

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pengujian dan Analisis Sistem

Pengujian sistem dilakukan pada empat lokasi di lingkungan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro dengan kondisi ruangan yang berbeda beda secara alami. Keempat lokasi tersebut adalah Ruang Dosen TLI , Ruang Sidang TLI, Gedung Bersama Sekolah Vokasi, dan Perpustakaan Sekolah Vokasi. Total durasi pengujian mencapai 80,55 jam dengan jumlah data yang terekam sebanyak 19.408 titik untuk masing masing parameter. Jumlah data per lokasi berkisar antara 1.946 titik hingga 6.107 titik bergantung pada durasi pengujian pada lokasi tersebut.

Sistem diprogram untuk mengirim data secara berkala dengan interval terprogram 10 detik. Pada praktiknya, interval aktual rata rata pengiriman adalah 14,94 detik karena adanya akumulasi waktu eksekusi pembacaan sensor, pengiriman melalui protokol HTTPS, dan latensi jaringan. Data mentah hasil pengukuran seluruhnya tersimpan pada Google Spreadsheet. Sebelum analisis, dimensi fisik setiap lokasi diukur untuk memperoleh gambaran volume ruang yang menjadi acuan interpretasi konsentrasi gas dan partikulat. Rangkuman dimensi keempat lokasi disajikan pada Tabel 5.1.

Tabel 5- 1 Dimensi Area Pengujian

No	Lokasi	Tanggal	P (m)	L (m)	T (m)	Luas (m ²)	Volume (m ³)	Keterangan
1	Ruang Dosen TLI	8-9 Juni 2026	552	250	303	13,80	41,81	Ruangan semi terbuka, atap menyatu dengan ruangan bersebelahan
2	Ruang Sidang TLI	15 Juni 2026	591	272	303	16,08	48,71	Ruangan tertutup ber-AC
3	Gedung Bersama SV	17-18 Juni 2026	780	240	290	18,72	54,29	Ruangan tertutup ber-AC

No	Lokasi	Tanggal	P (m)	L (m)	T (m)	Luas (m ²)	Volume (m ³)	Keterangan
4	Perpustakaan SV	18-19 Juni 2026	2.560	1.020	450	261,12	1.175,04	Ruangan tertutup ber-AC berukuran besar

Keterangan: P menyatakan panjang, L menyatakan lebar, dan T menyatakan tinggi ruangan.

Perbedaan volume ruang antarlokasi cukup lebar. Perpustakaan Sekolah Vokasi memiliki volume terbesar yaitu 1.175,04 m³, jauh melampaui Gedung Bersama Sekolah Vokasi dengan 54,29 m³, Ruang Sidang TLI dengan 48,71 m³, dan Ruang Dosen TLI dengan 41,81 m³. Volume ruang menjadi faktor penting dalam menafsirkan konsentrasi CO₂ karena ruang yang lebih besar cenderung memiliki kapasitas pengenceran udara yang lebih tinggi. Namun, faktor okupansi dan ventilasi turut menentukan konsentrasi akhir sebagaimana dibahas pada Tabel 5.3.

5.1.1 Pengujian Kinerja Sistem

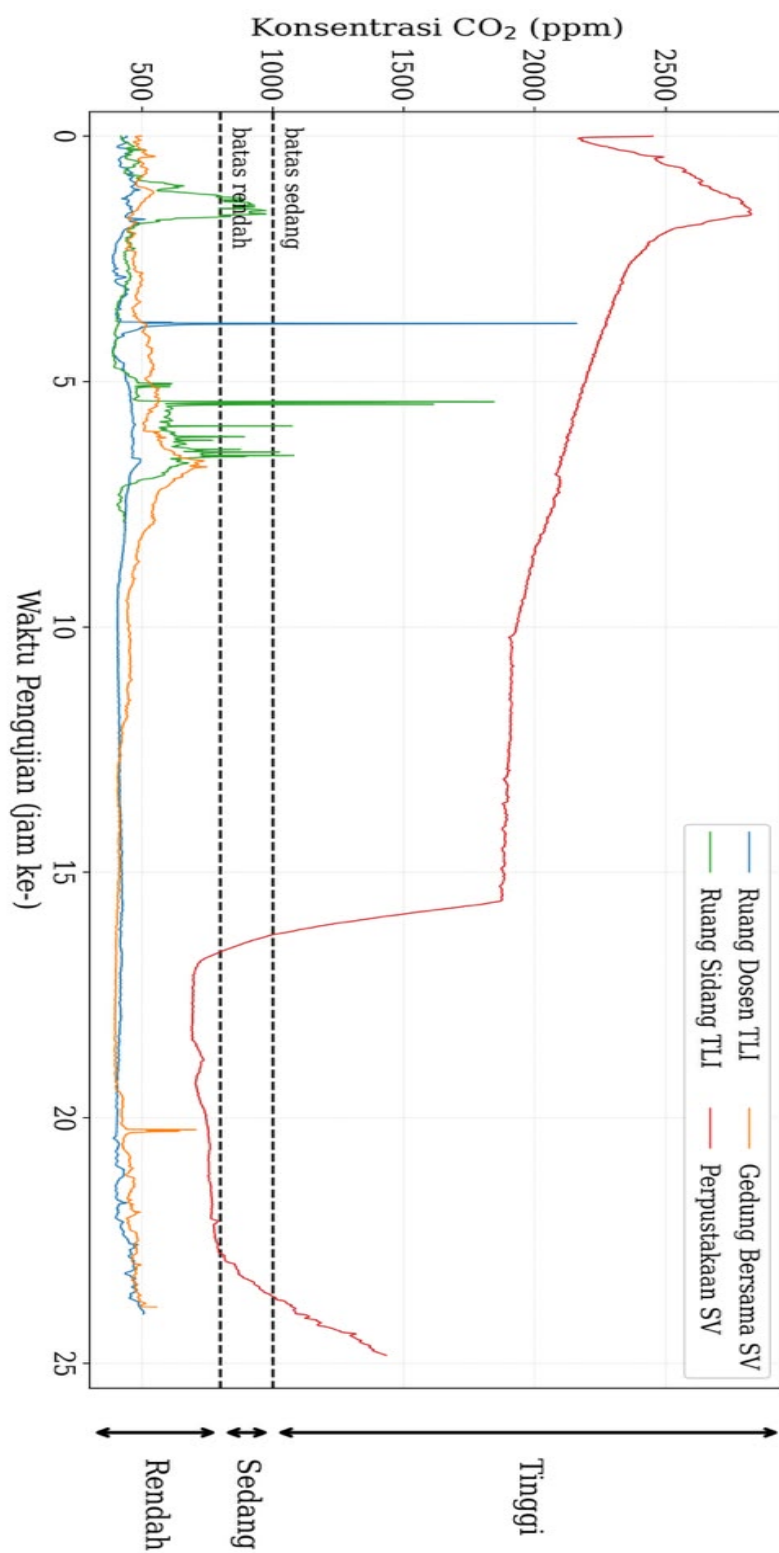
Pengujian kinerja sistem bertujuan memastikan seluruh komponen bekerja secara terintegrasi, mulai dari pembacaan sensor, penampilan data pada LCD, hingga pengiriman data ke basis data daring. Selama pengujian, sistem berhasil beroperasi secara berkelanjutan pada keempat lokasi tanpa memerlukan intervensi ulang. Data terekam secara berkala dan tersimpan pada Google Spreadsheet melalui skrip Google Apps Script. Sistem juga mampu memulihkan koneksi secara mandiri ketika jaringan sempat terputus melalui mekanisme WiFi.reconnect, sehingga pengiriman data dapat dilanjutkan tanpa menghentikan keseluruhan proses.

5.2 Hasil Pengujian Sensor CO₂ (MH-Z16)

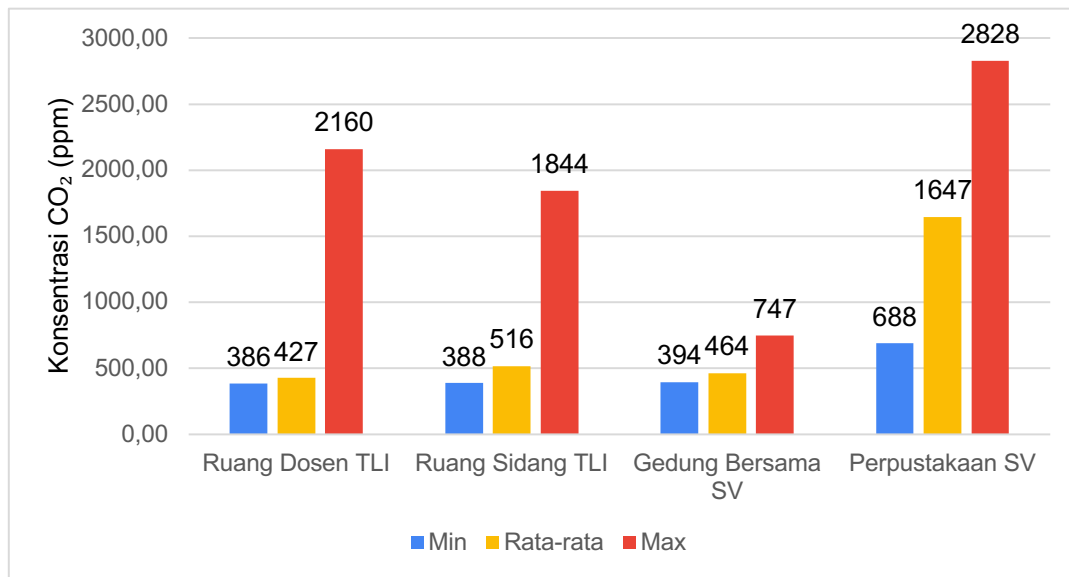
Pengujian sensor CO₂ dilakukan untuk mengukur konsentrasi karbon dioksida sebagai indikator kecukupan ventilasi ruang. Perhitungan Statistik deskriptif konsentrasi CO₂ pada keempat lokasi disajikan pada Tabel 5.2.

Tabel 5- 2 Statistik Deskriptif Konsentrasi CO₂ (ppm)

Lokasi	Jumlah Data Yang Direkam	Min	Maks	Rata-rata	Standar Deviasi
Ruang Dosen TLI	5.529	386	2.160	426,60	42,95
Ruang Sidang TLI	1.946	388	1.844	515,65	148,57
Gedung Bersama SV	5.826	394	747	463,60	59,26
Perpustakaan SV	6.107	688	2.828	1.647,12	651,19
Gabungan	19.408	386	2.828	830,69	666,25



Gambar 5. 1 Grafik Konsentrasi CO₂ pada Keempat Lokasi



Gambar 5. 2 Grafik Statistik Konsentrasi CO₂ per Lokasi

Konsentrasi CO₂ sangat dipengaruhi oleh jumlah penghuni ruang dan kondisi ventilasi. Tabel 5.3 merangkum kondisi lingkungan dan estimasi okupansi setiap lokasi selama pengujian.

Tabel 5- 3 Kondisi Lingkungan dan Okupansi Orang

Lokasi	Kondisi Jendela	Kondisi AC	Okupansi Orang	Volume (m ³)
Ruang Dosen TLI	Terbuka sebagian	Tidak aktif	3-8 orang	41,81
Ruang Sidang TLI	Terbuka sebagian	Tidak aktif	5-15 orang	48,71
Gedung Bersama SV	Tertutup	Aktif	3-6 orang	54,29
Perpustakaan SV	Tertutup	Aktif	5-20 orang	1.175,04

Tabel 5- 4 Distribusi Kategori Konsentrasi CO₂

Lokasi	Rendah (<800 ppm)	Normal (800-1000 ppm)	Tinggi (>1000 ppm)
Ruang Dosen TLI	5.525 (99,9%)	0 (0,0%)	4 (0,1%)
Ruang Sidang TLI	1.823 (93,7%)	111 (5,7%)	12 (0,6%)
Gedung Bersama SV	5.826 (100%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)
Perpustakaan SV	1.530 (25,1%)	303 (5,0%)	4.274 (70,0%)

Hasil pengujian memperlihatkan hubungan yang jelas antara okupansi, ventilasi, dan konsentrasi CO₂. Gedung Bersama yang berpenghuni paling sedikit mencatat konsentrasi seluruhnya pada kategori Aman meskipun ruangan tertutup dan ber-AC. Sebaliknya, Perpustakaan menunjukkan kondisi paling kritis dengan 70,0% data berada pada kategori Berbahaya dan konsentrasi maksimum mencapai 2.828 ppm. Kondisi ini disebabkan oleh kombinasi ruangan tertutup ber-AC dengan okupansi tinggi hingga 20 orang, sedangkan pendingin ruangan hanya menyirkulasikan udara di dalam ruang tanpa memasukkan udara segar dari luar. Volume ruang Perpustakaan yang besar tidak cukup mengimbangi akumulasi CO₂ karena tidak ada pertukaran udara dengan lingkungan luar. Temuan ini sejalan dengan penelitian [16] yang menegaskan bahwa peningkatan konsentrasi CO₂ dalam ruang berkorelasi kuat dengan berkurangnya laju ventilasi udara luar.

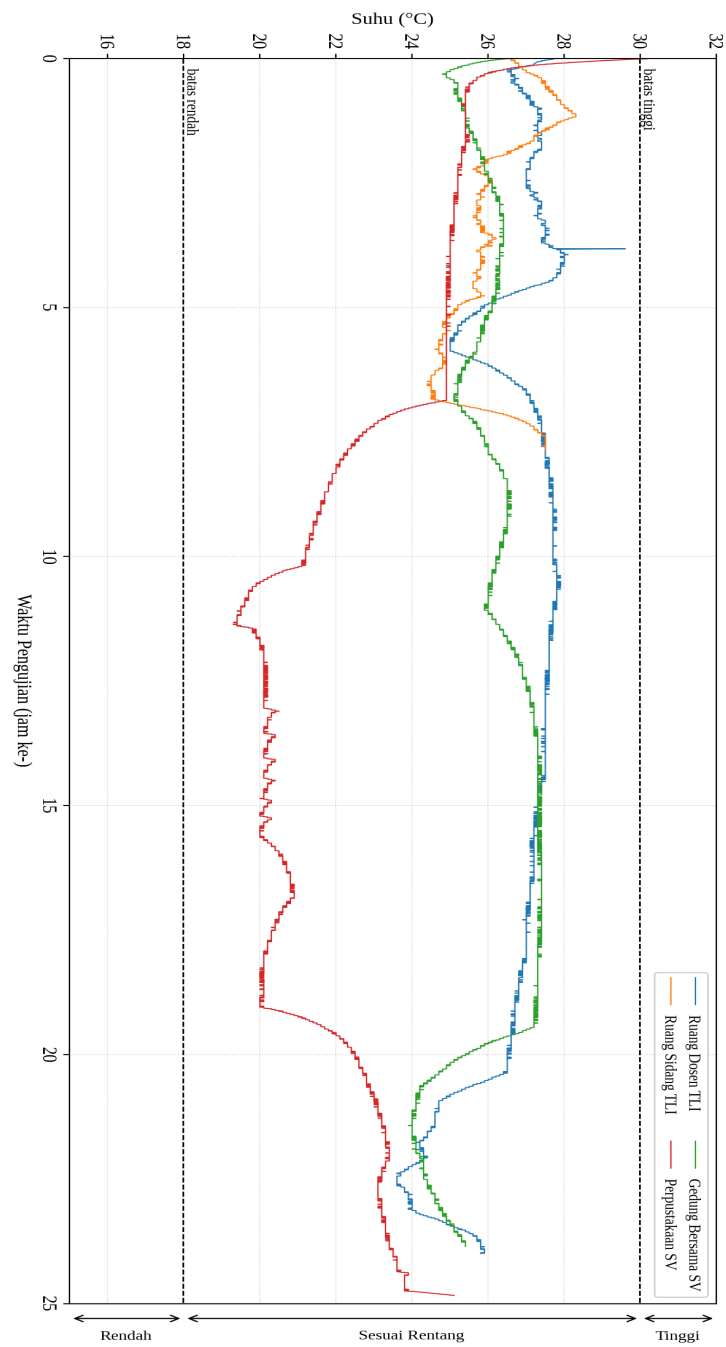
Ruang Dosen dan Ruang Sidang yang jendelanya terbuka sebagian menunjukkan konsentrasi yang jauh lebih rendah. Standar deviasi konsentrasi pada kedua ruang tersebut relatif kecil untuk Ruang Dosen dan lebih besar untuk Ruang Sidang, yang mengindikasikan fluktuasi okupansi selama pengujian. Pola ini menegaskan bahwa ventilasi alami melalui jendela yang terbuka efektif menekan akumulasi CO₂ meskipun terdapat penghuni di dalam ruang.

5.3 Hasil Pengujian Sensor Suhu dan Kelembapan (DHT22)

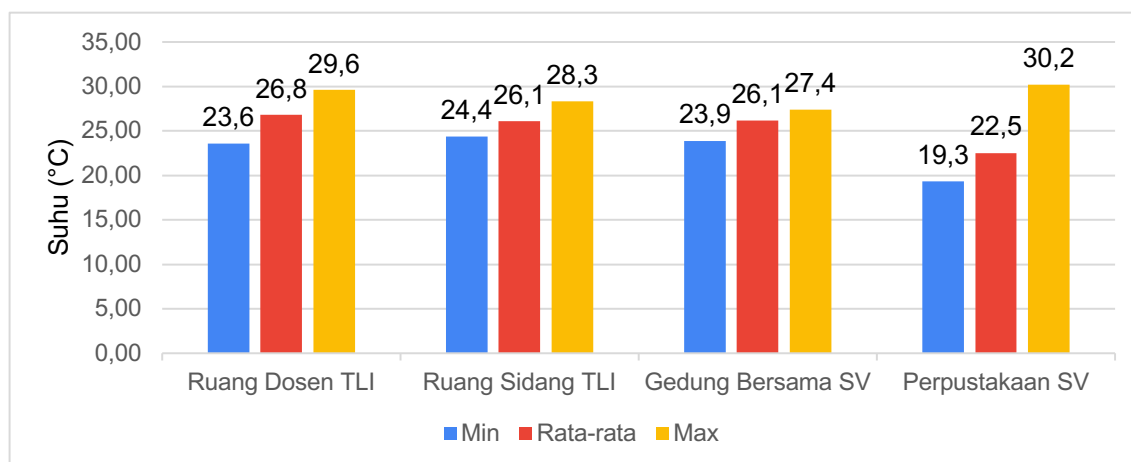
Pengujian sensor DHT22 menghasilkan data suhu dan kelembapan relatif ruang. Seluruh pembacaan suhu tergolong valid setelah koreksi format data sebagaimana dijelaskan pada Subbab 3.8, sehingga statistik dihitung dari keseluruhan 19.408 titik data. Statistik deskriptif suhu disajikan pada Tabel 5.5.

Tabel 5- 5 Statistik Deskriptif Suhu (°C)

Lokasi	N	Min	Maks	Rata-rata	Standar Deviasi
Ruang Dosen TLI	5.529	23,6	29,6	26,79	1,09
Ruang Sidang TLI	1.946	24,4	28,3	26,07	1,06
Gedung Bersama SV	5.826	23,9	27,4	26,14	1,00
Perpustakaan SV	6.107	19,3	30,2	22,47	2,09
Gabungan	19.408	19,3	30,2	25,16	2,35



Gambar 5. 3 Grafik Suhu pada Keempat Lokasi



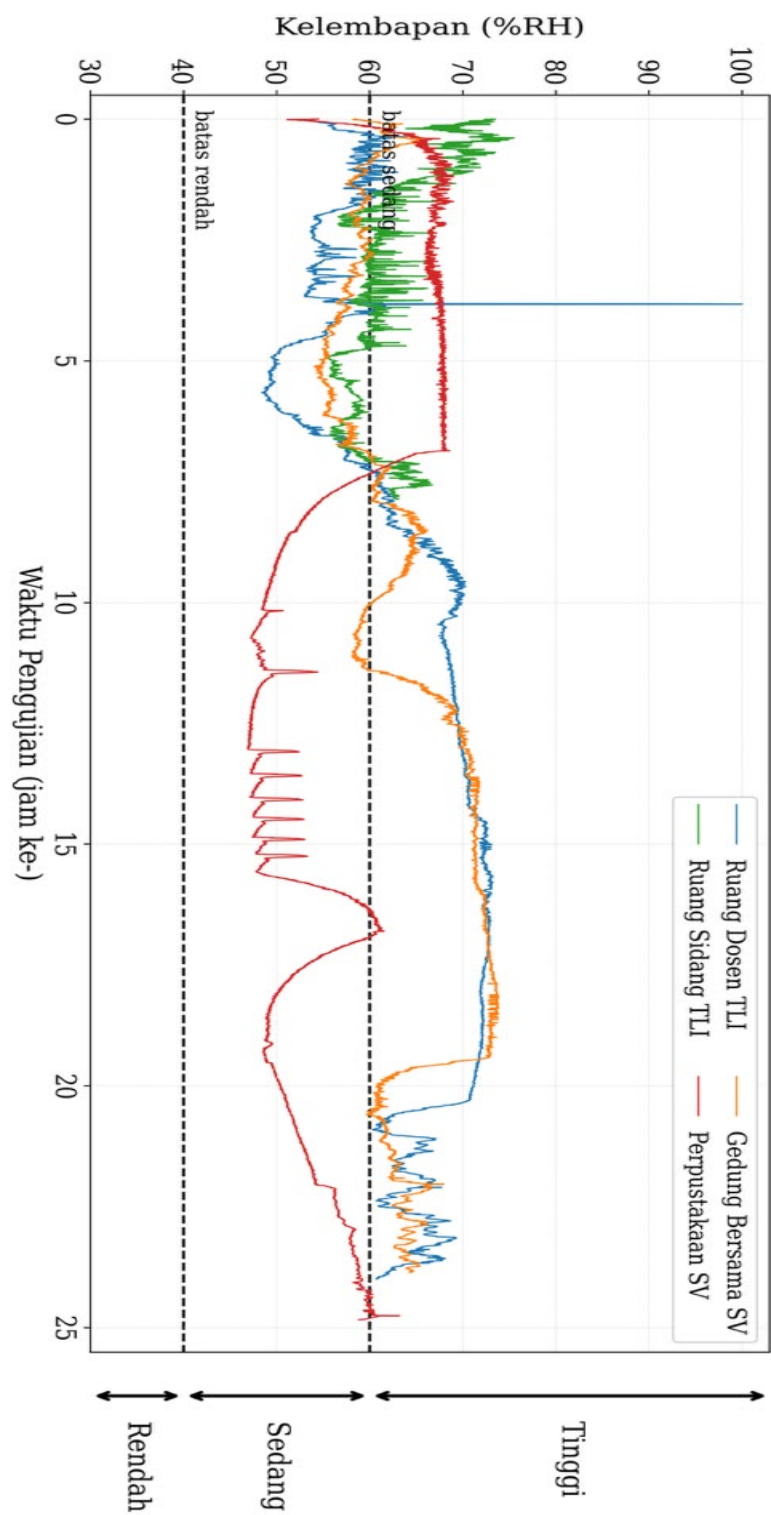
Gambar 5. 4 Grafik Statistik Suhu per Lokasi

Suhu pada seluruh lokasi berada pada kategori Sesuai Rentang menurut ambang Permenkes Nomor 2 Tahun 2023, yaitu 18°C sampai 30°C. Ruang Dosen, Ruang Sidang, dan Gedung Bersama mencatat 100% data pada kategori Sesuai Rentang. Perpustakaan mencatat 6.104 titik atau 99,95% pada kategori Sesuai Rentang, dengan tiga titik atau 0,05% pada kategori Tinggi karena melampaui 30°C. Tidak ada satu pun data pada keempat lokasi yang masuk kategori Rendah. Perpustakaan memiliki suhu rata-rata terendah sebesar 22,47°C sekaligus rentang paling lebar, yang mencerminkan kerja pendingin ruangan. Ruang Dosen mencatat suhu rata-rata tertinggi sebesar 26,79°C karena mengandalkan ventilasi alami tanpa pendingin.

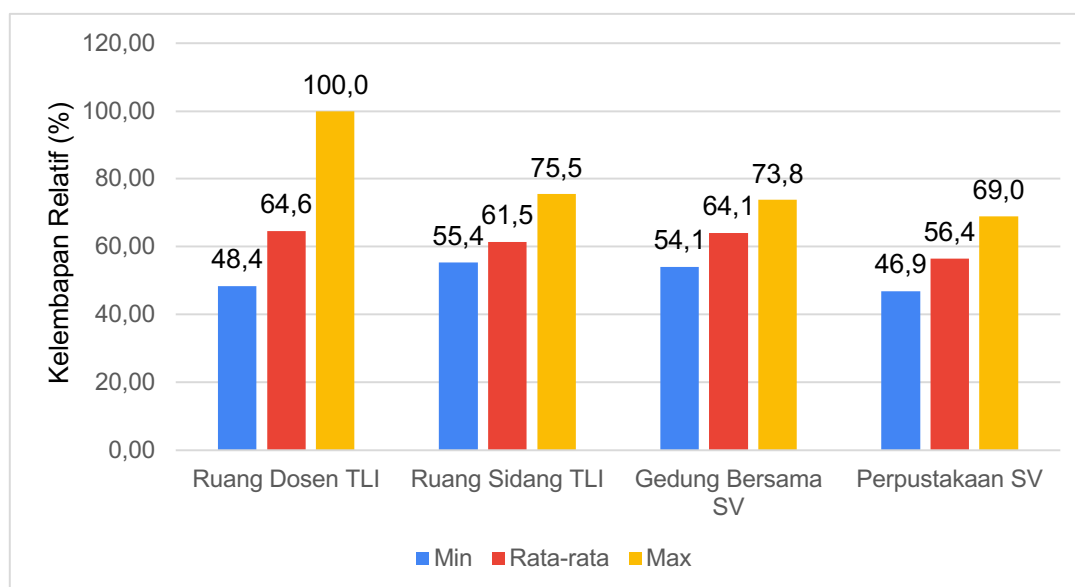
Kelembapan relatif ruang diukur bersamaan dengan suhu. Statistik deskriptif kelembapan disajikan pada Tabel 5.6 dan distribusi kategorinya pada Tabel 5.7.

Tabel 5- 6 Statistik Deskriptif Kelembapan Relatif (%RH)

Lokasi	N	Min	Maks	Rata-rata	Standar Deviasi
Ruang Dosen TLI	5.529	48,4	100	64,64	7,20
Ruang Sidang TLI	1.946	55,4	75,5	61,47	4,41
Gedung Bersama SV	5.826	54,1	73,8	64,07	5,84
Perpustakaan SV	6.107	46,9	69,0	56,42	7,66
Gabungan	19.408	46,9	100	61,56	7,64



Gambar 5. 5 Grafik Kelembapan pada Keempat Lokasi



Gambar 5. 6 Grafik Statistik Kelembapan per Lokasi

Tabel 5- 7 Distribusi Kategori Kelembapan Relatif

Lokasi	Rendah (<40 %RH)	Sedang (40-60 %RH)	Tinggi (>60 %RH)
Ruang Dosen TLI	0 (0,0%)	1.506 (27,2%)	4.023 (72,8%)
Ruang Sidang TLI	0 (0,0%)	934 (48,0%)	1.012 (52,0%)
Gedung Bersama SV	0 (0,0%)	1.828 (31,4%)	3.998 (68,6%)
Perpustakaan SV	0 (0,0%)	4.172 (68,3%)	1.935 (31,7%)

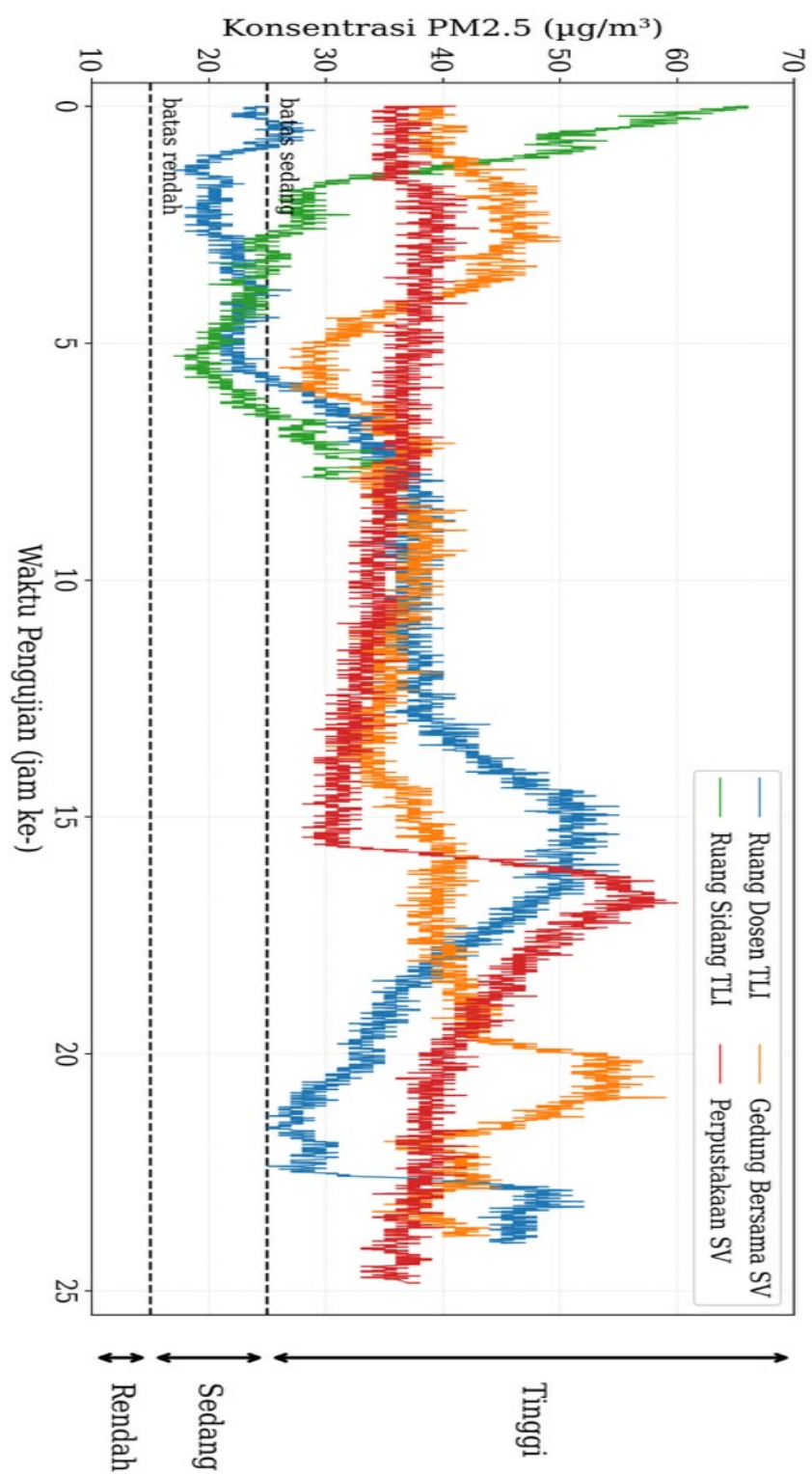
Kelembapan relatif memperlihatkan pola yang berlawanan dengan suhu. Perpustakaan yang menggunakan pendingin udara mencatat kelembapan rata rata terendah sebesar 56,42 %RH dengan 68,3% data pada kategori Sesuai Rentang, yaitu proporsi tertinggi di antara keempat lokasi. Ruang Dosen dan Gedung Bersama mencatat proporsi kategori Tinggi sebesar 72,8% dan 68,6%, yaitu kelembapan di atas 60 %RH. Tidak ada data yang masuk kategori Rendah pada keempat lokasi. Pendingin ruangan menekan kelembapan, tetapi pengendalian kelembapan tidak menggantikan ventilasi udara segar karena Perpustakaan tetap mencatat konsentrasi CO₂ tertinggi. Nilai kelembapan maksimum 100 %RH pada Ruang Dosen merupakan pembacaan valid pada kondisi jenuh dan bukan anomali sensor.

5.4 Hasil Pengujian Sensor PM2.5 (ZH03B)

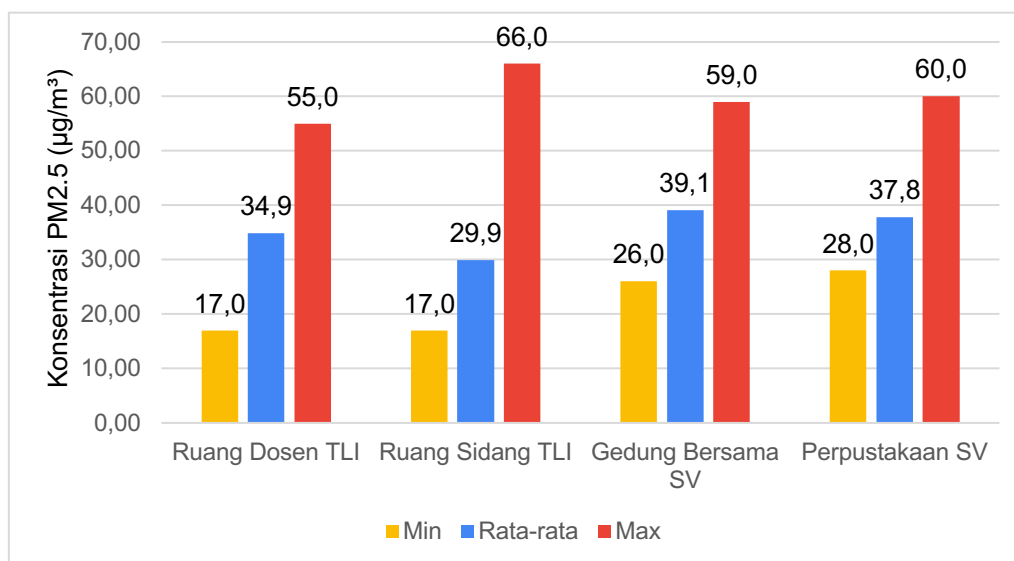
Pengujian sensor ZH03B mengukur konsentrasi partikulat halus PM2.5 sebagai indikator pencemaran partikel di dalam ruang. Statistik deskriptif PM2.5 disajikan pada Tabel 5.9 dan distribusi kategorinya pada Tabel 5.10.

Tabel 5- 8 Statistik Deskriptif PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Lokasi	N	Min	Maks	Rata-rata	Standar Deviasi
Ruang Dosen TLI	5.529	17	55	34,90	9,34
Ruang Sidang TLI	1.946	17	66	29,89	11,04
Gedung Bersama SV	5.826	26	59	39,14	5,40
Perpustakaan SV	6.107	28	60	37,81	5,53
Gabungan	19.408	17	66	36,59	7,95



Gambar 5. 7 Grafik Konsentrasi PM_{2.5} pada Keempat Lokasi



Gambar 5. 8 Grafik Statistik Konsentrasi PM2.5 per Lokasi

Tabel 5- 9 Distribusi Kategori PM2.5

Lokasi	Rendah (<15 µg/m³)	Sedang (15-25 µg/m³)	Tinggi (>25 µg/m³)
Ruang Dosen TLI	0 (0,0%)	1.226 (22,2%)	4.303 (77,8%)
Ruang Sidang TLI	0 (0,0%)	898 (46,1%)	1.048 (53,9%)
Gedung Bersama SV	0 (0,0%)	0 (0,0%)	5.826 (100%)
Perpustakaan SV	0 (0,0%)	0 (0,0%)	6.107 (100%)

Konsentrasi PM2.5 merupakan temuan paling menonjol pada penelitian ini. Tidak ada satu pun data pada keempat lokasi yang masuk kategori Rendah menurut pedoman WHO 2021 sebesar 15 µg/m³. Konsentrasi rata rata seluruh lokasi berada pada rentang 29,89 sampai 39,14 µg/m³. Gedung Bersama dan Perpustakaan mencatat 100% data pada kategori Tinggi, sedangkan Ruang Dosen mencatat 77,8% dan Ruang Sidang mencatat 53,9%. Tabel 5.10 menyajikan ambang acuan yang digunakan sebagai pembanding.

Tabel 5- 10 Standar Kesehatan Konsentrasi PM2.5

Acuan	Parameter	Periode Rata-rata	Nilai Direkomendasikan
WHO Global Air Quality Guidelines 2021	PM2.5	24 jam	15 µg/m³
WHO Global Air Quality Guidelines 2021	PM2.5	Tahunan	5 µg/m³

Acuan	Parameter	Periode Rata-rata	Nilai Direkomendasikan
Permenkes Nomor 2 Tahun 2023, Tabel 13	PM2.5	24 jam	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Konsentrasi rata rata keempat lokasi melampaui pedoman WHO 2021 sebesar 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan melampaui Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan pada Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 sebesar 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Gedung Bersama mencatat rata rata tertinggi sebesar 39,14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, diikuti Perpustakaan sebesar 37,81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ruang Dosen sebesar 34,90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dan Ruang Sidang sebesar 29,89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Standar deviasi yang lebih besar pada Ruang Dosen dan Ruang Sidang mencerminkan fluktuasi akibat jendela yang terbuka sebagian, sedangkan konsentrasi pada Gedung Bersama dan Perpustakaan yang tertutup cenderung stabil pada tingkat tinggi.

Dua keterbatasan membatasi penafsiran temuan tersebut. Pertama, sensor ZH03B memiliki ketidakpastian pengukuran sekitar 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sehingga nilai yang dilaporkan bersifat indikatif dan pengujian tidak menyertakan pengukuran pembandingan pada kondisi udara bersih sebagai garis dasar. Kedua, ambang WHO dan Permenkes dinyatakan sebagai nilai rata rata 24 jam, sedangkan sistem merekam nilai sesaat pada interval sekitar 10 detik, sehingga perbandingan pada subbab ini bersifat indikatif dan tidak menyatakan pemenuhan atau pelanggaran baku mutu. Meskipun demikian, seluruh lokasi berada di atas kedua ambang acuan, sehingga kualitas partikulat di lingkungan pengujian memerlukan perhatian, terutama pada ruangan tertutup yang tidak dilengkapi penyaring udara.

5.5 Rekapitulasi Hasil Pengukuran 4 Lokasi

Subbab ini merangkum hasil pengukuran keempat lokasi pengujian dan menempatkan setiap parameter pada kategori sesuai ambang acuan Tabel 3.10. Kategori pada setiap sel ditentukan oleh kategori dengan proporsi titik data terbesar pada lokasi tersebut. Kategori tersebut sama dengan kategori nilai rata rata pada seluruh kombinasi lokasi dan parameter, sehingga nilai rata rata pada penelitian ini mewakili sebaran datanya dengan baik.

Tabel 5- 11 Rekapitulasi Kategori Kualitas Udara Rata-rata di Empat Lokasi

No	Lokasi	CO ₂	Kelembapan	Suhu	PM2.5
1	Ruang Dosen TLI	Rendah	Tinggi	Sedang	Tinggi
2	Ruang Sidang TLI	Rendah	Tinggi	Sedang	Tinggi
3	Gedung Bersama SV	Rendah	Tinggi	Sedang	Tinggi
4	Perpustakaan SV	Tinggi	Sedang	Sedang	Tinggi

Suhu berada pada kategori Sesuai Rentang di seluruh lokasi dengan rata rata 22,69 °C sampai 26,80 °C, sedangkan PM2.5 berada pada kategori Tinggi di seluruh lokasi dengan rata rata 29,89 sampai 39,14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan tidak ada satu pun titik data yang masuk kategori Rendah. Perpustakaan menjadi satu satunya lokasi dengan CO₂ pada kategori Tinggi, yaitu 70,0% titik data dengan rata rata 1.647,12 ppm, sementara tiga lokasi lain berada pada kategori Rendah dengan rata rata di bawah 520 ppm. Perpustakaan juga menjadi satu satunya lokasi dengan kelembapan pada kategori Sesuai Rentang, sedangkan tiga lokasi lain berada pada kategori Tinggi. Kombinasi tersebut menjelaskan hubungan antara pendingin ruangan dan ventilasi, yaitu pendingin ruangan mengendalikan suhu dan kelembapan Perpustakaan tetapi tidak memasukkan udara segar dari luar, sehingga CO₂ terakumulasi pada ruang tertutup dengan okupansi padat, sementara tiga lokasi lain menekan CO₂ melalui ventilasi alami atau okupansi rendah. Kategori pada Tabel 5.11 menyatakan posisi nilai terukur terhadap ambang acuan dan tidak menyatakan tingkat risiko kesehatan.

5.6 Pengujian Pengiriman Data

Pengujian pengiriman data mengevaluasi keandalan sistem dalam mengirim hasil pengukuran ke Google Spreadsheet secara berkala. Sistem diprogram mengirim data setiap 10 detik, tetapi interval aktual rata rata yang teramati adalah 14,94 detik. Selisih ini bukan disebabkan oleh kehilangan data, melainkan oleh akumulasi waktu eksekusi setiap siklus yang mencakup pembacaan tiga sensor, pembentukan koneksi HTTPS, latensi jaringan WiFi, dan waktu pemrosesan pada Google Apps Script. Karena setiap siklus baru

dimulai setelah siklus sebelumnya selesai, interval aktual selalu lebih besar daripada interval terprogram.

Estimasi jumlah data ideal dihitung dengan membagi durasi pengujian dalam detik dengan interval terprogram 10 detik. Perbandingan antara estimasi ideal dan jumlah data yang benar benar tersimpan disajikan pada Tabel 5.12. Berikut ini merupakan contoh rumus perhitungan dari Estimasi Ideal dan Estimasi Keberhasilan untuk periode 8-9 Juni 2026 yang diuji di Ruang Dosen.

$$\text{Estimasi Ideal} = \frac{\text{Durasi Pengujian (detik)}}{10 \text{ detik}}$$

$$\text{Estimasi Ideal} = \frac{86.378 \text{ detik}}{10 \text{ detik/data}} = 8.637,8 \approx 8.638 \text{ titik data}$$

$$\text{Estimasi Keberhasilan(\%)} = \frac{\text{Data Tersimpan}}{\text{Estimasi Ideal}} \times 100\%$$

$$\text{Estimasi Keberhasilan(\%)} = \frac{5.529}{8.638} \times 100\% = 64\%$$

Tabel 5- 12 Estimasi Ideal dan Keberhasilan Pengiriman Data

Lokasi	Mulai Pengujian	Selesai Pengujian	Durasi	Durasi (Detik)	Estimasi Ideal (titik)	Data Tersimpan (titik)	Keberhasilan
Ruang Dosen TLI	08/06/26 09.58	09/06/26 09.57	23.59.38	86378	8.638	5.529	64,00%
Ruang Sidang TLI	15/06/26 09.10	15/06/26 17.01	07.51.57	28317	2.832	1.946	68,70%
Gedung Bersama SV	17/06/26 10.25	18/06/26 10.16	23.51.08	85868	8.587	5.826	67,80%
Perpustakaan SV	18/06/26 13.55	19/06/26 14.46	24.50.11	89411	8.941	6.107	68,30%
Total			80.32.54	289974	28.998	19.408	66,90%

Estimasi keberhasilan sebesar 66,9% merupakan cerminan perbedaan antara interval terprogram 10 detik dan interval aktual rata-rata 14,94 detik, bukan indikasi kehilangan 33,1% data. Apabila interval aktual dijadikan acuan, hampir seluruh siklus

berhasil menyimpan data. Kegagalan pengiriman yang sesungguhnya, yaitu interval yang melampaui 20 detik, hanya berjumlah 0,79% sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.13. Dengan demikian keandalan pengiriman data sistem tergolong tinggi meskipun interval aktual belum sepenuhnya menyamai interval terprogram.

Tabel 5- 13 Rekapitulasi Kegagalan Pembacaan dan Pengiriman Data

Lokasi	Total Data (titik)	Jumlah Interval >20 Detik	Persentase Interval
Ruang Dosen TLI	5.529	58	1,05%
Ruang Sidang TLI	1.946	9	0,46%
Gedung Bersama SV	5.826	43	0,74%
Perpustakaan SV	6.107	44	0,72%
Total	19.408	154	0,79%

Ketidaksempurnaan data yang teridentifikasi selama pengujian berupa interval pengiriman yang melampaui 20 detik. Nilai batas 20 detik dipilih karena 97,5% interval berada pada rentang 14 hingga 17 detik, sehingga interval yang melampaui dua kali lipat interval terprogram dapat dianggap sebagai penyimpangan. Rekapitulasi interval yang melampaui batas tersebut disajikan pada Tabel 5.13.