

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Teknologi sterilisasi air menggunakan sinar *ultraviolet* (UV) telah banyak dikembangkan sebagai metode desinfeksi yang efektif tanpa menghasilkan residu kimia[1]. Sinar UV pada panjang gelombang 254 nm (UV-C) diketahui memiliki kemampuan untuk merusak struktur DNA dan RNA mikroorganisme sehingga menghambat proses reproduksi dan menyebabkan inaktivasi mikroorganisme[1,2]. Efektivitas proses sterilisasi UV sangat dipengaruhi oleh dosis radiasi yang diterima, yang merupakan hasil perkalian antara intensitas radiasi dan waktu paparan[1,2].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kinerja sistem sterilisasi UV dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain intensitas sumber cahaya, kondisi kualitas air, serta desain reaktor[1,2]. Salah satu komponen penting dalam sistem UV adalah *sleeve* yang berfungsi sebagai pelindung lampu dari kontak langsung dengan air[1]. Namun, penggunaan *sleeve* dapat mempengaruhi transmisi radiasi UV, terutama jika terjadi penumpukan kotoran (*fouling*) pada permukaannya, yang dapat menyebabkan penurunan intensitas radiasi secara signifikan[1].

Penggunaan beberapa lampu UV dalam satu sistem (*multi-lamp system*) juga telah dikembangkan untuk meningkatkan distribusi intensitas radiasi, khususnya pada aplikasi dengan debit air yang lebih besar[2]. Sistem ini mampu meningkatkan cakupan penyinaran, namun memerlukan sistem pemeliharaan yang baik untuk menjaga performa alat dalam jangka waktu operasi tertentu[1].

Selain itu, beberapa pengembangan sistem sterilisasi UV telah dilakukan dengan mengkombinasikan teknologi UV dan ozon untuk meningkatkan efektivitas sterilisasi. Ray Denkewicz, et al. mengembangkan sistem sterilisasi cairan yang menggabungkan UV dan ozon dalam satu tabung reaktor dengan lebih dari satu

lampu UV[3]. Sementara itu, Norimitsu Abe, et al. mengembangkan sistem yang memisahkan proses ozonisasi dan penyinaran UV dalam dua reaktor yang disusun secara seri[4]. Penelitian lain oleh Dexter Richard Van Riper, et al. mengembangkan sistem kombinasi UV dan ozon dalam satu unit dengan dua ruang terpisah[5]. Meskipun sistem-sistem tersebut mampu meningkatkan efektivitas sterilisasi, sebagian besar belum dilengkapi dengan mekanisme pembersihan *sleeve* secara otomatis serta memiliki kompleksitas sistem yang relatif tinggi.

Selain aspek desain, sistem sterilisasi UV modern juga mulai mengintegrasikan sistem monitoring untuk memastikan kinerja alat tetap optimal[1]. Monitoring parameter operasi seperti daya listrik dan kondisi kerja alat menjadi penting untuk menjaga keandalan sistem dalam jangka panjang[1].

Berdasarkan kajian tersebut, dapat disimpulkan bahwa permasalahan utama yang masih perlu dikaji adalah penurunan kinerja akibat *fouling* pada *sleeve* serta keterbatasan sistem dalam melakukan pemantauan kinerja secara berkelanjutan. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pengembangan alat sterilisasi air berbasis lampu UV majemuk yang dilengkapi dengan sistem pembersih otomatis serta sistem monitoring berbasis *data logging* untuk meningkatkan kestabilan dan keandalan kinerja alat.

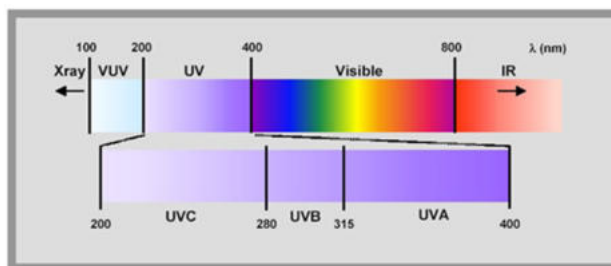
2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sterilisasi Air Menggunakan Sinar Ultraviolet (UV)

Sterilisasi air menggunakan sinar ultraviolet (UV) merupakan metode desinfeksi fisik yang memanfaatkan radiasi gelombang elektromagnetik pada rentang UV-C (200–280 nm)[2]. Panjang gelombang sekitar 254 nm merupakan daerah dengan efektivitas germisidal tertinggi karena mampu diserap secara optimal oleh asam nukleat mikroorganisme[1,2]. Mekanisme inaktivasi mikroorganisme terjadi ketika radiasi UV diserap oleh DNA dan RNA, yang menyebabkan terbentuknya kerusakan struktur seperti dimer pirimidin[2]. Kerusakan ini menghambat proses replikasi sel sehingga mikroorganisme kehilangan kemampuan untuk berkembang biak dan menjadi tidak aktif[1,2].

Berbeda dengan metode kimia, proses ini tidak menghasilkan produk samping yang berbahaya sehingga lebih ramah lingkungan[1,2].

Dimer pirimidin yang terbentuk tersebut, khususnya cyclobutyl dimer antara dua basa pirimidin yang berdekatan, secara langsung menghalangi proses replikasi sehingga mikroorganisme menjadi tidak mampu berkembang biak[2]. Namun perlu diperhatikan bahwa beberapa mikroorganisme, khususnya bakteri, memiliki mekanisme perbaikan DNA yang disebut fotoreaktivasi, yaitu kemampuan memulihkan kerusakan dimer pirimidin ketika kembali terpapar cahaya UVA setelah proses desinfeksi berlangsung [2]. Oleh karena itu, dosis UV yang diberikan harus dirancang cukup tinggi agar proses pemulihan ini tidak terjadi[2]. Dibandingkan metode klorinasi dan ozonasi, sterilisasi UV memiliki keunggulan tambahan berupa tidak adanya perubahan pada rasa, warna, maupun pH air, serta tidak memerlukan penanganan bahan kimia berbahaya selama operasi berlangsung[1].



Gambar 2. 1 Spektrum elektromagnetik

2.2.2 Intensitas dan Dosis Radiasi UV

Dalam sistem sterilisasi UV, efektivitas proses tidak hanya ditentukan oleh intensitas radiasi, tetapi juga oleh lamanya paparan terhadap mikroorganisme. Kombinasi kedua parameter ini dinyatakan dalam bentuk dosis UV (*fluence*), yang merupakan parameter utama dalam menentukan tingkat inaktivasi mikroorganisme [1,2].

$$D = I \times T$$

Dimana:

D = dosis UV ($\text{mW}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ atau mJ/cm^2)

I = intensitas radiasi UV (W/m^2)

T = waktu paparan (detik)

Semakin besar nilai dosis UV yang diterima, maka tingkat inaktivasi mikroorganisme akan semakin tinggi. Dalam praktiknya, distribusi intensitas radiasi di dalam reaktor tidak selalu merata, sehingga desain sistem dan posisi lampu menjadi faktor penting untuk memastikan setiap bagian fluida menerima dosis yang cukup[2].

Mengacu pada kebutuhan dosis yang memadai tersebut, berbagai standar internasional telah menetapkan nilai minimum yang harus dipenuhi. Berdasarkan standar NSF (*National Sanitation Foundation*), sistem UV Class A dirancang untuk mencapai dosis minimum $40.000 \mu\text{W}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ (setara $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$) guna memastikan inaktivasi bakteri dan virus patogen[1]. Sementara itu, sistem Class B yang ditujukan untuk air minum yang sudah memenuhi standar kesehatan cukup menggunakan dosis $16.000 \mu\text{W}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ [1]. Sejalan dengan hal tersebut, CEFAS merekomendasikan dosis minimal $400 \text{ J}/\text{m}^2$ (setara $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$) untuk memastikan inaktivasi virus dan protozoa secara menyeluruh[2], mengingat fenomena fotoreaktivasi dapat membutuhkan dosis 2 hingga 4 kali lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa fotoreaktivasi[2].

2.2.3 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Sistem UV

Kinerja sistem sterilisasi UV dipengaruhi oleh beberapa faktor utama yang saling berkaitan, yaitu:

1. **Intensitas sumber UV** : Dipengaruhi oleh daya lampu dan efisiensi radiasi yang dihasilkan.
2. **Waktu kontak (*exposure time*)** : Ditentukan oleh kecepatan aliran air di dalam reaktor.
3. **Kualitas air (turbiditas)** : Partikel dalam air dapat menyerap atau menghamburkan sinar UV sehingga mengurangi penetrasi radiasi.

4. **Distribusi radiasi dalam reaktor** : Dipengaruhi oleh jumlah dan konfigurasi lampu UV.

5. **Kondisi sleeve lampu UV** : Fouling pada permukaan sleeve dapat mengurangi transmisi radiasi secara signifikan.

Di antara kelima faktor tersebut, turbiditas merupakan salah satu yang paling perlu diperhatikan dalam operasi nyata. CEFAS menyebutkan bahwa pada aplikasi air minum, pengaruh yang terukur sudah dapat terjadi pada turbiditas melebihi 1 NTU, dan atenuasi yang lebih signifikan ditemukan pada turbiditas di atas 15 NTU [1]. Oleh karena itu, untuk sistem depurasi, disarankan agar turbiditas air masukan dijaga di bawah 5 NTU, dan apabila turbiditas melebihi 15 NTU maka perlu dilakukan proses sedimentasi atau filtrasi terlebih dahulu sebelum masuk ke tahap desinfeksi UV [1]. Dengan demikian, pengendalian kualitas air masukan menjadi prasyarat penting agar sistem UV dapat beroperasi pada efisiensi yang telah direncanakan.

2.2.4 Pengaruh Sleeve terhadap Intensitas Radiasi UV

Sleeve merupakan komponen penting yang berfungsi sebagai pelindung lampu UV dari kontak langsung dengan air. Namun, keberadaan sleeve juga mempengaruhi jumlah radiasi UV yang dapat ditransmisikan ke dalam air. Material sleeve memiliki karakteristik transmisi yang berbeda. Sleeve berbahan kaca, khususnya quartz, memiliki kemampuan transmisi UV yang lebih baik dibandingkan dengan akrilik. Sementara itu, sleeve berbahan akrilik cenderung menyerap sebagian radiasi UV sehingga menurunkan intensitas yang diteruskan. Selain material, kondisi permukaan sleeve juga sangat berpengaruh. Penumpukan kotoran (fouling) pada permukaan sleeve dapat menghambat transmisi radiasi UV secara signifikan. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme pembersihan untuk menjaga kebersihan sleeve agar kinerja sistem tetap optimal.

Terkait pemilihan material, International Water-Guard menegaskan bahwa sleeve yang baik umumnya dibuat dari *fused silica* atau quartz, karena material ini mampu mentransmisikan radiasi UV germisidal dengan baik, sementara kaca biasa

justru memblokir radiasi UVC[1]. Selain pemilihan material, pembersihan sleeve secara berkala juga merupakan bagian tak terpisahkan dari pemeliharaan sistem UV untuk mempertahankan output lampu yang optimal, dengan interval pembersihan yang direkomendasikan umumnya setiap enam bulan[1] . Lebih jauh, paten Van Riper et al. [5] mengungkapkan bahwa penumpukan *hard water* pada permukaan *quartz tube* menyebabkan intensitas UV menurun tanpa ada indikasi yang terlihat dari luar, sehingga kondisi ini sering tidak disadari hingga sistem harus dibongkar. Oleh karena itu, integrasi mekanisme pembersihan otomatis dan sensor intensitas UV seperti yang dirancang pada penelitian ini merupakan solusi yang tepat untuk mendeteksi dan mengatasi masalah fouling secara proaktif tanpa perlu menghentikan operasi sistem.

2.2.5 Sistem Lampu UV Majemuk

Penggunaan lebih dari satu lampu UV dalam satu sistem (multi-lamp system) bertujuan untuk meningkatkan distribusi radiasi UV di dalam reaktor. Dengan adanya beberapa sumber cahaya, cakupan penyinaran menjadi lebih luas dan merata, sehingga meningkatkan peluang fluida untuk menerima dosis UV yang cukup.

Sistem ini umumnya digunakan pada aplikasi dengan debit air yang lebih besar, di mana satu lampu tidak cukup untuk memberikan distribusi radiasi yang merata. Namun, penggunaan lampu dalam jumlah banyak juga berdampak pada peningkatan konsumsi daya listrik serta kebutuhan sistem pemeliharaan yang lebih intensif.

Dalam hal konfigurasi sistem, CEFAS menjelaskan bahwa unit-unit UV majemuk dapat disusun secara paralel maupun seri dengan efek yang berbeda terhadap dosis yang diterima air. Penyusunan paralel membagi laju aliran ke masing-masing unit sehingga waktu tinggal air di tiap unit meningkat dan dosis yang diterima menjadi lebih besar, sedangkan penyusunan seri mengakumulasi waktu residen secara kumulatif dari seluruh unit yang terpasang [2]. Pendekatan multi-lampu juga diterapkan dalam sistem yang dikembangkan oleh Abe et al. [4], di mana beberapa lampu UV disusun dalam modul silindris yang dilengkapi nozzle

penyemprotan ozone-water ke permukaan lampu, yang secara bersamaan berfungsi mencegah fouling sekaligus menghasilkan radikal OH untuk meningkatkan efektivitas pengolahan. Pada penelitian ini, konfigurasi empat lampu UV majemuk dalam satu tabung reaktor dipilih dengan tujuan meningkatkan distribusi intensitas radiasi sekaligus menjaga kesederhanaan dan kompaknya konstruksi sistem berbeda dari pendekatan konvensional yang umumnya hanya menggunakan satu lampu dalam satu tabung seperti pada reaktor referensi Germilite.

2.2.6 Reliability

Keandalan (*reliability*) merupakan kemampuan suatu sistem untuk menjalankan fungsinya sesuai spesifikasi yang telah ditentukan, dalam kondisi operasi tertentu, selama periode waktu yang ditetapkan tanpa mengalami kegagalan [6]. Dalam konteks sistem sterilisasi air berbasis UV yang dilengkapi mekanisme pembersih otomatis, aspek keandalan yang paling kritis adalah kemampuan sistem pembersih menjalankan siklus pembersihan sleeve secara konsisten dan berulang, karena kegagalan pada mekanisme ini akan berdampak langsung pada akumulasi fouling yang menurunkan transmisi radiasi UV secara bertahap.

Keandalan mekanisme pembersih sangat dipengaruhi oleh konsistensi gerak motor stepper dan *lead screw* dalam menjalankan gerakan maju-mundur secara berulang. Salah satu aspek fundamental yang menentukan keandalan ini adalah akurasi kontrol posisi. Kontrol posisi pada sistem berbasis motor stepper bekerja dengan prinsip open-loop, di mana posisi aktuator ditentukan secara langsung dari jumlah step yang diperintahkan tanpa memerlukan umpan balik sensor posisi tambahan. Setiap satu step motor stepper menghasilkan perpindahan linier yang presisi melalui mekanisme lead screw, sehingga posisi wiper pembersih dapat dihitung dan dikontrol secara deterministik berdasarkan parameter jumlah step per milimeter (steps/mm) yang ditetapkan saat kalibrasi [6]. Konsistensi kontrol posisi ini menjadi fondasi keandalan siklus pembersihan karena memastikan wiper bergerak dari titik awal hingga titik akhir sleeve secara penuh dan berulang pada setiap siklus.

Pada operasi siklus panjang, akumulasi panas pada motor stepper dapat menurunkan kemampuan torsi sehingga berpotensi menyebabkan missed step yang mengakibatkan posisi pembersih tidak sesuai dan pembersihan sleeve menjadi tidak merata. Kondisi missed step merupakan kegagalan kontrol posisi yang paling umum pada sistem open-loop, karena tanpa umpan balik posisi aktual, penyimpangan yang terjadi tidak dapat terdeteksi dan terakumulasi sepanjang operasi [6]. Selain itu, keandalan penjadwalan siklus pembersihan juga bergantung pada akurasi RTC sebagai acuan waktu, sehingga interval aktivasi mekanisme pembersih tetap konsisten meskipun sistem mengalami gangguan koneksi internet maupun restart pada mikrokontroler.

CEFAS menyebutkan bahwa pembersihan sleeve secara berkala merupakan bagian tak terpisahkan dari pemeliharaan sistem UV, dan mekanisme pembersih otomatis lebih diutamakan dibandingkan manual untuk memastikan pembersihan rutin serta mempertahankan kinerja sistem [2]. Pengujian keandalan pada penelitian ini dilakukan melalui operasi kontinu selama ± 24 jam dengan parameter yang diamati meliputi konsistensi kontrol posisi wiper pada setiap siklus pembersihan, akurasi penjadwalan, serta integritas penyekatan sistem untuk memastikan tidak terjadi kebocoran selama mekanisme pembersih beroperasi..

2.2.7 Motor Stepper Bipolar

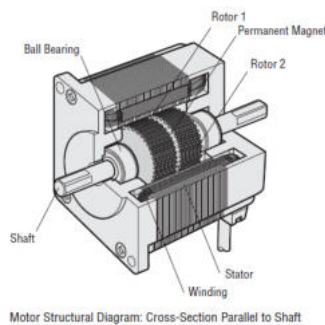


Gambar 2. 2 Motor Stepper NEMA17

Motor stepper merupakan jenis motor listrik arus searah (*brushless DC motor*) yang mengubah pulsa listrik menjadi gerakan sudut diskrit (step). Motor stepper bergerak dalam satuan langkah (step) per pulsa masukan, sehingga posisi

sudut rotor dapat dikendalikan secara presisi tanpa memerlukan sensor umpan balik (*feedback sensor*) tambahan seperti encoder. Kemampuan pengendalian posisi secara *open-loop* ini menjadikan motor stepper sangat sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan pergerakan terkontrol dan berulang dengan akurasi yang konsisten

Motor stepper dibagi menjadi 2 berdasarkan konfigurasi lilitan (*Winding*) pada statornya, yaitu unipolar dan bipolar. Motor stepper unipolar memiliki titik tengah (*center tap*) pada setiap kumparan sehingga arus hanya mengalir dalam satu arah pada masing-masing setengah kumparan. Sementara itu, motor stepper bipolar tidak memiliki titik tengah, sehingga arus dapat mengalir dalam dua arah pada kumparan yang sama dengan menggunakan rangkaian jembatan H (*H-bridge*). Konfigurasi bipolar ini menghasilkan torsi yang lebih besar dibandingkan unipolar pada ukuran fisik yang sama, karena seluruh lilitan kumparan dimanfaatkan secara penuh dalam setiap langkah. Oleh karena itu, motor stepper bipolar lebih banyak digunakan pada aplikasi yang membutuhkan gaya dorong (*thrust force*) yang lebih besar, termasuk pada mekanisme penggerak *lead screw* seperti yang diterapkan dalam penelitian ini.

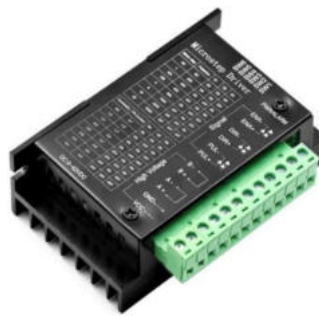


Gambar 2. 3 Konstruksi Motor Stepper

Prinsip kerja motor stepper bipolar didasarkan pada interaksi medan magnet antara rotor dan stator. Rotor motor stepper umumnya terbuat dari material feromagnetik bergigi (*toothed ferromagnetic core*) atau magnet permanen, sedangkan stator terdiri dari sejumlah kumparan yang tersusun melingkar. Ketika kumparan stator dialiri arus secara bergantian sesuai urutan fase yang ditentukan, medan magnet yang terbentuk akan menarik gigi rotor untuk bergerak menuju

posisi keseimbangan baru. Setiap perubahan urutan energisasi kumparan menghasilkan satu langkah (step) pergerakan sudut rotor. Besar sudut per langkah (*step angle*) ditentukan oleh jumlah kutub dan gigi rotor, dengan nilai umum sebesar $1,8^\circ$ per langkah, sehingga dibutuhkan 200 langkah untuk menyelesaikan satu putaran penuh[6].

2.2.8 Driver Motor Stepper



Gambar 2. 4 Driver Motor Stepper TB6600

Untuk mengendalikan motor stepper diperlukannya *driver* khusus, hal ini dikarenakan motor stepper memerlukan arus dan tegangan yang tinggi sehingga tidak memungkinkan dikontrol secara langsung oleh mikrokontroler. Dengan menggunakan *driver* stepper motor, mikrokontroller hanya membutuhkan 3 pin untuk melakukan kontrol sebuah motor stepper yaitu pin direction, pulsa dan enable[7]. Selain hal itu *driver* stepper motor juga dapat mengatur jumlah step yang diperlukan untuk menyelesaikan satu kali putaran pada motor stepper tergantung pada konfigurasi *driver* stepper motor.

2.2.9 Lead Screw



Gambar 2. 5 Lead Screw

Lead screw merupakan salah satu mekanisme transmisi gerak yang berfungsi mengubah gerakan rotasi menjadi gerakan linear. Komponen ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu batang berulir (*screw*) dan mur penggerak (*nut*) yang bergerak secara translasi ketika batang berulir diputar. Prinsip kerja *lead screw* didasarkan pada mekanisme ulir heliks, dimana putaran pada batang berulir menghasilkan perpindahan linear pada mur penggerak sesuai dengan geometri ulir yang digunakan .

Parameter utama yang menentukan karakteristik gerak *lead screw* adalah lead (jarak tempuh linear per satu putaran penuh) dan pitch (jarak antar ulir yang berdekatan). Pada *lead screw* dengan ulir tunggal (*single start*), nilai lead sama dengan nilai pitch. Sementara itu, pada *lead screw* dengan ulir majemuk (*multi-start*), nilai lead merupakan hasil perkalian antara pitch dengan jumlah awal ulir (*number of starts*)[8]. Hubungan antara putaran motor dan perpindahan linear yang dihasilkan dinyatakan sebagai berikut:

$$d = n \times L$$

Dimana:

d = perpindahan linear (mm)

n = jumlah putaran

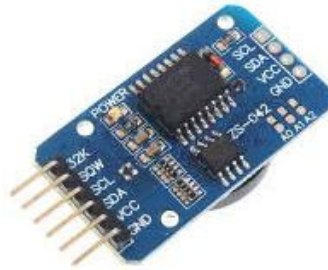
L = lead (mm/putaran)

Dengan menggunakan motor stepper sebagai penggerak, jumlah putaran dapat dikendalikan secara presisi berdasarkan jumlah pulsa yang diberikan. Sehingga perpindahan linear pembersih dapat dihitung dan dikendalikan secara akurat berdasarkan kombinasi nilai lead dan resolusi langkah motor stepper yang digunakan dengan rumus sebagai berikut :

$$nPulsa = \frac{\text{Jarak Yang Diinginkan}}{\text{Lead}} \times (\text{nilai setting pulse/revolution})$$

Dengan rumus diatas dapat ditentukan nilai parameter pulsa guna menentukan seberapa jauh *lead screw* bergerak.

2.2.10 RTC (*Real Time Clock*)



Gambar 2. 6 Modul RTC DS3231

Real Time Clock (RTC) merupakan komponen elektronik yang berfungsi untuk mencatat dan menyimpan informasi waktu secara akurat, meliputi detik, menit, jam, hari, tanggal, bulan, dan tahun, secara berkelanjutan bahkan ketika sistem utama dalam kondisi tidak bertegangan. Komponen ini bekerja menggunakan kristal osilator dengan frekuensi 32,768 kHz sebagai sumber detak (*clock source*) yang menghasilkan basis waktu presisi tinggi. Untuk mempertahankan operasi pencatatan waktu saat catu daya utama terputus, RTC dilengkapi dengan baterai cadangan berupa baterai koin (*coin cell*) tipe CR2032 yang mampu menyuplai daya dalam waktu yang sangat lama karena konsumsi daya RTC sangat rendah.

Modul RTC yang umum digunakan pada sistem berbasis mikrokontroler adalah DS3231, yang dikenal memiliki akurasi tinggi karena dilengkapi dengan kompensasi suhu internal (*temperature-compensated crystal oscillator / TCXO*)[9]. Kompensasi suhu ini memungkinkan DS3231 mempertahankan akurasi waktu hingga ± 2 ppm pada rentang suhu 0°C hingga 40°C[9], setara dengan penyimpangan kurang dari 1 menit per tahun. Komunikasi antara DS3231 dengan mikrokontroler dilakukan melalui protokol I²C (Inter-Integrated Circuit) menggunakan dua jalur, yaitu SDA (Serial Data) dan SCL (Serial Clock), sehingga hanya membutuhkan dua pin mikrokontroler dan dapat berbagi jalur komunikasi dengan perangkat I²C lainnya dalam satu sistem.

Spesifikasi teknis utama modul RTC DS3231 dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2- 1 Spesifikasi RTC DS3231

Parameter	Nilai
Tegangan Kerja	2,3 – 5,5 Volt
Akurasi (<i>dengan suhu dari 0° – +40°</i>)	±2ppm
Antarmuka	I2C
Frekuensi Osilator	32,768 kHz
Tipe Baterai Cadangan	CR2032

2.2.11 Rotary Encoder

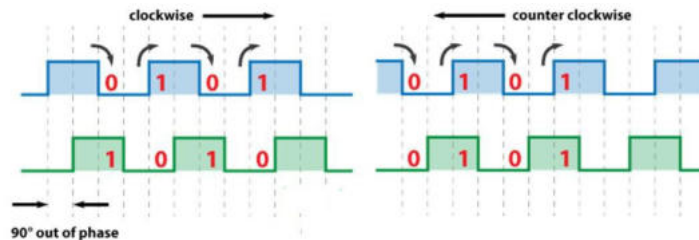


Gambar 2. 7 Rotary Encoder EC11

Rotary encoder merupakan perangkat elektromekanis yang berfungsi mengubah gerakan rotasi menjadi sinyal listrik digital. Berdasarkan prinsip kerjanya, rotary encoder dibedakan menjadi dua jenis utama yaitu encoder absolut (*absolute encoder*) dan encoder inkremental (*incremental encoder*). Encoder absolut menghasilkan kode unik untuk setiap posisi sudut sehingga posisi dapat diketahui secara langsung tanpa referensi awal, sedangkan encoder inkremental menghasilkan pulsa digital setiap kali poros berputar sejumlah sudut tertentu sehingga posisi dihitung secara akumulatif berdasarkan jumlah pulsa yang diterima.

Rotary encoder yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis encoder inkremental mekanis (*mechanical incremental rotary encoder*) tipe EC11[10]. Encoder jenis ini memiliki dua saluran keluaran, yaitu saluran A (CLK) dan saluran B (DT), yang menghasilkan sinyal kotak (*square wave*) dengan beda fase 90° (*quadrature signal*) ketika poros diputar. Arah putaran encoder dapat ditentukan berdasarkan urutan fase kedua sinyal tersebut, jika sinyal A mendahului sinyal B maka putaran searah jarum jam (*clockwise*), sedangkan jika sinyal B mendahului

sinyal A maka putaran berlawanan arah jarum jam (*counter-clockwise*). Selain dua saluran keluaran rotasi, encoder ini juga dilengkapi dengan tombol tekan (*push button*) yang aktif ketika poros ditekan ke bawah.



Gambar 2. 8 Ilustrasi sinyal keluaran quadrature rotary encoder

Spesifikasi teknis umum rotary encoder tipe EC11 yang digunakan:

Tabel 2- 2 Spesifikasi Rotary Encoder EC11

Parameter	Nilai
Tegangan Kerja	3,3 – 5,5 Volt
Resolusi	20 ppr
Antarmuka	CLK, DT, SW
Sudut mekanik	360° continue
Output	2 bit gray code

2.2.12 LCD



Gambar 2. 9 LCD 20x4

LCD 20x4 merupakan modul tampilan berbasis teknologi *Liquid Crystal Display* (LCD) dapat digunakan untuk menampilkan karakter alfanumerik sebanyak empat baris, dengan masing-masing baris terdiri dari 20 karakter. Modul display bekerja berdasarkan prinsip modulasi cahaya menggunakan kristal cair (liquid crystal). Kristal cair tidak memancarkan cahaya secara langsung, melainkan

memanipulasi cahaya dari sumber *backlight* yang berada di belakang panel untuk menghasilkan tampilan karakter maupun grafis yang dapat dibaca oleh pengguna. LCD banyak digunakan pada sistem embedded sebagai komponen antarmuka pengguna lokal karena konsumsi dayanya yang rendah, harganya yang terjangkau, serta kemudahan penggunaannya dengan berbagai platform mikrokontroler.

LCD karakter yang umum digunakan pada sistem berbasis mikrokontroler adalah tipe LCD 20×4, yang berarti mampu menampilkan 20 karakter per baris dengan total 4 baris tampilan. LCD jenis ini menggunakan kontroler HD44780 atau kompatibel, yang menyediakan antarmuka komunikasi paralel 8-bit maupun 4-bit dengan mikrokontroler. Namun untuk melakukan pneghematan pin pada mikrokontroler ditambahkan modul I2C LCD yaitu PCF8574. Penambahan modul dapat memangkas pin sehingga hanya menggunakan 2 pin yaitu SCL dan SDA untuk melakukan komunikasi dengan LCD.

Berikut spesifikasi teknis umum LCD 20×4 dengan modul I²C PCF8574 yang digunakan:

Tabel 2- 3 Spesifikasi LCD 20x4 I2C

Parameter	Nilai
Konfigurasi Tampilan	20 karakter × 4 baris
Kontroler	HD44780 atau kompatibel
Tegangan Kerja	5 Volt
Arus	110 mA
Antarmuka	I2C

Komunikasi antara mikrokontroler ESP32 dan LCD melalui modul I²C PCF8574 dilakukan dengan mengirimkan data secara serial melalui jalur SDA dan SCL. Modul PCF8574 kemudian mengkonversikan data serial tersebut menjadi sinyal paralel 4-bit yang diteruskan ke kontroler HD44780 pada LCD[11]. Proses ini ditangani secara otomatis oleh library LCD I²C yang tersedia pada ekosistem Arduino *framework*, sehingga pengguna cukup memanggil fungsi seperti `lcd.print()` dan `lcd.setCursor()` tanpa perlu mengatur sinyal paralel secara manual.

2.2.13 Sensor Intensitas UV (GUVA-S12SD)



Gambar 2. 10 Sensor GUVA-S12SD

Pengukuran intensitas radiasi ultraviolet merupakan salah satu aspek penting dalam evaluasi kerja sistem sterilisasi UV. Untuk keperluan tersebut, digunakan sensor intensitas UV yaitu GUVA-S12SD untuk mendeteksi intensitas sinar UV pada gelombang 240 – 370nm[12]. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip efek fotoelektrik, dimana foton UV yang mengenai sambungan p-n semikonduktor akan membangkitkan pasangan elektron-hole yang menghasilkan arus fotolistrik (*photocurrent*) sebanding dengan intensitas radiasi yang diterima.

Sensor GUVA-S12SD memiliki keluaran analog sehingga dapat dibaca dengan pin ADC pada mikrokontroler. Besar kecilnya tegangan yang diberikan berbanding lurus dengan intensitas UV yang diterima. Berikut rumus untuk mengkonversi dari ADC ke tegangan :

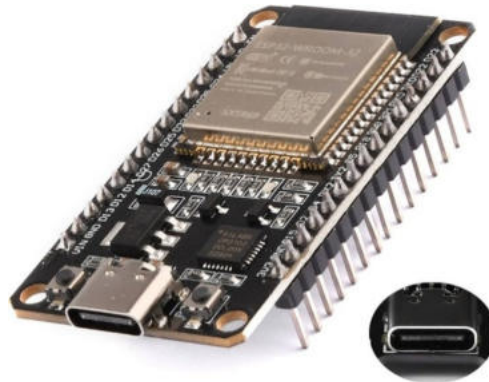
$$Sensor\ Voltage = \frac{Sensor\ ADC}{Analog\ Resolution} \times Voltage\ Reference$$

Berikut spesifikasi teknis sensor GUVA S12SD pada tabel berikut:

Tabel 2- 4 Spesifikasi Sensor GUVA-S12SD

Parameter	Nilai
Rentan Panjang Gelombang	240 – 370nm
Koefisien suhu	0.08 %/C
Antarmuka	Analog (ADC)
Tegangan Suplai	2,7 – 5.0 Volt
Sudut Kerja	100°

2.2.14 Mikrokontroller ESP32



Gambar 2. 11 ESP32-DOIT 30Pin

ESP32 merupakan mikrokontroler *System on Chip* (SoC) yang dikembangkan oleh Espressif Systems dan dirilis pada tahun 2016 sebagai penerus ESP8266. ESP32 dirancang untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT) yang membutuhkan konektivitas nirkabel dengan kemampuan komputasi yang lebih tinggi dibandingkan mikrokontroler konvensional. Keunggulan utama ESP32 terletak pada integrasi prosesor *dual-core* Xtensa LX6 dengan frekuensi clock hingga 240 MHz, konektivitas WiFi 802.11 b/g/n dan Bluetooth 4.2/BLE dalam satu chip, serta dilengkapi dengan berbagai antarmuka komunikasi dan peripheral yang lengkap[13].

Arsitektur ESP32 terdiri dari dua inti prosesor (core) yang dapat beroperasi secara independen maupun paralel. Core 0 umumnya digunakan untuk menangani operasi protokol WiFi dan Bluetooth secara internal, sedangkan Core 1 digunakan untuk menjalankan program aplikasi pengguna. Pembagian tugas antar core ini memungkinkan sistem komunikasi nirkabel berjalan tanpa mengganggu eksekusi program utama, sehingga responsivitas sistem tetap terjaga meskipun sedang melakukan transmisi data melalui jaringan internet.

Tabel 2- 5 Spesifikasi Teknis ESP32

Parameter	Nilai
Prosesor	<i>Dual-core</i> Xtensa LX6
Frekuensi Clock	240 MHz

Parameter	Nilai
SRAM	520 KB
Flash Eksternal	4 MB (pada modul)
WiFi	802.11 b/g/n (2,4 GHz)
Bluetooth	v4.2 BR/EDR dan BLE
GPIO	34 pin
ADC	18 channel, resolusi 12-bit
DAC	2 channel, resolusi 8-bit
Antarmuka	UART, SPI, I ² C, I ² S, PWM
Tegangan Operasi	3,3 Volt
Konsumsi Daya	240 mA

2.2.15 Platform IO



(a)



(b)

Gambar 2. 12 (a) VSCode code editor (b) Platform IO Extension

PlatformIO merupakan ekosistem pengembangan perangkat lunak open-source yang dirancang khusus untuk pemrograman sistem embedded dan perangkat IoT. PlatformIO beroperasi sebagai ekstensi pada Visual Studio Code (VSCode), menjadikannya lingkungan pengembangan terintegrasi (*Integrated Development Environment / IDE*) yang lengkap dengan fitur *syntax highlighting*, *code completion*, *debugging*, serta manajemen library dan dependensi secara otomatis. Dibandingkan Arduino IDE konvensional, PlatformIO menawarkan kemudahan pengelolaan proyek yang lebih terstruktur melalui file konfigurasi `platformio.ini` yang mendefinisikan platform target, board, *framework*, dan library yang digunakan dalam satu proyek[14].

Arduino *framework* merupakan lapisan abstraksi perangkat lunak (*software abstraction layer*) yang menyederhanakan pemrograman mikrokontroler dengan menyediakan fungsi-fungsi standar yang mudah digunakan tanpa harus memahami register hardware secara langsung[15]. Dua fungsi utama dalam Arduino *framework* adalah `setup()` yang dieksekusi sekali saat mikrokontroler pertama kali dinyalakan untuk inisialisasi sistem, dan `loop()` yang dieksekusi secara berulang untuk menjalankan logika program utama. Arduino *framework* awalnya dikembangkan untuk mikrokontroler AVR pada papan Arduino, namun kini telah mendukung berbagai platform mikrokontroler termasuk ESP32 melalui paket *board support package* (BSP) yang dikembangkan oleh Espressif Systems.

Keunggulan penggunaan PlatformIO dengan Arduino *framework* antara lain. Pertama, manajemen library otomatis sehingga dapat menambahkan langsung melalui file `platformio.ini` tanpa perlu mengunduh dan menginstal secara manual. Kedua, struktur proyek yang terorganisir, PlatformIO memisahkan kode sumber (*source code*), file header, dan file konfigurasi dalam direktori yang terstruktur, sehingga proyek dengan banyak komponen seperti pada penelitian ini lebih mudah dikelola dan dikembangkan. Ketiga, kompatibilitas penuh dengan ESP32 PlatformIO mendukung ESP32 secara *native* dengan *toolchain* `xtensa-esp32-elf-gcc` yang dikelola secara otomatis, sehingga proses kompilasi dan upload program ke ESP32 dapat dilakukan langsung dari VSCode tanpa konfigurasi tambahan.

2.2.16 Google Sheets & Apps Script



Gambar 2. 13 Ilustrasi protokol komunikasi ESP32 dan Google Sheets

Google Sheets merupakan aplikasi lembar kerja (spreadsheet) berbasis *cloud* yang dikembangkan oleh Google sebagai bagian dari ekosistem Google Workspace[16]. Berbeda dengan aplikasi spreadsheet konvensional yang bersifat

lokal, Google Sheets menyimpan data secara daring (*online*) pada server Google sehingga dapat diakses secara real-time dari berbagai perangkat melalui jaringan internet. Kemampuan akses multi-pengguna secara bersamaan dan pembaruan data secara langsung menjadikan Google Sheets sebagai platform yang sesuai untuk digunakan sebagai tujuan penyimpanan data (data logging) pada sistem monitoring berbasis IoT.

Google Apps Script merupakan platform skrip berbasis bahasa pemrograman JavaScript yang terintegrasi dengan layanan Google, termasuk Google Sheets. Apps Script memungkinkan pengembang membuat fungsi kustom, mengotomasi tugas, serta yang paling relevan untuk penelitian ini adalah membuat *Web App* yang berfungsi sebagai *endpoint* HTTP untuk menerima data dari perangkat eksternal[17]. Dengan men-*deploy* Apps Script sebagai *Web App*, skrip tersebut dapat menerima permintaan HTTP GET maupun POST dari perangkat IoT seperti ESP32, kemudian memprosesnya dan menuliskan data ke dalam lembar kerja Google Sheets secara otomatis.

Data yang dikirimkan ESP32 ke *endpoint* Apps Script berupa format JSON (*JavaScript Object Notation*) melalui protokol HTTPS, yang kemudian diurai (*parsed*) pada Apps Script dan dituliskan ke baris baru pada Google Sheets menggunakan fungsi `sheet.append()`. Penggunaan protokol HTTPS memastikan data yang dikirimkan terenkripsi selama proses transmisi sehingga keamanan data terjaga.