

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS ALAT

Pada bab ini akan dibahas mengenai pengujian dan analisa alat yang sudah dirancang dan dibuat. Pengujian alat dilakukan berdasarkan rumusan masalah pada bab sebelumnya. Terdapat empat pengujian yang akan dilakukan antara lain, pengujian intensitas UV berdasarkan jenis Sleeve , keandalan pembersihan dan keandalan sistem IOT. Selain itu, dilakukan pula analisis teknis geometri lampu dan hasil pengujian alat guna mengevaluasi hasil dari pengujian yang telah dilakukan. Analisis ini mencakup perbandingan antara hasil yang diperoleh dengan ekspektasi hasil.

5.1 Tujuan Pengukuran dan Pengujian Alat

Pengujian alat dibagi ke dalam beberapa bagian dengan masing-masing tujuan setiap pengujian sebagai berikut,

1) Uji intensitas UV berdasarkan jenis Sleeve

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat intensitas paparan sinar UV berdasarkan jenis sleeve yang digunakan pada lampu UV. Perbedaan material sleeve dapat mempengaruhi transmitansi gelombang UV-C (254 nm) secara signifikan, sehingga berdampak langsung pada dosis UV yang diterima oleh fluida yang mengalir di sekitarnya.

2) Uji Keandalan dan Validasi Kontrol Posisi Pembersihan Sleeve UV

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat keandalan sistem pembersihan sleeve UV secara otomatis selama operasi berlangsung dalam jangka waktu tertentu, sekaligus memvalidasi konsistensi kontrol posisi aktuator berbasis step counting yang digunakan. Evaluasi dilakukan terhadap kondisi fisik sleeve, mekanisme pembersih, komponen mekanik pendukung lainnya, serta akurasi posisi cleaner terhadap titik operasi yang telah ditetapkan.

3) Uji keandalan sistem IOT

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat keandalan sistem IoT pada alat sterilisasi UV dalam hal pengiriman dan pencatatan data secara real-time ke platform Google Sheets melalui Google Apps Script. Parameter utama yang diamati adalah konsistensi timestamp pada setiap data yang dikirimkan, yaitu apakah terdapat selisih waktu yang tidak wajar, data yang terlewat (missing data), atau ketidaksesuaian antara waktu aktual pengoperasian alat dengan waktu yang tercatat pada spreadsheet.

5.2 Peralatan Yang Digunakan

Pada pengukuran dan pengujian alat diperlukan beberapa peralatan untuk memudahkan proses pengukuran dan pengujian alat. Berikut merupakan alat yang digunakan,

- 1) Laptop
- 2) Avometer
- 3) Pita Ukur
- 4) Arduino uno
- 5) Sensor GUV-A-S12SD

5.3 Pengujian Alat

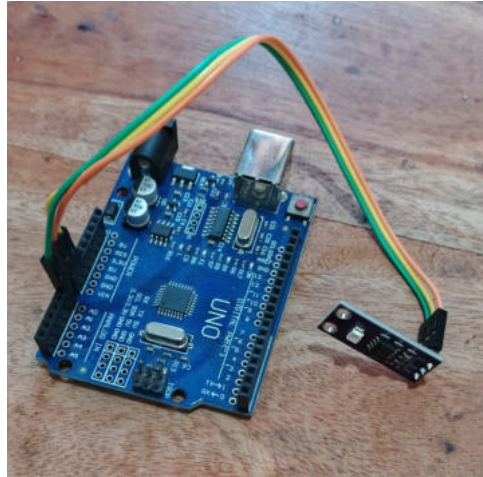
Pengujian alat dilakukan untuk memverifikasi bahwa seluruh komponen dan sistem pada alat sterilisasi UV bekerja sesuai dengan spesifikasi yang telah dirancang. Pengujian dibagi menjadi beberapa bagian sebagai berikut:

5.3.1 Uji Intensitas UV Berdasarkan Jenis Sleeve

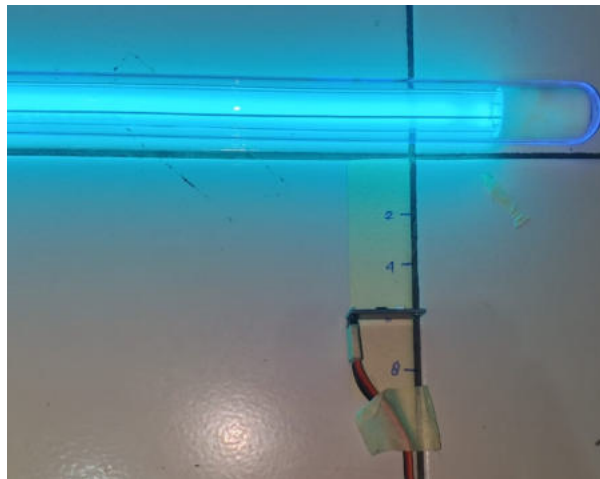
Pada pengujian intensitas UV dilakukan dengan membandingkan empat kondisi pengukuran, yaitu menggunakan sleeve quartz, sleeve akrilik, tanpa sleeve, dan sebagai pembanding digunakan intensitas sinar UV matahari. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jenis material sleeve terhadap nilai intensitas UV-C yang terukur oleh sensor GUV-A-S12SD, sehingga dapat ditentukan material sleeve yang paling optimal untuk digunakan pada alat sterilisasi UV.

Pada pengujian menggunakan sleeve quartz, sleeve akrilik, dan tanpa sleeve, digunakan Arduino Uno dan sensor GUV-A-S12SD sebagai perangkat

pengambilan data intensitas UV. Pengukuran dilakukan pada jarak yang seragam antara sensor dengan sumber cahaya UV guna memperoleh perbandingan data intensitas yang akurat dan konsisten antar setiap kondisi pengujian.



Gambar 5. 1 Rangkaian Arduino Uno dan sensor GUV-A-S12SD



Gambar 5. 2 Posisi sensor GUV-A-S12SD pengambilan nilai intensitas sinar UV pada jarak 6cm



Gambar 5. 3 Penentuan jarak sensor dengan pita ukur

Nilai intensitas yang didapat dari penggunaan sensor GUVA-S12SD berupa nilai analog yang nantinya dikonversi menjadi nilai tegangan. Nilai tegangan tersebut kemudian digunakan sebagai representasi relatif dari intensitas UV yang diterima oleh sensor, di mana semakin tinggi nilai tegangan yang terukur maka semakin besar pula intensitas UV yang menembus sleeve dan sampai ke permukaan sensor.

Konversi nilai ADC (*Analog to Digital Converter*) pada Arduino Uno dilakukan dengan resolusi 10-bit, sehingga nilai analog yang terbaca berada pada rentang 0 hingga 1023. Nilai tersebut kemudian dikonversi ke dalam satuan tegangan (volt) menggunakan referensi tegangan sebesar 5V, dengan persamaan sebagai berikut:

$$V = (ADC / 1023) \times 5$$

Hasil konversi tegangan dari masing-masing kondisi pengujian — sleeve quartz, sleeve akrilik, tanpa sleeve, dan UV matahari — kemudian dicatat dan dibandingkan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh jenis sleeve terhadap intensitas UV yang dapat diteruskan ke media sterilisasi. Berikut Implementasi rumus pada program ditulis pada gambar 5.1 berikut.

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
```

```

    delay(2000);
    Serial.println(" === MEMULAI AKUSISI DATA SENSOR UV === ");
}

void loop() {
    float sensorVoltage;
    float sensorValue;
    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        sensorValue = analogRead(A0);
        sensorVoltage = sensorValue / 1024 * 5.0;
        Serial.print("sensor reading = ");
        Serial.print(sensorValue);
        Serial.print("    sensor voltage = ");
        Serial.print(sensorVoltage);
        Serial.println(" V");
        delay(1000);
    }
    Serial.println(" === AKUSISI DATA SENSOR UV SELESAI === ");
    while (1) {
    }
}

```

Gambar 5. 4 Program konversi nilai ADC sensor GUVA-S12SD

Hasil pengukuran intensitas UV menggunakan sensor GUVA-S12SD pada masing-masing kondisi pengujian disajikan pada empat perbandingan berikut. Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali pengukuran dengan interval 1 detik untuk setiap variabel jarak, kemudian diambil nilai rata-ratanya sebagai data representatif. Pengujian intensitas UV berdasarkan jenis sleeve dan variabel pembanding sinar UV matahari. Pengujian dilakukan pada tanggal 7 Oktober 2025.

- 1) Uji intensitas lampu UV dengan Sleeve berbahan akrilik
 - Berikut tabel hasil pengujian berdasarkan beberapa variasi jarak
 - a) Jarak 2 Cm

Tabel 5- 1 Hasil uji intensitas dengan Sleeve berbahan akrilik jarak 2cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
18:54:54.632	3	0.01
18:54:55.650	2	0.01
18:54:56.663	2	0.01
18:54:57.622	2	0.01
18:54:58.658	3	0.01

b) Jarak 4 Cm

Tabel 5- 2 Hasil uji intensitas dengan Sleeve berbahan akrilik jarak 4cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
18:59:12.001	1.00	0.00
18:59:13.012	1.00	0.00
18:59:14.041	0.00	0.00
18:59:14.998	1.00	0.00
18:59:16.043	1.00	0.00

c) Jarak 6 Cm

Tabel 5- 3 Hasil uji intensitas dengan Sleeve berbahan akrilik jarak 6cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
19:07:05.710	0.00	0.00
19:07:06.706	0.00	0.00
19:07:07.725	0.00	0.00
19:07:08.726	0.00	0.00
19:07:09.725	0.00	0.00

d) Jarak 8 Cm

Tabel 5- 4 Hasil uji intensitas dengan Sleeve berbahan akrilik jarak 8cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
19:10:31.741	0.00	0.00

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
19:10:32.739	0.00	0.00
19:10:33.707	0.00	0.00
19:10:34.708	0.00	0.00
19:10:35.709	0.00	0.00

Dari pengujian intensitas lampu UV dengan Sleeve berbahan akrilik pada empat tabel diatas didapatkan rata rata nilai ADC dan nilai tegangan sebagai berikut:

Tabel 5- 5 Rata rata uji intensitas dengan Sleeve berbahan akrilik

Jarak (Cm)	Rata Rata Nilai ADC	Rata Rata Nilai Tegangan (V)
2	2.4	0.01
4	0.8	0.00
6	0.00	0.00
8	0.00	0.00

Berdasarkan tabel 5.5 hasil pengujian intensitas lampu UV menggunakan sleeve berbahan akrilik pada berbagai jarak pengukuran, diperoleh rata-rata nilai ADC dan tegangan yang sangat rendah. Pada jarak 2 cm, sensor hanya menghasilkan rata-rata nilai ADC sebesar 2,4 dengan tegangan 0,01 V, sedangkan pada jarak 4 cm nilai ADC turun menjadi 0,8 dengan tegangan mendekati 0 V. Pada jarak 6 cm dan 8 cm, sensor tidak mendeteksi intensitas cahaya UV yang signifikan dengan nilai ADC dan tegangan sebesar 0. Hasil tersebut menunjukkan bahwa intensitas sinar UV yang berhasil melewati sleeve berbahan akrilik sangat rendah dan semakin berkurang seiring bertambahnya jarak pengukuran.

2) Uji intensitas lampu UV dengan Sleeve berbahan quartz

Berikut tabel hasil pengujian berdasarkan beberapa variasi jarak

a) Jarak 2 Cm

Tabel 5- 6 Hasil uji intensitas dengan Sleeve berbahan quartz jarak 2cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
19:16:06.198	46.00	0.22
19:16:07.212	46.00	0.22
19:16:08.222	46.00	0.22
19:16:09.224	46.00	0.22
19:16:10.222	47.00	0.23

b) Jarak 4 Cm

Tabel 5- 7 Hasil uji intensitas dengan Sleeve berbahan quartz jarak 4cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
19:17:40.579	35.00	0.17
19:17:41.601	35.00	0.17
19:17:42.605	35.00	0.17
19:17:43.577	35.00	0.17
19:17:44.578	36.00	0.18

c) Jarak 6 Cm

Tabel 5- 8 Hasil uji intensitas dengan Sleeve berbahan quartz jarak 6cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
19:33:21.562	16.00	0.08
19:33:22.556	16.00	0.08
19:33:23.554	16.00	0.08
19:33:24.567	16.00	0.08
19:33:25.536	17.00	0.08

d) Jarak 8 Cm

Tabel 5- 9 Hasil uji intensitas dengan Sleeve berbahan quartz jarak 8cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
19:34:28.630	14.00	0.07
19:34:29.622	14.00	0.07
19:34:30.622	14.00	0.07

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
19:34:31.639	14.00	0.07
19:34:32.643	14.00	0.07

Dari pengujian intensitas lampu UV dengan Sleeve berbahan quartz pada empat tabel diatas didapatkan rata rata nilai ADC dan nilai tegangan sebagai berikut:

Tabel 5- 10 Rata rata uji intensitas dengan Sleeve berbahan quartz

Jarak (Cm)	Rata Rata Nilai ADC	Rata Rata Nilai Tegangan (V)
2	46.2	0.222
4	35.2	0.172
6	16.2	0.080
8	14.0	0.070

Berdasarkan hasil pengujian intensitas lampu UV dengan sleeve berbahan kaca quartz pada Tabel 5.10, diperoleh rata-rata nilai ADC sebesar 46,2 pada jarak 2 cm, 35,2 pada jarak 4 cm, 16,2 pada jarak 6 cm, dan 14,0 pada jarak 8 cm. Sementara itu, rata-rata tegangan yang terukur masing-masing sebesar 0,222 V, 0,172 V, 0,080 V, dan 0,070 V. Hasil pengujian menunjukkan bahwa intensitas cahaya yang diterima sensor menurun seiring bertambahnya jarak antara sensor dan sumber cahaya UV, sesuai dengan karakteristik penyebaran cahaya.

Nilai intensitas yang diperoleh pada pengujian ini tergolong baik karena penggunaan kaca quartz memungkinkan transmisi radiasi UV yang lebih tinggi dibandingkan material lain seperti akrilik. Hal ini terlihat dari nilai ADC dan tegangan yang masih dapat terdeteksi dengan jelas hingga jarak 8 cm. Dibandingkan dengan hasil pengujian menggunakan sleeve akrilik, kaca quartz menunjukkan kemampuan yang jauh lebih baik dalam meneruskan radiasi UV.

3) Uji intensitas lampu UV tanpa Sleeve

Berikut tabel hasil pengujian berdasarkan beberapa variasi jarak

a) Jarak 2 Cm

Tabel 5- 11 Hasil uji intensitas tanpa Sleeve jarak 2cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
23:00:59.151	45.00	0.22
23:01:00.142	45.00	0.22
23:01:01.144	46.00	0.22
23:01:02.163	46.00	0.22
23:01:03.121	48.00	0.23

b) Jarak 4 Cm

Tabel 5- 12 Hasil uji intensitas tanpa Sleeve jarak 4cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
23:01:46.622	31.00	0.15
23:01:47.643	31.00	0.15
23:01:48.638	31.00	0.15
23:01:49.620	34.00	0.17
23:01:50.621	33.00	0.16

c) Jarak 6 Cm

Tabel 5- 13 Hasil uji intensitas tanpa Sleeve jarak 6cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
23:02:52.089	28.00	0.14
23:02:53.072	28.00	0.14
23:02:54.070	28.00	0.14
23:02:55.093	28.00	0.14
23:02:56.075	29.00	0.14

d) Jarak 8 Cm

Tabel 5- 14 Hasil uji intensitas tanpa Sleeve jarak 8cm

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
23:03:40.339	21.00	0.10

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
23:03:41.361	20.00	0.10
23:03:42.381	20.00	0.10
23:03:43.363	20.00	0.10
23:03:44.365	21.00	0.10

Dari pengujian intensitas lampu UV tanpa Sleeve pada empat tabel diatas didapatkan rata rata nilai ADC dan nilai tegangan sebagai berikut:

Tabel 5- 15 Rata rata uji intensitas tanpa Sleeve

Jarak (Cm)	Rata Rata Nilai ADC	Rata Rata Nilai Tegangan (V)
2	46.0	0.222
4	32.0	0.156
6	28.2	0.140
8	20.4	0.100

Berdasarkan hasil pengujian intensitas lampu UV tanpa sleeve (tabung telanjang), diperoleh rata-rata nilai ADC sebesar 46,0 pada jarak 2 cm, 32,0 pada jarak 4 cm, 28,2 pada jarak 6 cm, dan 20,4 pada jarak 8 cm. Sementara itu, rata-rata tegangan yang terukur masing-masing sebesar 0,222 V, 0,156 V, 0,140 V, dan 0,100 V. Hasil pengujian menunjukkan bahwa intensitas cahaya UV yang diterima sensor mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak pengukuran dari sumber cahaya.

Nilai yang diperoleh pada kondisi tanpa sleeve menunjukkan bahwa tidak terdapat material penghalang di antara lampu UV dan sensor, sehingga radiasi UV dapat diterima sensor secara lebih langsung. Data ini dapat digunakan sebagai acuan atau nilai referensi untuk membandingkan pengaruh penggunaan sleeve berbahan akrilik maupun quartz terhadap transmisi radiasi UV. Selain itu, hasil pengujian memperlihatkan bahwa meskipun intensitas menurun pada jarak yang lebih jauh, sinar UV masih dapat terdeteksi dengan baik oleh sensor hingga jarak 8 cm.

4) Uji intensitas sinar UV pada matahari

Berikut tabel hasil pengujian berdasarkan beberapa variasi waktu



Gambar 5. 5 Dokumentasi pengujian intensitas UV matahari

a) Jam 10.00 WIB

Tabel 5- 16 Hasil uji intensitas UV matahari pada jam 10.00 WIB

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
10:12:01.542	250.00	1.22
10:12:02.532	251.00	1.23
10:12:03.535	251.00	1.23
10:12:04.536	251.00	1.23
10:12:05.537	251.00	1.23

b) Jam 11.00 WIB

Tabel 5- 17 Hasil uji intensitas UV matahari pada jam 11.00 WIB

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
11:04:53.579	271.00	1.32

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
11:04:54.576	270.00	1.32
11:04:55.578	271.00	1.32
11:04:56.579	271.00	1.32
11:04:57.607	271.00	1.32

c) Jam 12.00 WIB

Tabel 5- 18 Hasil uji intensitas UV matahari pada jam 12.00 WIB

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
12:37:14.901	241.00	1.18
12:37:15.881	242.00	1.18
12:37:16.857	243.00	1.19
12:37:17.858	244.00	1.19
12:37:18.904	245.00	1.20

d) Jam 13.00 WIB

Tabel 5- 19 Hasil uji intensitas UV matahari pada jam 13.00 WIB

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
13:11:30.870	206.00	1.01
13:11:31.893	207.00	1.01
13:11:32.895	207.00	1.01
13:11:33.896	206.00	1.01
13:11:34.896	207.00	1.01

e) Jam 14.00 WIB

Tabel 5- 20 Hasil uji intensitas UV matahari pada jam 14.00 WIB

Waktu	Nilai ADC	Nilai Tegangan (V)
14:13:06.565	162.00	0.79
14:13:07.589	161.00	0.79
14:13:08.590	162.00	0.79
14:13:09.590	161.00	0.79
14:13:10.591	162.00	0.79

Dari pengujian intensitas lampu UV dengan Sleeve berbahan akrilik pada empat tabel diatas didapatkan rata rata nilai ADC dan nilai tegangan sebagai berikut:

Tabel 5- 21 Rata rata uji intensitas UV matahari

Waktu	Rata Rata Nilai ADC	Rata Rata Nilai Tegangan (V)
10.00	250.8	1.228
11.00	270.8	1.320
12.00	243.0	1.188
13.00	206.6	1.010
14.00	161.6	0.790

Berdasarkan tabel 5.21 hasil pengujian intensitas sinar UV pada matahari, diperoleh nilai rata-rata ADC tertinggi pada pukul 11.00 yaitu sebesar 270,8 dengan tegangan rata-rata 1,320 V. Setelah pukul 11.00, nilai intensitas yang terukur mengalami penurunan secara bertahap, yaitu menjadi 243,0 ADC pada pukul 12.00, 206,6 ADC pada pukul 13.00, dan 161,6 ADC pada pukul 14.00. Sementara itu, pada pukul 10.00 diperoleh nilai rata-rata sebesar 250,8 ADC dengan tegangan 1,228 V.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa intensitas radiasi UV yang diterima sensor cenderung meningkat dari pukul 10.00 hingga mencapai nilai maksimum pada pukul 11.00, kemudian menurun pada jam-jam berikutnya. Perubahan ini dipengaruhi oleh posisi matahari, kondisi atmosfer, serta keberadaan awan yang dapat memengaruhi jumlah radiasi UV yang mencapai permukaan bumi.

Tabel 5- 22 Ringkasan nilai ADC uji Intensitas UV

Ringkasan Nilai ADC (Analog Digital Converter)					
Variabel	2cm	4cm	6cm	8cm	
Sleeve Akrilik	2.4	0.8	0	0	
Sleeve Quartz	46.2	35.2	16.2	14.0	
Tanpa Sleeve	46.0	32.0	28.2	20,4	
Variabel	10.00 WIB	11.00 WIB	12.00 WIB	13.00 WIB	14.00 WIB
Matahari	250.8	270.8	243.0	206.6	161.6

Tabel 5- 23 Ringkasan nilai tegangan uji Intensitas UV

Ringkasan Nilai Tegangan					
Variabel	2cm	4cm	6cm	8cm	
Sleeve Akrilik	0.01	0.00	0.00	0.00	
Sleeve Quartz	0.222	0.172	0.08	0.07	
Tanpa Sleeve	0.222	0.156	0.14	0.1	
Variabel	10.00 WIB	11.00 WIB	12.00 WIB	13.00 WIB	14.00 WIB
Matahari	1.228	1.32	1.188	1.01	0.79

Berdasarkan empat pengujian intensitas UV yang telah dilakukan, yaitu menggunakan sleeve berbahan akrilik, sleeve berbahan quartz, tanpa sleeve, dan sinar UV matahari sebagai pembanding, diperoleh hasil bahwa jenis material yang berada di antara sumber cahaya dan sensor sangat memengaruhi nilai intensitas UV yang terukur. Sleeve berbahan akrilik menghasilkan nilai ADC dan tegangan paling rendah, yang menunjukkan bahwa material tersebut kurang mampu meneruskan radiasi UV. Sebaliknya, sleeve berbahan quartz menghasilkan nilai pengukuran yang mendekati kondisi tanpa sleeve, sehingga menunjukkan kemampuan transmisi UV yang sangat baik. Sementara itu, pengujian menggunakan sinar UV matahari

menghasilkan nilai ADC dan tegangan tertinggi karena sensor GUVA-S12SD memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap spektrum UV-A yang terkandung dalam cahaya matahari.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sleeve berbahan quartz merupakan material yang paling optimal untuk digunakan pada sistem sterilisasi UV karena mampu meneruskan radiasi UV dengan baik tanpa memberikan penurunan intensitas yang signifikan.

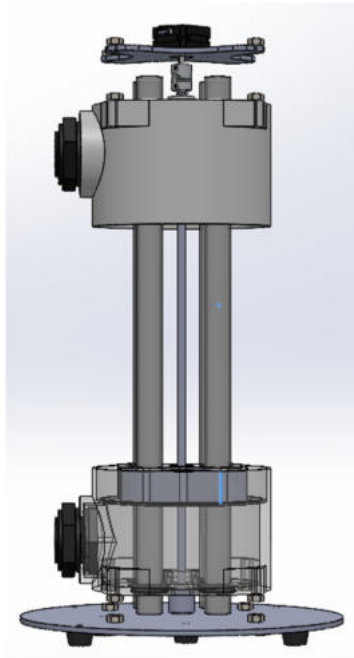
5.3.2 Uji Keandalan dan Validasi Kontrol Posisi Pembersihan Sleeve UV

Uji keandalan pembersihan sleeve UV dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem mekanis dalam menjalankan proses pembersihan secara berulang dalam jangka waktu tertentu. Pada pengujian ini, mekanisme pembersih dioperasikan secara otomatis menggunakan sistem penjadwalan dengan interval pembersihan setiap 30 menit. Selama pengujian berlangsung dilakukan pemantauan terhadap kondisi komponen mekanis, khususnya motor stepper, *coupling*, *lead screw*, dan mekanisme cleaner untuk mengetahui adanya kegagalan yang dapat mempengaruhi kinerja sistem.

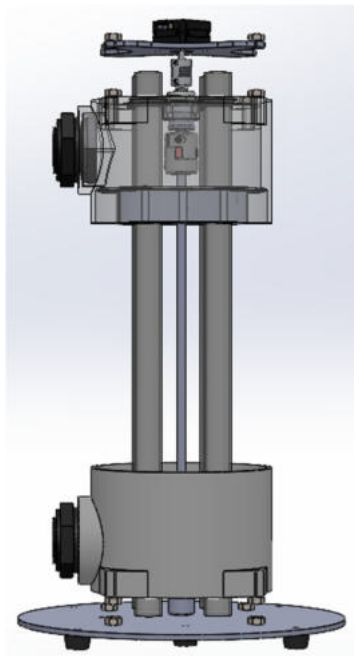
Sebelum membahas hasil pengujian, perlu didefinisikan terlebih dahulu istilah langkah dan siklus yang digunakan dalam pengujian ini. Satu langkah (*stroke*) didefinisikan sebagai pergerakan aktuator dari satu batas gerak ke batas gerak lainnya, yaitu dari batas atas menuju batas bawah (langkah turun) atau dari batas bawah menuju batas atas (langkah naik). Satu siklus kemudian didefinisikan sebagai gabungan dari dua langkah tersebut secara berurutan, yaitu langkah turun yang diikuti oleh langkah naik (atau sebaliknya), sehingga aktuator kembali ke posisi awalnya.

Sistem pembersihan sleeve UV menggunakan kontrol posisi berbasis motor stepper dengan skema open-loop, yaitu penentuan posisi dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah langkah motor (*step count*) tanpa umpan balik dari sensor posisi fisik. Batas atas dan batas bawah gerak aktuator ditentukan melalui proses kalibrasi awal sebagaimana telah dijelaskan pada Sub-bab 4.3.3, bukan berdasarkan posisi

fisik tetap pada reaktor, sehingga akurasi posisi bergantung pada konsistensi proses kalibrasi tersebut.



Gambar 5. 6 Posisi pembersih pada titik bawah



Gambar 5. 7 Posisi pembersih pada titik atas

a) Tabel Ringkasan Pengujian

Tabel 5- 24 Ringkasan pengujian keandalan pembersihan Sleeve UV

Parameter	Hasil Pengujian
Interval pembersihan	30 menit
Total langkah pengujian	50 langkah
Langkah sebelum kegagalan	38 langkah
Lama operasi sebelum kegagalan	±19 jam
Komponen yang mengalami kerusakan	<i>Coupling</i>
Dampak kerusakan	<i>Lead screw</i> tidak berputar
Kondisi motor stepper	Tetap berputar normal sesuai jadwal
Status sistem kontrol	Berfungsi normal

b) Tabel Log Pengujian

Tabel 5- 25 Log pengujian keandalan pembersihan Sleeve UV

TANGGAL	POSISI CLEANER	TOTAL LANGKAH
2026/05/19 23:20:34	TOP	1
2026/05/19 23:50:34	BOTTOM	2
2026/05/20 0:20:34	TOP	3
2026/05/20 0:50:34	BOTTOM	4
2026/05/20 1:20:34	TOP	5
2026/05/20 1:50:34	BOTTOM	6
2026/05/20 2:20:34	TOP	7
2026/05/20 2:50:34	BOTTOM	8
2026/05/20 3:20:34	TOP	9
2026/05/20 3:50:34	BOTTOM	10
2026/05/20 4:20:34	TOP	11
2026/05/20 4:50:34	BOTTOM	12
2026/05/20 5:20:34	TOP	13
2026/05/20 5:50:34	BOTTOM	14
2026/05/20 6:20:34	TOP	15

TANGGAL	POSISI CLEANER	TOTAL LANGKAH
2026/05/20 6:50:34	BOTTOM	16
2026/05/20 7:20:34	TOP	17
2026/05/20 7:50:34	BOTTOM	18
2026/05/20 8:20:34	TOP	19
2026/05/20 8:50:34	BOTTOM	20
2026/05/20 9:20:34	TOP	21
2026/05/20 9:50:34	BOTTOM	22
2026/05/20 10:20:34	TOP	23
2026/05/20 10:50:34	BOTTOM	24
2026/05/20 11:20:34	TOP	25
2026/05/20 11:50:34	BOTTOM	26
2026/05/20 12:20:34	TOP	27
2026/05/20 12:50:34	BOTTOM	28
2026/05/20 13:20:34	TOP	29
2026/05/20 13:50:34	BOTTOM	30
2026/05/20 14:20:34	TOP	31
2026/05/20 14:50:34	BOTTOM	32
2026/05/20 15:20:34	TOP	33
2026/05/20 15:50:34	BOTTOM	34
2026/05/20 16:20:34	TOP	35
2026/05/20 16:50:34	BOTTOM	36
2026/05/20 17:20:34	TOP	37
2026/05/20 17:50:34	BOTTOM	38

Berdasarkan data log pengujian pada Tabel 5.23, sistem pembersihan sleeve UV mampu beroperasi secara otomatis dan konsisten sesuai jadwal yang telah ditentukan. Cleaner berhasil bergerak secara bergantian dari posisi TOP menuju BOTTOM dengan interval pembersihan setiap 30 menit, tanpa ditemukan indikasi cleaner gagal mencapai batas atas maupun batas bawah yang telah ditetapkan pada tahap kalibrasi. Konsistensi pergantian posisi TOP-BOTTOM secara berurutan

sepanjang 38 langkah ini menjadi indikator bahwa kontrol posisi berbasis step counting yang digunakan tetap akurat dan tidak mengalami drift selama durasi pengujian tersebut. Namun, setelah langkah ke-38 ditemukan kerusakan pada coupling yang menyebabkan lead screw tidak dapat berputar. Akibatnya, mekanisme cleaner tidak dapat bergerak meskipun motor stepper masih beroperasi dan menerima perintah dari sistem kontrol.



Gambar 5. 8 Kerusakan Coupling Setelah Siklus Pembersihan ke-38

Gambar 5.8 menunjukkan kondisi *coupling* setelah mengalami kerusakan. Patahnya *coupling* menyebabkan putaran motor stepper tidak dapat diteruskan ke *lead screw* sehingga proses pembersihan sleeve UV tidak dapat dilakukan. Meskipun demikian, sistem kontrol, RTC, pencatatan data, dan motor stepper tetap bekerja sesuai program yang telah dirancang. Kegagalan yang terjadi tergolong kegagalan mekanis pada komponen transmisi, bukan kegagalan pada sistem kontrol posisi berbasis step counting, karena hingga saat kegagalan terjadi tidak ditemukan indikasi penyimpangan posisi cleaner terhadap titik operasi yang telah dikalibrasi. Perlu dicatat bahwa validasi ini bersifat tidak langsung, karena pengujian tidak disertai pengukuran posisi aktual secara manual pada setiap langkah.

5.3.3 Uji Keandalan Sistem IOT

Uji keandalan sistem IoT dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengirimkan data monitoring secara kontinu ke spreadsheet melalui jaringan internet. Pengujian dilakukan bersamaan dengan pengujian keandalan pembersihan sleeve UV, di mana setiap perubahan posisi cleaner dari TOP ke BOTTOM atau sebaliknya akan dikirim dan dicatat secara otomatis pada spreadsheet. Parameter yang diamati meliputi keberhasilan pengiriman data, kesesuaian waktu pencatatan, serta keberadaan data yang hilang (missing data) selama proses monitoring berlangsung.

Tabel 5- 26 Ringkasan hasil uji keandalan sistem IOT

Parameter	Hasil
Interval pengiriman data	30 menit
Total data yang seharusnya terkirim	50 data
Total data yang berhasil diterima	50 data
Data hilang (missing data)	0 data
Persentase keberhasilan pengiriman	100%
Durasi pengujian	±25 jam

Tabel 5- 27 Log uji keandalan sistem IOT

TANGGAL	POSISI CLEANER	TOTAL LANGKAH
2026/05/19 23:20:34	TOP	1
2026/05/19 23:50:34	BOTTOM	2
2026/05/20 0:20:34	TOP	3
2026/05/20 0:50:34	BOTTOM	4
2026/05/20 1:20:34	TOP	5
2026/05/20 1:50:34	BOTTOM	6
2026/05/20 2:20:34	TOP	7

TANGGAL	POSISI CLEANER	TOTAL LANGKAH
2026/05/20 2:50:34	BOTTOM	8
2026/05/20 3:20:34	TOP	9
2026/05/20 3:50:34	BOTTOM	10
2026/05/20 4:20:34	TOP	11
2026/05/20 4:50:34	BOTTOM	12
2026/05/20 5:20:34	TOP	13
2026/05/20 5:50:34	BOTTOM	14
2026/05/20 6:20:34	TOP	15
2026/05/20 6:50:34	BOTTOM	16
2026/05/20 7:20:34	TOP	17
2026/05/20 7:50:34	BOTTOM	18
2026/05/20 8:20:34	TOP	19
2026/05/20 8:50:34	BOTTOM	20
2026/05/20 9:20:34	TOP	21
2026/05/20 9:50:34	BOTTOM	22
2026/05/20 10:20:34	TOP	23
2026/05/20 10:50:34	BOTTOM	24
2026/05/20 11:20:34	TOP	25
2026/05/20 11:50:34	BOTTOM	26
2026/05/20 12:20:34	TOP	27
2026/05/20 12:50:34	BOTTOM	28
2026/05/20 13:20:34	TOP	29
2026/05/20 13:50:34	BOTTOM	30
2026/05/20 14:20:34	TOP	31
2026/05/20 14:50:34	BOTTOM	32
2026/05/20 15:20:34	TOP	33
2026/05/20 15:50:34	BOTTOM	34
2026/05/20 16:20:34	TOP	35

TANGGAL	POSISI CLEANER	TOTAL LANGKAH
2026/05/20 16:50:34	BOTTOM	36
2026/05/20 17:20:34	TOP	37
2026/05/20 17:50:34	BOTTOM	38
2026/05/20 18:20:34	TOP	39
2026/05/20 18:50:34	BOTTOM	40
2026/05/20 19:20:34	TOP	41
2026/05/20 19:50:34	BOTTOM	42
2026/05/20 20:20:34	TOP	43
2026/05/20 20:50:34	BOTTOM	44
2026/05/20 21:20:34	TOP	45
2026/05/20 21:50:34	BOTTOM	46
2026/05/20 22:20:34	TOP	47
2026/05/20 22:50:34	BOTTOM	48
2026/05/20 23:20:34	TOP	49
2026/05/20 23:50:34	BOTTOM	50

Berdasarkan tabel 5.27 hasil pengujian seluruh data monitoring berhasil diterima dan tersimpan pada spreadsheet sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan. Selama periode pengujian tidak ditemukan data yang hilang maupun kegagalan pengiriman data. Setiap perubahan posisi cleaner berhasil dicatat secara berurutan mulai dari siklus pertama hingga siklus ke-50.

Selain itu, waktu pencatatan pada spreadsheet menunjukkan selang waktu yang konsisten yaitu sekitar 30 menit sesuai dengan interval pembersihan yang telah diprogram pada sistem. Hal ini menunjukkan bahwa modul RTC, koneksi internet, serta mekanisme pengiriman data ke spreadsheet mampu bekerja dengan baik selama pengujian berlangsung.

Meskipun pada pengujian keandalan mekanis ditemukan kerusakan *coupling* pada siklus ke-38, sistem IoT tetap mampu melakukan pencatatan dan

pengiriman data sesuai jadwal. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem monitoring dan komunikasi data bekerja secara independen terhadap kondisi mekanis alat sehingga keandalan fungsi IoT tetap terjaga selama proses pengujian.

5.4 Analisa Teknis Geometri Lampu UV Terhadap Flow Air

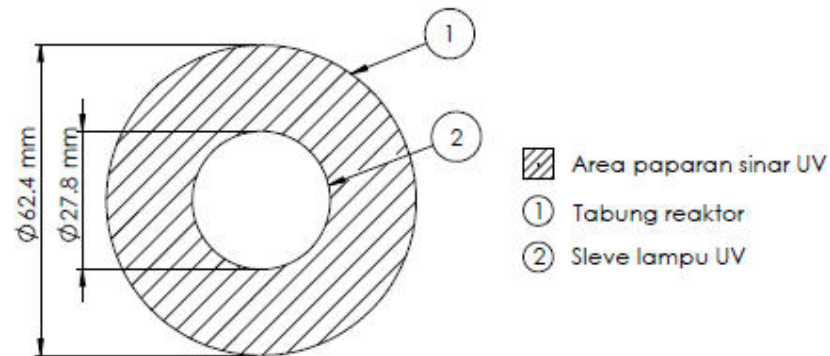
Berdasarkan Berdasarkan teori *UV disinfection* yang dijelaskan oleh Cefas, efektivitas sterilisasi sinar UV ditentukan oleh besarnya dosis UV (*fluence*) yang diterima oleh air. *Fluence* dipengaruhi oleh intensitas radiasi UV dan lama paparan (*residence time*) air di dalam ruang reaktor. Semakin lama air berada pada daerah paparan sinar UV maka semakin besar dosis UV yang diterima[2]. Sebaliknya, peningkatan debit aliran akan mengurangi waktu paparan sehingga dosis UV yang diterima menjadi lebih kecil.

Pada sistem UV yang dijelaskan oleh Cefas, konfigurasi lampu umumnya menggunakan satu lampu UV yang ditempatkan pada satu ruang reaksi. Untuk meningkatkan dosis UV, dilakukan penambahan unit UV secara seri maupun paralel sehingga waktu paparan air terhadap sinar UV menjadi lebih lama. Konsep tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara geometri reaktor dan debit aliran merupakan faktor penting dalam menentukan efektivitas proses sterilisasi.

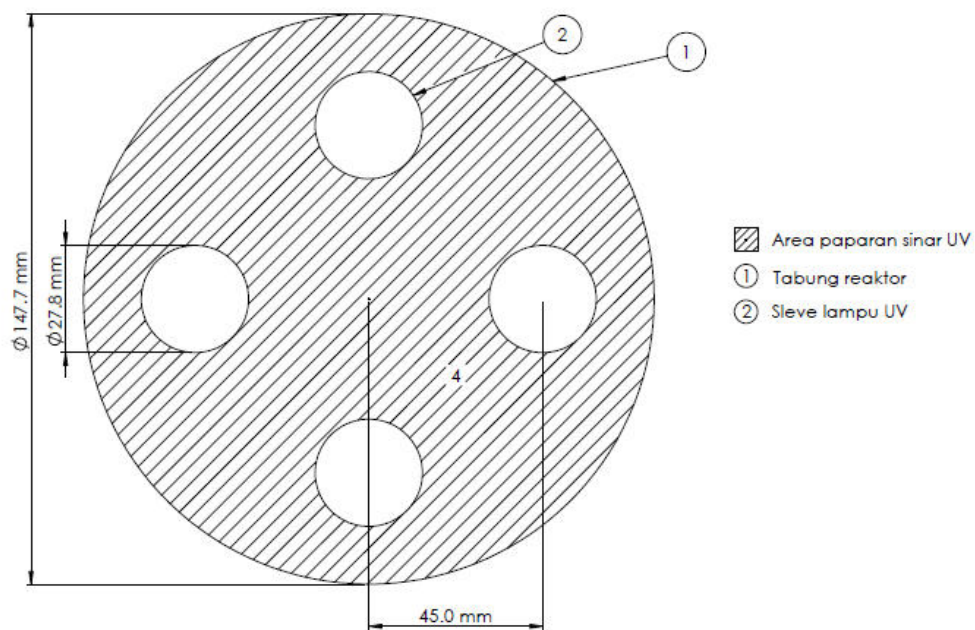
Berbeda dengan konfigurasi tersebut, pendekatan yang digunakan pada alat yang dikembangkan mengacu pada reaktor UV komersial Germilite sebagai pembanding. Reaktor Germilite menggunakan konfigurasi satu lampu UV 55W yang ditempatkan di dalam satu tabung reaktor dengan diameter dalam sebesar 62,40 mm. Konfigurasi tunggal tersebut menjadi acuan distribusi intensitas penyinaran dalam kondisi standar.

Alat yang dikembangkan menggunakan empat buah lampu UV Germilite 55W yang masing-masing dilindungi oleh sleeve kuarsa dan disusun secara melingkar (*circular pattern*) di dalam satu tabung reaktor. Tabung reaktor memiliki diameter dalam sebesar 147,70 mm, sedangkan sleeve kuarsa yang digunakan memiliki diameter luar sebesar 27,80 mm. Keempat sleeve ditempatkan secara

simetris dengan jarak 45 mm dari titik pusat reaktor sehingga membentuk distribusi radiasi UV yang lebih merata pada seluruh penampang aliran air.

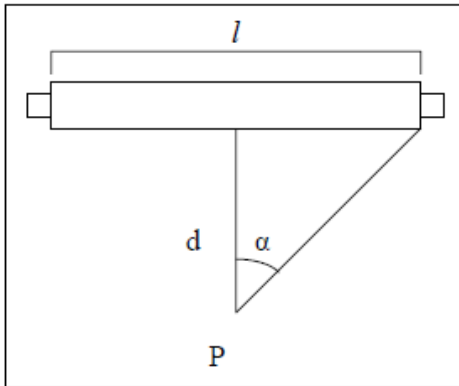


Gambar 5. 9 Ilustrasi reaktor UV Germilite 55W



Gambar 5. 10 Ilustrasi reaktor UV konfigurasi majemuk

Untuk menganalisis distribusi intensitas radiasi UV secara kuantitatif, digunakan model sumber garis (*line source*) yang mengasumsikan lampu UV tabung sebagai sumber radiasi terdistribusi sepanjang sumbunya. Berdasarkan model tersebut, besar irradiance (E) pada suatu titik P yang berada pada jarak tegak lurus d dari sumbu lampu dinyatakan dengan persamaan berikut[2]:



Gambar 5. 11 Diagram geometri sumber garis (line source) untuk perhitungan irradiance pada titik P

$$E = \frac{\phi}{2 \pi l d} (2 \alpha + \sin(2 \alpha))$$

dimana :

E = Irradiance pada titik P ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)

ϕ = Fluks radiasi total lampu (μW)

l = Panjang efektif lampu (cm)

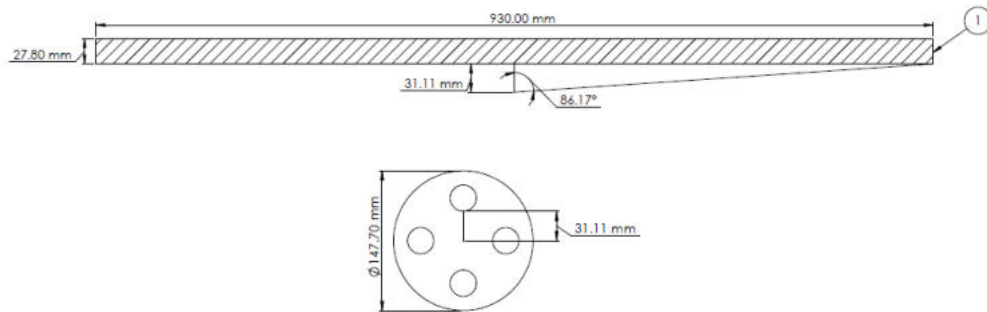
d = Jarak titik P dari sumbu lampu (cm)

Sudut α dihitung berdasarkan geometri relatif antara titik P dan panjang efektif lampu menggunakan persamaan:

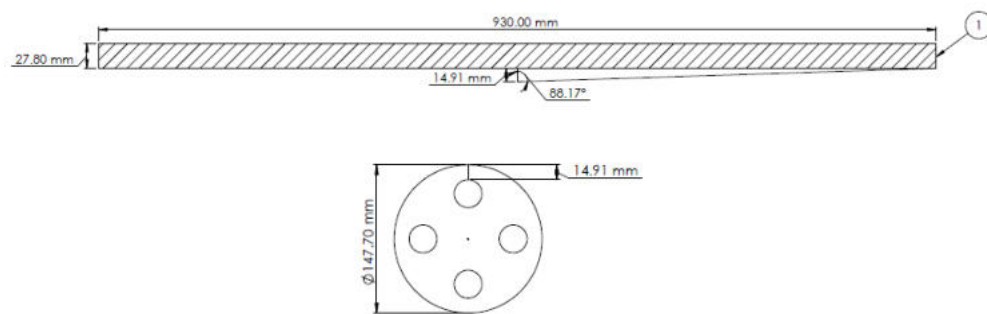
$$\alpha = \arctan\left(\frac{l}{2d}\right)$$

Panjang efektif lampu ditetapkan sebesar 88 cm, yaitu panjang total lampu 93 cm dikurangi 5 cm untuk mengakomodasi bagian elektroda pada kedua ujung lampu yang tidak memancarkan radiasi UV secara efektif. Fluks radiasi UV total lampu Germilite 55W yang digunakan dalam perhitungan adalah $\Phi = 17,5 \text{ W} = 17.500.000 \mu\text{W}$, sesuai dengan spesifikasi output UV-C yang tercantum pada datasheet lampu dengan tipe TUV.

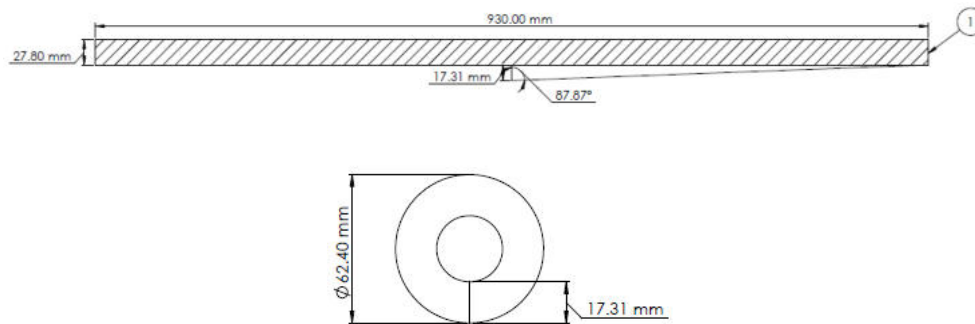
Perhitungan irradiance dilakukan untuk tiga konfigurasi, yaitu dua konfigurasi desain alat yang dikembangkan dan satu konfigurasi reaktor Germilite sebagai pembandingan. Titik pengamatan P pada konfigurasi pertama ditetapkan pada pusat sumbu reaktor, sehingga jarak d merupakan jarak dari sumbu lampu menuju titik pusat reaktor (Gambar 5.6). Sementara itu, pada konfigurasi kedua dan reaktor Germilite, titik P ditetapkan pada dinding dalam reaktor, sehingga jarak d merupakan jarak dari sumbu lampu menuju permukaan dinding dalam tabung (Gambar 5.7 dan Gambar 5.8). Parameter geometri masing-masing konfigurasi ditampilkan pada Tabel 5.28 berikut.



Gambar 5. 12 Geometri perhitungan irradiance konfigurasi 1 — titik pengamatan P pada pusat reaktor ($d = 31,11 \text{ mm}$, $\alpha = 86,17^\circ$)



Gambar 5. 13 Geometri perhitungan irradiance konfigurasi 2 — titik pengamatan P Dinding dalam reaktor ($d = 14,91 \text{ mm}$, $\alpha = 88,17^\circ$)



Gambar 5. 14 Geometri perhitungan irradiance reaktor Germilite — titik pengamatan P pada dinding dalam reaktor ($d = 17,31 \text{ mm}$, $\alpha = 87,87^\circ$)

Tabel 5- 28 Parameter geometri perhitungan irradiance masing-masing konfigurasi reaktor

Parameter	Konfigurasi 1 (Desain)	Konfigurasi 2 (Desain)	Germilite (Referensi)
Diameter dalam reaktor (mm)	147,70	147,70	62,40
Titik pengamatan P	Pusat reaktor	Dinding dalam reaktor	Dinding dalam reaktor
Jarak d (mm)	31,11	14,91	17,31
Sudut α ($^\circ$)	86,17	88,17	87,87
Panjang efektif lampu l (cm)	88	88	88
Fluks UV Φ (μW)	17.500.000	17.500.000	17.500.000

Berdasarkan parameter geometri pada tabel di atas, nilai irradiance pada masing-masing titik pengamatan dihitung menggunakan persamaan *line source*. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 5.29 berikut.

Tabel 5- 29 Hasil perhitungan irradiance masing-masing konfigurasi reaktor

Konfigurasi	Titik P	d (cm)	E satu lampu ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Jumlah lampu berkontribusi	E total ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)
Desain 1	Pusat reaktor	3,111	10.153	4	40.612
Desain 2	Dinding dalam reaktor	1,491	21.253	1	21.253
Germilite	Dinding dalam reaktor	1,731	18.330	1	18.330

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa konfigurasi desain alat yang dikembangkan menghasilkan nilai irradiance yang lebih tinggi dibandingkan reaktor Germilite pada kedua titik pengamatan. Pada konfigurasi pertama, titik pusat reaktor menerima kontribusi irradiance dari keempat lampu secara bersamaan karena susunan lampu yang simetris melingkar terhadap sumbu reaktor. Dengan demikian, irradiance total di titik pusat merupakan superposisi dari keempat sumber, sehingga menghasilkan nilai sebesar $40.612 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, atau setara dengan empat kali nilai irradiance dari satu lampu tunggal.

Pada konfigurasi kedua, titik pengamatan ditetapkan pada dinding dalam reaktor yang merupakan titik terjauh dari sumbu lampu terdekat. Meskipun hanya memperhitungkan kontribusi dari satu lampu, nilai irradiance yang diperoleh sebesar $21.253 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ masih lebih tinggi dibandingkan reaktor Germilite yang menghasilkan $18.330 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ pada kondisi serupa. Hal ini disebabkan oleh jarak d pada konfigurasi kedua (14,91 mm) yang lebih kecil dibandingkan reaktor Germilite (17,31 mm), sehingga titik dinding reaktor berada lebih dekat terhadap sumbu lampu dan menerima intensitas radiasi yang lebih besar.

Dengan demikian, konfigurasi empat lampu UV yang disusun secara melingkar di dalam satu tabung reaktor terbukti secara geometris mampu menghasilkan irradiance yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi satu lampu UV pada reaktor Germilite, baik pada titik pusat reaktor maupun pada titik dinding dalam reaktor. Peningkatan irradiance ini berpotensi meningkatkan dosis UV yang diterima oleh air selama proses sterilisasi berlangsung.

5.5 Analisis Dosis UV dan Kapasitas Flow Rate Berdasarkan Acuan Reaktor Germilite

Dosis UV merupakan parameter fundamental dalam penilaian efektivitas reaktor sterilisasi, didefinisikan sebagai hasil kali antara intensitas iradiasi (irradiance) dengan waktu kontak (*contact time*) yang dialami oleh air selama melewati ruang reaktor. Hubungan ini dinyatakan dalam persamaan:

$$D = E \times t$$

dengan D adalah dosis UV (mJ/cm²), E adalah irradiance (μW/cm²), dan t adalah waktu kontak (s).

5.5.1 Perhitungan Dosis Acuan Reaktor Germilite

Reaktor Germilite dengan konfigurasi *annular* tunggal digunakan sebagai acuan perhitungan dosis, berdasarkan klaim pabrikan dengan kapasitas nominal 16 GPM (60,567 L/menit atau 1,009 L/detik). Volume aktif ruang reaktor dihitung berdasarkan luas penampang *annular* antara dinding tabung (Ø 62,4 mm) dan sleeve quartz (Ø 25 mm) sepanjang 930 mm:

$$A_{annular} = \pi(R^2 - r^2) = \pi(31,2^2 - 12,5^2) = 2.567,28 \text{ mm}^2$$

$$V_{Germilite} = 2.567,28 \times 930 = 2.387.569 \text{ mm}^3 \approx 2,388 \text{ L}$$

Waktu kontak air pada flow rate nominal tersebut adalah:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{2,388 \text{ L}}{1,009 \text{ L/s}} = 2,366 \text{ detik}$$

Dengan nilai irradiance pada titik dinding tabung Germilite sebesar $18.330 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ sebagaimana diperoleh dari hasil perhitungan pada Subbab 5.4, maka dosis UV reaktor Germilite adalah:

$$D_{\text{Germilite}} = 18.330 \mu \frac{W}{\text{cm}^2} \times 2,366 \text{ s}$$

$$D_{\text{Germilite}} = 43.357 \mu\text{J}/\text{cm}^2 \approx 43,36 \text{ mJ}/\text{cm}^2$$

Nilai dosis tersebut dapat dievaluasi terhadap dua standar acuan yang relevan. Berdasarkan standar NSF/ANSI 55, sistem UV Class A ditetapkan pada dosis minimum $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ untuk inaktivasi patogen termasuk bakteri, virus, *Cryptosporidium*, dan *Giardia*, sedangkan sistem Class B ditetapkan pada dosis minimum $16 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ sebagai *supplemental treatment* untuk air minum yang telah memenuhi standar kesehatan [1]. Selain itu, CEFAS merekomendasikan dosis minimum $400 \text{ J}/\text{m}^2$ (setara $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$) untuk memastikan inaktivasi virus dan protozoa secara menyeluruh dalam sistem depurasi [2]. Dosis Germilite sebesar $43,36 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ melampaui ambang batas Class A NSF/ANSI 55 maupun rekomendasi CEFAS (keduanya $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$), sehingga klaim efektivitas pabrikan Germilite pada kapasitas 16 GPM dapat divalidasi secara teoritis. Nilai dosis acuan sebesar $43,36 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ini selanjutnya digunakan sebagai basis perbandingan dalam analisis kapasitas flow rate reaktor alat yang dikembangkan.

5.5.2 Analisis Kapasitas Flow Rate Reaktor TA dengan Dosis Tetap

Pada pendekatan ini, dosis UV ditetapkan sama dengan nilai acuan Germilite ($43,36 \text{ mJ}/\text{cm}^2$), kemudian dihitung berapa waktu kontak minimum dan flow rate maksimum yang masih menjamin dosis tersebut terpenuhi pada masing-masing titik uji reaktor alat yang dikembangkan.

Volume aktif ruang reaktor alat yang dikembangkan dihitung sebagai luas penampang tabung berdiameter dalam 147,7 mm dikurangi luas keempat sleeve quartz berdiameter 25 mm sepanjang 930 mm:

$$A_{\text{air}} = \pi \cdot R^2 - 4 \cdot \pi \cdot r^2 = \pi(73,85^2) - 4 \cdot \pi(12,5^2)$$

$$A_{air} = 17.133,69 - 1.963,50 = 15.170,19 \text{ mm}^2$$

$$V_{TA} = 15.170,19 \times 930 = 14.108.280 \text{ mm}^3 \approx 14,108 \text{ L}$$

Apabila dosis UV dibakukan sama dengan acuan Germilite, maka waktu kontak minimum dan flow rate maksimum untuk masing-masing titik uji diperoleh dari persamaan balik:

$$t = \frac{D}{E} \quad \text{dan} \quad Q_{maks} = \frac{V}{t}$$

Analisis dilakukan pada dua titik uji berdasarkan nilai irradiance hasil perhitungan Subbab 5.4.

a. Titik Uji 1 — Zona Pusat Reaktor (Superposisi Empat Lampu)

Titik pusat reaktor merupakan zona dengan iradiasi tertinggi karena menerima kontribusi superposisi dari keempat sleeve secara bersamaan, dengan irradiance sebesar $40.612 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$. Waktu kontak minimum dan flow rate maksimum yang diizinkan adalah:

$$t_1 = \frac{D}{E_1} = \frac{43.357}{40.612} = 1,068 \text{ detik}$$

$$Q_{maks_1} = \frac{V}{t_1} = \frac{14,108}{1,068}$$

$$Q_{maks_1} = 13,21 \text{ L/s} = 792,96 \text{ L/menit} \approx 209,48 \text{ GPM}$$

b. Titik Uji 2 — Zona Dinding Tabung (Iradiasi Minimum)

Titik dinding tabung merupakan zona terjauh dari sumber UV sehingga menerima iradiasi paling rendah dalam ruang reaktor, dengan irradiance sebesar $21.253 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$. Titik ini menjadi kondisi kritis (*worst case*) dalam penetapan flow rate operasional maksimum:

$$t_2 = \frac{D}{E_2} = \frac{43.357}{21.253} = 2,040 \text{ detik}$$

$$Q_{maks_2} = \frac{V}{t_2} = \frac{14,108}{2,040} = 6,916 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$Q_{maks_2} = 414,97 \text{ L/menit} \approx 109,62 \text{ GPM}$$

Hasil perhitungan selengkapnya dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 5- 30 Perbandingan dosis UV dan flow rate maksimum reaktor Germilite dan alat yang dikembangkan

Parameter	Germilite (Acuan)	TA — Titik Uji 1 (Pusat)	TA — Titik Uji 2 (Dinding)
Diameter dalam (mm)	62,4	147,7	147,7
Volume air aktif (L)	2,388	14,108	14,108
Irradiance ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	18.330	40.612	21.253
Dosis UV acuan (mJ/cm^2)	43,36	43,36 (tetap)	43,36 (tetap)
Waktu kontak minimum (s)	2,366	1,068	2,040
Flow rate maksimum (L/menit)	60,57 (16 GPM)	792,96 (209,48 GPM)	414,97 (109,62 GPM)
Rasio flow vs Germilite	1,00×	13,09×	6,85×
NSF 55 Class A ≥ 40 mJ/cm^2	✓	✓	✓
CEFAS $\geq 40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$	✓	✓	✓

Berdasarkan hasil pada Tabel 5-30, apabila dosis UV dibakukan sama dengan acuan Germilite ($43,36 \text{ mJ}/\text{cm}^2$), reaktor alat yang dikembangkan mampu beroperasi pada flow rate maksimum sebesar $414,97 \text{ L}/\text{menit}$ ($109,62 \text{ GPM}$) yang ditetapkan berdasarkan kondisi kritis di dinding tabung, atau $792,96 \text{ L}/\text{menit}$ ($209,48 \text{ GPM}$) pada zona pusat reaktor. Nilai ini masing-masing 6,85 kali dan 13,09 kali lebih tinggi dibandingkan kapasitas nominal Germilite 16 GPM. Pada kedua titik uji, dosis acuan yang digunakan ($43,36 \text{ mJ}/\text{cm}^2$) melampaui ambang batas Class A NSF/ANSI 55 maupun rekomendasi CEFAS sebesar $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ [1, 2].

Peningkatan kapasitas throughput ini merupakan hasil dari dua faktor yang saling menguatkan. Pertama, irradiance yang dihasilkan oleh konfigurasi empat lampu pada reaktor alat yang dikembangkan secara signifikan lebih tinggi dibandingkan reaktor Germilite, sehingga waktu kontak minimum yang dibutuhkan untuk mencapai dosis yang sama menjadi lebih singkat. Kedua, volume ruang reaktor yang jauh lebih besar (14,108 L berbanding 2,388 L) memungkinkan debit aliran yang lebih tinggi tanpa mengorbankan waktu kontak tersebut. Kombinasi kedua faktor ini menghasilkan kapasitas sterilisasi yang secara teoritis jauh melampaui reaktor referensi Germilite pada standar dosis yang sama.