

Analisis Eksperimental Waktu Respons dan Repeatabilitas Sensor Gas CCS811 terhadap Paparan Asap Rokok pada Ruang Uji Terkontrol

Billy Sopater Maniani*, Akbar Sujiwa, Nailul Hasan

Fisika, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 16 Januari 2026
Direvisi: 28 Maret 2026
Diterima: 22 Mei 2026

Kata kunci:

Asap Rokok
Ccs811
Kualitas Udara Dalam Ruang
Repeatabilitas
Waktu Respons

Keywords:

Ccs811
Cigarette Smoke
Indoor Air Quality
Repeatability
Response Time

Penulis Korespondensi:

Billy Sopater Maniani
Email: billymaniani@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis waktu respons dan repeatabilitas sensor gas CCS811 pada alat wearable pendeteksi asap rokok yang dikembangkan secara mandiri. Pengujian dilakukan pada ruang uji terkontrol berukuran 20 cm × 20 cm × 20 cm dan 40 cm × 40 cm dengan paparan 1–4 batang rokok, masing-masing lima pengulangan sehingga diperoleh 40 percobaan. Parameter yang dianalisis meliputi waktu menuju ambang alarm, waktu menuju puncak respons, nilai puncak eCO₂, nilai puncak TVOC, simpangan baku, dan koefisien variasi. Hasil menunjukkan bahwa waktu menuju ambang alarm berada pada rentang 35.43–91.98 s, sedangkan waktu menuju puncak berada pada rentang 76.50–139.29 s. Nilai puncak tertinggi diperoleh pada paparan empat batang rokok, yaitu 6051.4 ppm dan 9389.0 ppb untuk box 20 cm serta 5984.4 ppm dan 9234.0 ppb untuk box 40 cm. Analisis ANOVA dua arah menunjukkan bahwa ukuran box dan jumlah rokok berpengaruh signifikan terhadap nilai puncak eCO₂ dan TVOC ($p < 0,01$), tetapi tidak signifikan terhadap waktu respons ($p > 0,05$). Hasil ini menunjukkan bahwa sensor CCS811 layak digunakan untuk mendeteksi tren paparan asap rokok pada perangkat wearable berbiaya rendah.

This study analyzes the response time and repeatability of a CCS811 gas sensor embedded in a self-developed wearable cigarette-smoke detector. Experiments were conducted in controlled test chambers of 20 cm × 20 cm × 20 cm and 40 cm × 40 cm using exposures of 1–4 cigarettes, with five repetitions for each condition, yielding a total of 40 experiments. The analyzed parameters include time to alarm, time to peak response, peak values of eCO₂, peak values of TVOC, standard deviation, and coefficient of variation. The results show that the time to alarm ranged from 35.43 to 91.98 s, while the time to peak ranged from 76.50 to 139.29 s. The highest peak values were observed for four cigarettes, reaching 6051.4 ppm and 9389.0 ppb in the 20 cm chamber, and 5984.4 ppm and 9234.0 ppb in the 40 cm chamber. Two-way ANOVA indicated that chamber size and cigarette number significantly affected the peak values of eCO₂ and TVOC ($p < 0.01$), but not the response times ($p > 0.05$). These results demonstrate that the CCS811 sensor is feasible for trend detection of cigarette smoke exposure in low-cost wearable devices.

Copyright © 2026 Author(s).

I. PENDAHULUAN

Paparan asap rokok di ruang tertutup masih menjadi isu penting dalam kualitas udara dalam ruang karena tidak terdapat tingkat paparan asap rokok pasif yang benar-benar aman. *U.S. Environmental Protection Agency* (2025) menjelaskan bahwa paparan asap rokok pasif dapat meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular dan kanker paru pada orang yang tidak merokok. Hal serupa juga dilaporkan oleh *Centers for Disease Control and Prevention* (2024) yang menyatakan bahwa paparan asap rokok pada anak dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti infeksi saluran pernapasan, asma, serta meningkatkan risiko berbagai penyakit kronis pada usia dewasa. Kondisi ini menjadi perhatian khusus karena asap rokok di lingkungan tertutup dapat bertahan dalam waktu tertentu dan terakumulasi di dalam ruangan, sehingga meningkatkan paparan terhadap penghuni yang tidak merokok. Selain itu, asap rokok diketahui mengandung ribuan senyawa kimia yang berasal dari proses pembakaran tembakau, termasuk berbagai *volatile organic compounds* (VOC), karbon monoksida, partikel halus, serta berbagai senyawa organik lainnya yang membahayakan kesehatan manusia. Keberadaan senyawa VOC dalam asap rokok dapat menyebabkan penurunan kualitas udara dalam ruang karena senyawa tersebut mudah menguap dan dapat terdispersi dengan cepat di lingkungan tertutup. Senyawa VOC juga diketahui dapat memicu berbagai efek kesehatan seperti iritasi saluran pernapasan, sakit kepala, serta gangguan sistem pernapasan apabila terpapar dalam konsentrasi tertentu. Oleh karena itu, pemantauan konsentrasi VOC yang dihasilkan oleh asap rokok menjadi salah satu pendekatan penting dalam evaluasi kualitas udara dalam ruang. Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa emisi VOC dari rokok konvensional dapat menjadi sumber pencemar udara yang signifikan di lingkungan dalam ruang dan berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi polutan udara di sekitar perokok maupun perokok pasif (Lim et al., 2022; Lu et al., 2022).

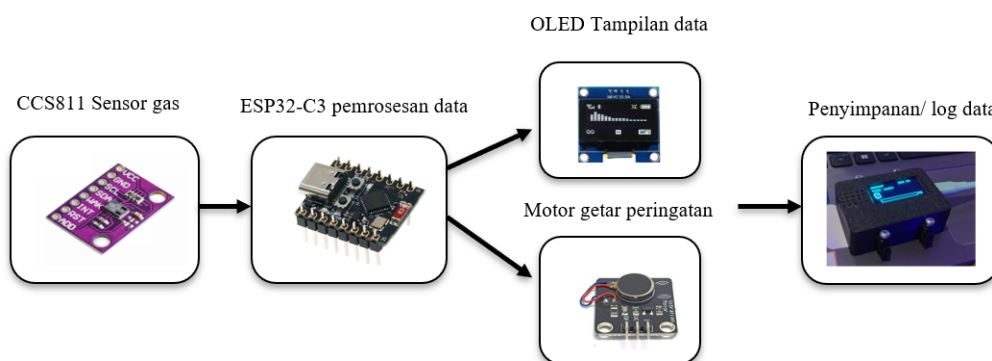
Perkembangan sensor gas berbiaya rendah telah mendorong pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *wearable devices* untuk pemantauan kualitas udara secara personal dan *real-time*. Menurut Deng et al. (2016), perangkat *wearable* dengan sensor VOC memungkinkan pemantauan paparan senyawa kimia di lingkungan secara portabel. Kajian yang dilakukan oleh Salamone et al. (2021) dan Imtiaz et al. (2019) juga menunjukkan bahwa perangkat *wearable* semakin banyak digunakan untuk memantau kondisi lingkungan dan aktivitas terkait paparan asap rokok. Dalam konteks pemantauan kualitas udara dalam ruang, sensor berbasis *metal oxide semiconductor* (MOX) banyak digunakan karena kecil, murah, dan sangat sensitif terhadap senyawa VOC (Saini et al., 2021; Pietraru et al., 2024). Salah satu sensor yang banyak digunakan adalah CCS811, yaitu sensor digital yang mampu mengestimasi konsentrasi *equivalent CO₂* (eCO₂) dan *total volatile organic compounds* (TVOC) sehingga dapat digunakan pada sistem pemantauan kualitas udara berbasis mikrokontroler (ScioSense, 2020; Kuncoro et al., 2022; González et al., 2023).

Meskipun sensor MOX banyak digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara, performa sensor masih dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan seperti temperatur, kelembapan, serta gas interferen yang dapat memengaruhi stabilitas pembacaan sensor. Hong et al. (2023) menunjukkan bahwa kalibrasi sensor VOC biaya rendah sangat dipengaruhi oleh kondisi meteorologi dan keberadaan gas interferen. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Papaconstantinou et al. (2023) yang menunjukkan bahwa sensor gas berbiaya rendah dapat mengalami variasi pembacaan pada kondisi temperatur dan kelembapan yang ekstrem. Selain itu, beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa asap rokok merupakan sumber VOC yang signifikan pada lingkungan dalam ruang dan dapat dideteksi menggunakan perangkat pemantauan udara portabel (Casanova et al., 2016). Namun demikian, penelitian yang secara khusus mengevaluasi waktu respons, waktu menuju ambang alarm, serta repeatabilitas keluaran sensor CCS811 terhadap variasi jumlah rokok pada ruang uji terkontrol masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik waktu respons dan repeatabilitas sensor CCS811 terhadap paparan asap rokok menggunakan alat *wearable* pendeteksi asap rokok yang dikembangkan secara mandiri pada dua volume ruang uji yang berbeda. Penelitian ini memiliki keterbaruan dalam evaluasi eksperimental performa sensor CCS811 untuk mendeteksi paparan asap rokok melalui analisis waktu menuju ambang alarm, waktu menuju puncak respons, serta pengujian repeatabilitas pada variasi jumlah rokok dan dua ukuran ruang uji terkontrol.

II. METODE

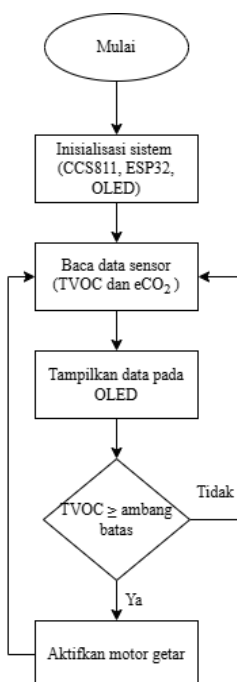
2.1 Desain Sistem dan Rangkaian Pengujian CCS811

Sistem yang digunakan merupakan alat *wearable* pendeteksi asap rokok yang dirancang dan dirakit secara mandiri dengan sensor gas CCS811 sebagai sensor utama, ESP32-C3 sebagai pengendali dan pemroses data, OLED sebagai tampilan lokal, serta motor getar sebagai aktuator peringatan. Ketika nilai pembacaan melewati ambang alarm internal, motor getar aktif sebagai notifikasi cepat kepada pengguna. Diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram blok alat *wearable* pendeteksi asap rokok.

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 1, sistem bekerja dengan memanfaatkan sensor gas CCS811 untuk mendeteksi konsentrasi senyawa VOC yang dihasilkan dari asap rokok. Data pembacaan sensor kemudian dikirimkan ke mikrokontroler ESP32-C3 untuk diproses dan dianalisis. Hasil pengolahan data ditampilkan secara langsung melalui layar OLED sehingga pengguna dapat memantau kondisi kualitas udara secara *real-time*. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan motor getar yang berfungsi sebagai aktuator peringatan ketika nilai pembacaan sensor melewati ambang batas yang telah ditentukan. Data pengukuran yang diperoleh juga dapat disimpan sebagai log data di Excel untuk keperluan analisis lebih lanjut terhadap karakteristik respons sensor terhadap paparan asap rokok. Untuk memperjelas alur kerja sistem selama proses pengujian, disusun *flowchart* yang menggambarkan logika operasi perangkat secara keseluruhan.

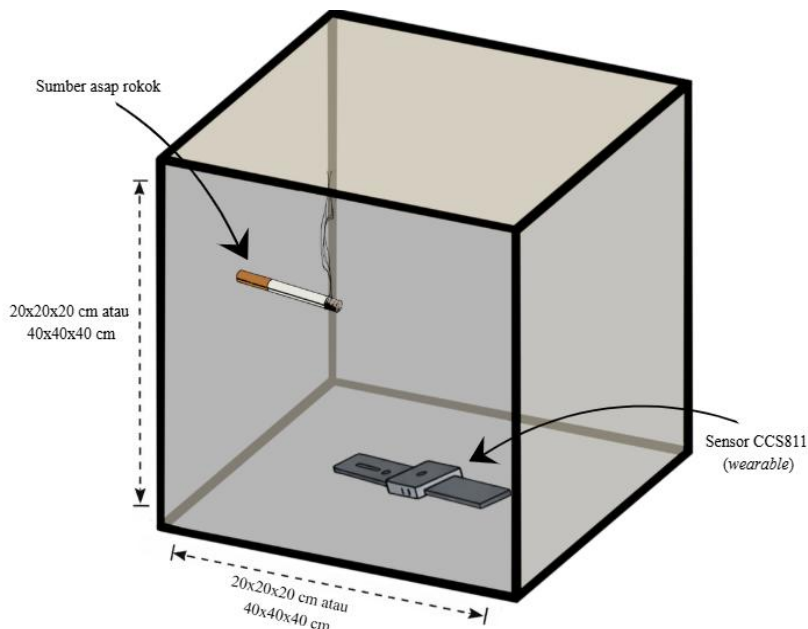


Gambar 2 Flowchart sistem kerja alat *wearable* pendeteksi asap rokok

Berdasarkan *flowchart* pada Gambar 2, sistem diawali dengan proses inialisasi komponen utama, yaitu sensor CCS811, mikrokontroler ESP32, dan OLED. Selanjutnya, sistem melakukan pembacaan data sensor berupa nilai TVOC dan eCO₂ secara kontinu, kemudian menampilkan hasil pengukuran pada layar OLED. Nilai TVOC yang diperoleh dibandingkan dengan ambang batas yang telah ditentukan. Apabila nilai TVOC melebihi ambang batas, maka motor getar akan diaktifkan sebagai notifikasi kepada pengguna. Sebaliknya, jika nilai belum melebihi ambang batas, sistem akan terus melakukan pembacaan data secara berulang. Proses ini berlangsung secara kontinu selama pengujian berlangsung.

2.2 Desain Pengujian Sensor CCS811

Pengujian dilakukan pada dua ruang uji tertutup, yaitu box 20 cm × 20 cm × 20 cm dan box 40 cm × 40 cm × 40 cm. Untuk setiap ukuran box dilakukan paparan asap dari 1, 2, 3, dan 4 batang rokok dengan lima pengulangan pada masing-masing kondisi, sehingga total diperoleh 40 data eksperimen. Pada setiap percobaan, alat ditempatkan pada posisi tetap di dalam ruang uji dan data sensor direkam terhadap waktu sampai sinyal mencapai puncak lalu menurun kembali. Untuk memperjelas konfigurasi ruang uji serta posisi sensor dan sumber asap, ditampilkan ilustrasi setup pengujian pada Gambar 3.



Gambar 3 Konfigurasi ruang uji dan posisi sensor CCS811 serta sumber asap rokok.

Gambar 3 menunjukkan konfigurasi ruang uji yang digunakan dalam penelitian ini. Sensor CCS811 ditempatkan pada posisi tengah di dalam ruang uji, sedangkan sumber asap berupa rokok diletakkan pada sisi dinding dalam ruang uji. Variasi jumlah rokok yang digunakan adalah 1 hingga 4 batang, di mana pada kondisi lebih dari satu batang, rokok ditempatkan pada sisi yang berbeda untuk menghasilkan distribusi asap yang lebih merata di dalam ruang uji. Pengujian dilakukan dalam kondisi ruang tertutup untuk memastikan paparan asap terdistribusi dalam volume ruang yang terkontrol.

2.3 Ekstraksi Parameter dan Analisis Statistik

Analisis data mengikuti penandaan warna yang telah digunakan pada lembar kerja eksperimen. Titik berwarna biru didefinisikan sebagai waktu awal paparan atau baseline, titik kuning sebagai saat nilai TVOC pertama kali mencapai atau melampaui ambang alarm internal 65 sehingga motor getar aktif, dan titik merah sebagai nilai puncak sebelum terjadi penurunan sinyal. Keluaran sensor diinterpretasikan sebagai eCO₂ (ppm) dan TVOC (ppb) sesuai lembar data CCS811.

Parameter utama yang dihitung adalah waktu menuju alarm, yaitu selisih waktu antara titik biru dan kuning, serta waktu menuju puncak, yaitu selisih waktu antara titik biru dan merah. Selain itu dihitung nilai puncak eCO₂, nilai puncak TVOC, rata-rata, simpangan baku, dan *coefficient of variation*

(CV) untuk menilai repeatabilitas setiap kondisi. Untuk membandingkan pengaruh ukuran box dan jumlah rokok digunakan ANOVA dua arah dengan tingkat signifikansi 5%.

III. HASIL DAN DISKUSI

Ringkasan hasil utama ditunjukkan pada Tabel 1. Secara deskriptif, rata-rata waktu menuju ambang alarm berada pada rentang 35.43–91.98 s, sedangkan rata-rata waktu menuju puncak berada pada rentang 76.50–139.29 s. Waktu menuju ambang alarm tercepat diperoleh pada box 40 cm untuk dua batang rokok dengan waktu 35.43 s, sedangkan waktu menuju puncak terlama diperoleh pada box 40 cm untuk tiga batang rokok dengan waktu 139.29 s. Variasi waktu respons antarpengulangan masih terlihat, terutama pada kondisi box 20 cm dengan tiga batang rokok, yang menunjukkan adanya fluktuasi pencampuran asap di dalam ruang uji.

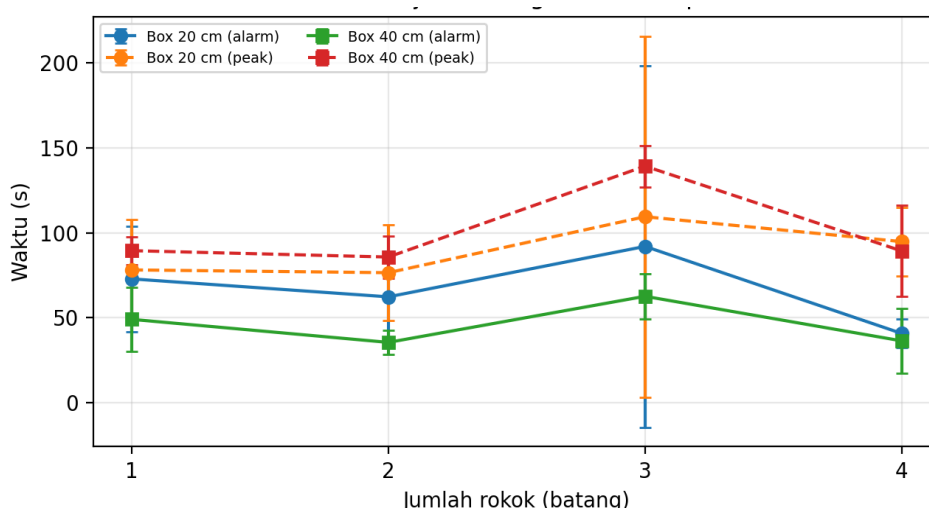
Tabel 1 Rata-rata dan simpangan baku parameter utama untuk setiap kondisi pengujian

Box (cm)	Rokok	waktu alarm (s)	waktu puncak (s)	Nilai puncak eCO ₂ (ppm)	Nilai puncak TVOC (ppb)
20	1	72.85 ± 31.08	78.14 ± 29.48	1608.4 ± 529.8	489.4 ± 486.3
20	2	62.27 ± 26.71	76.50 ± 28.39	1721.2 ± 330.3	457.0 ± 238.7
20	3	91.98 ± 106.49	109.48 ± 106.42	3214.8 ± 506.7	3310.2 ± 1079.6
20	4	40.70 ± 8.51	94.81 ± 20.23	6051.4 ± 3308.7	9389.0 ± 7085.2
40	1	49.00 ± 18.69	89.48 ± 8.10	4140.8 ± 1050.0	5292.2 ± 2242.4
40	2	35.43 ± 7.00	85.73 ± 12.38	4512.2 ± 1184.0	6081.0 ± 2532.1
40	3	62.59 ± 13.37	139.29 ± 12.16	4435.4 ± 2096.5	5914.8 ± 4477.2
40	4	36.33 ± 19.04	89.31 ± 26.81	5984.4 ± 1742.6	9234.0 ± 3723.9

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa waktu menuju ambang alarm dan waktu menuju puncak sensor bervariasi pada setiap kondisi pengujian. Secara umum, peningkatan jumlah rokok cenderung meningkatkan nilai puncak konsentrasi eCO₂ dan TVOC, serta memengaruhi waktu respons sensor, yang sejalan dengan temuan penelitian mengenai emisi senyawa VOC dari asap rokok yang meningkat seiring bertambahnya sumber pembakaran (Lim et al., 2022; Lu et al., 2022). Variasi waktu respons juga terlihat antara box 20 cm × 20 cm × 20 cm dan box 40 cm × 40 cm × 40 cm, yang menunjukkan bahwa ukuran ruang uji dapat memengaruhi dinamika penyebaran asap dan respons sensor. Fenomena ini juga berkaitan dengan karakteristik sensor gas berbasis MOX yang sensitif terhadap distribusi konsentrasi gas dan kondisi lingkungan di sekitar sensor (Hong et al., 2023).

Namun demikian, pola perubahan parameter tidak selalu menunjukkan tren yang konsisten pada setiap kondisi pengujian. Secara teoritis, penambahan jumlah sumber asap akan meningkatkan konsentrasi gas di dalam ruang uji. Akan tetapi, dalam kondisi eksperimen nyata, distribusi asap di dalam ruang tertutup tidak selalu homogen. Variasi ini dapat dipengaruhi oleh dinamika difusi dan pencampuran asap, posisi relatif antara sensor dan sumber asap, serta kemungkinan terjadinya turbulensi lokal di dalam ruang uji. Selain itu, karakteristik sensor berbasis MOX yang memiliki respons transien juga dapat menyebabkan fluktuasi waktu respons meskipun terjadi peningkatan konsentrasi gas. Oleh karena itu, meskipun terdapat kecenderungan peningkatan pada beberapa parameter, hasil pengukuran tidak selalu menunjukkan hubungan yang linier atau konsisten terhadap penambahan jumlah rokok maupun perbedaan ukuran ruang uji.

Pola perubahan waktu menuju ambang alarm dan waktu menuju puncak terhadap variasi jumlah rokok pada kedua ukuran ruang uji ditunjukkan lebih jelas pada Gambar 4.



Gambar 4 Perbandingan waktu menuju ambang alarm dan waktu menuju puncak pada dua ukuran box

Pada Gambar 4 terlihat bahwa waktu menuju ambang alarm dan waktu menuju puncak tidak selalu menunjukkan tren yang konsisten seiring bertambahnya jumlah rokok, di mana pada kondisi tiga batang rokok justru diperoleh waktu respons yang relatif lebih lama. Fenomena ini dapat disebabkan oleh distribusi asap yang tidak homogen di dalam ruang uji, yang dipengaruhi oleh dinamika difusi dan pencampuran asap, posisi relatif antara sensor dan sumber asap, serta kemungkinan terjadinya turbulensi lokal. Kondisi tersebut dapat menyebabkan konsentrasi gas di sekitar sensor tidak meningkat secara langsung meskipun jumlah sumber asap bertambah. Selain itu, karakteristik sensor berbasis MOX yang memiliki respons transien juga berkontribusi terhadap variasi waktu respons, sehingga peningkatan jumlah rokok tidak selalu menghasilkan respons yang lebih cepat secara konsisten.

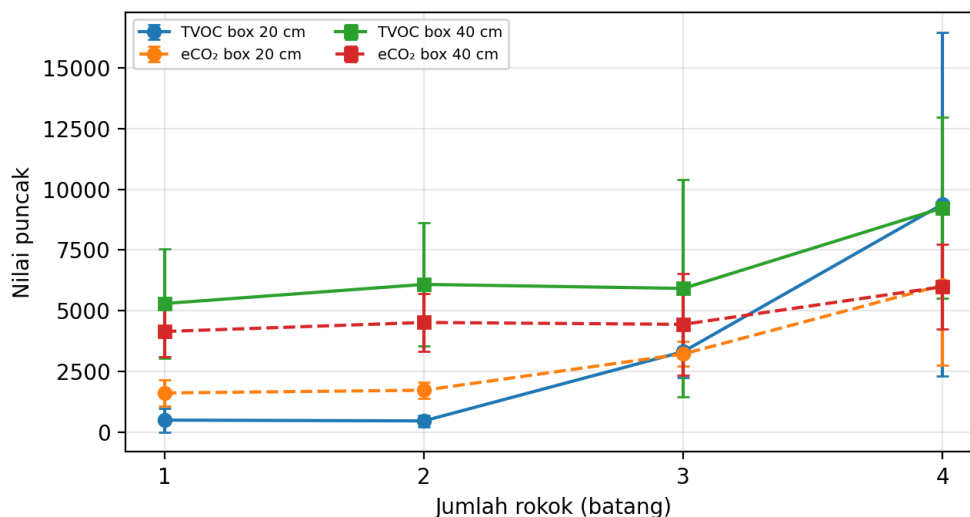
Untuk mengevaluasi pengaruh ukuran ruang uji dan jumlah rokok terhadap parameter yang diamati, dilakukan analisis statistik menggunakan ANOVA dua arah, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil ANOVA pada Tabel 2 menunjukkan bahwa ukuran box dan jumlah rokok tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap waktu menuju ambang alarm maupun waktu menuju puncak ($p > 0,05$). Dengan kata lain, pada dataset ini perbedaan volume ruang belum cukup kuat untuk menghasilkan perbedaan statistik pada aspek kecepatan respons. Hong et al. (2023) menjelaskan bahwa performa sensor gas biaya rendah berbasis MOX dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan dinamika distribusi gas di sekitarnya. Dalam konteks pengujian ini, dinamika difusi asap di dalam ruang uji, posisi sensor terhadap jalur aliran asap, serta kemungkinan terjadinya turbulensi lokal dapat menyebabkan variasi distribusi konsentrasi gas di dalam ruang uji. Selain itu, respons sensor MOX juga diketahui dapat menunjukkan karakteristik respons transien sebelum mencapai kondisi stabil, sebagaimana dibahas pada penelitian mengenai sensor VOC berbasis MOX untuk pemantauan kualitas udara dalam ruang (Pietraru et al., 2024). Kondisi tersebut dapat menyebabkan variasi waktu respons sensor meskipun konsentrasi gas yang dihasilkan relatif berbeda pada setiap kondisi pengujian.

Tabel 2 Hasil ANOVA dua arah untuk empat parameter utama

Parameter	p ukuran box	p jumlah rokok	p interaksi
Waktu alarm	0.1207	0.2124	0.9059
Waktu puncak	0.4107	0.1086	0.8328
Puncak eCO ₂	0.0038	0.0006	0.2057
Puncak TVOC	0.0063	0.0008	0.2672

Berbeda dengan waktu respons, amplitudo sinyal menunjukkan kecenderungan meningkat seiring pertambahan jumlah rokok, terutama pada kanal puncak eCO₂ dan TVOC. Nilai puncak tertinggi pada box 20 cm dicapai saat empat batang rokok dipaparkan, yaitu 6051.4 ± 3308.7 ppm untuk eCO₂

dan 9389.0 ± 7085.2 ppb untuk TVOC. Pada box 40 cm, kondisi empat batang rokok juga menghasilkan puncak tertinggi, yaitu 5984.4 ± 1742.6 ppm dan 9234.0 ± 3723.9 ppb. ANOVA dua arah memperlihatkan bahwa ukuran box berpengaruh signifikan terhadap puncak eCO_2 ($p=0.0038$) dan puncak TVOC ($p=0.0063$), sementara jumlah rokok juga berpengaruh signifikan terhadap kedua parameter tersebut ($p<0.001$).



Gambar 5 Perbandingan nilai puncak eCO_2 dan TVOC pada dua ukuran box.

Dari sisi repeatabilitas, evaluasi kinerja sensor dilakukan menggunakan *coefficient of variation* (CV) untuk setiap parameter pengujian. Hasil perhitungan CV pada masing-masing kondisi ditunjukkan pada Tabel 3

Tabel 3 Nilai *coefficient of variation* (CV) untuk setiap kondisi pengujian

Box (cm)	Rokok	CV waktu menuju ambang alarm (%)	CV waktu menuju puncak (%)	CV nilai puncak eCO_2 (%)	CV nilai puncak TVOC (%)
20	1	42.66	37.73	32.94	99.37
20	2	42.90	37.11	19.19	52.23
20	3	115.78	97.22	15.76	32.62
20	4	20.91	21.34	54.70	75.47
40	1	38.14	9.05	25.36	42.37
40	2	19.76	14.44	26.24	41.64
40	3	21.36	8.73	47.28	75.69
40	4	52.41	30.02	29.12	40.32

Dari sisi repeatabilitas, CV waktu alarm terendah diperoleh pada box 40 cm dengan dua batang rokok sebesar 19.76%, sedangkan CV waktu puncak terendah diperoleh pada box 40 cm dengan tiga batang rokok sebesar 8.73%. Untuk amplitudo sinyal, repeatabilitas terbaik pada puncak eCO_2 diperoleh pada box 20 cm dengan tiga batang rokok sebesar 15.76%, sedangkan repeatabilitas terbaik pada puncak TVOC juga muncul pada kondisi yang sama sebesar 32.62%. Temuan ini menunjukkan bahwa CCS811 cukup konsisten untuk pemantauan tren paparan asap rokok, meskipun beberapa kondisi masih menunjukkan dispersi data yang tinggi. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian mengenai penggunaan sensor VOC berbiaya rendah untuk pemantauan kualitas udara dalam ruang yang menunjukkan bahwa sensor jenis ini mampu mendeteksi perubahan tren konsentrasi gas meskipun masih terdapat variasi pembacaan antar pengulangan (Saini et al., 2021; Pietraru et al., 2024).

Interpretasi hasil harus mempertimbangkan karakteristik dasar MOX. Lembar data CCS811 menjelaskan bahwa sensor memerlukan early-life burn-in dan conditioning period sebelum pembacaan menjadi lebih stabil serta memungkinkan kompensasi temperatur dan kelembapan (ScioSense, 2020). Selain itu, penelitian mengenai kalibrasi sensor VOC biaya rendah juga menunjukkan bahwa keluaran sensor dapat dipengaruhi oleh kondisi meteorologis, keberadaan gas pengganggu, serta metode kalibrasi yang digunakan (Hong et al., 2023). Oleh karena itu, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini lebih tepat diposisikan sebagai alat deteksi dini dan pemantau tren paparan, bukan sebagai instrumen referensi untuk kuantifikasi absolut komponen kimia dalam asap rokok.

Secara umum, hasil penelitian ini mendukung pemanfaatan CCS811 untuk aplikasi wearable indoor air quality monitoring. Penggunaan sensor VOC portabel dan perangkat wearable telah banyak dilaporkan mampu memberikan pemantauan paparan lingkungan secara real-time (Deng et al., 2016; Salamone et al., 2021). Dalam penelitian ini, kombinasi sensor digital, mikrokontroler ESP32-C3, tampilan OLED, dan aktuator getar menghasilkan sistem yang ringkas serta responsif untuk mendeteksi paparan asap rokok. Ke depan, performa sistem masih dapat ditingkatkan melalui kontrol posisi sensor, penambahan sensor temperatur-kelembapan untuk kompensasi pembacaan, serta validasi silang menggunakan instrumen referensi atau ruang uji dengan laju alir yang lebih terkontrol, sebagaimana direkomendasikan pada berbagai studi mengenai evaluasi sensor kualitas udara berbiaya rendah (Papaconstantinou et al., 2023).

IV. KESIMPULAN

Sensor gas CCS811 yang diintegrasikan pada alat wearable buatan sendiri mampu mendeteksi paparan asap rokok pada ruang uji terkontrol dengan waktu menuju ambang alarm rata-rata 35.43–91.98 s dan waktu menuju puncak 76.50–139.29 s. Ukuran box dan jumlah rokok tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap waktu respons, tetapi keduanya berpengaruh signifikan terhadap nilai puncak eCO₂ dan TVOC. Paparan empat batang rokok menghasilkan nilai puncak tertinggi pada kedua box, sedangkan repeatabilitas terbaik diperoleh pada kondisi tertentu dengan nilai CV waktu di bawah 20% dan nilai CV puncak eCO₂ sekitar 15.76%. Hasil ini menunjukkan bahwa CCS811 layak digunakan sebagai detektor tren paparan asap rokok pada perangkat wearable berbiaya rendah, dengan catatan bahwa kalibrasi, kompensasi lingkungan, dan standarisasi prosedur uji masih perlu ditingkatkan untuk pengembangan berikutnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tidak ada.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GENERATIF DAN TEKNOLOGI BERBASIS AI

GPT hanya digunakan untuk mengoreksi kesalahan tata bahasa dan tipografi. Penulis bertanggung jawab penuh atas isi dan integritas publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

Casanova-Chafer, J., Gallart-Mateu, D., Armenta, S., & de la Guardia, M. (2016). Preliminary results about the breath of passive smokers and vapers based on the use of portable air monitoring devices. *Microchemical Journal*, 126, 454–459. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.01.004>

- Centers for Disease Control and Prevention. (2024). About secondhand smoke. <https://www.cdc.gov/tobacco/secondhand-smoke/index.html>
- Deng, Y., Chen, C., Xian, X., Tsow, F., Verma, G., McConnell, R., Fruin, S., Tao, N., & Forzani, E. S. (2016). A novel wireless wearable volatile organic compound (VOC) monitoring device with disposable sensors. *Sensors*, 16(12), 2060. <https://doi.org/10.3390/s16122060>
- González, V., Meléndez, F., Arroyo, P., Godoy, J., Díaz, F., Suárez, J. I., & Lozano, J. (2023). Electro-optical nose for indoor air quality monitoring. *Chemosensors*, 11(10), 535. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11100535>
- Hong, G.-H., Le, T.-C., Lin, G.-Y., Cheng, H.-W., Yu, J.-Y., Dejchanchaiwong, R., Tekasakul, P., & Tsai, C.-J. (2023). Long-term field calibration of low-cost metal oxide VOC sensor: Meteorological and interference gas effects. *Atmospheric Environment*, 310, 119955. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119955>
- Imtiaz, M. H., Ramos-Garcia, R. I., Wattal, S., Tiffany, S., & Sazonov, E. (2019). Wearable sensors for monitoring of cigarette smoking in free-living: A systematic review. *Sensors*, 19(21), 4678. <https://doi.org/10.3390/s19214678>
- Kuncoro, C. B. D., Asyikin, M. B. Z., & Amaris, A. (2022). Smart-autonomous wireless volatile organic compounds sensor node for indoor air quality monitoring application. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4), 2439. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042439>
- Lim, D.-H., Son, Y.-S., Kim, Y.-H., Kukkar, D., & Kim, K.-H. (2022). Volatile organic compounds released in the mainstream smoke of flavor capsule cigarettes. *Environmental Research*, 209, 112866. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112866>
- Lu, F., Yu, M., Chen, C., Liu, L., Zhao, P., Shen, B., & Sun, R. (2022). The emission of VOCs and CO from heated tobacco products, electronic cigarettes, and conventional cigarettes, and their health risk. *Toxics*, 10(1), 8. <https://doi.org/10.3390/toxics10010008>
- Papaconstantinou, R., Demosthenous, M., Bezantakos, S., Hadjigeorgiou, N., Costi, M., Stylianou, M., Symeou, E., Savvides, C., & Biskos, G. (2023). Field evaluation of low-cost electrochemical air quality gas sensors under extreme temperature and relative humidity conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16, 3313–3329. <https://doi.org/10.5194/amt-16-3313-2023>
- Pietraru, R. N., Nicolae, M., Mocanu, Ș., & Merezeanu, D.-M. (2024). Easy-to-use MOX-based VOC sensors for efficient indoor air quality monitoring. *Sensors*, 24(8), 2501. <https://doi.org/10.3390/s24082501>
- Saini, J., Dutta, M., & Marques, G. (2021). Sensors for indoor air quality monitoring and assessment through Internet of Things: A systematic review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(2), 66. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08781-6>
- Salamone, F., Masullo, M., & Sibilio, S. (2021). Wearable devices for environmental monitoring in the built environment: A systematic review. *Sensors*, 21(14), 4727. <https://doi.org/10.3390/s21144727>
- ScioSense. (2020). CCS811 datasheet (Revision 2). <https://www.digikey.com/en/htmldatasheets/production/2037977/0/0/1/ccs811b-jopd500.html>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2025). Secondhand tobacco smoke and indoor air quality. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/secondhand-tobacco-smoke-and-indoor-air-quality>
- Xie, J., Wang, X., Sheng, G., Bi, X., & Fu, J. (2003). Determination of tobacco smoking influence on volatile organic compounds constituent by indoor tobacco smoking simulation experiment. *Atmospheric Environment*, 37(24), 3365–3374. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00354-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00354-6)