADS1115 sebesar 0.00% dan error tertinggi sebesar 0.08%. Sedangkan pada ADC internal yang dibangun berdasarkan arsitektur ATmega328P, memiliki tingkat error terendah sebesar 0.02% dan tertinggi 1.99%.

Ucapan Terima Kasih

Bismillahirrahmanirrahim, penulis mengucapkan penghargaan yang tulus kepada semua anggota, reviewer, editor dan semua pihak yang telah turut menyumbangkan keahlian dan waktu mereka untuk proses meninjau, yang sangat penting untuk menjamin kualitas dan dampak substantif jurnal. Serta penulis mengucapkan beribu terimakasih karena telah diberikan kesempatan untuk menyampaikan buah pemikiran pada jurnal Seniati, semoga Allah SWT melimpahkan taufik dan hidayahnya bagi kita semua, aamiin.

Daftar Pustaka

- [1] B. Zhao, D. Xu, Z. Bai, and Z. Chen, "Volcanism in the longgang volcanic field of NE China: Insights from eruption history, volcano types and geochemical characteristics," in *Geological Society Special Publication*, vol. 510, no. 1, Geological Society of London, 2021, pp. 27–39. doi: 10.1144/SP510-2020-60.
- [2] S. F. Jenkins *et al.*, "Rapid emergency assessment of ash and gas hazard for future eruptions at Santorini Volcano, Greece," *Journal of Applied Volcanology*, vol. 4, no. 1, pp. 1–22, Dec. 2015, doi: 10.1186/s13617-015-0033-y.
- [3] C. Werner *et al.*, "Linking Subsurface to Surface Using Gas Emission and Melt Inclusion Data at Mount Cleveland Volcano, Alaska," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 21, no. 7, Jul. 2020, doi: 10.1029/2019GC008882.
- [4] B. R. P. D. Palevi, M. Rivai, and D. Purwanto, "Fuzzy Logic-Based Wet Scrubber to Control Air Pollutant," in *Proceedings - 2019 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, ISITIA 2019*, Aug. 2019, pp. 74–79. doi: 10.1109/ISITIA.2019.8937142.
- [5] M. Inostroza *et al.*, "Geochemistry of gas and water discharge from the magmatic-hydrothermal system of Guallatiri volcano, northern Chile," *Bulletin of Volcanology*, vol. 82, no. 7, pp. 1–16, Jul. 2020, doi: 10.1007/s00445-020-01396-2.
- [6] G. Merlhiot, M. Mermillod, J. L. le Pennec, S. Hidalgo, and L. Mondillon, "Reducing uncertainty to promote appropriate decisions when facing hazardous phenomena at an active volcano," *Journal of Applied Social Psychology*, vol. 48, no. 4, pp. 227–234, Apr. 2018, doi: 10.1111/jasp.12507.
- [7] "Figaro TGS-2201 - for detection of Gasoline and Diesel Exhaust Gas."
- [8] "Figaro TGS 5N-2201 - for detection of Gasoline and Diesel Exhaust Gas."
- [9] "Atmel 8-bit AVR Microcontrollers ATmega328/P Datasheet," pp. 1–442, 2016.
- [10] T. Instruments, "ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator," pp. 1–54, 2018.

- [11] A. Majstorović, V. Babić, and M. Todić, “Carbon monoxide in the process of uncontrolled combustion - Occurrence, hazards and first aid,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Jan. 2020, vol. 1426, no. 1, pp. 1–10. doi: 10.1088/1742-6596/1426/1/012008.
- [12] H. Zhou, H. Su, H. Zhang, C. Li, D. Ma, and R. Bai, “Geochemical Characteristics of Soil Gas and Strong Seismic Hazard Potential in the Liupanshan Fault Zone (LPSFZ),” *Geofluids*, vol. 2020, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1155/2020/4917924.
- [13] L. Liu *et al.*, “Edge-exposed MoS₂ nanospheres assembled with SnS₂ nanosheet to boost NO₂ gas sensing at room temperature,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 393, pp. 1–10, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122325.
- [14] P. T. Hu *et al.*, “New equation to predict size-resolved gas-particle partitioning quotients for polybrominated diphenyl ethers,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 400, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123245.
- [15] “ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash Datasheet.”