

BAB IV

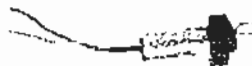
PERANCANGAN DAN PENYUSUNAN KONFIGURASI PERANGKAT OPTIK

Berdasarkan pengetahuan pada Bab III selanjutnya dilakukan perancangan konfigurasi perangkat untuk mengukur konsentrasi *Chlorella* sp. yang terlarut dalam medium cair. Pada penelitian ini, fenomena fluoresensi pada *Chlorella* sp. dibangkitkan dengan menggunakan laser dioda ungu ($\lambda = 405\text{nm}$). Laser tersebut dipilih dengan mempertimbangkan karakteristik absorpsi *Chlorella* sp. terhadap cahaya, yang memiliki absorbansi tinggi (maksimal) pada rentang 400 – 500 nm dan bentuknya yang kompak. Selanjutnya fluoresensi yang terjadi akan dipindai oleh fotodioda. Berikut adalah tahapan perancangan yang dilakukan:

4.1.1 Sumber Cahaya

Sumber cahaya yang digunakan adalah laser dioda ungu (*Ocean Optics* tipe PMMF-208G-VT) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. Dan output berkasnya telah difokuskan. Karakteristik laser dioda tersebut adalah:

- Panjang gelombang = 405nm
- Titik fokus = 15mm
- Daya maksimal = 4mW
- Tegangan bias = 6,8 – 9,0 V
- I_{th} = 25mA pada V_{bias} sebesar 7V
- Rentang injeksi arus = 15 – 60 mA
- Tipe Modulasi = TTL (0 – 5 V)
- Rentang modulasi = 0 – 1 KHz
- Metode modulasi = *direct modulation*
- Suhu operasi standard = 24 °C



Gambar 4.1 Laser dioda violet *Ocean Optics* tipe PMMF-208G-VT.

4.1.2 Detektor

Detektor yang digunakan adalah fotodiode pin dari bahan Si tipe FDS100 (Thorlabs) yang memiliki respon spektrum 350 – 900 nm dan telah dirancang khusus, yakni memiliki kelebihan dalam hal laju pendeteksian (*high speed sensing*). Perancangan fotodiode ini sebagai detektor cahaya fluoresensi, dikonfigurasi pada moda fotovoltai dalam implementasi rangkaian elektroniknya (integrasi dengan *Op-Amp*). Tujuannya adalah untuk diperoleh tingkat kesensitifan yang tinggi ketika mendeteksi sinyal intensitas cahaya fluoresensi yang rendah. Karakteristik fotodiode tersebut adalah:

- Area aktif = 13,0 mm²
- Tegangan bias maksimal = 25V
- *Risetime* = 10ns
- *Falltime* = 10ns
- *NEP* pada 900nm = $1,2 \times 10^{-14}$ W/(Hz)⁻² pada V_{bias} 20V
- *Dark current* = 20nA (maksimal) pada V_{bias} 20V
- Ambang daya maksimal (*CW*) = 100mW/cm³
- Ambang daya maksimal (pulsa 10ns) = 500mW/cm³

4.1.3 Rangkaian *Driver* Laser

Rangkaian *Driver* yang berfungsi untuk menginjeksikan arus yang cukup besar (dalam orde puluhan miliAmpere) ke laser diode dirancang dengan karakteristik sebagai berikut:

- Rentang injeksi arus = 0 – 350 mA
- Kestabilan arus = 0,001mA/Jam
- Rentang tegangan catu, V_{cc} = 3,0 – 12,0 V

Driver tersebut memanfaatkan transistor daya tipe NPN BD243C yang dirancang dengan sistem umpan balik dari IC LM358 untuk menstabilkan arus *emitter*. Gambar rangkaian dapat dilihat pada Lampiran 1.

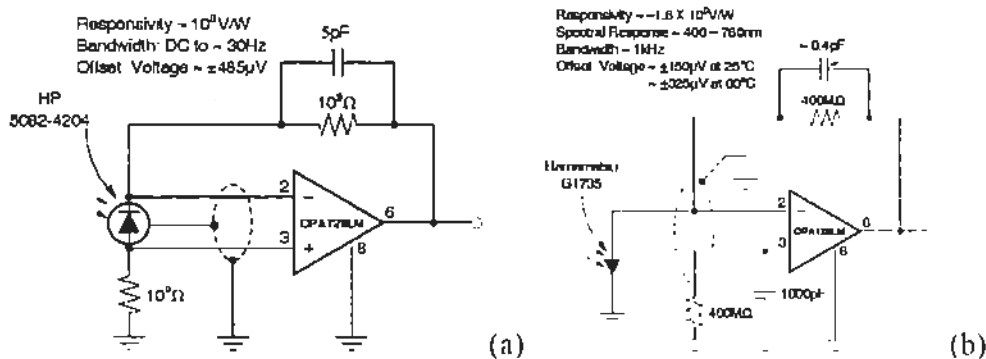
Metode penstabilan arus *emitter* yang dihasilkan oleh transistor daya pada *driver* laser adalah dengan cara memanfaatkan dua buah gerbang *Op-Amp* pada IC

LM358. Dimana besar kecilnya arus yang keluar dari *emitter* akan dikendalikan oleh tegangan yang ditala sebelum masuk *Op-Amp* I dan di perkuat oleh *Op-Amp* II selanjutnya diumpungkan ke basis *Tr* BD243C. Dengan cara demikian tegangan basis dapat membangkitkan perubahan tegangan V_{BE} yang kecil (3,0 – 4,0 V) namun dapat mengalirkan arus transien yang besar dan stabil pada rentang 0 – 350 mA.

4.1.4 Rangkaian Penguat Sinyal Analog

Pengolah sinyal terdiri dari perangkat detektor penguatan awal (*pre-amplifier*). Penguat awal dibutuhkan karena intensitas cahaya fluoresensi yang dideteksi oleh fotodiode sangat rendah (dalam skala μV) karena itu diperlukan penguatan secara bertingkat dengan memanfaatkan IC LM358, di samping berfungsi sebagai *signal conditioning*. Jenis pengolah sinyal analog dengan *Op-Amp* tersebut adalah memanfaatkan teknik *current to voltage converter*, Gambar rangkaian dapat dilihat pada Lampiran 2. Dimana dengan teknik tersebut hasil pendeteksian foton oleh fotodiode I yang berupa variasi arus akan dikonversi oleh *Op-Amp* menjadi variasi tegangan.

Jenis pendeteksian atau moda fotodetektor yang digunakan dalam rangkaian *pre-amplifier* adalah tipe fotovoltaiik. Secara umum fotodiode sebagai detektor intensitas cahaya dikonfigurasi dalam moda fotokonduktif dan menggunakan teknik *reverse bias* serta memerlukan tegangan bias eksternal, dengan meletakkan kaki anodanya langsung ke *ground* (pentanahan). Perbedaan moda fotovoltaiik dan moda fotokonduktif ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Konfigurasi fotodiode sebagai fotodetektor.
a. Moda fotovoltaiik b. Moda fotokonduktif.

Pada moda fotovoltaiik kaki anoda fotodioda tidak diletakkan pada titik *ground* melainkan dipasangkan pada input *non inverting Op-Amp*. Sedangkan katoda pada input *Op-Amp* yang *inverting*. Pada kondisi tersebut tegangan bias pada fotodioda adalah sama dengan nol, $V_{bias}=0V$. Sehingga distribusi aliran elektron-hole untuk menghasilkan arus listrik, hanya dipengaruhi oleh jumlah foton yang masuk pada daerah intrinsik fotodioda.

Mengacu pada karakteristik IC LM358 terkait dengan implementasinya pada moda fotovoltaiik, tegangan catu yang digunakan adalah seminimal mungkin namun dalam ambang tegangan kerja IC tersebut. Dengan cara demikian diperoleh *noise* sinyal *elektronik* yang minimal dan akibatnya arus yang masuk ke fotodioda sangat kecil (dalam orde nA). Sehingga arus yang dihasilkan fotodioda secara dominan adalah arus sebagai hasil konversi foton.

Kelebihan dari moda fotovoltaiik dibandingkan dengan moda fotokonduktif adalah menghasilkan karakteristik pendeteksian cahaya sebagai berikut:

- I_{dark} yang minimum
- *Noise* (derau) arus yang minimum
- Sensitifitas yang tinggi
- Spektrum cahaya (*bandwidth*) yang sempit
- Hubungan yang linier antara arus dengan intensitas cahaya

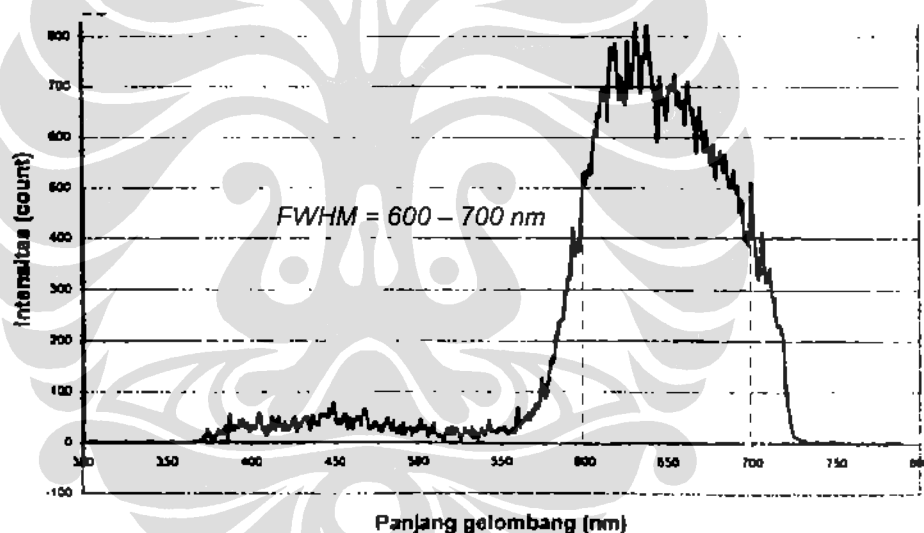
4.1.5 Wadah Ukur

Wadah ukur berupa *cuvette* merupakan wadah kultur *Chlorella* sp. yang akan disinari dengan laser dioda ungu sehingga tempat tersebut harus dirancang stabil terhadap getaran mekanik dan memiliki rentang transmitansi yang tinggi terhadap spektrum emisi fluoresensi. Tipe *cuvette* yang digunakan adalah *UV Disposable CVD-UVIS-SAM (Ocean Optics)* terbuat dari plastik. Karakteristik *cuvette* tersebut adalah:

- Rentang spektrum transmitansi = 220 – 900 nm
- Kapasitas volume maksimal = 3,0ml
- Lintasan optik = 10,0mm

4.1.6 Filter *Bandpass* Optik

Mengacu pada karakteristik spektrum fluoresensi pada *Chlorella* sp., digunakan filter *bandpass* optik yang berupa plastik transparan (warna merah), dimana respon transmisi spektrumnya adalah 600 – 700 nm pada *FWHM* dan pusat panjang gelombang transmisi pada 650nm (Gambar 4.3). Filter tersebut berfungsi untuk menyaring intensitas cahaya hamburan dari laser sehingga tidak terdeteksi oleh fotodiode. Serta berfungsi untuk meloloskan spektrum cahaya fluoresensi fitoplankton yang telah dieksitasi dengan sinar laser. Spektrum transmisi filter *bandpass* optik diukur dengan menggunakan lampu iodine yang diiluminasikan secara langsung dan keluaran cahayanya diukur dengan spektrofotometer.

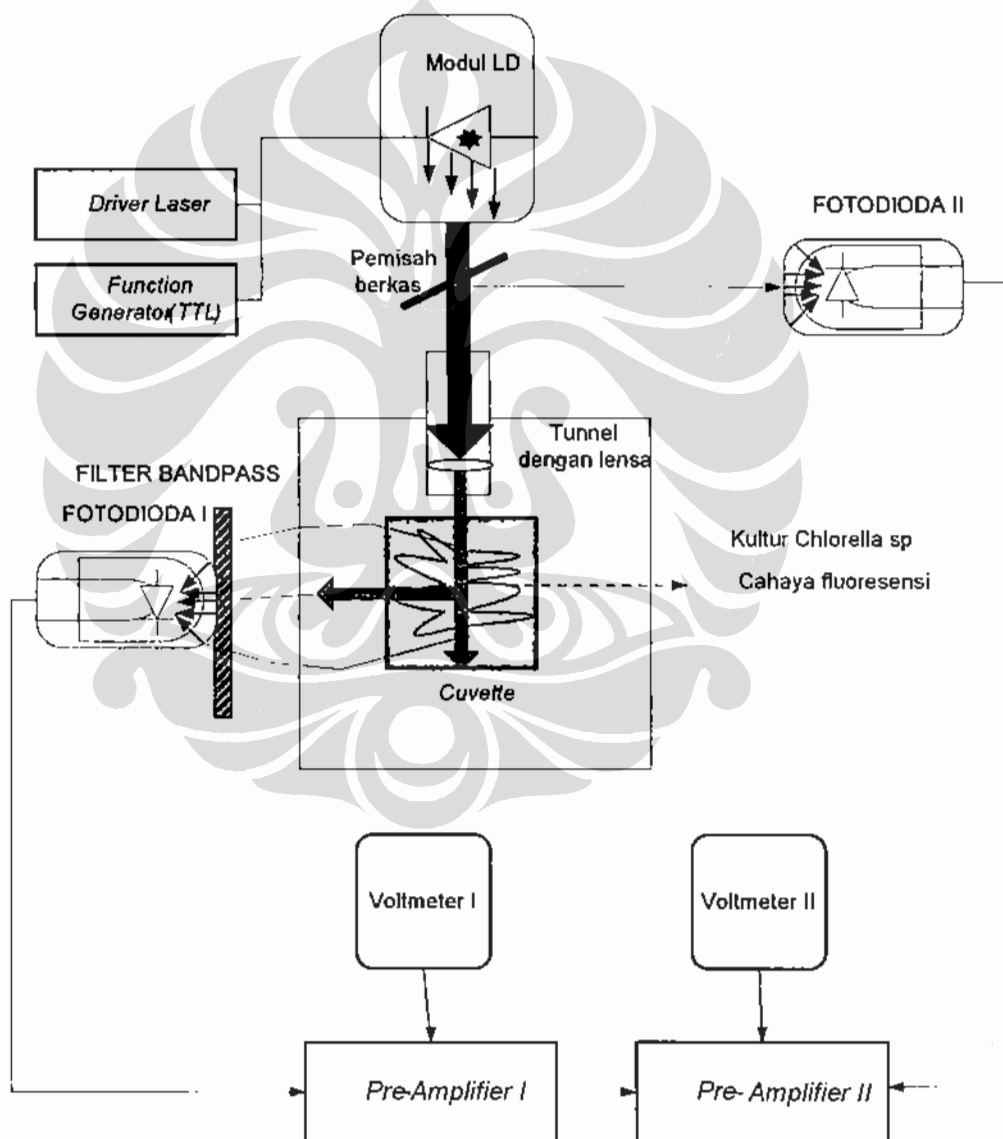


Gambar 4.3 Respon transmisi spektrum filter *bandpass* optik [35].

4.2 Susunan Konfigurasi Perangkat Optik

Set up optik yang digunakan untuk membangkitkan fenomena fluoresensi pada *Chlorella* sp. ditunjukkan pada Gambar 4.4. Sebelum menuju *cuvette* berkas laser difokuskan oleh lensa yang berdiameter 5mm dan titik fokusnya sebesar 5,0mm yang berada dalam *tunnel* (selongsong), sedangkan 2 buah fotodiode (I dan II) digunakan untuk mendeteksi intensitas fluoresensi dan memantau

kestabilan intensitas sinar laser. Fotodioda-I diposisikan tegak lurus terhadap sumbu optik. Sedangkan fotodioda-II diletakkan tegak lurus dari aksis sinar laser yang datang sebelum menuju tunnel. Pengukuran intensitas sinar laser dilakukan dengan mencuplik sebagian intensitas sinar laser melalui pemecah berkas (rasio intensitas 1:1). Tujuan dari penggunaan mini lensa tersebut adalah untuk memfokuskan dan mengarahkan berkas laser pada larutan *Chlorella* sp. Filter *bandpass* optik diletakkan antara *cuvette* dan fotodioda guna membatasi spektrum cahaya yang diterima fotodioda, sesuai dengan karakteristik transmitansinya.



Gambar 4.4 Konfigurasi perangkat optik untuk membangkitkan dan mendeteksi intensitas cahaya fluoresensi *Chlorella* sp.

Fotodioda I diletakkan sedekat mungkin dengan *cuvette* agar intensitas fluoresensi langsung terdeteksi. Untuk itu luasan *sensing active area* dirancang tepat berhadapan dengan lintasan laser pada kultur (membentuk sudut 90^0 dengan muka luasan sensing).

Reabsorpsi terjadi akibat penyerapan kultur terhadap intensitas fluoresensi [42], sebelum cahaya tersebut mencapai detektor. Untuk menghindari terjadinya reabsorpsi, volume kultur yang ditaruh dalam *cuvette* diusahakan seminimal mungkin namun masih dalam batas ketinggian lintasan berkas laser. Pada eksperimen volume kultur yang digunakan adalah sekitar 1,0ml.

Power supply regulator ditala pada rentang 7,0 – 9,0 V untuk menyalakan driver laser, bersamaan dengan itu sinyal pulsa *TTL* dari *function generator* dimasukkan ke modul *LD*. Pada rentang tegangan tersebut energi cahaya yang bisa dipergunakan untuk mengeksitasi kultur adalah 0 – 4 mJ, sedangkan lebar pulsa yang bisa ditala dari *function generator* adalah sebesar 0 – 1 ms. Cahaya fluoresensi yang terjadi akan difilter (filter optik) menuju ke fotodioda I. Hasil pendeteksian intensitas fluoresensi yang dilakukan oleh fotodioda I selanjutnya diumpankan ke *pre-amplifier I* dan diukur tegangannya oleh Voltmeter digital I. Keluaran (output) dari fotodioda II akan diumpankan ke *pre-amplifier II* yang selanjutnya dibaca oleh Voltmeter II. Fungsi dari fotodioda adalah untuk mengukur kestabilan intensitas eksitasi dari *LD*. Selanjutnya untuk mendapatkan intensitas fluoresensi dalam satuan *a.u.* dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran dari fotodioda I dengan fotodioda yang selanjutnya disebut sebagai intensitas fluoresensi ternormalisasi.

Hal penting yang perlu diperhatikan dalam perangkat detektor (fotodioda, dan *pre-amplifier* Gambar 4.4) adalah mengkarakterisasi kondisi *dark current* (I_{dark}), yakni arus yang dikeluarkan oleh detektor ketika tidak menerima intensitas cahaya (kondisi gelap). Arus tersebut muncul sebagai akibat respon elektronik ketika tidak ada sinyal cahaya. Sedapat mungkin diperoleh output 0mA dari detektor untuk kondisi gelap. Meskipun secara ideal hal tersebut tidak dapat dicapai namun dapat diminimalkan dengan cara menerapkan konsep peredaman di fotodioda, yakni dengan menggunakan kapasitor untuk meredam osilasi sinyal elektrik antara fotodioda dengan titik pentanahan (*ground*).

Jika I_{dark} minimum maka variasi tegangan dari detektor ketika mengukur intensitas fluoresensi merupakan tegangan murni hasil pemindaian intensitas fluoresensi. Namun jika I_{dark} muncul dalam orde milivol maka keluaran tegangan dari *pre-amplifier* harus dikurangkan dengan V_{dark} guna didapatkan harga intensitas cahaya yang ditangkap oleh fotodiode.

Faktor konversi penguatan *pre-amplifier I* dan *II* diperoleh dari penggunaan R_2 yang berfungsi sebagai tahanan umpan balik dan faktor penguatan. Pada eksperimen ini faktor penguatan dilakukan dengan menggunakan tahanan sebesar 10^6 Ohm. Dengan harga tahanan tersebut diperoleh konversi yang besar, yakni dari orde miliVolt – Volt. Sehingga output tegangan dari *pre-amplifier I* dan *II* adalah hasil konversi arus (dari fotodiode) yang mengalami penguatan tegangan sebesar R_2 sebagaimana dinyatakan dalam formulasi konversi arus ke tegangan, yakni sebagaimana pada persamaan 4.1 dan 4.2.

$$V_{out} = i_{fd} \cdot R_2 \dots \dots \dots (4.1)$$

$$V_{out} = 10^6 \cdot i_{fd} \dots \dots \dots (4.2)$$

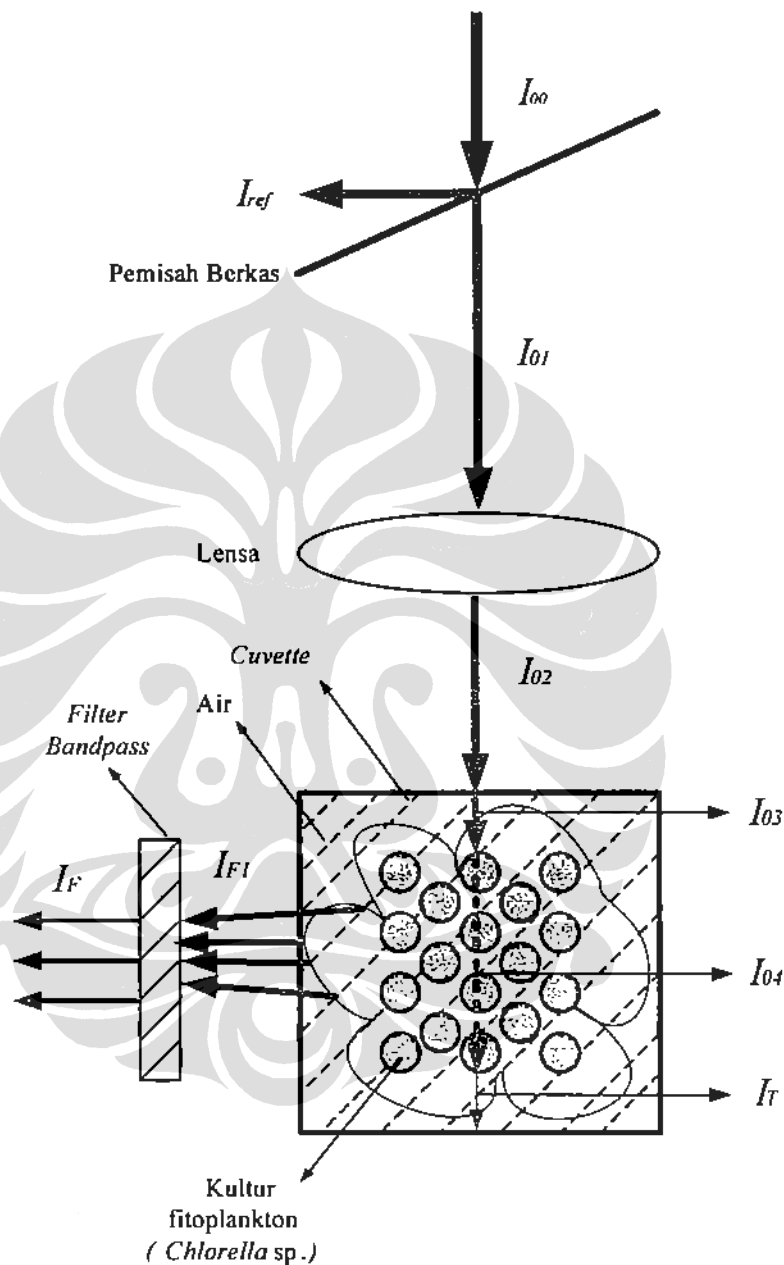
Dengan i_{fd} adalah arus dari fotodiode hasil pengkonversian foton.

Besarnya harga I_{dark} merupakan acuan untuk mengkalibrasi performansi detektor. Fotodiode FDS 100 memiliki karakteristik yang sensitif terhadap perubahan temperatur, oleh karena itu dalam eksperimen temperatur ruangan diusahakan stabil dalam suhu kamar ($24-25$ °C). Dengan kondisi I_{dark} yang stabil dapat dikatakan bahwa detektor tidak mengalami fluktuasi arus pada saat tidak merespon cahaya. Indikator I_{dark} yang stabil memberikan arti fisis bahwa respon arus elektronik *pre-amplifier* dalam kondisi stabil pula. Sehingga dalam setiap pengukuran dilakukan pengukuran I_{dark} terlebih dahulu sebelum digunakan untuk mengukur intensitas cahaya fluoresensi dari kultur.

4.3 Perumusan Besaran Cahaya Konfigurasi Perangkat

Mengacu pada langkah-langkah penurunan parameter fluoresensi di Bab 2.2. Untuk diperoleh persamaan intensitas fluoresensi ternormalisasi yang sesuai dengan konfigurasi perangkat yang telah dirancang, diperlukan analisis lintasan optik dari sinar eksitasi laser dan cahaya fluoresensi sebagaimana ditunjukkan

pada Gambar 4.5. Dan analisis jejak lintasan tersebut menggunakan asumsi bahwa pada saat kultur *Chlorella* sp. dieksitasi tidak terjadi proses hamburan sinar LD dan cahaya fluoresensi oleh air.



Gambar 4.5 Diagram lintasan optik sinar eksitasi laser dan cahaya fluoresensi pada konfigurasi perangkat.

Jejak lintasan optik dari sinar eksitasi laser (LD) yang dirancang pada konfigurasi perangkat melalui beberapa komponen yakni pemisah berkas, lensa,

dan *cuvette* (berisi air dan kultur fitoplankton/*Chlorella* sp.). Secara terperinci jejak lintasan tersebut dan analisisnya adalah:

I_{00} adalah intensitas sinar *LD* yang datang pada pemisah berkas.

I_{Ref} adalah intensitas sinar *LD* yang terpisah tegak lurus dan dijadikan sebagai berkas referensi.

I_{01} adalah intensitas sinar *LD* yang diteruskan oleh pemisah berkas.

I_{02} adalah intensitas sinar *LD* yang diteruskan oleh lensa.

I_{03} adalah intensitas sinar *LD* yang diteruskan oleh bagian sisi pertama *cuvette* yang dilalui untuk menuju kultur fitoplankton.

I_{04} adalah intensitas sinar *LD* yang diserap oleh kultur fitoplankton.

I_T adalah intensitas sinar *LD* yang diteruskan oleh kultur (tidak terserap oleh kultur fitoplankton).

Sedangkan jejak lintasan cahaya fluoresensi adalah:

I_F adalah intensitas cahaya fluoresensi yang ditransmisikan oleh *cuvette* menuju filter bandpass untuk diteruskan menuju detektor. Pada konfigurasi ini faktor redaman oleh air pada arah tegak lurus yang menuju detektor/fotodiode I diabaikan karena dimensi *cuvette* sangat tipis (1,5mm).

Perumusan cahaya untuk konfigurasi perangkat optik dapat dituliskan sebagai berikut:

$$I_{Ref} = R_{PB} \cdot I_{00} \dots\dots\dots (4.3)$$

Dengan R_{PB} adalah faktor reflektansi dari pemisah berkas.

$$I_{01} = T_{PB} \cdot I_{00} \dots\dots\dots (4.4)$$

T_{PB} adalah faktor transmitansi dari pemisah berkas.

$$I_{02} = T_L \cdot I_{01} \dots\dots\dots (4.5)$$

T_L adalah faktor transmitansi dari lensa.

$$I_{03} = T_{CV} \cdot I_{02} \left(\exp[-\alpha l] \right) \dots\dots\dots (4.6)$$

T_{CV} adalah faktor transmitansi dari *cuvette*.

α adalah faktor atenuasi dari air.

$$I_I = I_{03} \left(\exp[-Na\epsilon l] \right) \dots\dots\dots (4.7)$$

Dengan menggunakan persamaan 2.14, nilai dari intensitas sinar *LD* yang terabsorpsi kultur adalah:

$$I_{04} = I_{03} - I_T \dots\dots\dots(4.8)$$

$$I_{04} = I_{03} (1 - \exp[-Na\epsilon l]) \dots\dots\dots(4.9)$$

Mensubstitusikan persamaan 4.4 - 4.6 ke persamaan 4.9, diperoleh:

$$I_{04} = T_{PB} \cdot T_L \cdot T_{CV} \cdot I_{00} \exp(-\alpha l) (1 - \exp(-Na\epsilon l)) \dots\dots\dots(4.10)$$

Selanjutnya persamaan 4.10 disederhanakan dengan menggunakan pendekatan deret Mc Laurin, menghasilkan bentuk sebagai berikut:

$$\exp(-Na\epsilon l) = 1 - Na\epsilon l \dots\dots\dots(4.11)$$

$$\exp(-\alpha l) = 1 - \alpha l \dots\dots\dots(4.12)$$

Selanjutnya dengan mensubstitusikan persamaan 4.11 dan 4.12 ke persamaan 4.10 diperoleh:

$$I_{04} = T_{PB} \cdot T_L \cdot T_{CV} \cdot I_{00} (1 - \alpha l) (1 - (1 - Na\epsilon l)) \dots\dots\dots(4.13)$$

$$I_{04} = T_{PB} \cdot T_L \cdot T_{CV} \cdot I_{00} (1 - \alpha l) (Na\epsilon l) \dots\dots\dots(4.14)$$

Mengacu persamaan 2.12, bahwa intensitas fluoresensi, I_F sebanding dengan intensitas sinar LD yang terabsorpsi oleh kultur dan mengalami konversi emisi fluoresensi oleh faktor Φ_F serta analisis jejak lintasan cahaya fluoresensi, I_F dapat dinyatakan dalam bentuk sebagai berikut:

$$I_F = k \Phi_F \cdot T_{CV} \cdot T_{FO} \cdot I_{04} \dots\dots\dots(4.15)$$

Dimana T_{FO} adalah faktor transmitansi dari filter *bandpass*.

Dan dengan mensubstitusikan persamaan 4.14 ke persamaan 4.15, diperoleh:

$$I_F = k \cdot \Phi_F \cdot T_{PB} \cdot T_L \cdot T_{CV}^2 \cdot T_{FO} \cdot I_{00} (1 - \alpha l) \cdot (Na\epsilon l) \dots\dots\dots(4.16)$$

Selanjutnya intensitas fluoresensi ternormalisasi dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{I_F}{I_{ref}} = k \cdot \Phi_F \cdot T_{PB} \cdot T_L \cdot T_{CV}^2 \cdot T_{FO} \cdot (1 - \alpha l) \cdot (Na\epsilon l) \dots\dots\dots(4.17)$$

Karena dalam konfigurasi perangkat pengukuran intensitas fluoresensi yang terukur selalu dibandingkan dengan intensitas referensi, I_{Ref} persamaan 4.3 disubstitusikan ke persamaan 4.17, didapatkan:

$$\frac{I_F}{I_{ref}} = k \cdot \Phi_F \cdot R_{PB} \cdot T_{PB} \cdot T_L \cdot T_{CV}^2 \cdot T_{FO} \cdot (1 - \alpha l) \cdot (Na\epsilon l) \dots\dots\dots(4.18)$$

Dalam eksperimen semua faktor dalam persamaan 4.18 merupakan harga konstan kecuali N (konsentrasi kultur) sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{I_F}{I_{K\epsilon l}} = K \cdot N \dots\dots\dots(4.19)$$

Dengan K adalah:

$$K = k \cdot \Phi_F \cdot R_{pH} \cdot T_{pH} \cdot T_L \cdot T_{CV}^2 \cdot T_{FO} \cdot (1 - \alpha l) \cdot (a\epsilon l) \dots\dots\dots(4.20)$$

Dan persamaan 4.19 menyatakan bahwa intensitas fluoresensi ternormalisasi adalah fungsi dari N yang besarnya tergantung dengan faktor pengali K . Dimana harga K ditentukan oleh harga konstanta-konstanta pada komponen dan jenis fitoplankton yang digunakan. Ditunjukkan bahwa intensitas fluoresensi ternormalisasi berbanding lurus dengan konsentrasi sel, yaitu meningkat secara linier seiring dengan meningkatnya konsentrasi sel.

