pISSN : 0852-0232, eISSN : 2656-582X DOI : 10.14710/gt.v22i4.xxxxx

RANCANG BANGUN SISTEM LAMPU UV MAJEMUK DENGAN METODE SATU TABUNG DAN SISTEM PEMBERSIH SLEVE OTOMATIS PADA ALAT STERILISASI AIR

Firstyawan Esa Naufalabib [1)], Dista Yoel Tadeus [2)]
Program Studi D-IV Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
E-mail : distayoel@gmail.com

ABSTRACT

Water sterilization using ultraviolet (UV) light is an effective method because it produces no chemical residues and involves a relatively simple process. However, the performance of UV systems can decline due to the buildup of contaminants on the surface of the lamp sleeves, while conventional systems generally lack both automatic cleaning mechanisms and integrated performance monitoring. This study aims to design and build a water sterilization device using multiple UV lamps in a single reactor tube equipped with an automatic sleeve cleaning system and IoT-based monitoring. The device was built using four 55W Germilite UV lamps arranged in a circular pattern inside a single acrylic reactor tube. The sleeve cleaning mechanism is driven by a NEMA17 stepper motor via a lead screw system, controlled by an ESP32 microcontroller with a user interface consisting of a 20x4 LCD, a rotary encoder, and a DS3231 RTC, as well as a data logging feature to Google Spreadsheet via Google Apps Script. Test results show that the quartz sleeve provides significantly better UV radiation transmission compared to the acrylic sleeve and approaches the conditions of a sleeve-less setup. The automatic cleaning system operated successfully for 38 cycles (±19 hours) before a mechanical failure occurred at the coupling connecting the stepper motor to the lead screw. The IoT monitoring system successfully transmitted all data without any packet loss, achieving a 100% success rate. Geometric analysis of the reactor using a line source model showed that the four-lamp configuration produced a total irradiance of 40.612 µW/cm² at the reactor's center, four times higher than that of the single-lamp configuration.

***Keywords** : UV sterilization, multi-lamp UV system, automatic sleeve cleaner, ESP32, IoT, data logging, irradiance*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pengolahan air bersih saat ini semakin menuntut adanya sistem sterilisasi yang efektif, efisien, dan mudah dalam pengoperasian. Di antara metode sterilisasi air yang umum digunakan, sterilisasi menggunakan sinar ultraviolet (UV) menjadi salah satu alternatif yang banyak digunakan karena tidak menghasilkan residu kimia dan memiliki proses yang relatif sederhana [1]. Sterilisasi UV bekerja dengan memanfaatkan radiasi pada panjang gelombang 254 nm (UV-C) yang mampu merusak struktur DNA dan RNA mikroorganisme sehingga menghambat kemampuan reproduksi dan menyebabkan inaktivasi mikroorganisme [1][2].

Namun demikian, kinerja sistem sterilisasi UV sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi UV yang diterima oleh air. Intensitas ini dapat menurun akibat adanya kotoran yang menempel pada permukaan pelindung lampu UV (*sleeve*) [2]. Pada sistem konvensional umumnya belum dilengkapi dengan mekanisme pembersihan otomatis maupun sistem pemantauan kinerja, sehingga penurunan performa sulit terdeteksi secara langsung.

Beberapa pengembangan sistem sterilisasi UV telah dilakukan dengan mengombinasikan teknologi UV dan ozon dalam satu maupun dua tabung reaktor [3][4][5], namun sebagian besar sistem tersebut belum dilengkapi dengan mekanisme pembersihan *sleeve* otomatis serta memiliki kompleksitas konstruksi yang relatif tinggi. Berdasarkan kajian tersebut, permasalahan utama yang masih sering muncul adalah penurunan kinerja sistem akibat *fouling* pada *sleeve* lampu UV serta belum tersedianya mekanisme pembersihan otomatis dan pemantauan kinerja sistem secara terintegrasi.

Efektivitas sterilisasi UV ditentukan oleh dosis UV (*fluence*), yaitu hasil kali antara intensitas radiasi (I) dan waktu paparan (T), dinyatakan dengan persamaan $D = I \times T$. Berdasarkan standar NSF, sistem UV Class A dirancang untuk mencapai dosis minimum 40.000 µW-sec/cm² (setara 40 mJ/cm²) guna memastikan inaktivasi bakteri dan virus patogen [1], sementara CEFAS merekomendasikan dosis minimal 400 J/m² (setara 40 mJ/cm²) untuk memastikan inaktivasi virus dan protozoa secara menyeluruh [2].

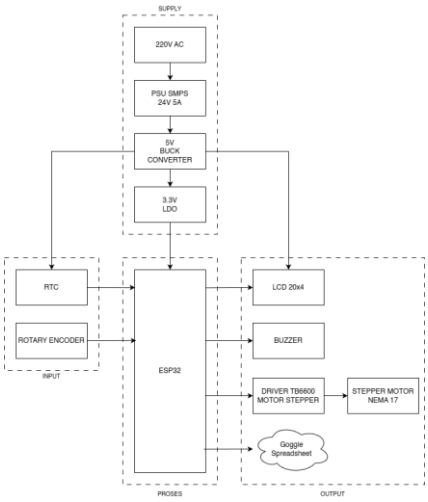
Penggunaan lebih dari satu lampu UV dalam satu sistem (*multi-lamp system*) bertujuan untuk meningkatkan distribusi intensitas radiasi UV di dalam reaktor sehingga cakupan penyinaran menjadi lebih luas dan merata [2]. Pada penelitian ini dirancang dan dibangun alat sterilisasi air menggunakan lampu UV majemuk dalam satu tabung reaktor, dilengkapi dengan mekanisme pembersih *sleeve* otomatis berbasis motor *stepper*

dan *lead screw*, serta sistem pemantauan berbasis IoT yang mencatat dan mengirimkan data operasional secara *real-time* ke *platform spreadsheet* berbasis internet.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun yang terbagi menjadi dua tahap utama, yaitu perancangan perangkat keras (*hardware*) dan perancangan perangkat lunak (*software*), dilanjutkan dengan tahap pembuatan alat dan pengujian. Perancangan *hardware* meliputi perancangan PCB kontroler, kontroler utama, mekanisme pembersihan *sleeve* lampu UV, serta tabung reaktor. Perancangan *software* meliputi diagram alir *setting* parameter, kalibrasi alat, dan mekanisme pembersihan *sleeve* lampu UV.

Alat menggunakan empat lampu UV Germilite 55W yang disusun melingkar di dalam satu tabung reaktor akrilik berdiameter dalam 147,7 mm, dengan jarak masing-masing *sleeve* kuarsa (Ø27,8 mm) sebesar 45 mm dari titik pusat reaktor. Mekanisme pembersih digerakkan oleh motor *stepper* bipolar NEMA17 yang dikendalikan *driver* TB6600, ditransmisikan melalui *lead screw* T8 menjadi gerakan translasi linear pada *cleaner* berbahan spon. Mikrokontroler ESP32 bertindak sebagai pusat kendali sistem, dengan RTC DS3231 sebagai acuan waktu penjadwalan pembersihan, LCD 20x4 dan *rotary encoder* sebagai antarmuka pengguna.



Gambar 1. Blok diagram sistem alat sterilisasi air UV majemuk

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan bahasa C++ pada *platform* PlatformIO dengan *framework* Arduino. Program dibagi menjadi mekanisme kalibrasi posisi *cleaner* (untuk menentukan jumlah *step* motor *stepper* yang dibutuhkan menempuh satu lintasan penuh), mekanisme eksekusi pembersihan otomatis berdasarkan interval waktu yang dibaca dari RTC, serta mekanisme pengiriman data operasional (waktu, posisi *cleaner*, dan jumlah total pembersihan) ke Google Spreadsheet melalui Google Apps Script setiap kali siklus pembersihan selesai dijalankan. Sistem dilengkapi mekanisme *failsafe*: apabila koneksi internet terputus, data disimpan sementara pada memori *LittleFS* sebagai *queue* data *pending* dan dikirim kembali begitu koneksi pulih.

Pengujian alat dilakukan melalui tiga skema, yaitu (1) pengujian intensitas UV berdasarkan jenis *sleeve* (akrilik, kuarsa, tanpa *sleeve*, dan sinar matahari sebagai pembanding) menggunakan sensor GUVA-S12SD dan Arduino Uno pada variasi jarak 2–8 cm, (2) pengujian keandalan mekanisme pembersihan otomatis melalui operasi kontinu dengan interval 30 menit, dan (3) pengujian keandalan sistem IoT dengan mengamati konsistensi pengiriman data ke *spreadsheet* selama periode pengujian yang sama. Selain itu dilakukan analisis geometri reaktor menggunakan model sumber garis (*line source*) untuk menghitung *irradiance* pada titik pusat dan dinding dalam reaktor, yang selanjutnya digunakan untuk mengestimasi kapasitas debit aliran (*flow rate*) maksimum alat.



Gambar 2. Prototipe alat sterilisasi air UV majemuk setelah perakitan

HASIL PENGUKURAN

1. Intensitas UV Berdasarkan Jenis Sleeve

Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai ADC sensor GUVA-S12SD pada tiga kondisi *sleeve* untuk mengetahui pengaruh material

terhadap transmisi radiasi UV. Hasil rata-rata pengukuran ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan nilai ADC pengujian intensitas UV berdasarkan jenis sleeve

Variabel	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm
Sleeve Akrilik (ADC)	2.4	0.8	0.0	0.0
Sleeve Kuarsa (ADC)	46.2	35.2	16.2	14.0
Tanpa Sleeve (ADC)	46.0	32.0	28.2	20.4

Sleeve berbahan akrilik menghasilkan nilai ADC paling rendah dan tidak terdeteksi lagi pada jarak 6 cm, menunjukkan bahwa material tersebut banyak menyerap radiasi UV. Sebaliknya, *sleeve* berbahan kuarsa menghasilkan nilai yang mendekati kondisi tanpa *sleeve*, sehingga terbukti sebagai material yang paling optimal untuk digunakan pada sistem sterilisasi UV.

2. Keandalan Pembersihan Sleeve UV

Pengujian keandalan dilakukan dengan menjalankan mekanisme pembersihan secara otomatis pada interval 30 menit secara terus-menerus. Hasil pengujian dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan pengujian keandalan pembersihan sleeve UV

Parameter	Hasil
Interval pembersihan	30 menit
Total siklus pengujian	50 siklus
Siklus sebelum kegagalan	38 siklus (±19 jam)
Komponen yang rusak	Coupling
Dampak kerusakan	Lead screw tidak berputar
Kondisi motor stepper	Tetap normal sesuai jadwal

Sistem mampu menjalankan 38 siklus pembersihan (±19 jam operasi kontinu) sebelum *coupling* penghubung motor *stepper* dan *lead screw* mengalami kegagalan mekanis, meskipun motor *stepper* dan sistem kontrol tetap berfungsi normal.



Gambar 3. Kerusakan coupling setelah siklus pembersihan ke-38

3. Keandalan Sistem IoT

Pengujian keandalan IoT dilakukan bersamaan dengan pengujian pembersihan, dengan mengamati konsistensi pengiriman data ke Google Spreadsheet. Hasil pengujian dirangkum pada Tabel 3.

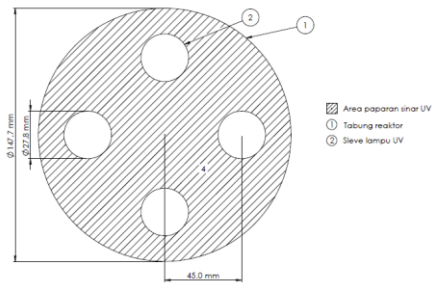
Tabel 3. Ringkasan hasil uji keandalan sistem IoT

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

Seluruh 50 data berhasil terkirim tanpa kehilangan paket (*missing data*), menunjukkan bahwa modul RTC, koneksi internet, dan mekanisme pengiriman data mampu bekerja secara independen terhadap kondisi mekanis alat, termasuk saat terjadi kegagalan *coupling* pada siklus ke-38.

4. Analisis Geometri dan Irradiance Reaktor

Analisis distribusi radiasi UV dilakukan menggunakan model sumber garis (*line source*) dengan persamaan $E = \varphi / (2\pi ld) \times (2\alpha + \sin 2\alpha)$, dengan φ adalah fluks radiasi total lampu, l panjang efektif lampu, d jarak titik pengamatan dari sumbu lampu, dan α sudut geometri terhadap panjang efektif lampu. Perhitungan dilakukan pada titik pusat dan dinding dalam reaktor desain, dibandingkan dengan reaktor komersial Germilite sebagai acuan.



Gambar 4. Konfigurasi penampang empat lampu UV pada tabung reaktor

Tabel 4. Hasil perhitungan irradiance masing-masing konfigurasi reaktor

Konfigurasi	Titik P	d (cm)	E 1 lampu	Σ	E total
Pusat (desain)	Pusat	3.111	10.153	4	40.612
Dinding (desain)	Dinding	1.491	21.253	1	21.253
Germilite	Dinding	1.731	18.330	1	18.330

Pada titik pusat reaktor, superposisi kontribusi keempat lampu menghasilkan *irradiance* total sebesar 40.612 µW/cm², atau empat kali nilai *irradiance* satu lampu tunggal. Pada titik dinding dalam reaktor, nilai *irradiance* desain (21.253 µW/cm²) juga lebih tinggi dibandingkan reaktor Germilite (18.330 µW/cm²) karena jarak d yang lebih kecil terhadap sumbu lampu terdekat.

5. Analisis Dosis UV dan Kapasitas Flow Rate

Dosis UV acuan dihitung dari reaktor Germilite pada kapasitas nominal 16 GPM, diperoleh sebesar 43,36 mJ/cm² — melampaui ambang batas 40 mJ/cm² pada standar NSF/ANSI 55 Class A maupun rekomendasi CEFAS [1][2]. Nilai ini digunakan sebagai acuan untuk menghitung kapasitas *flow rate* maksimum reaktor desain pada dosis yang setara, dengan hasil pada Tabel 5.

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

Parameter	Germilite	TA-Pusat	TA-Dinding
Diameter dalam (mm)	62.4	147.7	147.7
Volume air aktif (L)	2.388	14.108	14.108
Irradiance (µW/cm²)	18.330	40.612	21.253
Waktu kontak min. (s)	2.366	1.068	2.040
Flow rate maks. (L/mnt)	60.57	792.96	414.97
Setara GPM	16.00	209.48	109.62

Pada kondisi kritis (titik dinding tabung), reaktor desain mampu beroperasi pada *flow rate* maksimum 414,97 L/menit (109,62 GPM), atau 6,85 kali lebih tinggi dibandingkan kapasitas nominal Germilite, dengan dosis UV yang tetap memenuhi standar minimum 40 mJ/cm².

ANALISIS

Berdasarkan hasil pengujian, jenis material *sleeve* berpengaruh signifikan terhadap transmisi radiasi UV. *Sleeve* berbahan kuarsa terbukti jauh lebih optimal dibandingkan akrilik karena karakteristik transmisi UV-nya yang mendekati kondisi tanpa *sleeve*, sehingga direkomendasikan sebagai material utama pada sistem sterilisasi UV berkelanjutan.

Pada aspek keandalan mekanis, kegagalan *coupling* pada siklus ke-38 (±19 jam) menunjukkan bahwa komponen transmisi antara motor *stepper* dan *lead screw* merupakan titik lemah utama pada sistem pembersih otomatis, sehingga pemilihan material *coupling* yang lebih tahan terhadap beban siklik berulang menjadi prioritas pengembangan selanjutnya. Sebaliknya, sistem kendali, RTC, dan sistem *monitoring* IoT terbukti bekerja secara independen dari kondisi mekanis, dengan tingkat keberhasilan pengiriman data 100% tanpa *missing data*.

Dari sisi analisis geometri, konfigurasi empat lampu UV yang disusun melingkar dalam satu tabung reaktor terbukti mampu menghasilkan *irradiance* yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi satu lampu pada reaktor komersial Germilite, baik pada titik pusat maupun dinding dalam reaktor. Peningkatan *irradiance* ini berbanding lurus dengan peningkatan kapasitas *flow rate* yang dapat ditangani sistem pada dosis UV yang setara, sehingga desain reaktor majemuk ini berpotensi diterapkan pada aplikasi dengan debit air yang jauh lebih besar dibandingkan reaktor UV komersial tunggal.

KESIMPULAN

1. Telah berhasil dirancang dan dibangun alat sterilisasi air menggunakan empat lampu UV dalam satu tabung reaktor yang dilengkapi sistem pembersih *sleeve* otomatis berbasis motor *stepper*, *lead screw*, dan mikrokontroler ESP32, serta fitur *monitoring* berbasis IoT.
2. *Sleeve* berbahan kuarsa menghasilkan transmisi radiasi UV yang jauh lebih baik dibandingkan *sleeve* akrilik dan mendekati kondisi tanpa *sleeve*.

3. Mekanisme pembersih otomatis mampu beroperasi hingga 38 siklus (±19 jam) sebelum terjadi kegagalan mekanis pada *coupling*, sementara motor *stepper* dan sistem kontrol tetap berfungsi normal.
4. Sistem *monitoring* IoT berhasil mengirimkan seluruh data operasional tanpa kehilangan paket, dengan tingkat keberhasilan pengiriman sebesar 100%.
5. Konfigurasi empat lampu UV menghasilkan *irradiance* total sebesar 40.612 μW/cm² pada titik pusat reaktor — empat kali lebih tinggi dibandingkan konfigurasi satu lampu — dan memungkinkan kapasitas *flow rate* hingga 6,85 kali lebih besar dibandingkan reaktor komersial acuan pada dosis UV yang setara.

SARAN

1. Mengganti *coupling* dengan material yang lebih tahan terhadap beban siklik atau menggunakan *flexible coupling* industri agar mampu menahan operasi berulang dalam jangka waktu lebih lama.
2. Menambahkan sensor posisi atau *limit switch* pada mekanisme pembersih agar kegagalan mekanis dapat terdeteksi secara otomatis.
3. Melakukan pengujian mikrobiologi terhadap kualitas air sebelum dan sesudah sterilisasi untuk mengevaluasi efektivitas inaktivasi mikroorganisme secara langsung.
4. Melakukan validasi eksperimental terhadap hasil perhitungan *irradiance* menggunakan sensor UV-C terkalibrasi pada beberapa titik di dalam reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

1. I. W. Guard, "Disinfection of Water by Ultraviolet Light," *Water Knowledge Co.*, pp. 1–13, 2002.
2. CEFAS, "*UV Disinfection in Depuration Theory and Practice*," vol. 44.
3. R. Denkewicz, et al., "Combined Ultraviolet and Ozone Fluid Sterilization System," US2016/0122208 A1, 2016.
4. N. Abe, "UV-Assisted Advanced-Ozonation Water Treatment System and Advanced-Ozonation Module," 2004.
5. V. Riper, et al., "Combination Ultraviolet Ray and Ozone Water Sanitizing Unit," US 11,472,727 B2, 2022.
6. Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet." [Online]. Tersedia: https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32
7. Google LLC, "Google Sheets API Overview." [Online]. Tersedia: https://developers.google.com/workspace/sheets/api/guides/concepts
8. Google LLC, "Google Apps Script — Overview and Reference Documentation." [Online]. Tersedia: https://developers.google.com/apps-script/