



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SUPERPOSISI DUA LASER SEMIKONDUKTOR  
TERPOLARISASI PADA KOMUNIKASI *FREE SPACE*  
*OPTICS* UNTUK MENINGKATKAN INTENSITAS  
TRANSMISI**

**TESIS**

**UMI MURDIKA**

**1006788901**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM PASCA SARJANA  
DEPOK  
JUNI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SUPERPOSISI DUA LASER SEMIKONDUKTOR  
TERPOLARISASI PADA KOMUNIKASI *FREE SPACE*  
*OPTICS* UNTUK MENINGKATKAN INTENSITAS  
TRANSMISI**

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik**

**UMI MURDIKA**

**1006788901**

**FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
KEKHUSUSAN TEKNIK TELEKOMUNIKASI  
DEPOK  
JUNI 2012**

**Universitas Indonesia**

## LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Umi Murdika**

**NPM : 1006788901**

**Tanda Tangan :** 

**Tanggal : Juni 2012**

## LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :  
Nama : Umi Murdika  
NPM : 1006788901  
Program Studi : Teknik Telekomunikasi  
Judul Tesis :

### SUPERPOSISI DUA LASER SEMIKONDUKTOR TERPOLARISASI PADA KOMUNIKASI *FREE SPACE* *OPTICS* UNTUK MENINGKATKAN INTENSITAS TRANSMISI

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Kekhususan Teknik Telekomunikasi, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

#### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Purnomo Sidi Priambodo Ph.D

*Priambodo*  
*Andy*

Penguji : Prof. Dr. Harry Sudibyo, DEA

( )

Penguji : Dr. Ir Dodi Sudiana M.Eng

( )

Penguji : Ir. Arifin Djauhari M.T

( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juni 2012

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah syukur penulis panjatkan kepada ALLAH SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Program Studi Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

- (1) Ir. Purnomo Sidi Priambodo M.Sc. Ph.D selaku pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini.
- (2) Keluargaku, khususnya Suamiku dan Anakku tersayang yang telah memberikan bantuan dan dukungan moral.
- (3) Pak Ucuk Darussalam, S.T. M.T dan Ibu Tri Damayanti, S.T yang telah memberikan bantuannya dalam eksperimen dan proses menyelesaikan penulisan ini.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga makalah penelitian ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Umi Murdika  
NPM : 1006788901  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Tesis

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

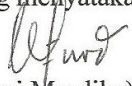
**Superposisi Dua Laser Semikonduktor Terpolarisasi pada Komunikasi *Free Space Optics* Untuk Meningkatkan Intensitas Transmisi**

berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmediakan/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 26 Juni 2012

Yang menyatakan

  
(Umi Murdika)

## ABSTRAK

Nama : Umi Murdika

Program Studi : Teknik Telekomunikasi

Judul : Superposisi Dua Laser Semikonduktor Terpolarisasi pada Komunikasi *Free Space Optics* Untuk Meningkatkan Intensitas Transmisi

Perkembangan teknologi multimedia saat ini, mendorong peningkatan kebutuhan bandwidth dan kecepatan transfer yang tinggi. Kemudahan instalasi dan media komunikasi yang fleksibel menjadi syarat dalam mengakomodasi perkembangan tersebut. Pilihan teknologi yang ada misalnya broadband nirkabel, namun penelitian saat ini banyak yang mengembangkan teknologi menggunakan cahaya yang ditransmisikan dalam ruang bebas yang dikenal sebagai *Free Space Optical Communications* atau FSOC.

FSOC adalah teknologi *line-of-sight* yang menggunakan cahaya yang dipancarkan dalam ruang bebas. Keuntungan teknologi FSOC, yaitu tidak membutuhkan media waveguide, sehingga fleksibilitasnya tinggi, dan bandwidth tinggi serta biaya lebih ekonomis dan tanpa perlu lisensi spektrum dibandingkan media transmisi lain. Namun, kelemahan teknologi FSOC ini membutuhkan sumber cahaya berdaya tinggi untuk mengompensasi penyerapan dan hamburan yang terjadi pada medium propagasi. Sumber cahaya optik seperti laser/LED berdaya tinggi yang ada masih terbatas sehingga peralatan tersebut menjadi mahal.

Pada penelitian ini, untuk mengantisipasi kebutuhan laser berdaya tinggi, diusulkan menggabungkan beberapa laser berdaya rendah yang lebih ekonomis namun berdaya guna tinggi jika digabungkan. Diharapkan dari penggabungan ini diperoleh sumber cahaya koheren, kontinyu dan berdaya tinggi. Superposisi dua cahaya laser yang berbeda wavelength memunculkan masalah beat frekuensi yang tidak diharapkan. Karenanya dilakukan pengaturan terhadap polarisasi untuk meminimalisasi efek beat frekuensi tersebut. Input cahaya laser digabungkan sesuai metode superposisi menggunakan coupler dan dihubungkan pada fiber optik menuju *beam expander* pada sisi kirim. Selanjutnya menganalisa beat frekuensi dan beat polarisasi serta pengaruhnya terhadap maksimum *modulation rate*. Sumber cahaya laser berdaya tinggi tersebut berpotensi besar sebagai sumber cahaya optik pada sistem *Terrestrial Free Space Optical Communications*.

**Kata kunci:** *line-of-sight, beam expander, modulation rate, terrestrial free space optical communications.*

## ABSTRACT

Name : Umi Murdika

Study Program : Telecommunication

Title : Superposition of Two Polarized Semiconductor Laser for *Free Space Optical Communications* to Increase Transmission Intensity.

Recent development of multimedia technology, present demand on higher bandwidth and faster transfer rate is increasing. Furthermore, ease of installation and flexibility of communication medium to accommodate network topology change, add complexities to the solution of the aforementioned requirements. Although broadband wireless communication has been taken as an option, recent works also reveal the implementation possibility of transmitting lights in a free space for data communication, which is widely known as Free Space Optical Communications (FSOC).

FSOC is a line-of-sight technology utilizing lights as communication media traversed in a free space. This technology does not require a waveguide medium, hence it has a higher flexibility with higher bandwidth. In addition, no special license to secure the frequency spectrum is required as applies to other wireless technology. On the other hand, a high power supply is necessary for the light source to compensate absorption and dispersion during light transmission, which leads to higher cost of building such system. This remains a research challenge to develop a high power yet cost-effective light source.

In this research, we propose a new approach in building a high power laser source by combining several low power and inexpensive laser sources. It is expected that a coherent, continuous and high power laser source can be realized from this combination. Superposition of two different wavelength laser light raises the issue of the beat frequency is not expected. Therefore made polarization arrangements to minimize the effect of the beat frequency. Input lasers are combined according to superposition method using coupler and then connected through a fiber optic link to beam expander at the sending end. Beat frequency and beat polarization are then analyzed to investigate their effects to maximum modulation rate. The obtained high power laser can then be utilized as a light source for a terrestrial free-space optical communications.

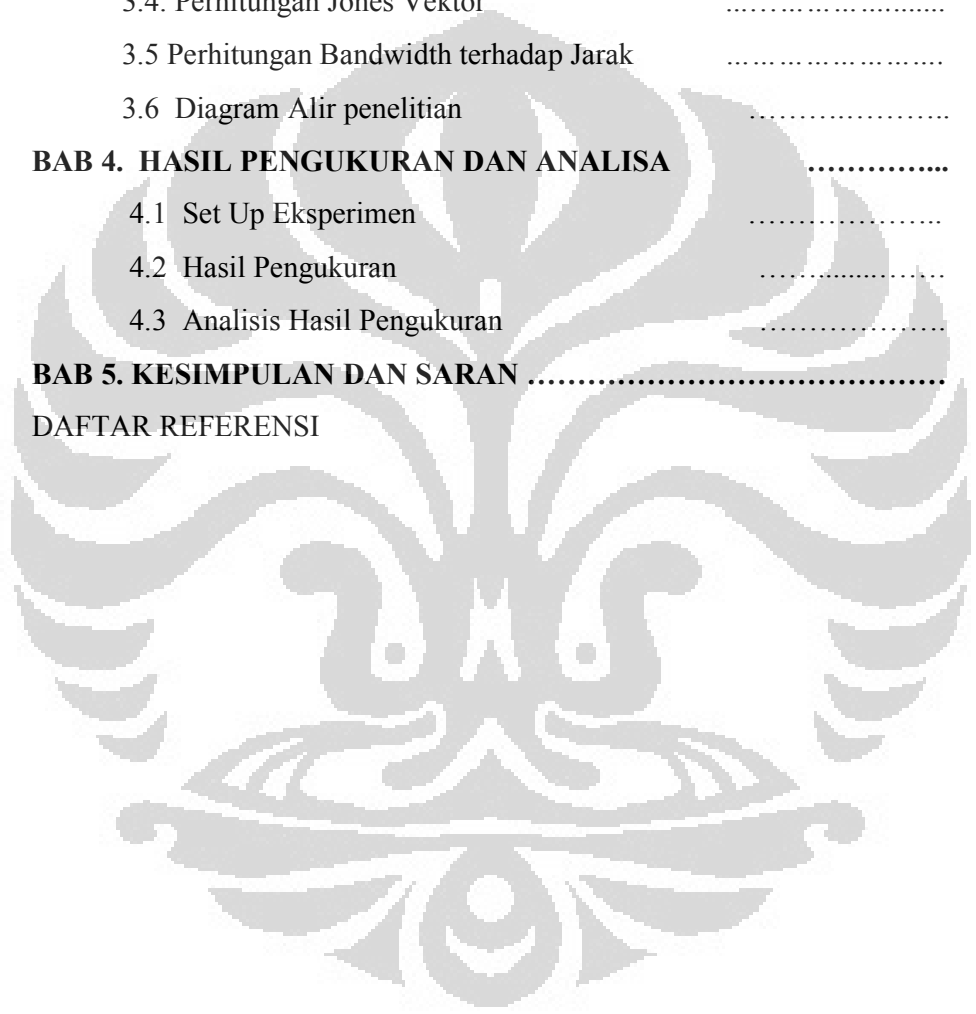
**Keyword:** *line-of-sight, beam expander, modulation rate, terrestrial free space optical communications.*



## DAFTAR ISI

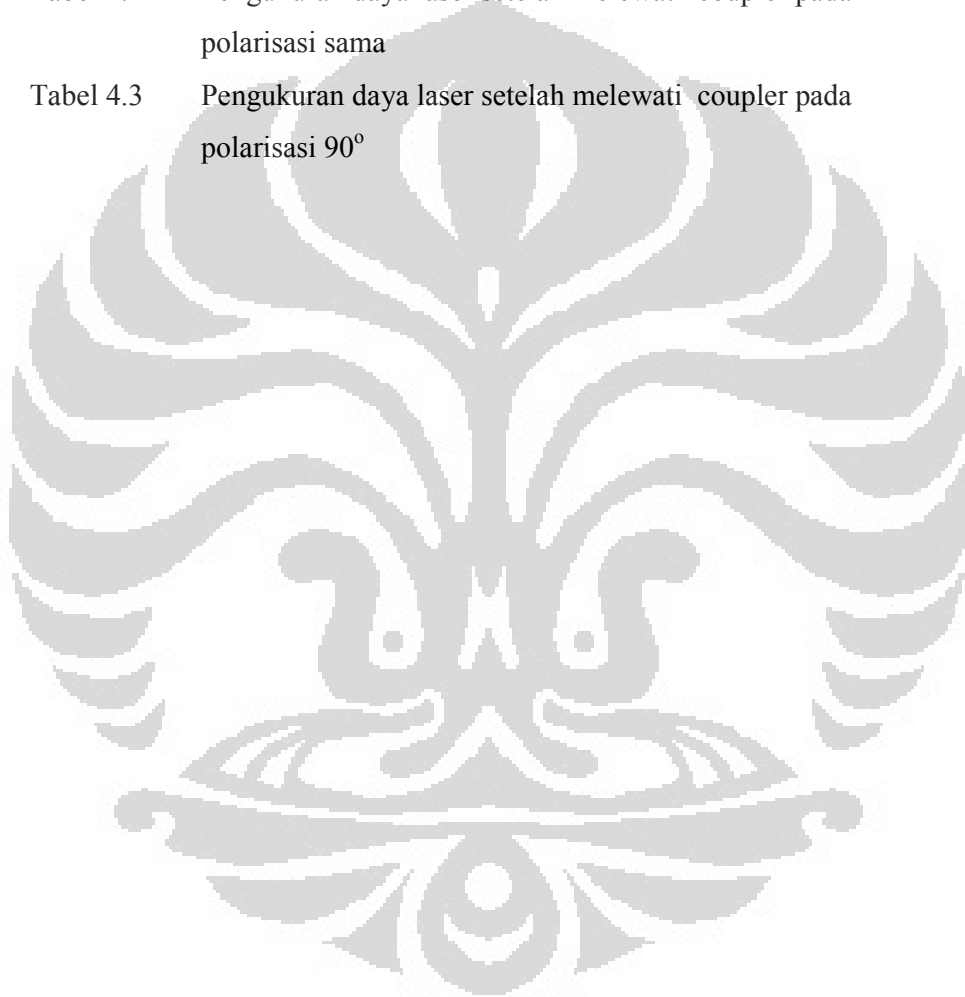
|  |          |
|--|----------|
| HALAMAN JUDUL .....  | i        |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....  | ii       |
| HALAMAN PENGESAHAN .....   | iii      |
| KATA PENGANTAR .....   | iv       |
| HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....   | v        |
| ABSTRAK .....  | vi       |
| ABSTRACT .....   | vii      |
| DAFTAR ISI .....   | viii     |
| DAFTAR TABEL .....   | x        |
| DAFTAR GAMBAR .....  | xi       |
| <b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 Latar Belakang .....   | 1        |
| 1.2 Tujuan Penulisan .....   | 6        |
| 1.3 Batasan Masalah .....  | 6        |
| 1.4 Sistematika Penulisan .....  | 7        |
| <b>BAB 2. PENGGABUNGAN SUMBER LASER DENGAN METODA<br/>    SUPERPOSISI UNTUK KOMUNIKASI FREE SPACE<br/>    OPTICS (FSO) .....</b> | <b>8</b> |
| 2.1 Latar Belakang <i>Free Space Optic Communications</i> (FSOC) .....   | 8        |
| 2.2 Superposisi Sumber Laser.....  | 9        |
| 2.3 Sumber Cahaya Optik .....  | 11       |
| 2.4 Polarisasi Cahaya .....  | 12       |
| 2.5 Jones Vektor .....   | 15       |
| 2.6 Intensitas Sumber Optik .....  | 17       |
| 2.7 Aspek pemanfaatan multimode fiber untuk transmisi  |          |
| Sinyal optik dari in-house menuju lensa kolimator ( $T_x$ ) .....  | 18       |
| 2.7.1 Modal Dispersi .....   | 19       |
| 2.7.2 Bandwidth terhadap Jarak .....   | 20       |

|  |       |    |
|--|-------|----|
| <b>BAB 3. PEMODELAN DAN SIMULASI</b>                   | ..... | 24 |
| 3.1 Pemodelan Sistem                                   | ..... | 24 |
| 3.2 Simulasi Superposisi terhadap aspek Polarisasi     | ..... | 25 |
| 3.3. Hasil Simulasi                                    | ..... | 30 |
| 3.2.1. Superposisi dengan polarisasi sama              | ..... | 30 |
| 3.2.2 Superposisi dengan Polarisasi berbeda $90^\circ$ | ..... | 32 |
| 3.4. Perhitungan Jones Vektor                          | ..... | 35 |
| 3.5 Perhitungan Bandwidth terhadap Jarak               | ..... | 36 |
| 3.6 Diagram Alir penelitian                            | ..... | 39 |
| <b>BAB 4. HASIL PENGUKURAN DAN ANALISA</b>             | ..... | 44 |
| 4.1 Set Up Eksperimen                                  | ..... | 39 |
| 4.2 Hasil Pengukuran                                   | ..... | 43 |
| 4.3 Analisis Hasil Pengukuran                          | ..... | 45 |
| <b>BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN</b>                     | ..... | 49 |
| <b>DAFTAR REFERENSI</b>                                |       |    |



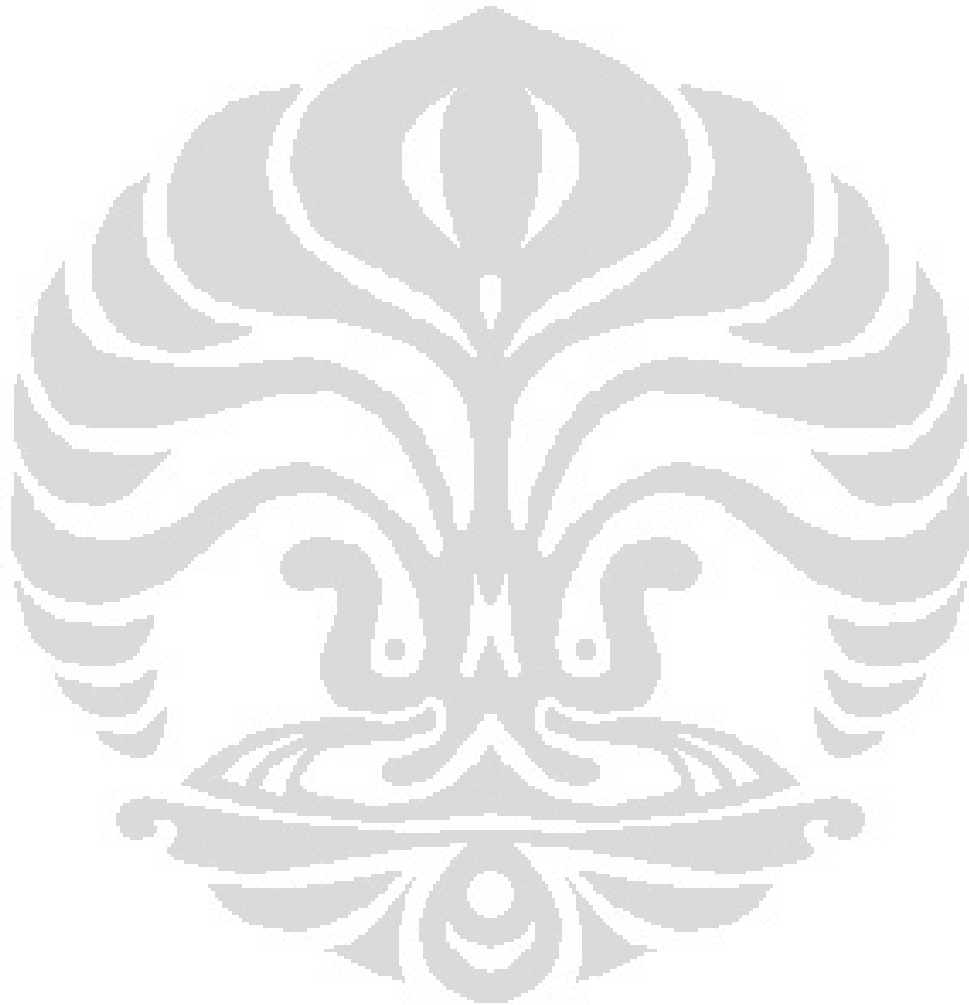
## Daftar Tabel

|           |   | Halaman |
|-----------|---|---------|
| Tabel 2.1 | Jones Vector untuk berbagai kondisi polarisasi                            | 17      |
| Tabel 4.1 | Daya (Power) laser Semikonduktor dan HeNe                                 | 43      |
| Tabel 4.2 | Pengukuran daya laser setelah melewati coupler pada polarisasi sama       | 44      |
| Tabel 4.3 | Pengukuran daya laser setelah melewati coupler pada polarisasi $90^\circ$ | 45      |



## Daftar Gambar

|             |  | Halaman |
|-------------|--|---------|
| Gambar 1.1  | Perbandingan sebaran berkas dari planet Saturnus menggunakan teknologi RF dengan teknologi optik | 3       |
| Gambar 2.1  | Superposisi dua gelombang dengan polarisasi sama   | 11      |
| Gambar 2.2  | Medan listrik membentuk ellips   | 14      |
| Gambar 2.3  | Polarisasi Linier  | 14      |
| Gambar 2.4  | Polarisasi Sirkuler  | 15      |
| Gambar 2.5  | Pelebaran pulsa akibat disperse modal  | 20      |
| Gambar 2.6  | Panjang fiber max L terbatas disperse terhadap Bit rate  | 21      |
| Gambar 3.1  | Pemodelan Ideal Transmitter pada system FSOC   | 22      |
| Gambar 3.2  | Pemodelan unit utama superposisi sumber laser  | 22      |
| Gambar 3.3  | Superposisi dua gelombang dengan frekuensi berbeda   | 24      |
| Gambar 3.4  | Spektrum frekuensi sinyal  | 24      |
| Gambar 3.5  | Superposisi dua gelombang termodulasi  | 25      |
| Gambar 3.6  | Energi sinyal E untuk perioda $T_1 \rightarrow T_2$  | 26      |
| Gambar 3.7  | Prosentase deviasi terhadap beat energi  | 26      |
| Gambar 3.8  | Superposisi dengan polarisasi sama   | 29      |
| Gambar 3.9  | Polarisasi sirkuler ke kanan   | 29      |
| Gambar 3.10 | Hasil simulasi beat polarisasi   | 30      |
| Gambar 3.11 | Perubahan polarisasi saat dua sumber saling orthogonal   | 31      |
| Gambar 3.12 | Arah perputaran polarisasi   | 31      |
| Gambar 3.13 | Respon waktu multimode pada panjang fiber $L=1.5\text{Km}$                                       | 33      |
| Gambar 3.14 | Pulsa yang mengalami disperse modal  | 34      |
| Gambar 3.15 | Diagram alir Penelitian  | 35      |
| Gambar 4.1  | Komponen penyusun system   | 41      |
| Gambar 4.2  | Set Up Peralatan pada penggabungan dua sumber laser Semikonduktor                                | 41      |
| Gambar 4.3  | Pengukuran daya laser saat digabung dengan coupler   | 41      |
| Gambar 4.4  | Set Up Peralatan pada penggabungan dua sumber laser HeNe   | 42      |
| Gambar 4.5  | Mekanisme pengukuran daya laser.   | 44      |



## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1. Latar Belakang

Teknologi *Free-Space Optical Communications* (FSOC) yang berkembang saat ini bukanlah teknologi baru, tapi teknologi ini pernah dikembangkan sekitar 30 tahun lalu, dimana pada saat itu FSO digunakan untuk konektivitas berkecepatan tinggi untuk jarak yang pendek. Saat ini teknologi FSOC telah berkembang dan mampu menghantarkan data *full-duplex* dalam ukuran *gigabit-per-second* untuk data suara maupun video untuk area metropolitan [3]. Kebutuhan bandwidth yang meningkat pada sistem komunikasi saat ini memunculkan dorongan untuk terus melakukan penelitian dalam komunikasi optik. Persoalannya adalah ketersediaan bandwidth yang besar pada backbone fiber optik masih belum bisa menyentuh pengguna akhir dalam jaringan akses karena keterbatasan bandwidth dari teknologi kawat tembaga yang menghubungkan pengguna akhir untuk backbone ini. Untuk itu teknologi *terrestrial free space optic* diharapkan mampu mengatasi kemacetan ini.

*Terrestrial Free-space optics* (FSO) adalah teknologi yang relatif fleksibel dan menjanjikan mampu menawarkan nilai keuntungan yang lebih ekonomis karena dapat digunakan untuk sambungan kecepatan tinggi. *Free-space optics* (FSO) adalah sistem *point-to-point* dan *line-of-sight* yang menggunakan laser untuk koneksi bandwidth optik yang memungkinkan konektivitas tanpa memerlukan kabel fiber optik, dengan kata lain mengamankan lisensi spektrum. *Terrestrial free space optic* memerlukan cahaya yang dapat dikolimasi yaitu menggunakan dioda emisi cahaya (LEDs) maupun laser. Penggunaan laser adalah konsep sederhana yang mirip dengan transmisi optik menggunakan kabel fiber optik, yang membedakan hanyalah medium propagasi yang digunakan.

Teknologi terrestrial FSO ini relatif sederhana, yang didasarkan atas koneksi antara unit FSO, terdiri dari sebuah *transceiver* optik dengan pemancar laser dan sebuah penerima. Namun dalam perjalanannya terdapat hal yang menjadikan

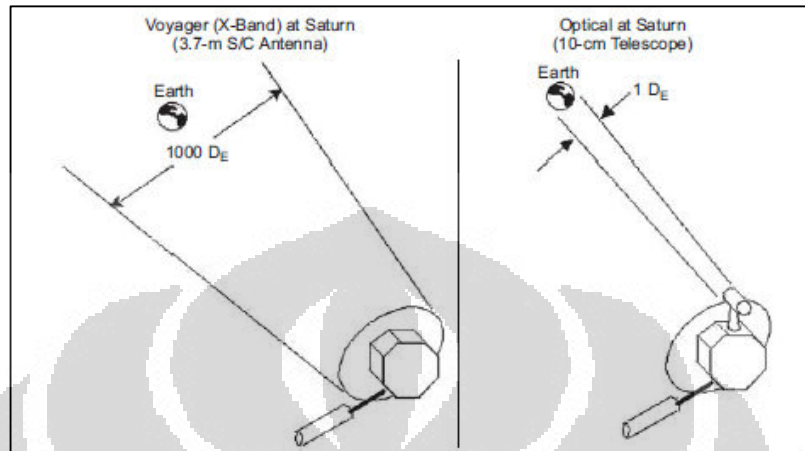
teknologi ini sedikit terkendala. Pada setiap unit terrestrial FSO ini membutuhkan sumber cahaya laser berdaya tinggi, sementara harga untuk jenis laser ini masih tinggi dan masih sulit ditemui dipasar. Kendala lainnya yang sangat penting adalah adanya gangguan pengaruh atmosfer yaitu terjadinya redaman (*attenuasi*) dalam proses perambatan cahaya berupa penyerapan (*absorption*) dan hamburan (*scattering*) yang ternyata memberikan dampak yang cukup signifikan dalam pengiriman data optik tersebut.

Perkembangan komunikasi terrestrial FSO ini tidak terlepas dari ditemukannya sumber optik yang sangat penting yaitu laser. Penggunaan laser pertama didemonstrasikan yaitu menggunakan GaAs *light emitting diode* untuk transmisi spektakuler sinyal televisi sepanjang jarak 48 km yang dilakukan oleh laboratorium MIT Lincoln tahun 1962 [4]. Teknologi *Free Space Optic* terus diteliti dan dikembangkan untuk aplikasi pada ruang angkasa (*deep space communications*) oleh NASA dengan programnya *Mars Laser Communication Demonstration* (MLDC) [4]. *Deep-space communications* yang menggunakan komunikasi optik, memungkinkan lebih banyak data yang dapat ditransmisikan dalam suatu misi ruang angkasa dibandingkan dengan teknologi frekuensi radio (*microwave*).

Komunikasi menggunakan teknologi RF untuk jarak jauh melalui ruang angkasa sangatlah sulit. Semakin bertambah jarak maka akan semakin melemah intensitas sinyal yang dapat ditransmisikan. Karakteristik ini merupakan batasan ukuran kapasitas informasi yaitu *bandwidth distance product* (perkalian antara jarak dan lebar pita) dimana *bandwidth* akan berkurang seiring bertambahnya jarak yang ditempuh yang dinyatakan MHz.km.

Penggunaan frekuensi yang lebih tinggi membuka harapan baru misalnya untuk komunikasi ruang angkasa. Perubahan frekuensi komunikasi ruang angkasa dari 8 GHz ke 32 GHz secara teoritis membawa perbaikan yang signifikan. Sebagai perbandingan, cahaya dengan panjang gelombang 1  $\mu\text{m}$  (frekuensi  $3 \times 10^{14}$  Hz) yang dikirimkan ke planet Bumi dari orbit planet Saturnus melalui teleskop dengan diameter 10cm akan terdispersi dengan luasan selebar diameter bumi. Sementara teknologi konvensional dengan frekuensi 8GHz dengan jarak

yang sama akan mengakibatkan berkas komunikasi terdispersi dengan luasan selebar 1000 kali diameter bumi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar (1-1).



Gambar 1.1. Perbandingan sebaran berkas dari planet Saturnus menggunakan teknologi RF dengan teknologi optik [5].

Penggunaan teknologi optik yang notabene memiliki frekuensi lebih tinggi lebih menjanjikan. Akibat semakin tinggi frekuensi yang dapat dihasilkan maka panjang gelombang akan semakin kecil sehingga memberikan bandwidth yang besar dan akan memperkecil ukuran antena yang dibutuhkan, serta mudah dalam mengatur kolimasinya. Namun ada dampak yang dapat ditimbulkan akibat penggunaan frekuensi tinggi ini yaitu akan meningkatkan penyerapan dan hamburan.

Komunikasi menggunakan sistem terestrial FSO (komunikasi yang paralel dengan *earth surface*), untuk jarak dekat dapat dimungkinkan selama tidak terdapat gangguan atmosfer sehingga tampak ada garis yang jelas terlihat antara sumber dan tujuan dengan daya pemancar yang cukup. Namun hal ini sulit ditemui untuk kondisi atmosfer yang jernih tanpa gangguan untuk jarak pancar yang cukup panjang. Dalam perjalanan cahaya melintasi atmosfer banyak kendala yang dihadapi yaitu terjadinya redaman (*attenuation*) berkas cahaya akibat adanya penyerapan (*absorption*), dan hamburan (*scattering*) dan juga terjadi turbulensi atmosfer yang mengakibatkan munculnya efek sintilasi. Untuk itu diperlukan



penanganan serius karena hal tersebut sangat mempengaruhi proses pengiriman data optik [6].

Penyerapan (*absorption*) yang terjadi merupakan hasil dari interaksi radiasi antar foton dan atom-atom atau molekul yang mengakibatkan hilangnya foton dan meningkatkan temperatur [7]. Penyerapan (*absorption*) akan menyebabkan daya laser berkurang secara bertahap sehingga mempengaruhi keberadaan cahaya laser pada link terestrial FSO. Temperatur dan tekanan atmosfer sangat berpengaruh pada besarnya absorpsi yang terjadi [7]. Pada daerah terestrial yang meliputi daerah urban dan sub urban, dimana pada daerah urban yang jumlah penduduknya lebih padat memiliki tingkat polusi gas (CO<sub>2</sub>) serta uap air yang tinggi lebih tinggi dibandingkan sub-urban, hal ini akan sangat mempengaruhi tingkat penyerapan (*absorption*) yang terjadi.

Hamburan (*scattering*) terjadi ketika partikel berukuran lebih besar dari panjang gelombang cahaya mengubah arah perambatan gelombang dengan mengirim ulang sinyal ke segala arah. Apabila jumlah partikel yang menghalangi sangat banyak, daya pengirim akan berkurang dalam jumlah besar. Pada daerah urban memiliki *noise ground temperatur* yang cukup tinggi sementara pada sub-urban hanya sedikit dipengaruhi *noise ground temperatur*.

Kinerja sistem FSO juga sangat dipengaruhi efek sintilasi (*scintillation*) akibat turbulensi atmosfer (*atmospheric turbulence*) dan ketidak seragaman (*inhomogeneity*) suhu atmosfer yang menimbulkan berbagai efek yang dapat merusak berkas cahaya yang dikirimkan pada link terestrial FSO. Akibat Efek sintilasi ini akan menyebabkan terjadinya sinyal fading, karena interferensi konstruktif dan destruktif dari cahaya optik melintasi atmosfer [6].

Kendala yang dihadapi oleh FSO akibat adanya penyerapan (*absorption*) dan hamburan (*scattering*) dan sintilasi ini harus diantisipasi dengan menyediakan cahaya dengan intensitas tinggi pada sisi pengiriman. Untuk memperoleh berkas cahaya tersebut perlu adanya sumber laser berdaya relatif tinggi (~0,25W). Untuk itulah pada penelitian ini diusulkan menggunakan sumber optik dari beberapa laser yang digabungkan. Laser yang dipilih memiliki panjang gelombang 1550nm

karena teknologi pendukung untuk panjang gelombang tersebut telah cukup memadai dan daya yang tinggi diizinkan pada panjang gelombang tersebut.

Untuk menyalahi kebutuhan laser berdaya tinggi yang belum tersedia di pasar, maka pada penelitian ini digunakan konsep penggabungan berkas cahaya (*beam combining*). Penggabungan ini dilakukan dengan mensuperposisikan sumber cahaya laser berdaya rendah yang memiliki panjang gelombang tidak identik, yang tujuannya tidak hanya untuk memperoleh daya output yang besar, tetapi juga untuk menjaga kualitas berkas, sehingga kecerahan akan meningkat sebanding daya outputnya.

## 1.2. Tujuan Penulisan

Pada penelitian ini, akan dilakukan analisa terhadap superposisi dua berkas cahaya laser semikonduktor berdaya rendah untuk diharapkan dapat menghasilkan sumber cahaya laser berdaya tinggi, yang kemudian dimanfaatkan sebagai sumber cahaya optik pada teknologi *Terrestrial Free Space Optical Communications*. Analisa juga dilakukan terhadap kapasitas bandwidth yang dihasilkan oleh pengaruh superposisi cahaya laser tersebut. Untuk mencapai tujuan tersebut, beberapa langkah kerja dibuat sebagai berikut:

1. Memodelkan dan menganalisa penggabungan dua laser yang tidak identik dalam panjang gelombang, sehingga menghasilkan sumber cahaya kontinu yang koheren dan memiliki intensitas tinggi.
2. Menganalisa penggunaan fiber optik Multimode untuk menyalurkan cahaya laser yang termodulasi dari modulator menuju ke kolimator.
3. Mengatur polarisasi dari berkas cahaya sumber agar saling tegak lurus (orthogonal) satu sama lain, untuk menghilangkan efek beat frekuensi yang terjadi.
4. Melakukan Pengukuran daya terhadap superposisi dua laser tersebut.

## 1.3. Pembatasan Penulisan

Dalam penulisan dan pembahasan makalah ini ada beberapa batasan masalah yang dibuat yaitu sebagai berikut :

1. Pembahasan mencakup perambatan *cahaya* laser ke kolimator dengan menggunakan kabel fiber optik multimode step indeks dengan diameter inti 62,5 micrometer.
2. Pada sistem penggabungan berkas cahaya laser yang dilakukan mempertimbangkan aspek polarisasi yang terjadi.
3. Penelitian ini adalah menentukan batasan bit-rate sebagai fungsi dari deviasi ( $\Delta\lambda$ ) kedua sumber cahaya laser.
4. Melakukan Pengukuran daya terhadap superposisi dua laser tersebut.

#### 1.4. Sistematika Penulisan

Thesis ini disusun terdiri dari lima bagian, dengan Bab 1 adalah bagian pendahuluan yang terdiri dari latarbelakang, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan. Pada Bab 2, membahas mengenai prinsip dasar dari komunikasi *free space optic* (FSO). Pada bagian awal bab ini dijelaskan tentang gambaran umum teknologi FSOC dengan sifat kekhususannya. Juga pada bab ini dipaparkan mengenai apa saja yang menjadi keistimewaan yang menyebabkan teknologi FSO ini semakin memperoleh perhatian dan juga memaparkan hal-hal yang menjadi kendala dalam mengembangkan teknologi FSOC ini. Di bagian berikutnya pada bab dua ini diketengahkan teori dasar tentang superposisi gelombang.

Bab 3, membahas pemodelan dan simulasi penggabungan berkas laser. Pada bab ini dibahas proses penggabungan berkas sinar laser menggunakan sebuah coupler, yang selanjutnya berkas sinar yang diperoleh dirambatkan menggunakan serat optik multimode menuju kolimator. Selanjutnya dilakukan analisa tentang karakteristik dari output berkas sinar yang dihasilkan akibat penggabungan tersebut. Bab 4, merupakan bagian yang membahas mengenai hasil pengukuran yang diperoleh dan analisa. Dan akhirnya bagian terakhir yaitu Bab 5, adalah kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini termasuk komentar dan rekomendasi yang dipaparkan dalam rangka pengembangan penelitian selanjutnya.

## BAB 2

### PENGGABUNGAN SUMBER LASER DENGAN METODA SUPERPOSISI UNTUK KOMUNIKASI *FREE SPACE OPTICS* (FSO)

#### 2.1 Latar Belakang *Free Space Optical Communications* (FSOC)

*Free space optical communication* (FSOC) adalah sistem komunikasi optik yang menggunakan cahaya sebagai pembawa informasi dan memanfaatkan atmosfer sebagai media propagasi atau perambatan [3]. Untuk memastikan pengiriman informasi diperlukan pengarah lurus (*point-to point*) sisi transmitter dan receiver agar saling terlihat langsung (*line-of-sight*) tanpa ada halangan. Aplikasi komunikasi pita lebar pada jarak medium dapat dikembangkan melalui teknologi FSO ini. Karakteristik teknologi terestrial FSO yang menarik sangat berguna untuk berbagai aplikasi, misalnya untuk jaringan microsel masa depan, juga aplikasi terestrial FSO dapat digunakan untuk menjembatani keterbatasan bandwidth (*last-mile bottleneck*) yang terjadi antara *end user* dan backbone fiber optik, juga dapat dipergunakan sebagai link sementara, jaringan interkoneksi kampus serta membantu penyediaan komunikasi pada medan atau wilayah yang sulit dijangkau.

Keuntungan yang ditawarkan teknologi FSOC ini, diantaranya tidak membutuhkan fiber optik sebagai media waveguide, sehingga memberikan fleksibilitas yang tinggi, juga memiliki kapasitas bandwidth tinggi dengan biaya yang lebih ekonomis dan tanpa perlu mengamankan lisensi spektrum dibandingkan media transmisi lain. Bila dibandingkan dengan teknologi komunikasi microwave RF yang memiliki masalah interferensi, teknologi FSO selain memiliki bandwidth besar juga tidak memberikan pengaruh interferensi, namun FSOC memiliki kinerja yang terkait pada kondisi atmosfer.

Propagasi cahaya melintasi atmosfer mengalami redaman berkas cahaya (*attenuation*) akibat adanya penyerapan (*absorption*), dan hamburan (*scattering*). Penyerapan (*absorption*) yang terjadi merupakan hasil dari interaksi radiasi antar

foton dan atom-atom atau molekul yang mengakibatkan hilangnya foton dan meningkatkan temperatur [7]. Penyerapan (*absorption*) akan menyebabkan daya laser berkurang secara bertahap sehingga mempengaruhi keberadaan cahaya laser pada link FSO. Temperatur dan tekanan atmosfer sangat berpengaruh pada besarnya penyerapan yang terjadi [7]. Sedangkan hamburan (*scattering*) terjadi ketika partikel berukuran lebih besar dari panjang gelombang cahaya mengubah arah perambatan gelombang dengan mengirim ulang sinyal ke segala arah. Apabila jumlah partikel yang menghalangi sangat banyak, daya pengirim akan berkurang dalam jumlah besar.

Kinerja sistem FSO juga sangat dipengaruhi efek sintilasi (*scintillation*) akibat turbulensi atmosfer (*atmospheric turbulence*) dan ketidakseragaman (*inhomogeneity*) suhu atmosfer yang menimbulkan berbagai efek yang dapat merusak berkas cahaya yang dikirimkan pada link terestrial FSO. Akibat Efek sintilasi ini akan menyebabkan terjadinya sinyal fading, karena interferensi konstruktif dan destruktif dari cahaya optik melintasi atmosfer [6].

Kondisi atmosfer yang mengalami penyerapan (*absorption*), hamburan (*scattering*) dan sintilasi (*scintillation*) ini membawa dampak diperlukannya pemancaran cahaya yang memiliki kekuatan pancar yang memadai. Untuk itu diperlukan suatu sumber cahaya laser berdaya relatif besar ( $\sim 0,25W$ ) untuk mengompensasi penyerapan, hamburan dan sintilasi yang terjadi. Namun, penggunaan laser berdaya relatif besar masih sulit di pasar dan walaupun ada harganya mahal, sehingga untuk mengantisipasi kebutuhan laser berdaya tinggi tersebut, diusulkan menggabungkan dua sumber laser berdaya rendah dengan metode superposisi. Penggunaan dua dioda laser ini berarti terdapat dua gelombang yang memiliki frekuensi tidak identik, dipancarkan bersamaan dari titik yang sama menuju titik yang sama pula. Kemudian dilakukan analisis superposisi terhadap sumber cahaya tersebut untuk mendapatkan mekanisme superposisi yang terbaik, sehingga mampu menghasilkan kebutuhan daya yang sesuai dengan yang diharapkan.

Radiasi optik pada teknologi FSO menggunakan laser ini memiliki luasan berkas yang sangat sempit, umumnya tipe berkas laser mempunyai divergensi

difraksi terbatas antara 0.01 – 0.1 mrad [7], untuk itu kekuatan radiasi optik harus berada dalam batas keselamatan yang ditetapkan. Pengiriman sumber cahaya pada sisi transmiter ( $T_x$ ) mempergunakan pembesaran berkas cahaya (*beam expansion*) yang terkolimasi yaitu untuk meningkatkan jumlah variabel statistik berkas cahaya sehingga jumlah berkas cahaya lebih banyak dibandingkan dengan partikel noise yang mengganggu sehingga noise dapat diperkecil dan untuk menjaga agar berkas yang berukuran kecil tersebut dapat dikirimkan tanpa pengaruh yang membahayakan keselamatan manusia terutama mata (*Eye safety*).

### 2.1. Superposisi Sumber Laser

Untuk menjelaskan propagasi cahaya dan fenomena superposisi cahaya, tahap awal cahaya dimodelkan sebagai gelombang. Cahaya adalah gelombang elektromagnetik, yang merupakan gelombang transversal elektrik dan magnetik.

Superposisi gelombang merupakan konsep dasar pada ilmu gelombang dan optik. Menggunakan konsep tersebut memungkinkan mempelajari dan menjelaskan pola interferensi dalam optik. Selain itu, memungkinkan para peneliti menjelaskan fenomena frekuensi denyut atau *beat frequency*. Fenomena beat disebabkan oleh efek modulasi amplitudo yang dihasilkan oleh superposisi gelombang yang memiliki perbedaan frekuensi yang sangat sedikit.

Berbeda dengan gelombang akustik yang merupakan gelombang longitudinal, gelombang elektromagnetik ini adalah gelombang transversal yang dalam propagasinya gelombang magnetik dan elektrik saling tegak lurus (orthogonal).

Cahaya yang merupakan gelombang transversal memiliki pola pergerakan medan elektrik yang disebut sebagai efek polarisasi. Efek polarisasi menjadi pertimbangan dalam melakukan proses superposisi pada gelombang cahaya ini. Jika dua sumber berkas cahaya ( $\lambda_1$  dan  $\lambda_2$ ) dengan panjang gelombang tidak identik saling disuperposisikan dalam polarisasi yang sama, maka akan muncul efek beat frekuensi yang menyebabkan terjadinya perubahan amplitudo. Efek beat frekuensi tidak dikehendaki, karenanya dilakukan pengaturan polarisasi cahaya

sehingga yang terjadi adalah beat polarisasi dengan amplitudo yang konstan. Namun demikian beat polarisasi yang terjadi tidak akan berpengaruh pada receiver ( $R_x$ ) yang menggunakan detektor APD (Avalanche Photo Diode) karena merupakan detektor yang non-sensitif terhadap polarisasi.

Ketika dua gelombang bertemu, resultan amplitudo gelombang tidak akan hanya tergantung pada amplitudo dari dua gelombang, tetapi juga hubungan phase mereka. Bila dua gelombang mensuperposisikan amplitudo yang sama yaitu gelombang berada pada satu fase yang sama. Gelombang yang dihasilkan dua kali lipat amplitudo gelombang asli. Ini disebut interferensi konstruktif atau penguatan. Jika gelombang saling berbeda phase  $180^\circ$  ( $\pi$  radian) maka akan saling menghilangkan (pelemahan). fenomena ini merupakan prinsip superposisi, yang menyatakan, bahwa resultan suatu gelombang merupakan penjumlahan vektor dari kedua gelombang tersebut.

Superposisi dua gelombang monokromatis dengan dua medan listrik  $\bar{y}_1$  dan  $\bar{y}_2$  yang masing-masing memiliki frekuensi yang berbeda yaitu  $\omega_1$  dan  $\omega_2$ ,

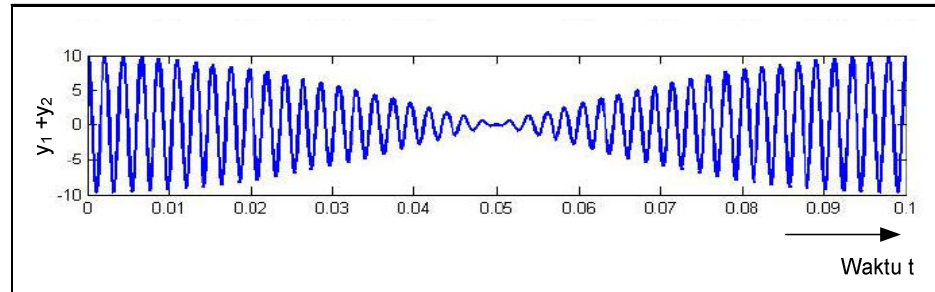
$$\begin{aligned}\bar{y}_1 &= \bar{a}_1 \cos(\omega_1 t) \\ \bar{y}_2 &= \bar{a}_2 \cos(\omega_2 t)\end{aligned}\quad (2-1)$$

Untuk penyederhanaan diasumsikan kedua medan listrik memiliki amplitudo yang sama yaitu  $\bar{a}_1 = \bar{a}_2 = \bar{A}$ . Menggunakan prinsip superposisi, maka resultan kedua gelombang tersebut merupakan penjumlahan kedua gelombang yang dapat ditulis sebagai:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{tot} &= \bar{y}_1 + \bar{y}_2 \\ \bar{U}_{tot} &= \bar{A}(\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t))\end{aligned}$$

Sehingga

$$\bar{U}_{tot}(t) = 2\bar{A} \cos \frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2} \cos \frac{(\omega_1 - \omega_2)t}{2} \quad (2-2)$$



Gambar 2.1. Superposisi dua gelombang dengan polarisasi sama

Superposisi dua gelombang tersebut menghasilkan gelombang *sinusoidal field* yang beresilasi dengan frekuensi  $f = 1/2(f_1 + f_2)$  dan juga gelombang modulasi *sinusoidal field* yang beresilasi dengan frekuensi  $f = 1/2(f_1 - f_2)$ . Bagian ini yang mengontrol amplitudo "amplop" gelombang dan menyebabkan persepsi "denyut" atau Beat.

Beat frekuensi intensitas ini adalah dua kali frekuensi, yang artinya :

$$f_{beat} = |f_1 - f_2| \quad (2-3)$$

### 2.3 Sumber Cahaya Optik

Terdapat dua jenis sumber cahaya optik yang umum digunakan dalam komunikasi *free space optics*, yaitu dari bahan semikonduktor yaitu LED (*Light Emitting Diode*) dan *Laser Diode* (LD). LED merupakan perangkat yang memancarkan cahaya yang inkoheren dengan spektrum lebar dan emisi tidak terarah (menyebar). Pada umumnya digunakan untuk fiber optik dengan diameter core berukuran besar (*multimode step indeks*).

Dioda laser merupakan sumber optik yang koheren, keluaran laser umumnya bersifat relatif monokromatis dan sangat terarah (konvergen). Pada umumnya digunakan untuk fiber optik dengan diameter core berukuran kecil (*singlemode step indeks*). Untuk transmisi jarak jauh, penggunaan laser sebagai sumber cahaya lebih menguntungkan dibandingkan menggunakan LED.



Jenis laser semikonduktor yang dapat digunakan untuk sistem FSOC adalah laser DFB (*distributed feedback*) atau VCSEL (*vertical cavity surface emitting laser*). Kedua jenis laser komunikasi tersebut telah banyak digunakan dalam sistem komunikasi fiber optik dan secara umum masing-masing memiliki kelebihan, menyesuaikan kebutuhan jenis kualitas transmisi yang dikehendaki. Perbedaan signifikan antara DFB dan VCSEL adalah mode cahaya yang diemisikan, DFB cenderung mengemisikan berkas yang elipsoidal dan berdaya tinggi sedangkan VCSEL cenderung lebih lingkaran sempurna (sirkular) namun berdaya rendah [8]. Untuk FSOC dimana berkas laser yang merambat dalam atmosfer akan berbentuk planar setelah terkolimasi oleh *collimator*, maka untuk menjaga tingkat attenuasi yang rendah pada setiap muka gelombangnya. Baik VCSEL maupun DFB merupakan kandidat yang terbaik untuk digunakan.

#### 2.4 Polarisasi Cahaya [8]

Cahaya yang merupakan gelombang transversal memiliki pola pergerakan medan elektrik yang disebut sebagai efek polarisasi. Efek polarisasi menjadi pertimbangan dalam melakukan proses superposisi pada gelombang cahaya ini.

Jika dua sumber berkas cahaya ( $\lambda_1$  dan  $\lambda_2$ ) dengan panjang gelombang tidak identik saling disuperposisikan dalam polarisasi yang sama, maka akan muncul efek beat frekuensi yang menyebabkan terjadinya perubahan amplitudo. Efek beat frekuensi tidak dikehendaki, karenanya dilakukan pengaturan polarisasi cahaya sehingga yang terjadi adalah beat polarisasi dengan amplitudo yang konstan.

Apabila gelombang monokromatis memiliki frekuensi  $\nu$  dan frekuensi angular  $\omega = 2\pi\nu$  yang merambat pada arah  $z$  dengan kecepatan  $c$ . Medan elektrik berada di bidang  $x$ - $y$  dan secara umum dituliskan sebagai:

$$E(z,t) = \text{Re} \left\{ A \exp \left[ j \omega \left( t - \frac{z}{c} \right) \right] \right\} \quad (2-4)$$

Dimana kompleks envelope-nya adalah :

$$A = A_x \bar{X} + A_y \bar{Y} \quad (2-5)$$

Persamaan (2.5) diatas, merupakan vektor dengan komponen kompleks  $A_x$  dan  $A_y$ . Dan untuk menjelaskan polarisasi gelombang ini, dimulai dari ujung vektor  $E(z,t)$  pada tiap posisi  $z$  sebagai fungsi waktu.

### 2.4.1 Polarisasi Ellips

Bila  $A_x$  dan  $A_y$  dapat dinyatakan dalam magnitud dan fase, yaitu  $A_x = a_x \exp(j\varphi_x)$  dan  $A_y = a_y \exp(j\varphi_y)$ , dan substitusikan pada persamaan (2-5) dan (2.4), sehingga

$$E(z,t) = E_x \bar{X} + E_y \bar{Y} \quad (2-6)$$

Dimana

$$E_x = a_x \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{c} \right) + \varphi_x \right] \quad (2-6a)$$

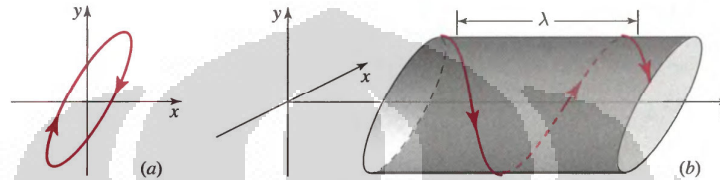
$$E_y = a_y \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{c} \right) + \varphi_y \right] \quad (2-6b)$$

Indeks  $x$  dan  $y$  merupakan komponen medan elektrik vektor  $E(z,t)$ . Komponen  $E_x$  dan  $E_y$  adalah fungsi periodik dari  $(t-z/c)$  yang berosilasi pada frekuensi  $\omega=2\pi\nu$ . Persamaan (2-6a) dan (2.6b) merupakan persamaan parametrik dari ellips, yaitu

$$\frac{E_x^2}{a_x^2} + \frac{E_y^2}{a_y^2} - 2 \cos \varphi \frac{E_x E_y}{a_x a_y} = \sin^2 \varphi, \quad (2-7)$$

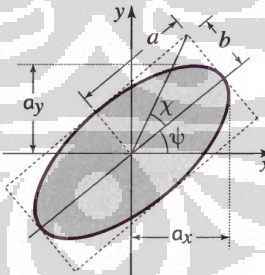
Dimana  $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$  adalah perbedaan fase.

Pada nilai yang tetap dari  $z$ , ujung vektor medan listrik berputar secara periodik pada bidang  $x$ - $y$ , membentuk ellips. Pada waktu tertentu  $t$ , posisi ujung vektor medan elektrik mengikuti lintasan helik pada ruang dimana sebagai permukaan dari silinder (lihat gambar 2-1). Medan elektrik berputar sebagai gelombang terdepan, mengulang pergerakan secara periodik untuk tiap jarak yang digambarkan sebagai panjang gelombang  $\lambda = c/v$ .



Gambar 2.1 (a). ujung vektor medan elektrik membentuk ellips, (b). Lintasan ujung vektor medan elektrik pada waktu tertentu.[8]

Kondisi polarisasi gelombang ditentukan oleh orientasi dan bentuk polarisasi ellips, yang mana dicirikan oleh dua sudut pada Gambar (2.1). Sudut  $\psi$  menyatakan arah sumbu utama, sebagaimana sudut  $\chi$  menentukan bentuk ellips yang disebut rasio sumbu minor dan mayor dari ellips ( $b/a$ ). Sudut ini tergantung pada rasio magnitud  $r = (a_y/a_x)$ , dan pada perbedaan fase  $\phi = \phi_y - \phi_x$ .

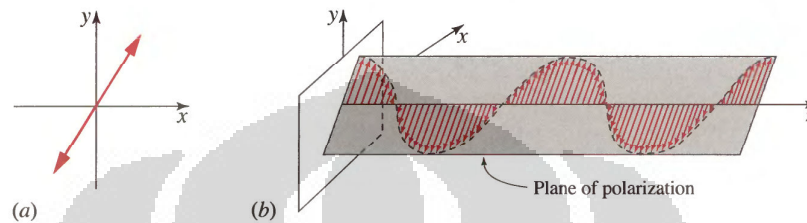


Gambar 2.2. Polarisasi ellips [8]

#### 2.4.2 Polarisasi Linier

Jika satu komponen dihilangkan (misalnya,  $a_x = 0$ ), cahaya akan terpolarisasi linier (LP) pada arah komponen lainnya (yaitu arah sumbu- $y$ ). Gelombang juga terpolarisasi linier jika perbedaan fase  $\phi = 0$  atau  $\pi$ . Persamaan

(2-5) memberikan nilai  $E_y = \pm(a_y/a_x) E_x$ , yang merupakan persamaan garis lurus dengan kemiringan  $\pm(a_y/a_x)$ , dimana tanda (+) dan (-) menunjukkan sudut  $\phi = 0$  atau  $\pi$ . Gelombang dinyatakan memiliki polarisasi datar atau linier, jika  $a_x = a_y$ .



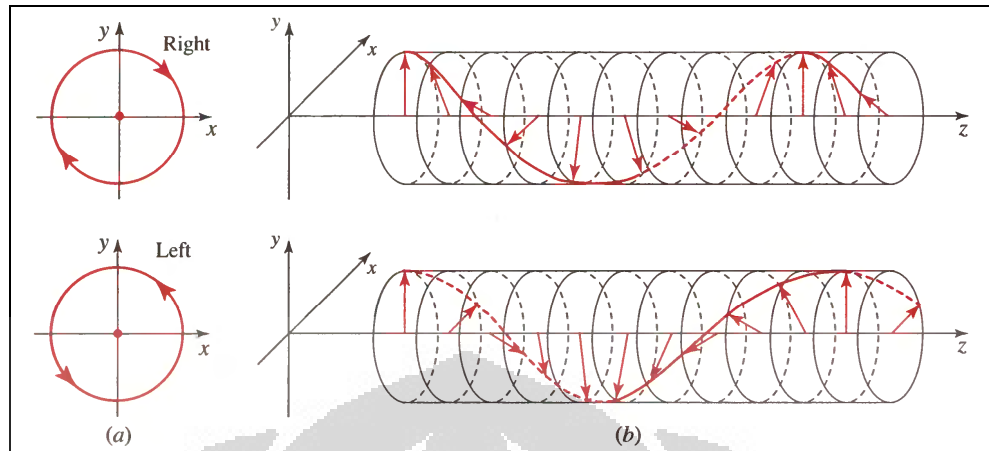
Gambar 2.3 Polarisasi linier [8]

### 2.4.3 Polarisasi Melingkar

Jika sudut  $\phi = \pm\pi/2$  dan amplitudo  $a_x = a_y = a_0$ , persamaan (2-4) menjadi

$E_x = a_x \cos\left[\omega\left(t - \frac{z}{c}\right) + \phi_x\right]$  dan  $E_y = a_y \cos\left[\omega\left(t - \frac{z}{c}\right) + \phi_y\right]$ , yang mana  $E_x^2 + E_y^2 = a_0^2$ , yang merupakan persamaan lingkaran.

Untuk kondisi  $\phi = +\pi/2$ , medan listrik pada posisi  $z$  tertentu melingkar sesuai arah jarum jam saat diamati dari arah berlawanan, maka cahaya dikatakan terpolarisasi melingkar kekanan (RCP). Dan pada kondisi  $\phi = -\pi/2$  bergerak melingkar menurut arah berlawanan jarum jam disebut sebagai terpolarisasi melingkar ke kiri (LCP).



Gambar 2.4. Polarisasi sirkuler (a). waktu pada posisi z tetap, (b). arah rotasi (a) yang berlawanan terhadap (b) karena gelombang berjalan tergantung pada arah  $(t-z/c)$ . [8]

## 2.5 Jones Vector [9]

Perhitungan vektor Jones adalah teknik secara matematis untuk menjelaskan kondisi polarisasi cahaya dan menghitung perubahan kondisi polarisasi saat cahaya melewati suatu peralatan optik. Suatu kondisi polarisasi dapat dijelaskan oleh dua elemen vektor Jones, dan operasi linier dari suatu peralatan optik yang dapat dijelaskan melalui matrik jones ( $2 \times 2$ ).

Karena cahaya tersusun dari osilasi medan magnet dan medan listrik, Jones menyatakan cara yang paling alami untuk merepresentasikan cahaya adalah dengan vektor medan listriknya. Bila dituliskan sebagai vektor kolom, vektor ini dikenal sebagai vektor Jones dan memiliki bentuk sebagai berikut:

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} \vec{E}_x(t) \\ \vec{E}_y(t) \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

Dimana  $E_x(t)$  dan  $E_y(t)$  adalah komponen skalar medan listrik sesaat. Nilai tersebut dapat berupa nilai kompleks, dimana kedua nilai amplitudo dan fasa diberikan. Terkadang, tidak perlu menyatakan nilai amplitudo dan phase eksak dari komponen vektor tersebut, karena vektor Jones dapat dinormalisasi sehingga faktor phase yang ada dapat diabaikan.

Pada bermacam kondisi dinyatakan bahwa untuk vektor jones yang memiliki kondisi polarisasi horizontal dan vertikal, dinyatakan dengan dua keadaan yaitu:

$$\vec{E}_h = \begin{bmatrix} \vec{E}_x(t) \\ 0 \end{bmatrix} \text{ and } \vec{E}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{E}_y(t) \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

Atau dalam bentuk normalisasi, dinyatakan

$$\vec{E}_h = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ and } \vec{E}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

Dimana  $\vec{E}_h$  dan  $\vec{E}_v$  menyatakan polarisasi cahaya secara horizontal dan vertikal. Jumlah dari kedua cahaya koheren dinyatakan oleh jumlah vektor Jones komponen tersebut, sehingga jumlah  $\vec{E}_h$  dan  $\vec{E}_v$  saat  $E_y(t) = E_x(t)$ , dinyatakan dengan :

$$\vec{E}_{45^\circ} = \begin{bmatrix} \vec{E}_x(t) \\ \vec{E}_y(t) \end{bmatrix} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

Dimana tanda panah menyatakan normalisasi, dengan catatan bahwa kondisi polarisasi yang dinyatakan disini adalah medan listrik yang berada pada sudut 45 derajat terhadap sumbu utama.

Kondisi polarisasi lainnya yaitu polarisasi sirkuler kekanan dan sirkuler kekiri. Pada kedua komponen memiliki amplitudo sama, tetapi untuk melingkar (sirkuler) kekanan, phase dari komponen-y mendahului komponen-x sebesar  $\pi/2$ , sedangkan untuk melingkar kekiri, yaitu komponen-x yang mendahului. Jones vektor untuk untuk melingkar kekiri adalah:

$$\vec{E}_R = \begin{bmatrix} \vec{E}_0 e^{i\phi} \\ \vec{E}_0 e^{i(\phi - \pi/2)} \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

Normalisasi persamaan diatas, dengan faktor fasa konstan  $e^{i\phi}$ , maka:

$$\bar{E}_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 e^{i\pi/2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

Sama juga halnya, normalisasi cahaya dinyatakan dengan arah melingkar kekanan

$$\bar{E}_R = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

|                     |   |  |                      |  |  |
|---------------------|---|--|----------------------|--|--|
| LP in $x$ direction | $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$                    |  | LP at angle $\theta$ | $\begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}$ |  |
| RCP                 | $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$ |  | LCP                  | $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$ |  |

Tabel 2.1. Jones Vector untuk berbagai kondisi polarisasi [9].

### 2.5.1 Jones Vektor dengan Polarisasi Orthogonal

Dua kondisi polarisasi dinyatakan oleh vektor Jones  $J_1$  dan  $J_2$  dikatakan saling orthogonal adalah jika inner product antara  $J_1$  dan  $J_2$  adalah nol. Inner product didefinisikan oleh:

$$(J_1, J_2) = A_{1x}A_{2x}^* + A_{1y}A_{2y}^* \quad (2-15)$$

Dimana  $A_{1x}$  dan  $A_{1y}$  adalah elemen-elemen dari  $J_1$  sedangkan,  $A_{2x}$  dan  $A_{2y}$  adalah elemen dari  $J_2$ .

## 2.6 Intensitas Sumber optik

Intensitas optik  $I(r,t)$  adalah daya optik per unit area ( $\text{watt/cm}^2$ ), yaitu merupakan rata-rata pangkat dua fungsi gelombang, dinyatakan dengan oleh persamaan:[8]

$$I(r,t) = 2 \langle u^2(r,t) \rangle. \quad (2-16)$$

Suatu gelombang monokromatis yang memiliki frekuensi  $\nu$  direpresentasikan oleh fungsi gelombang seperti pada persamaan (2.16), yaitu

$$U(r,t) = a(r) \exp[2\pi\nu t + \theta(r)] \quad (2-17)$$

dimana

$a(r) = \text{amplitudo}$

$\theta(r) = \text{phasa}$

$\nu = \text{frekuensi (cycle/detik atau Hz)}$

$\omega = 2\pi\nu = \text{frekuensi angular (radian/detik)}$

Jika dituliskan dalam bentuk fungsi kompleks, maka persamaan (2-17) diatas akan menjadi fungsi kompleks sebagai berikut:

$$U(r,t) = a(r) \exp[j\theta(r)] \exp(j2\pi\nu t) \quad (2-18)$$

Dimana  $U(r) = a(r) \exp[j\theta(r)]$  merupakan amplitudo kompleks gelombang yang time-independent, sehingga persamaan (2-18) dapat ditulis menjadi

$$U(r,t) = U(r) \exp(j2\pi\nu t) \quad (2-19)$$

Jika dihubungkan fungsi gelombang  $U(r,t)$  terhadap amplitude kompleks, maka

$$u(r,t) = \text{Re}\{U(r) \exp(j2\pi\nu t)\} = \frac{1}{2} [U(r) \exp(j2\pi\nu t) + U^*(r) \exp(-j2\pi\nu t)] \quad (2-20)$$



Intensitas optik diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan (2-16) ke dalam persamaan (2-19), maka akan diperoleh

$$\begin{aligned} 2u^2(r,t) &= 2a^2(r) \cos^2[2\pi vt + \theta(r)] \\ &= |U(r)|^2 \{1 + \cos(2[2\pi vt + \theta(r)])\} \end{aligned} \quad (2-21)$$

Pada persamaan (2-19) diatas dari waktu ke waktu rata-rata lebih lama dari periode optik ( $1/v$ ), menyebabkan bagian kedua dari persamaan (2-21) dapat dihilangkan, sehingga:

$$I(r) = |U(r)|^2 \quad (2-22)$$

$I(r)$  merupakan intensitas optik suatu gelombang monokromatis yang merupakan fungsi pangkat dua absolut dari amplitudo kompleksnya. Intensitas gelombang monokromatis tidak bervariasi terhadap waktu.

## 2.7 Aspek pemanfaatan multimode fiber untuk transmisi optik sinyal dari in-house menuju lensa kolimator (Tx)

Fiber optik adalah suatu bahan dielektrik dengan indeks bias tertentu yang digunakan untuk merambatkan energi elektromagnetik. Fiber optik terdiri dari inti (*core*) dan selubung inti (*cladding*). Fungsi inti sebagai penyalur gelombang cahaya dan selubung inti berfungsi untuk memperkecil rugi-rugi permukaan serta mengarahkan gelombang cahaya tersebut.

Fiber optik multimode step indeks ini, mempunyai karakteristik yaitu memiliki indeks bias inti ( $n_1$ ) yang seragam di seluruh bagian inti. Standar fiber Multimode saat ini memiliki diameter inti 62,5 mikron atau 50 mikron dengan diameter cladding secara keseluruhan adalah 125 mikron, oleh karena itu disebut sebagai fiber 50/125 mikron atau 62.5/125 mikron.

Biasanya inti adalah  $\text{SiO}_2$  doped dengan sekitar 4% dari  $\text{GeO}_2$ . Cladding biasanya sangat tipis merupakan silika murni. Sesuai dengan namanya, fiber multimode melewati lebih dari satu mode, bahkan mampu melewati lebih

dari 100 mode. Jumlah mode tergantung pada ukuran inti dan *numerical aperture* (NA). Dengan meningkatnya ukuran inti dan NA, maka jumlah mode akan bertambah.

Ukuran inti yang besar dan NA yang tinggi memberikan keuntungan yaitu cahaya dapat dengan mudah dilewatkan pada fiber multimode dan memudahkan dalam penyambungan. Namun fiber multimode yang memiliki inti yang besar ini memiliki kerugian yaitu sebagaimana dengan bertambahnya jumlah mode maka efek dispersi modal akan meningkat. Dispersi modal artinya tiap mode yang tiba pada ujung fiber akan memiliki waktu berbeda. Perbedaan ini karena pelebaran pulsa dan modal dispersi ini akan membatasi bandwidth atau kapasitas dalam membawa informasi dalam fiber.

Biasanya jenis fiber multimode step indeks hanya digunakan untuk jarak pendek dan transmisi data bit rate rendah.

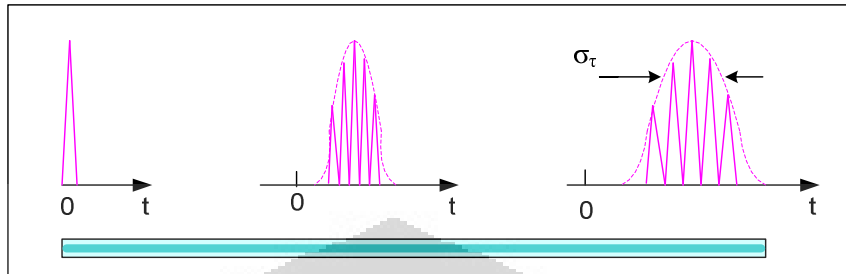
### 2.7.1. Modal Dispersi [8]

Dispersi intermodal atau modal dispersi dihasilkan dari gelombang merambat pada mode-mode. Akibat adanya dispersi antar mode menyebabkan perbedaan waktu perambatan gelombang untuk tiap mode yang berbeda.

Dispersi modal terjadi pada fiber multimode sebagai hasil dari perbedaan grup velocity pada mode. Sebuah pulsa cahaya tunggal memasuki fiber M-mode pada  $z = 0$  menyebar menjadi pulsa M dengan perbedaan keterlambatan yang meningkat sebagai fungsi  $z$ . Untuk fiber dengan panjang  $L$ , waktu keterlambatan ditemui dengan mode yang berbeda adalah  $\tau_q = L/V_q$ , dimana  $q = 1, \dots, M$ , dimana  $V_q$  adalah grup velocity mode  $q$ .

Jika  $V_{\min}$  dan  $V_{\max}$  adalah group velocity terkecil dan terbesar, pulsa yang diterima menyebar disepanjang interval waktu  $L/V_{\min} - L/V_{\max}$ . Karena mode-mode secara umumnya tidak serupa, bentuk keseluruhan dari lebar pulsa yang diterima memiliki tampilan yang mulus, seperti yang tampak pada Gambar (2.5).

Perkiraan lebar pulsa rms adalah  $\sigma_\tau = \frac{1}{2} (L/V_{\min} - L/V_{\max})$ . Lebar ini menunjukkan respon waktu dari fiber.



Gambar 2.5. Pelebaran pulsa akibat dispersi modal [8].

Pada fiber multimode step indeks dengan jumlah mode yang besar,  $V_{\min} \approx C_1(1-\Delta)$  dan  $V_{\max} \approx C_1$ . Karena  $(1-\Delta)^{-1} \approx 1+\Delta$ . Respon waktu fiber multimode step indeks menjadi;

$$\sigma_\tau \approx \frac{L \Delta}{C_1 2} \quad (2-23)$$

Lebar pulsa  $\sigma_\tau$  yang diterima akan meningkat dengan bertambah panjangnya fiber yaitu  $L$ . Ketika melebihi interval waktu,  $T = 1 / B_0$ , kinerja mulai menurun sebagai hasil dari interferensi intersymbol (tumpang tindih sinyal). Maksimal lebar diizinkan untuk secepat dari interval bit-waktu,

$$\sigma_\tau = \frac{T}{4} = \frac{1}{4B_0} \quad (2-24)$$

Pemilihan faktor  $\frac{1}{4}$  adalah sembarang dan hanya untuk membandingkan dengan tipe fiber berbeda.

Sehingga Fiber bandwidth adalah :

$$\sigma_f = \frac{1}{2\pi\sigma_\tau} \quad (2-25)$$

### 2.7.2 Hubungan Bandwidth Length (BL) terhadap Fiber Optik Multimode

*Bit rate-distance* (BL) merupakan perkalian bandwidth terhadap jarak adalah ukuran dari daya dukung fiber kapasitas dalam membawa informasi.

Perkalian bandwidth terhadap jarak untuk fiber step indeks multimode standar bervariasi berkisar antara 15 MHz/km dan 50 MHz/km bergantung pada panjang gelombang yang digunakan, diameter inti dan kesesuaian indeks refraktif antara inti dan selubung (cladding).

*Bit rate-distance product* (BL), dimana B adalah bit rate transmisi dan L adalah spasi repeater atau jarak, adalah ukuran kapasitas transmisi pada media propagasi fiber optik.

Lebar pulsa yang diterima setelah merambat dengan jarak L pada fiber multimode step indeks ditentukan oleh dispersi modal, yaitu dengan hubungan  $LB_0$  adalah

$$LB_0 = \frac{C_1}{2\Delta} \quad (2-26)$$

Dimana  $C_1 = C_0/n_1$  merupakan kecepatan cahaya pada inti material dan  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$  adalah perbedaan indeks fiber. Suatu fiber multimode step indeks memiliki perbedaan indeks refraksi  $\Delta = 0.01$  dan indeks bias inti  $n_1 = 1.46$ , maka akan memiliki nilai perkalian bandwidth terhadap jarak (BL) sebesar 10 Km-Mb/s.

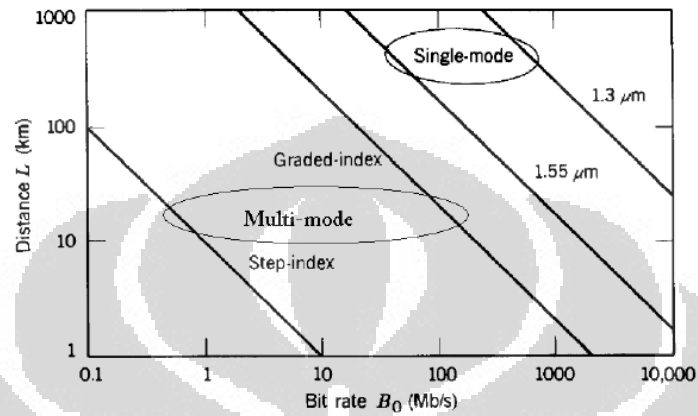
Pada fiber multimode graded index tampilan indeks refraksi, lebar pulsa diberikan oleh:

$$LB_0 = \frac{C_1}{\Delta^2} \quad (2-27)$$

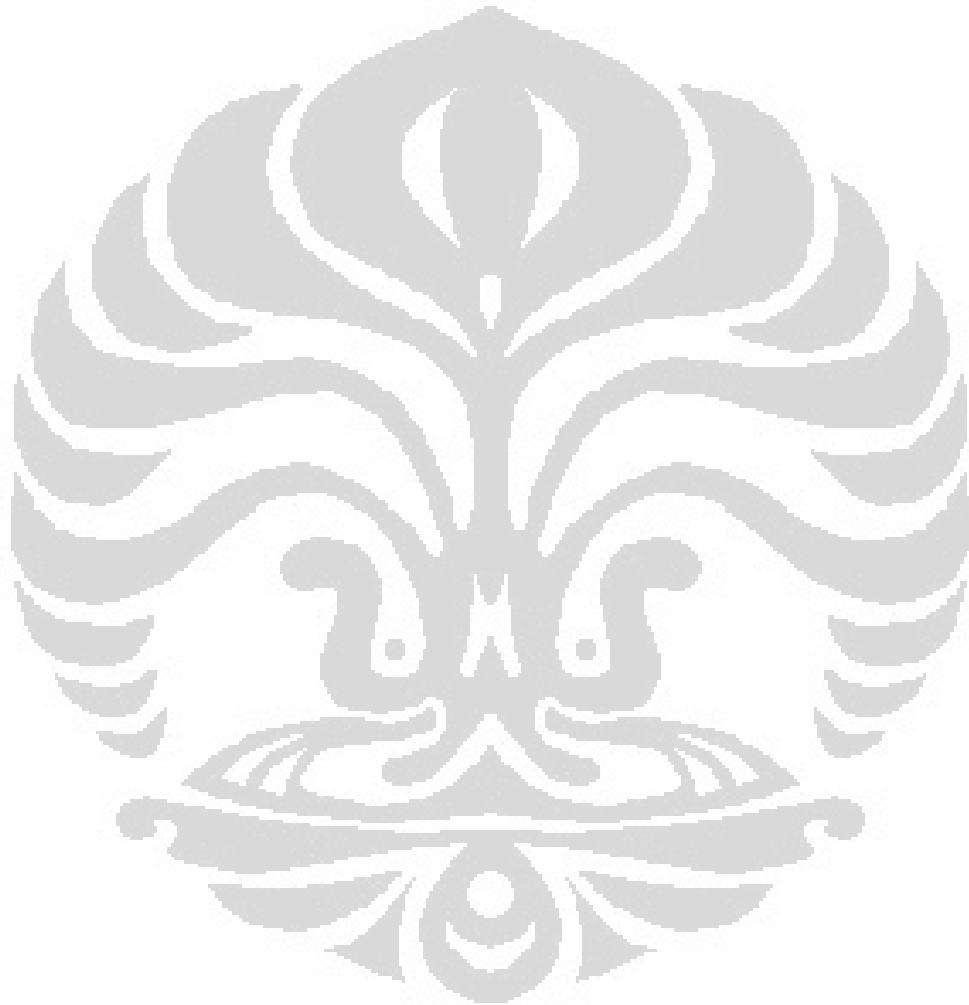
Pulsa yang melebar pada fiber singlemode merupakan hasil dari hanya dispersi material (dispersi waveguide diabaikan), kemudian untuk sumber dengan linewidth  $\sigma_\lambda$  lebar pulsa yang diterima diperoleh sebagai:

$$LB_0 = \frac{1}{4|D_\lambda|\sigma_\lambda} \quad (2-28)$$

Dimana  $D_\lambda$  adalah koefisien dispersi dari material fiber.



Gambar 2.6. Panjang kawat max L terbatas dispersi terhadap fungsi Bit rate B [8]

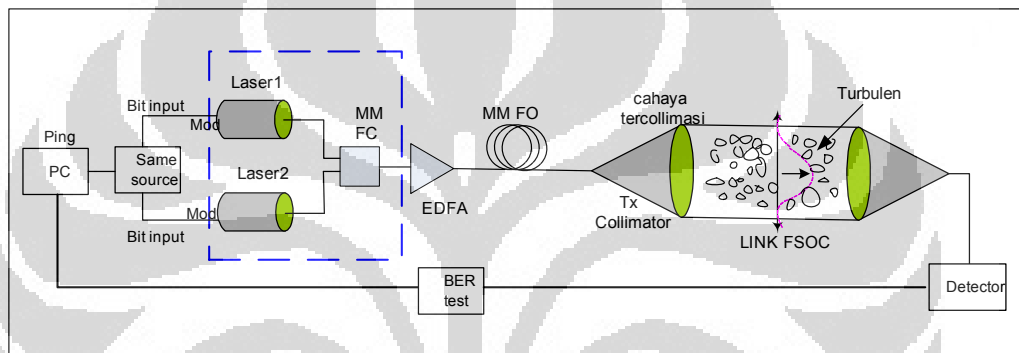


## BAB 3

### PEMODELAN SISTEM DAN SIMULASI

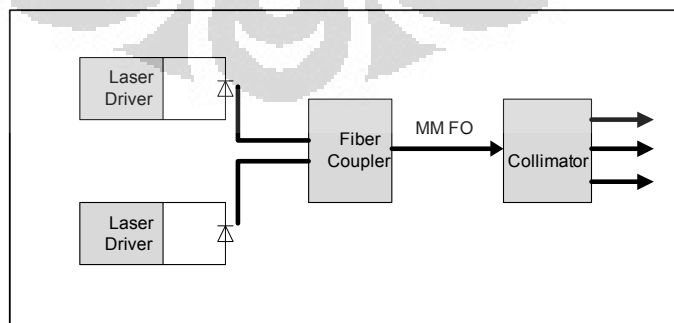
#### 3.1. Pemodelan Sistem

Secara umum gambar pemodelan ideal sistem *Free Space Optical Communication* (FSOC) adalah seperti ditunjukkan pada Gambar (3.1) dibawah ini.



Gambar 3.1 Pemodelan ideal Transmitter  $T_x$  pada Komunikasi *Free Space Optics*.

Dari gambar diatas, bidang yang ditandai oleh garis biru putus-putus, yang akan menjadi bagian dari penelitian yang dilakukan. Berikut ini adalah blok diagram untuk pemodelan sistem yang digunakan pada proses superposisi dua sumber cahaya laser pada penelitian ini berada pada sisi transmiternya seperti yang diperlihatkan pada Gambar (3.2) dibawah ini.



Gambar 3.2 Pemodelan unit utama superposisi sumber laser

Universitas Indonesia

Sistem pemodelan memiliki komponen utama yang menyusun transmitter  $T_x$  yaitu terdiri dari Laser Driver, Laser Semikonduktor, 2x1 fiber coupler, fiber optik multimode step indeks dan lensa transmitter (*beam collimator*).

### 3.2. Simulasi Superposisi terhadap aspek Polarisasi

Cahaya merupakan gelombang transversal yang artinya adalah cahaya merambat tegak lurus terhadap arah rambatnya. Karena merupakan gelombang transversal, maka efek polarisasi menjadi pertimbangan dalam melakukan superposisi terhadap gelombang cahaya tersebut.

Pada bagian pertama, akan dilakukan simulasi terhadap penggabungan dua sumber cahaya dengan cara mensuperposisikan kedua gelombang tersebut dengan polarisasi yang sama. Jika dua sumber berkas cahaya berbeda ( $\lambda_1$  dan  $\lambda_2$ ), saling disuperposisikan dengan polarisasi yang sama, dan dimana kedua sumber memiliki sedikit perbedaan frekuensi akan muncul efek beat frekuensi.

Superposisi dua gelombang monokromatis dengan dua medan listrik  $\vec{E}_x$  dan  $\vec{E}_y$  yang masing-masing memiliki frekuensi yang berbeda yaitu  $\omega$  dan  $\omega + \Delta\omega$ ,

$$\begin{aligned}\vec{E}_x &= \vec{a}_1 \sin(\omega t) \\ \vec{E}_y &= \vec{a}_2 \sin(\omega + \Delta\omega)t + \theta\end{aligned}\tag{3-1}$$

Untuk penyederhanaan diasumsikan memiliki amplitudo yang sama yaitu  $\vec{a}_1 = \vec{a}_2 = \vec{A}$ , Dimana  $\theta$  adalah perbedaan phase. Bila kedua medan terpolarisasi sama artinya  $\theta = \theta_y = \theta_x = 0$  atau  $\pi$ ,  $\Delta\omega$  merupakan selisih frekuensi yang terjadi antara dua sumber cahaya. Menggunakan prinsip superposisi, maka penjumlahan kedua gelombang dapat ditulis sebagai:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y \\ \vec{E}_{tot} &= \vec{A}(\sin(\omega t) + \sin(\omega + \Delta\omega)t)\end{aligned}$$

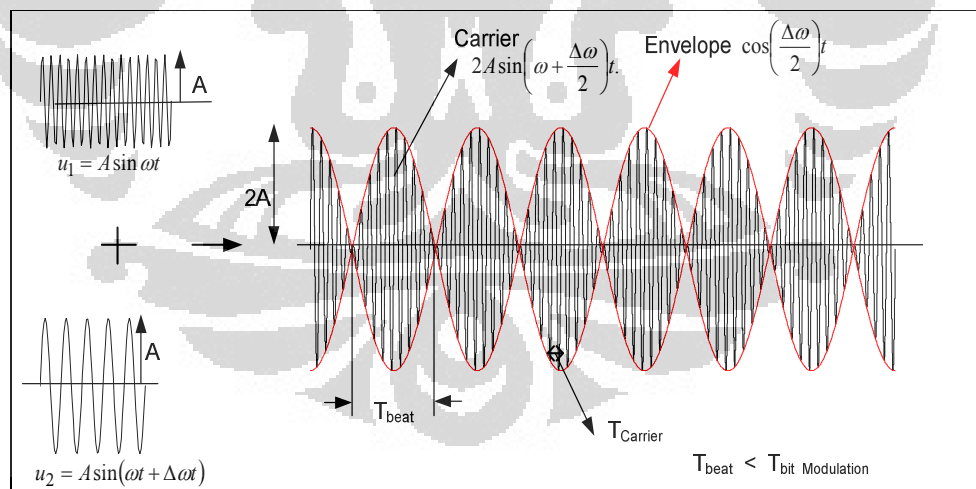


Maka

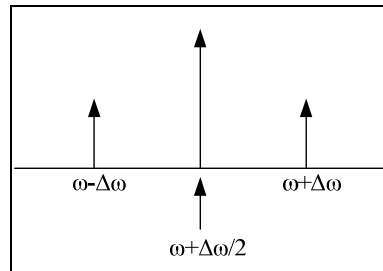
$$\begin{aligned}\bar{U}_{tot}(t) &= 2\bar{A} \sin\left(\frac{\omega + \omega + \Delta\omega}{2}t\right) \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right) \\ &= 2\bar{A} \underbrace{\sin\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2}t\right)}_{\text{Carrier}} \underbrace{\cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right)}_{\text{Beat modulation}}\end{aligned}\quad (3-2)$$

Persamaan  $\sin\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2}t\right)$  merupakan frekuensi carrier dan frekuensi *envelope*-nya adalah  $\cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right)$ , yang merupakan variasi lambat gelombang (slow varying), sedangkan intensitas akan berulang setelah setiap  $T_{\text{beat}} = \frac{1}{\Delta\nu}$  detik. Hal ini merupakan fenomena yang dikenal sebagai beat.

Maka beat yang terjadi, ditunjukkan pada Gambar (3.3), yaitu



Gambar 3.3. Superposisi dua gelombang dengan frekuensi yang berbeda



Gambar 3.4. Spektrum frekuensi sinyal

Karena nilai sinusoidal yang merupakan frekuensi carrier sangatlah kecil karenanya dapat diabaikan sedangkan yang diperhitungkan hanyalah fungsi cosinus yang merupakan *envelope* gelombang yang memiliki amplitudo  $2A$  dari persamaan sinyal  $E_{tot}(t)$  [12].

Energi sinyal  $E$  dari sinyal  $E_{tot}(t)$  didefinisikan sebagai area yang melingkupi dibawah persamaan sinyal  $E_{tot}$  yaitu  $[u(t)]^2$  dapat dinyatakan seperti pada persamaan (3.3) berikut ini [12].

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} (u(t))^2 dt \quad (3-3)$$

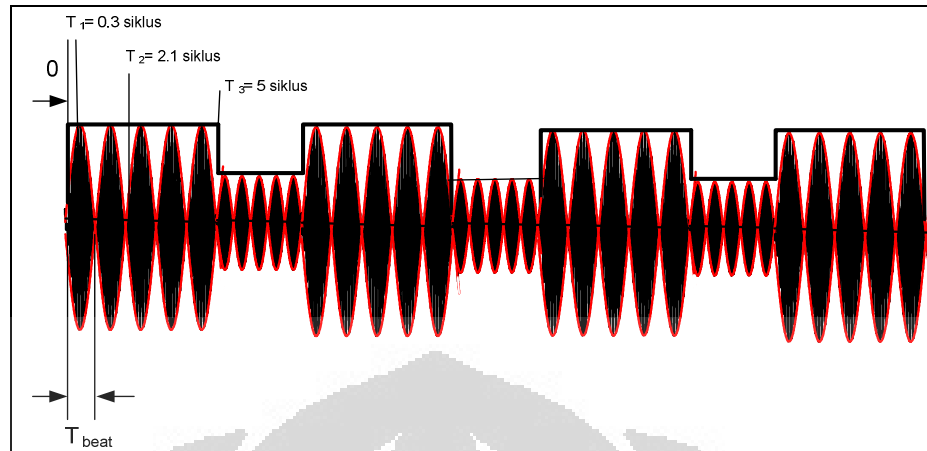
Atau secara umum dalam bentuk kompleks dari sinyal  $E_{tot}(t)$  dinyatakan sebagai :

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |u(t)|^2 dt \quad (3-4)$$

Jika energi sinyal ditentukan dengan mengintegrasikan energi sinyal sepanjang periode waktu tertentu terhadap satu siklus gelombang, maka energi sinyal yang akan diperoleh untuk periode  $T_1$  hingga  $T_2$  dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut:

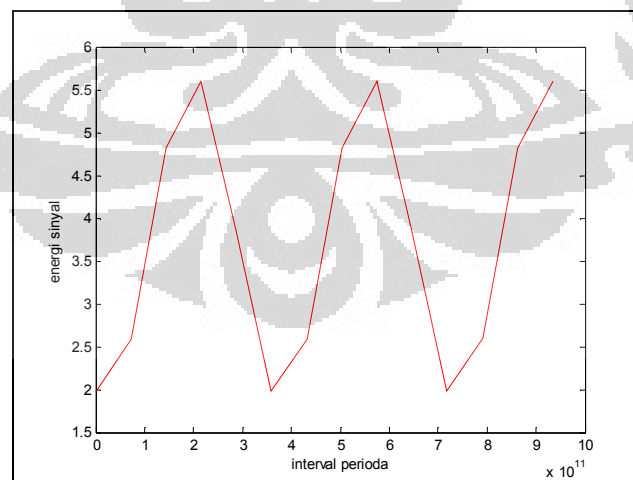
$$E = \int_{T_1}^{T_2} (u(t))^2 dt \quad (3-5)$$

Untuk menentukan energi bit maka kita melakukan beragam variasi rasio bit modulasi terhadap perioda beat.



Gambar 3.5. Superposisi dua gelombang termodulasi

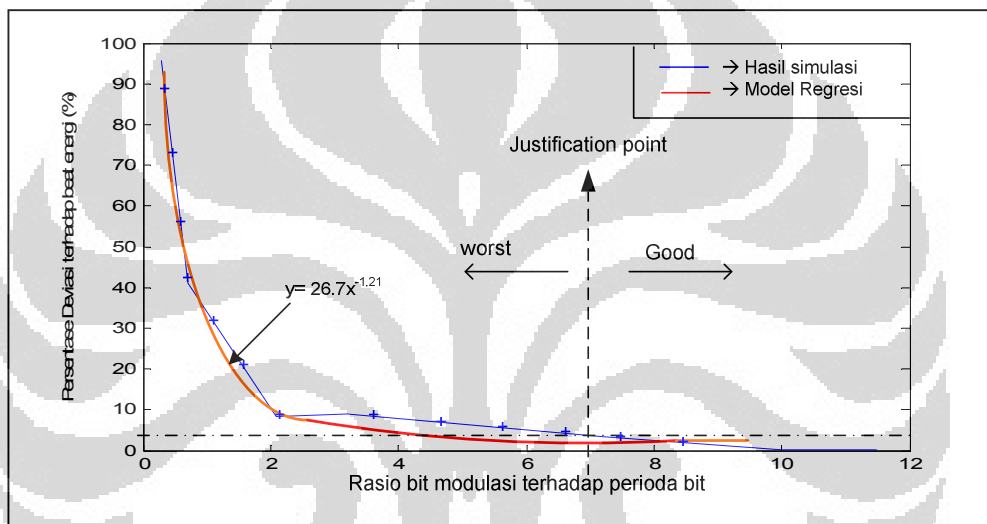
Misalnya jika kita menentukan rasio bit modulasi terhadap periode beat yaitu untuk setiap periode sinyal dari  $T_1 = 0.1$  hingga  $T_2 = 0.3$  dari satu siklus periode beat, maka energi yang dihasilkan dari tiap periode beat, yaitu dengan menghitung integral sisi kanan persamaan (3.5) dengan menggunakan simulasi dengan 14 periode siklus yang sama, akan diperoleh nilai rata-rata kira-kira sebesar 3.7 dan dapat dilihat seperti pada Gambar (3.6) dibawah ini.



Gambar 3.6. Energi sinyal E untuk periode  $T_1 \rightarrow T_2$

Energi sinyal  $E$  dihasilkan dari kontribusi oleh semua komponen spektrum sinyal  $E_{tot}(t)$ , dimana masing-masing kontribusi dari komponen spektrum frekuensi  $\omega$  adalah sebanding dengan  $|u(t)|^2$ . Energi juga sebanding dengan kuadrat amplitudonya, dimana amplitudo yang semakin tinggi akan memberikan nilai energi yang lebih besar bagi sinyal.

Jika kita gambarkan energi sinyal yang diwakilkan oleh berbagai interval periode beat maka akan diperoleh hasil seperti pada Gambar (3.7) dibawah ini.



Gambar 3.7 Prosentase deviasi terhadap beat energi

Dari hasil simulasi yang dilakukan terhadap variasi bit modulasi terhadap perioda beat, maka dapat digambarkan grafik yang menunjukkan hubungan antara prosentase deviasi terhadap beat energi terhadap rasio bit modulasi seperti pada Gambar (3.7) yang ditunjukkan oleh gambar garis berwarna biru. Model grafik yang diperoleh mengikuti pendekatan model regresi persamaan  $y=26.7x^{-1.21}$  (warna merah), dimana semakin besar kelipatan bit modulasi terhadap beat perioda maka akan memberikan simpangan yang semakin mengecil. Maka selanjutnya kita dapat menjustifikasi atau menentukan prosentase energi bit yang akan diambil yaitu prosentase deviasi terhadap beat energi yang berada pada posisi sekitar 3% , dimana rasio bit modulasi terhadap perioda beat bernilai sekitar 7 siklus.

Besarnya selisih frekuensi yaitu  $\Delta\omega$  juga mempengaruhi energi sinyal yang dihasilkan, karena semakin besar perbedaan yang terjadi akan mempengaruhi lamanya waktu yang terjadi pada tiap perioda beat, yang akan semakin bernilai kecil untuk setiap perioda beat, sehingga rasio bit modulasi terhadap perioda beat akan semakin besar.

Jika dua sumber berkas cahaya ( $\lambda_1$  dan  $\lambda_2$ ), yang masing-masing dinyatakan dalam medan listrik  $E_x$  dan  $E_y$  yang masing-masing memiliki perbedaan frekuensi  $\omega$  dan  $\omega+\Delta\omega$ , saling disuperposisikan dalam polarisasi yang diatur berbeda  $90^\circ$ , maka akan memunculkan efek beat polarisasi.

Jika diasumsikan kedua medan terpolarisasi saling tegak lurus (orthogonal) dan berada pada arah rambat yang sama, maka resultan kedua medan tersebut adalah:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y \\ \vec{E}_x &= \vec{a}_1 \cos(\omega t)\end{aligned}\quad (3-6)$$

Dan

$$\vec{E}_y = \vec{a}_2 \cos(\omega + \Delta\omega)t + \theta) \quad (3-7)$$

Dimana  $\omega = 2\pi\nu$

Maka

$$\begin{aligned}\vec{E}_x + \vec{E}_y &= \vec{a}_x \cos(\omega t) + \vec{a}_y \sin[(\omega + \Delta\omega)t] \\ &= \vec{a}_x \cos(\omega t) + \vec{a}_y [\sin \omega t + \cos \Delta\omega t + \cos \omega t + \sin \Delta\omega t.]\end{aligned}\quad (3-8)$$

Dimana  $\theta$  adalah perbedaan phase. Bila kedua medan terpolarisasi saling tegak lurus artinya  $\theta = \theta_y - \theta_x = \pi/2$  yaitu kedua medan listrik  $\vec{E}_x$  dan  $\vec{E}_y$  saling tegak lurus yaitu  $\vec{E}_x \perp \vec{E}_y$ ,  $\Delta\omega$  merupakan selisih frekuensi yang terjadi antara dua sumber cahaya.

### 3.3 Hasil Simulasi

#### 3.3.1 Superposisi dua sumber frekuensi sama dengan polarisasi sama

Suatu cahaya dikatakan terpolarisasi apabila cahaya itu bergerak merambat ke arah tertentu. Arah polarisasi gelombang ini dicirikan oleh arah vektor bidang medan listrik gelombang tersebut serta arah vektor bidang medan magnetnya.

Secara umum, superposisi dua sumber laser dengan beda frekuensi center  $\Delta\omega$ , dinyatakan sebagai persamaan berikut

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_x(t) + \vec{E}_y(t) \quad (3.9)$$

Dimana

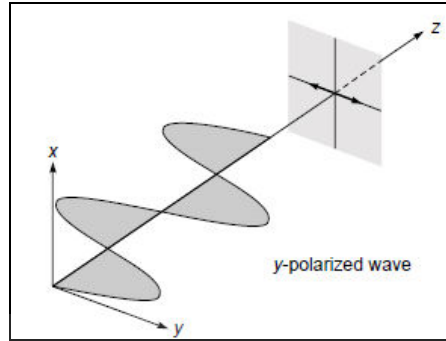
$$\begin{aligned} \vec{E}_x &= \vec{a}_x \cos(\omega t + \theta_x) \\ \vec{E}_y &= \vec{a}_y \cos[(\omega + \Delta\omega)t + \theta_y] \end{aligned} \quad (3-10)$$

$\vec{E}(t)$  merupakan resultan medan listrik yang bervariasi terhadap waktu pada bidang tegak lurus sembarang terhadap sumbu-z, diasumsikan  $z = 0$ .  $E_x$  dan  $E_y$  mewakili komponen-x dan komponen-y dari resultan medan listrik.

Untuk penyederhanaan rumus, maka jika  $\theta = \theta_y = \theta_x = 0$  dengan amplitudo masing masing adalah sama yaitu  $|\vec{a}| = |\vec{a}_y| = |\vec{a}_x|$ , maka

$$\vec{E}_x + \vec{E}_y = \vec{a} \cos(\omega t) + \vec{a} \cos[(\omega + \Delta\omega)t]$$

Dari persamaan, kita menganggap superposisi dengan mempertimbangkan aspek polarisasi sama, yang artinya masing-masing medan listrik  $E_x$  dan  $E_y$  memiliki nilai  $\theta = 0$  atau  $\theta = \pi$ , maka yang terjadi adalah superposisi kedua medan listrik menghasilkan suatu medan listrik terpolarisasi linier terhadap sumbu-y yaitu  $E = E_y$ , seperti diperlihatkan pada Gambar (3.8).



Gambar 3.8. superposisi polarisasi sama

Superposisi dua gelombang yang terpolarisasi sama yaitu masing-masing gelombang memiliki fasa yang sama, maka resultan yang diperoleh adalah gelombang terpolarisasi linier. Suatu gelombang disebut terpolarisasi linier jika getaran dari gelombang selalu terjadi dalam satu arah saja, yaitu arah polarisasi. Gelombang cahaya memiliki arah getaran medan listrik dan medan magnetik yang saling tegak lurus, dan keduanya tegak lurus terhadap arah rambat gelombang cahaya.

### 3.3.2. Superposisi dua sumber berbeda polarisasi $90^\circ$ dengan frekuensi berbeda.

Apabila dua buah berkas cahaya saling disuperposisikan dalam polarisasi berbeda, yaitu dengan perbedaan  $\theta = 90^\circ$  dan memiliki panjang gelombang yang tidak identik, maka akan muncul beat polarisasi akibat perbedaan panjang gelombang yang tidak sama.

Untuk superposisi dua medan listrik  $E_x$  dan  $E_y$  yang masing-masing memiliki frekuensi berbeda yaitu  $\omega$  dan  $\omega + \Delta\omega$ . Jika diasumsikan kedua medan dipolarisasikan saling tegak lurus (orthogonal) dan berada pada arah rambat yang sama, maka resultan kedua medan tersebut adalah:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y \\ \vec{E}_x &= \vec{a}_x \sin(\omega t)\end{aligned}\tag{3-11}$$

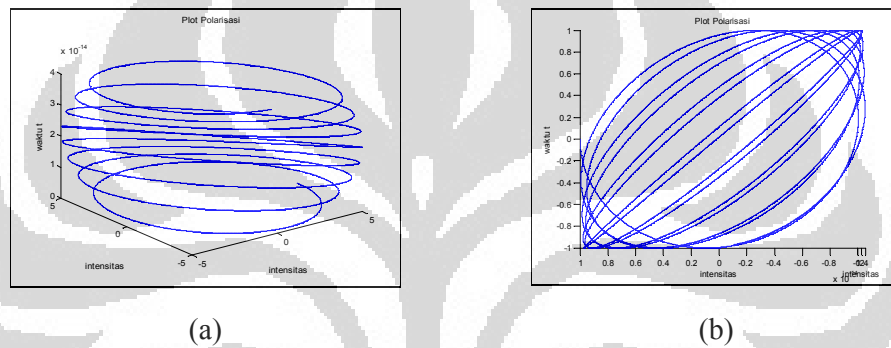
Dan

$$\vec{E}_y = \vec{a}_y \sin(\omega + \Delta\omega)t + \theta \quad (3-12)$$

Dimana  $\omega = 2\pi\nu_1$

$$\begin{aligned} \vec{E}_x + \vec{E}_y &= \vec{a}_x \sin(\omega t) + \vec{a}_y \sin[(\omega + \Delta\omega)t] \\ &= \vec{a}_x \sin(\omega t) + \vec{a}_y [\sin \omega t + \cos \Delta\omega t + \cos \omega t + \sin \Delta\omega t.] \end{aligned} \quad (3-13)$$

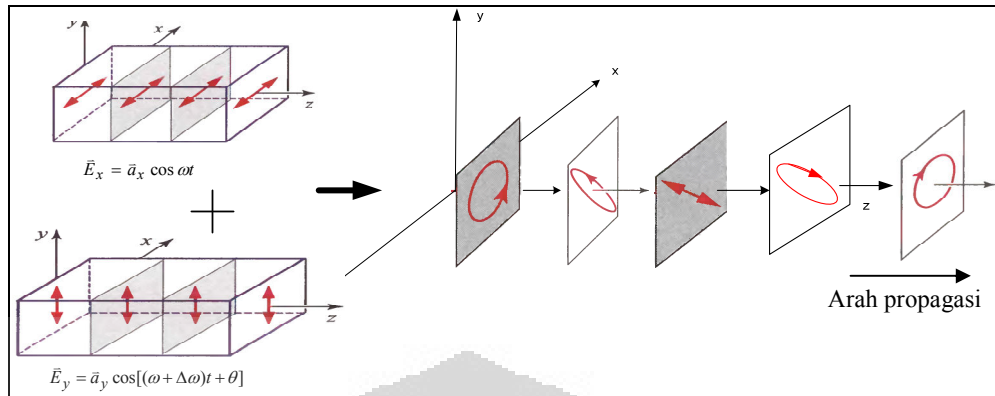
Apabila amplitudo masing masing adalah sama yaitu  $|\vec{a}| = |\vec{a}_y| = |\vec{a}_x|$ , maka



Gambar 3.9. Hasil simulasi beat polarisasi (a) Tampak depan (b) Tampak atas

Dari persamaan (3-13) diatas dan diperlihatkan seperti pada Gambar (3-9) menggunakan perbedaan sudut polarisasi  $\theta = \pi/2$ , tetapi dengan nilai frekuensi center yang berbeda yaitu  $\Delta\omega = 150\text{nrad}$ , maka akan terjadi perubahan bentuk polarisasi yang semula terbentuk polarisasi melingkar kekanan dengan kecepatan putaran ditentukan oleh besarnya  $\Delta\omega$  yang kemudian berubah menjadi polarisasi ellips dan kemudian menjadi polarisasi linier, yang terus berulang setiap perioda putarnya membentuk apa yang disebut sebagai beat polarisasi.



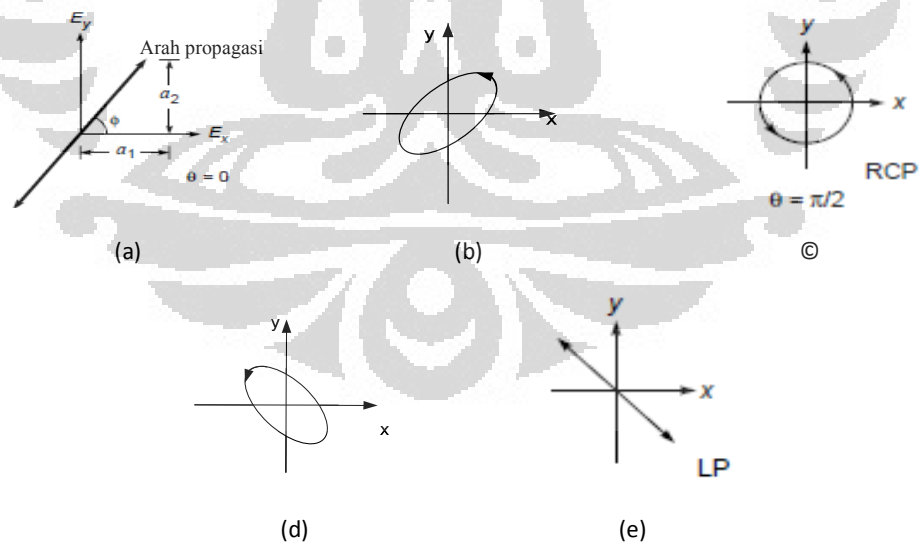


Gambar 3.10. perubahan polarisasi saat dua sumber saling orthogonal

Pada saat  $t = 0$ ,  $\vec{E}(t)$  memiliki polarisasi linier dimana memiliki nilai

$\varphi = \tan^{-1} \frac{|\vec{E}_y|}{|\vec{E}_x|} = \frac{\pi}{4}$ . Kemudian pada saat  $t = 0$  sampai  $t = \frac{\pi/2}{\Delta\omega}$ ,  $\vec{E}(t)$  berupa ellips

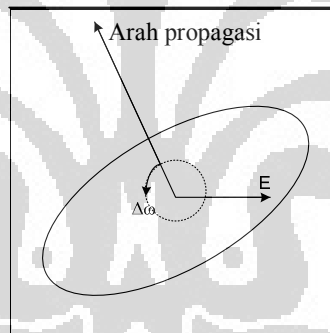
yang memiliki radius terpanjangnya tetap  $\varphi = \tan^{-1} \frac{|\vec{E}_y|}{|\vec{E}_x|} = \frac{\pi}{4}$ . Seperti diperlihatkan pada Gambar (3.11a) dan (3.11b).



Gambar 3.11. Perubahan polarisasi yang terjadi saat awal dan saat superposisi saling orthogonal

Pada saat kedua gelombang saling bersuperposisi dimana  $t = \frac{\pi/2}{\Delta\omega}$ , maka  $\vec{E}(t)$  memiliki polarisasi sirkuler dengan arah sumber putaran ke kanan. Kemudian pada saat  $t = \frac{\pi/2}{\Delta\omega}$  sampai  $t = \frac{\pi}{\Delta\omega}$ ,  $\vec{E}(t)$  berupa ellips yang memiliki radius terpanjangnya tetap  $\varphi = \frac{3\pi}{4}$ . Saat selanjutnya yaitu pada saat  $t = \frac{\pi}{\Delta\omega}$ ,  $\vec{E}(t)$  memperlihatkan polarisasi linier dengan  $\varphi = \tan^{-1} \frac{|\vec{E}_y|}{|\vec{E}_x|} = \frac{3\pi}{4}$ . Seperti diperlihatkan pada Gambar (3.11c), (3.11d) dan (3.11e).

Besarnya kecepatan putaran ditentukan oleh besarnya nilai  $\Delta\omega$ , sehingga semakin besar  $\Delta\omega$  yang terjadi akan menimbulkan putaran yang semakin cepat. Medan listrik E berputar sekali setiap periode T, dimana  $T = 2\pi/\Delta\omega$  dengan  $\Delta\omega$  merupakan angular frekuensinya.



Gambar 3.12 Arah perputaran polarisasi

### 3.4 Perhitungan kondisi polarisasi menggunakan Jones vektor

Untuk menentukan kondisi polarisasi yang terjadi, pembahasan secara matematis menggunakan Jones vektor. Saat dua medan listrik  $E_x$  dan  $E_y$  yang masing-masing saling tegak lurus (orthogonal), maka harus memenuhi persamaan:

$$E_x \cdot E_y = 0 \quad (3-14)$$

Inner product kedua medan listrik bernilai nol, sehingga

$$\begin{bmatrix} E_{1x} & E_{1y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{2x} \\ E_{2y} \end{bmatrix} = E_{1x} \cdot E_{2x}^* + E_{1y} \cdot E_{2y}^* \quad (3-15)$$

Medan  $E_x$  yang terpolarisasi terhadap sumbu-x dan medan  $E_y$  terpolarisasi terhadap sumbu-y, yang berpropagasi pada sumbu z, dimana masing-masing medan elektrik memiliki amplitudo sama yaitu  $a_x = a_y = a$ , tetapi dengan perbedaan frekuensi  $\omega$  dan  $\Delta\omega$ , dan dengan sudut polarisasi  $\theta = \pi/2$  dinyatakan sebagai persamaan:

$$\begin{aligned} \vec{E}_x &= \vec{a}_x \cos(\omega t) \\ \vec{E}_y &= \vec{a}_y \cos[(\omega t + \Delta\omega t) + \pi/2] \end{aligned}$$

Maka dituliskan dalam notasi eksponensial sebagai

$$\begin{aligned} \vec{E}_x &= \vec{a} e^{i\omega t} \\ \vec{E}_y &= \vec{a} e^{i[(\omega t + \Delta\omega t) + \pi/2]} \end{aligned}$$

Sehingga

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y \\ &= \vec{a} e^{i\omega t} + \vec{a} e^{i\omega t} e^{i(\Delta\omega t + \pi/2)} = \vec{a} + \vec{a} e^{i(\Delta\omega t)} \end{aligned} \quad (3-16)$$

Maka

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_x \\ \vec{E}_y \end{bmatrix} = \vec{a} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{a} \begin{bmatrix} 0 \\ e^{i(\Delta\omega t)} \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

Untuk gelombang terpolarisasi dengan amplitudo  $a_x = a_y = a$ , maka didapatkan

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \vec{E}_x \\ \vec{E}_y \end{bmatrix} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ e^{i(\Delta\omega t)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \vec{E}_x \\ \vec{E}_y \end{bmatrix} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i(\sin \Delta\omega t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-18)$$

Dari vektor yang dihasilkan, terlihat polarisasi yang terjadi adalah polarisasi melingkar (*circular*) kekanan (RCP).

### 3.5 Perhitungan Bandwidth terhadap Jarak

Perhitungan bandwidth terhadap jarak ini ditujukan untuk menentukan jarak maksimum yang dapat ditempuh dari penggabungan atau superposisi dua sumber cahaya yang digunakan. dan karena adanya pengaruh modal dispersi yang terjadi pada fiber multimode, dimana waktu tempuh masing-masing mode pada fiber berbeda.

#### 3.5.1 Modal Dispersi

Cahaya dari suatu sumber masuk ke fiber optik multimode dirambatkan dalam beberapa mode. Setiap mode ini melewati alur yang berbeda, sehingga jarak yang ditempuh tiap-tiap mode akan berbeda-beda. Jarak terpendek adalah yang sejajar dengan sumbu inti. Karena kecepatan tiap mode adalah berbeda, maka tiap mode akan mempunyai waktu tempuh yang berbeda.

Waktu tempuh yang dinyatakan sebagai fungsi respon waktu suatu fiber optik multimode tergantung modal dispersi yang terjadi. Lintasan yang ditempuh mempunyai jarak yang berlainan maka berkas-berkas cahaya yang merambat pada fiber optik ini akan mencapai tujuan dalam waktu yang berbeda sehingga pulsa pada sisi output mengalami pelebaran pulsa (dispersi)

Suatu fiber multimode step indeks memiliki perbedaan indek refraksi  $\Delta = 0,01$  dan indek bias inti  $n_1 = 1,46$ , maka dengan menggunakan persamaan (2.21), yaitu

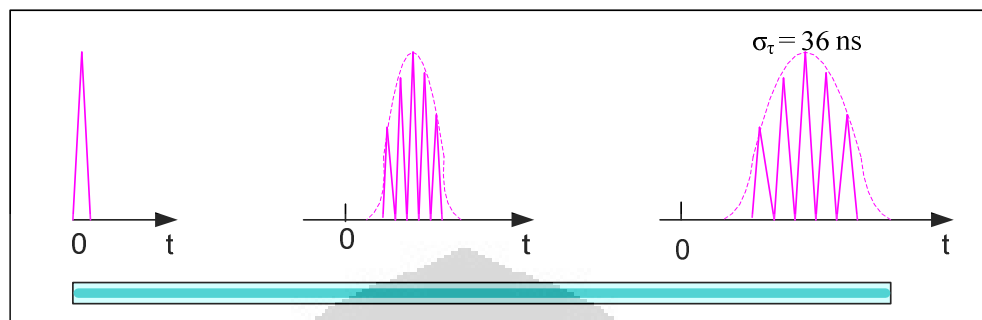
$$\sigma_{\tau} \approx \frac{L \Delta}{C_1 2}$$

Sehingga

$$\frac{\sigma_{\tau}}{L} = \frac{n_1 \Delta}{2 C_0} = \frac{(1,46)(0,01)}{2(3 \cdot 10^8)} = 24 \text{ ns / km}$$

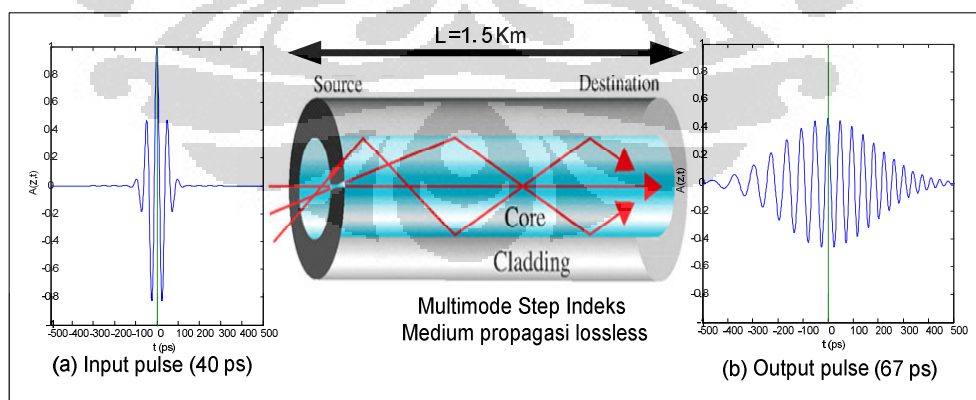
Jika kita modelkan bahwa jarak atau panjang lintasan yang akan kita pergunakan sebesar  $L_0 = 1.5 \text{ Km}$ , maka respon waktunya adalah

$$\sigma_{\tau} = 24 \text{ ns} / \text{km} \times 1.5 \text{ km} = 36 \text{ ns}$$



Gambar 3.13 Respon waktu yang terjadi pada multimode dengan panjang 1.5Km

Akibat panjang lintasan fiber optik yang digunakan sebesar  $L = 1.5 \text{ km}$  akan menghasilkan respon waktu fiber sebesar  $36 \text{ ns}$  atau  $0.036 \text{ ps}$ . Pada simulasi lebar pulsa awal sinyal input sebesar  $40 \text{ ps}$  akan terdispersi menjadi  $67 \text{ ps}$  pada jarak  $1.5 \text{ Km}$ , seperti diperlihatkan oleh hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar (3.14a), yaitu adalah pulsa input awal sebelum mengalami dispersi, dan Gambar (3.14b) merupakan pelebaran pulsa output yang dihasilkan akibat dari dispersi, dimana terjadinya penurunan amplitudo dan energi pulsa tersebar. Karena medium propagasi yang digunakan merupakan medium yang lossless, maka energi sinyal input tidak akan mengalami perubahan, yaitu tetap sama dengan energi pada sinyal output.



Gambar 3.14 Pulsa yang mengalami dispersi modal

Perbandingan bandwidth terhadap jarak (*Bit-rate distance product*)  $BL_0$  suatu fiber multimode adalah 10 Mb/s-Km atau 1Mb/s-10 Km [8]. Hal ini menunjukkan bahwa fiber optik multimode atau sistem akan bekerja efisien hingga 10 Mb/s sebelum dispersi merugikan mempengaruhi kinerja sinyal lebih panjang satu kilometer. Untuk jarak  $L = 1.5$  Km misalnya sistem akan bekerja efisien hingga bit-rate sebesar 6.667 Mb/s sebelum dispersi mempengaruhi kinerja sinyal lebih dari satu kilometer.

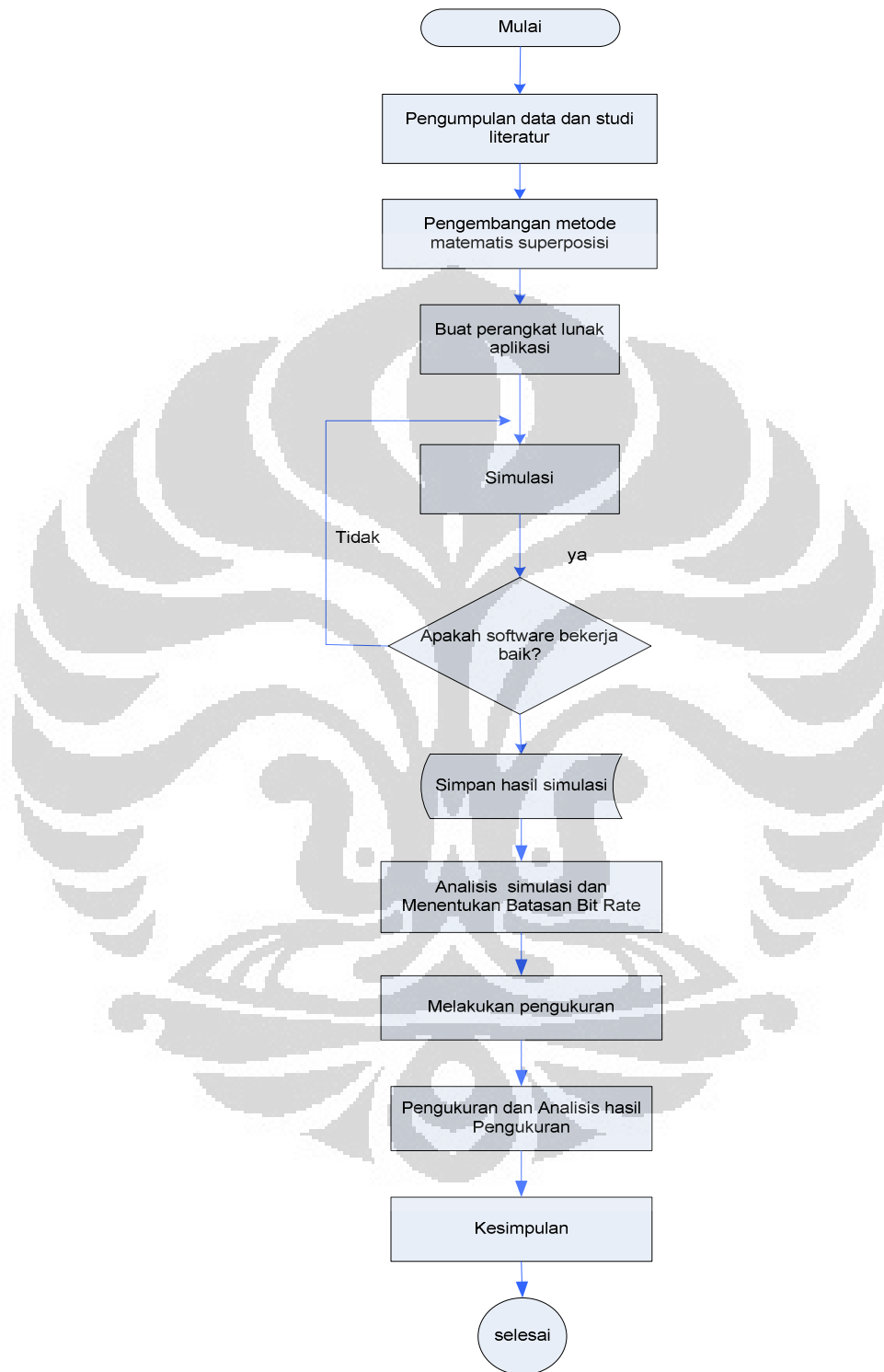
Dari hasil simulasi penggabungan dua sumber cahaya, dan berdasarkan besarnya bandwidth yang tersedia dari hasil superposisi dua sumber cahaya laser tersebut dimana masing-masing sumber memiliki frekuensi  $f_1=19.35 \times 10^{13}$  Hz dan  $f_2=19.48 \times 10^{13}$  Hz akan diperoleh bandwidth sebesar  $1.3 \times 10^{11}$  Hz atau sebesar 130 GHz . Maka diperoleh hubungan Bandwidth terhadap jarak (*Bit-rate distance product*)  $BL$ , adalah sebesar :

$$BL = 130 \text{ GHz-Km}$$

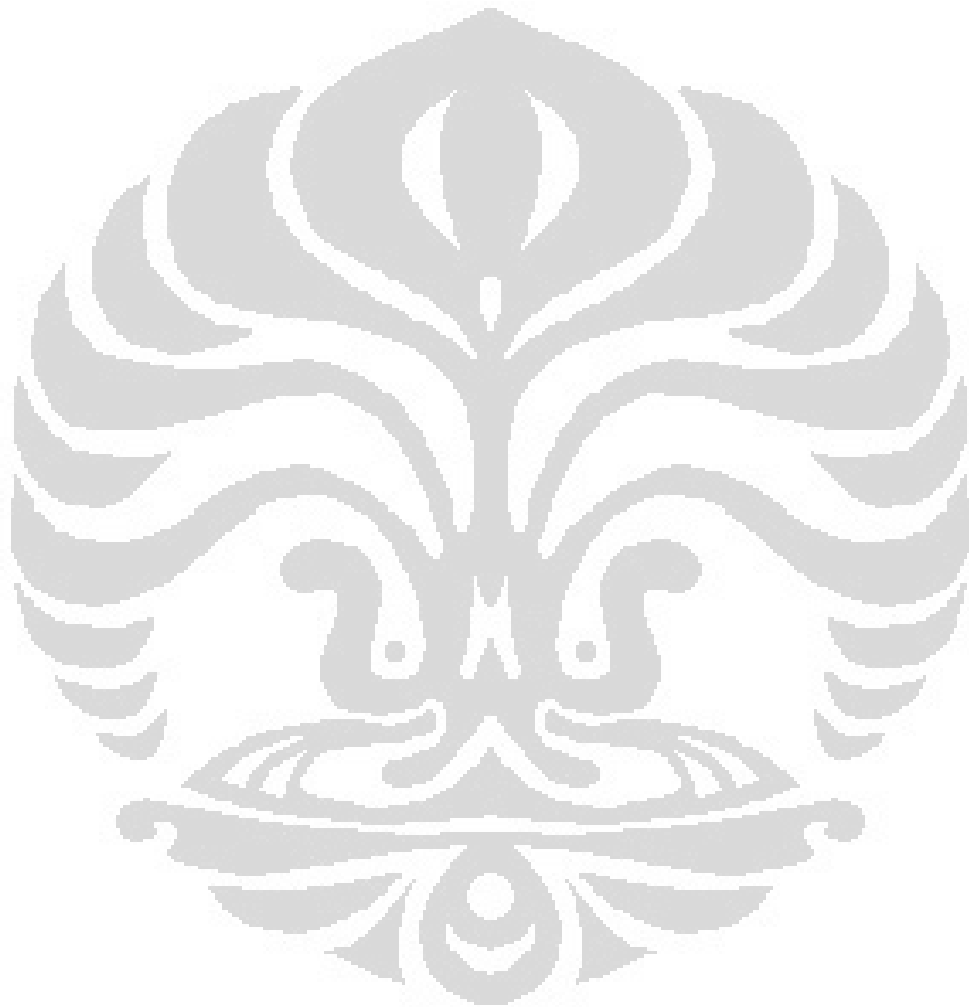
$$= 1 \text{ GHz- } 130 \text{ Km atau } 10 \text{ Ghz-}13\text{Km}$$

Jika panjang fiber yang digunakan sebesar 1.5 Km dari bandwidth yang tersedia yaitu 130 GHz-Km, maka sistem akan bekerja efisien hingga 86,667 GHz-Km.

### 3.6. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.15. Diagram alir penelitian





## BAB 4

### HASIL PENGUKURAN DAN ANALISA

Pada bab ini akan dipaparkan hasil pengukuran yang telah diperoleh dari percobaan superposisi dua sumber cahaya laser, berikut dengan analisa terhadap hasil perhitungan yang diperoleh.

#### 4.1 Set Up Eksperimen

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, penulisan selanjutnya yang akan dilakukan adalah melakukan pengukuran langsung terhadap sumber optik dan melakukan eksperimen superposisi terhadap dua sumber optik tersebut.

##### 4.1.1 Komponen penyusun sistem

Komponen utama yang menyusun transmitter  $T_x$  adalah Laser Driver, Laser Semikonduktor, 2x1 fiber coupler dan lensa transmitter (*beam collimator*). Laser driver digunakan untuk mengontrol sumber cahaya berdasarkan sinyal listrik yang diterima.

Sumber cahaya yang digunakan pada teknologi FSOC adalah menggunakan laser semikonduktor jenis DFB (*Distributed Feedback*) pada pita C (1530 - 1565 nm) yang memiliki karakteristik emisi berkas single mode, sirkuler dan daya yang cukup tinggi (5–10 mWatt) dan keuntungan ekonomis yaitu mudah didapatkan dipasar, akan tetapi cahaya yang berpropagasi dalam atmosfer sangat rentan mengalami berbagai gangguan optik.

Persyaratan utama sumber cahaya untuk digunakan dalam sistem dengan pertimbangan karakteristik sebagai berikut:

- 1) Berkas cahaya laser semikonduktor Gaussian dan koheren
- 2) Spektrumnya bersifat relatif monokromatik
- 3) Menghasilkan intensitas cahaya yang tinggi yakni lebih dari 1mW

- 4) Dapat dikonfigurasi sebagai modulasi langsung hingga orde puluhan Gbyte/s.
- 5) Dapat dikonfigurasi sebagai sumber cahaya yang terintegrasi dengan sistem modulasi secara optik yakni *absorption optical modulator* (AOM)

Sumber cahaya laser semikonduktor input ini diintegrasikan dengan *fiber coupler* (2x1 *fiber coupler*) untuk memperbesar daya transmisi berkas.

Jenis fiber optik yang digunakan dalam penelitian ini adalah fiber optik multimode step indeks. Fiber ini memiliki diameter inti (*core*) sesuai dengan rekomendasi dari CCITT G.651 sebesar 62.5  $\mu\text{m}$  dan dilapisi oleh jaket selubung (*cladding*) dengan diameter 125  $\mu\text{m}$ .

Pada fiber multimode step indeks mempunyai index bias cahaya sama, cahaya yang merambat pada sumbu akan sampai pada ujung lainnya terlebih dahulu (dispersi). Hal ini dapat terjadi karena lintasan yang melalui mode rendah dibandingkan sinar yang mengalami pemantulan pada dinding fiber optik. Sebagai hasilnya terjadi pelebaran pulsa atau dengan kata lain mengurangi lebar bidang frekuensi.

Karakteristik jenis fiber optik *Multimode* antara lain ;

- 1) Indeks bias inti (*core*) konstan.
- 2) Ukuran inti (*core*) besar (50 $\mu\text{m}$  - 200 $\mu\text{m}$ )
- 3) Penyambungan inti lebih mudah karena memiliki *diameter core* yang besar.
- 4) Terjadi modal dispersi dan akan signifikan mengikuti formula Perkalian antara Bandwidth dengan jarak, BL (Bandwidth-Length) = konstan.
- 5) Hanya digunakan untuk jarak pendek dan transmisi data *bit rate* yang rendah.

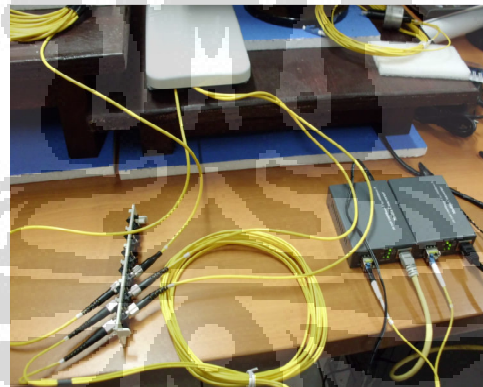
Untuk mengukur daya dari masing- masing laser dan daya yang dihasilkan dari superposisi kedua laser digunakan alat ukur optik yaitu Optical Power Meter,

dengan range sensitifitas  $-50$  dBm hingga  $+26$ dBm, seperti diperlihatkan pada Gambar (4.1).

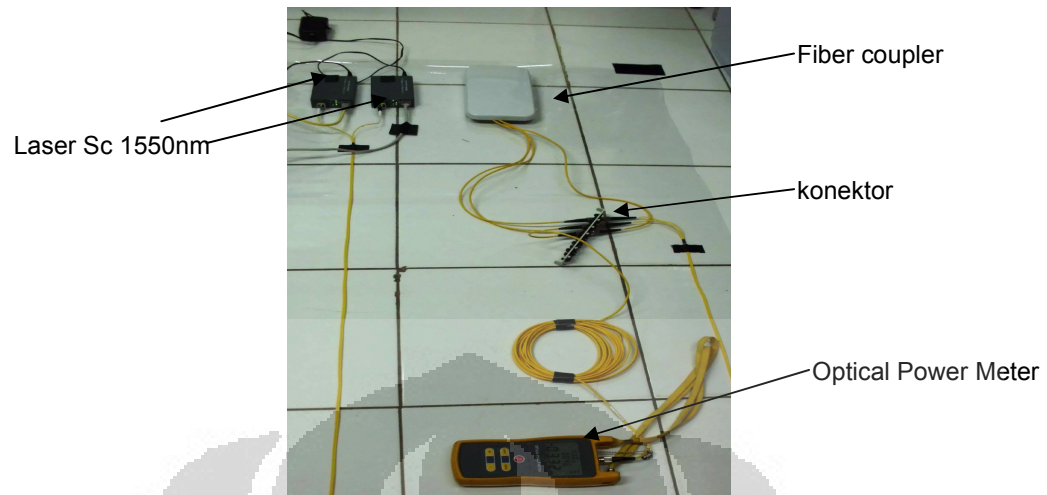


Gambar 4.1 Komponen penyusun system superposisi laser semikonduktor

Perancangan eksperimen yang dilakukan untuk pengukuran superposisi dua laser semikonduktor seperti diperlihatkan pada Gambar (4.2) dibawah ini.

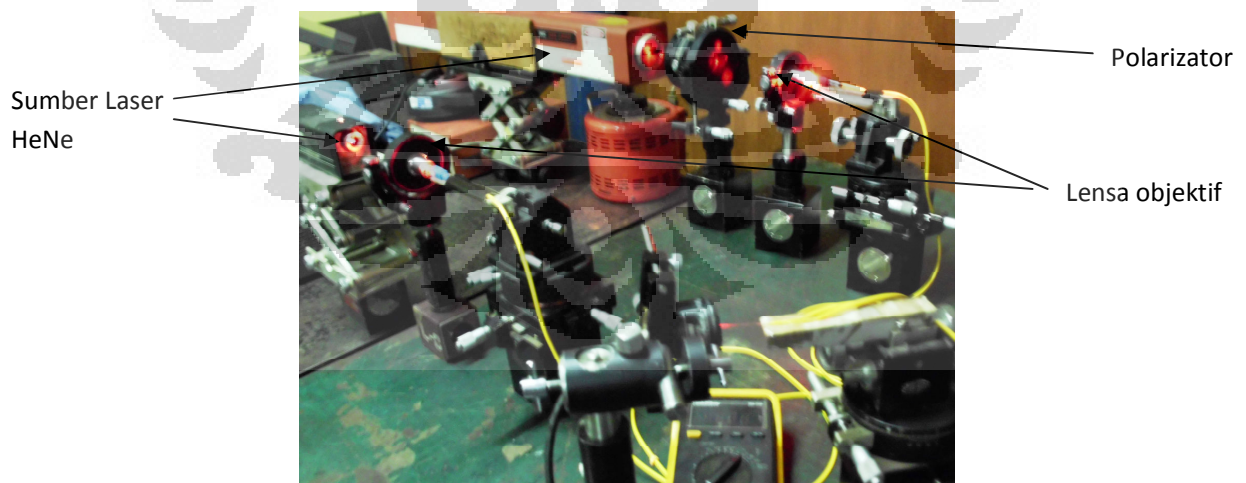


Gambar 4.2. Set up peralatan pada penggabungan dua sumber laser



Gambar 4.3 Pengukuran daya laser saat kedua laser digabungkan menggunakan coupler

Pada pengukuran menggunakan laser Helium-Neon, terdapat beberapa komponen yang menyusun sistem yaitu power supply dan dua sumber laser HeNe, lensa objektif, polarizer, polarizator, power meter serta coupler . Perancangan eksperimen untuk superposisi laser HeNe seting peralatan yang digunakan diperlihatkan pada gambar (4.4) dibawah ini.



Gambar 4.4. Mekanisme pengukuran superposisi pada laser HeNe

## 4.2. Hasil Pengukuran

Untuk melihat penambahan daya yang ditimbulkan dari penggabungan dua laser ini, maka pengukuran superposisi dua laser ini dilakukan menggunakan dua jenis laser berbeda, yaitu dua buah laser semikonduktor dan dua laser gas Helium-Neon (HeNe). Pasangan jenis laser yang digunakan bukan pasangan laser yang identik, karena masing-masing laser memiliki panjang gelombang (*wavelength*) yang tidak sama.

Pengukuran pertama dilakukan menggunakan laser semikonduktor, dimana dua sumber cahaya laser semikonduktor yang masing-masing memiliki panjang gelombang tidak identik digabungkan atau disuperposisikan menggunakan sebuah coupler.

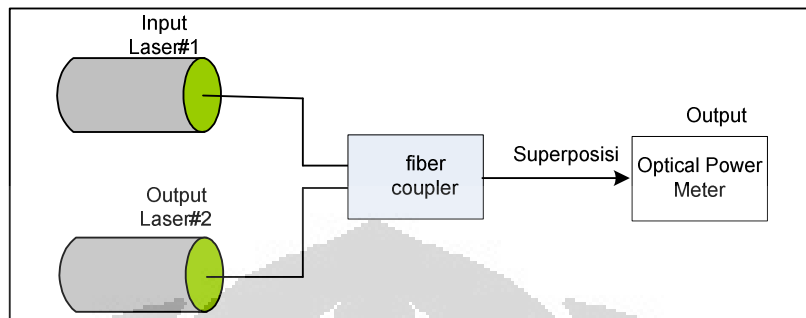
Pengukuran awal adalah untuk mengetahui daya keluaran kedua laser semikonduktor ini, masing-masing laser diukur dayanya pada ujung konektor fiber optik, data hasil pengukuran tersebut diperoleh daya masing-masing laser seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4.1. Daya (Power) laser Semikonduktor dan HeNe

|                     |         | Power (mW) |
|---------------------|---------|------------|
| Laser Semikonduktor | Laser 1 | 0.61       |
|                     | Laser 2 | 0.70       |
| Laser HeNe          | Laser 1 | 9.69       |
|                     | Laser 2 | 10.71      |

Begitu pula penggabungan untuk dua laser gas Helium-Neon (HeNe), berkas cahaya laser yang terpancar difokuskan pada lensa objektif, kemudian output cahaya keluaran dipancarkan kedalam inti fiber optik, yang diatur sedemikian rupa sehingga daya yang masuk ke dalam fiber optik dapat diperoleh dan menunjukkan daya yang maksimum. Pada ujung fiber optik daya masing-

masing laser diukur, yang dimaksudkan sebagai pembandingan dengan daya keluaran setelah melewati coupler.



Gambar 4.5 Mekanisme pengukuran daya laser

Setelah masing-masing laser diukur dayanya di ujung fiber optik, kemudian kedua laser digabungkan menggunakan coupler. Coupler yang dipergunakan pada penggabungan laser ini memiliki perbandingan dua masukan input akan menghasilkan satu keluaran output laser yaitu coupler 2x1. Pengukuran ini dilakukan untuk melihat sejauh mana daya laser berkurang akibat penggunaan coupler dan sambungan atau adaptor yang digunakan selama penggabungan kedua laser yaitu pada saat pengukuran dilakukan. Data hasil pengukuran untuk masing-masing laser terpolarisasi sama setelah melewati coupler dapat dilihat pada Tabel 4.2 dibawah ini.

Tabel 4.2. Pengukuran daya laser setelah melewati coupler pada polarisasi sama

|                     | Input (mW) |        | Output (mW) |        | Superposisi(mW) | Redaman                           |      |
|---------------------|------------|--------|-------------|--------|-----------------|-----------------------------------|------|
|                     | Laser1     | Laser2 | Laser1      | Laser2 | Laser1+laser2   | Rasio( $L_{Sinput}/L_{Soutput}$ ) | dB   |
| Laser Semikonduktor | 0.61       | 0.70   | 0.389       | Off    | 0.389           | 1.51                              | 1.79 |
|                     | 0.61       | 0.70   | Off         | 0.459  | 0.459           | 1.5                               | 1.76 |
|                     | 0.61       | 0.70   | 0.389       | 0.459  | 0.867           | 1.51                              | 1.76 |
| Laser HeNe          | 9.96       | 10.71  | 6.55        | Off    | 6.55            | 1.52                              | 1.8  |
|                     | 9.96       | 10.71  | Off         | 7.093  | 7.093           | 1.51                              | 1.79 |
|                     | 9.96       | 10.71  | 6.55        | 7.093  | 13.68           | 1.51                              | 1.79 |

Pengaturan polarisasi pada penggabungan atau superposisi kedua laser HeNe yaitu dengan menambahkan polarizator pada output laser HeNe. Setelah kedua cahaya laser digabungkan menggunakan coupler pada ujungnya, dimana kemudian polarizer diatur pada posisi 0 derajat dan 90 derajat.

Sedangkan pada laser semikonduktor, pengaturan polarisasi dilakukan dengan mengatur posisi fiber optik, sehingga didapatkan nilai maksimum yang dapat dicapai.

Data hasil pengukuran untuk masing-masing laser terpolarisasi 90° setelah melewati coupler dapat dilihat pada Tabel 4.3 dibawah ini.

#### 4.3. Pengukuran daya laser setelah melewati coupler pada polarisasi 90°.

|                     | Input (mW) |        | Output (mW) |        | Superposisi(mW) | Redaman                                 |      |
|---------------------|------------|--------|-------------|--------|-----------------|---|------|
|                     | Laser1     | Laser2 | Laser1      | Laser2 | Laser1+laser2   | Rasio( $L_{S_{input}}/L_{S_{output}}$ ) | dB   |
| Laser Semikonduktor | 0.61       | 0.70   | 0.399       | Off    | 0.399           | 1.53                                    | 1.83 |
|                     | 0.61       | 0.70   | Off         | 0.461  | 0.461           | 1.50                                    | 1.76 |
|                     | 0.61       | 0.70   | 0.399       | 0.461  | 0.873           | 1.50                                    | 1.79 |
| Laser HeNe          | 9.96       | 10.71  | 6.652       | Off    | 6.652           | 1.49                                    | 1.73 |
|                     | 9.96       | 10.71  | Off         | 7.093  | 7.093           | 1.51                                    | 1.79 |
|                     | 9.96       | 10.71  | 6.652       | 7.093  | 13.783          | 1.50                                    | 1.76 |

#### 4.2. Analisis Hasil Pengukuran

Dalam perancangan pengukuran ini, saluran fiber optik yang digunakan akan selalu terhubung pada komponen lainnya menggunakan konektor, yaitu konektor antar serat optik ataupun konektor yang terhubung langsung dengan sumber cahaya. Pada dasarnya penyambungan antar fiber optik menggunakan konektor memiliki kontribusi terhadap redaman pada transmisi cahaya pada fiber optik, sehingga akan memberikan pengaruh yaitu cahaya mengalami penurunan

daya. Rugi-rugi akibat penambahan konektor atau splice diantara dua buah serat optik disebut *insertion loss*.

Dari kedua data yang diperoleh dengan perlakuan pengukuran yang berbeda maka kita dapat menentukan atau menghitung redaman yang terjadi pada coupler dan konektor fiber optik menggunakan perumusan menggunakan persamaan berikut: [13]

$$Loss(dB) = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (4.1)$$

Dimana  $P_{in}$  = daya keluaran tanpa coupler

$P_{out}$  = daya keluaran dengan menggunakan coupler

Faktor lain yang turut memberikan sumbangan rugi-rugi pada suatu transmisi serat optik adalah penggunaan adaptor dalam menyambung dua buah serat optik. Pada umumnya, saat instalasi, dua kabel yang dihubungkan oleh konektor tersebut tidak dihubungkan secara langsung melainkan diberi sedikit jarak. Jarak antar dua serat optik ini memberikan rongga udara diantaranya. Hal ini menyebabkan meskipun kedua serat optik memiliki indeks bias yang sama tetap akan ada daya yang dipantulkan kembali ke kabel pengirim karena ada beda indeks antara inti dari serat dengan udara. Dengan perbedaan indeks tersebut didapat suatu nilai faktor yang disebut faktor fresnel reflection (R). Perumusannya dapat menggunakan persamaan (4.2) berikut ini [14].

$$R = \left( \frac{n_1 - n}{n_1 + n} \right)^2 \quad (4.2)$$

Dengan  $n_1$  adalah indeks bias dari serat optik pengirim dan  $n$  adalah indeks bias serat optik penerima atau medium perantara. Nilai faktor ini menunjukkan banyaknya persen daya yang hilang karena dipantulkan kembali ke dalam inti. Besarnya daya yang hilang akibat *fresnel reflection* dapat dihitung menggunakan persamaan (4.3) berikut ini [14].

$$Loss(dB) = 10 \log(1 - R) \quad (4.3)$$



Dari hasil pengukuran yang dilakukan, maka besarnya daya input laser 1 semikonduktor sebesar 0.61 mW setelah melewati konektor dan coupler menjadi berkurang yaitu sebesar 0.41 mW, sehingga dapat dihitung rasio daya yang hilang sebesar :

$$Loss(dB) = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} = 10 \log \frac{0.61}{0.399} = 1.83 dB$$

Sedangkan untuk laser 2 semikonduktor, daya input sebesar 0.70 mW setelah melewati konektor dan coupler menjadi berkurang menjadi 0.461 mW, sehingga dapat dihitung rasio daya yang hilang adalah sebesar 1.76dB.

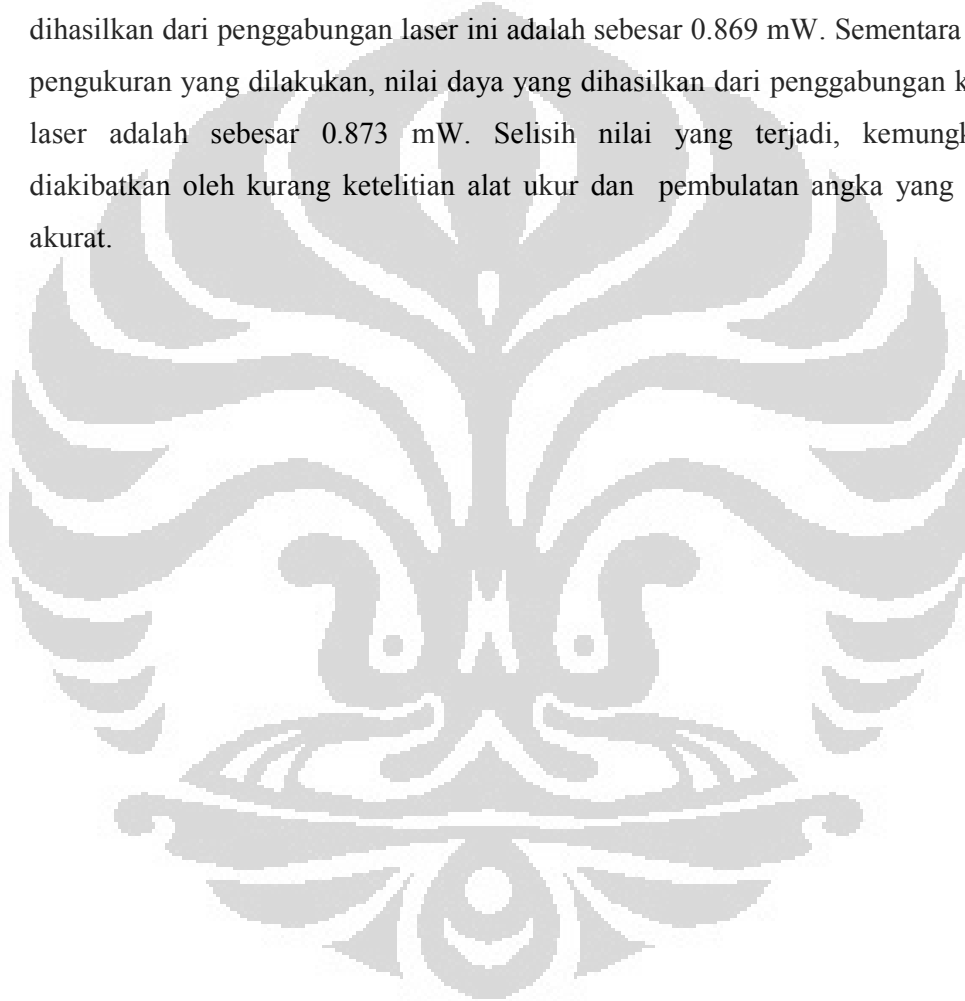
Pada pengukuran terhadap laser Helium Neon, untuk laser 1 besarnya daya input laser 1 adalah sebesar 9.69 mW setelah melewati konektor dan coupler menjadi berkurang yaitu sebesar 6.652 mW, sehingga dapat dihitung rasio daya yang hilang sebesar 1.73 dB. Sedangkan untuk laser 2 besarnya daya input laser 2 adalah sebesar 10.71 mW setelah melewati konektor dan coupler menjadi berkurang yaitu sebesar 7.093 mW, sehingga dapat dihitung rasio daya yang hilang sebesar 1.79 dB.

Besarnya rasio daya rata-rata yang hilang atau redaman yang terjadi pada coupler dan pada konektor fiber optik adalah kira-kira sebesar 1.79 dB, karenanya redaman ini mengurangi daya laser yang bergabung.

Kemudian setelah kita mengetahui berapa besar redaman yang terjadi pada peralatan yang digunakan untuk penggabungan laser yang kita miliki, maka selanjutnya kita dapat menentukan secara teoritis berapa besar daya yang dapat dihasilkan dari penggabungan kedua laser tersebut. Jika total daya yang masuk ke dalam coupler adalah  $P_{input}$  yang merupakan penjumlahan daya laser 1 dan laser 2, yaitu sebesar 1.3 mW, kemudian dilewatkan pada coupler yang memiliki redaman sebesar 1.79 dB, maka daya  $P_{out}$  yang akan dihasilkan adalah sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Loss}(dB) &= 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \\ 1.67(dB) &= 10 \log \left( \frac{1.31}{P_{out}} \right) = 10(\log 1.31 - \log P_{out}) \\ \log P_{out} &= \log 1.31 - 0.179 \\ P_{out} &= 0.869 \text{ mW} \end{aligned}$$

Jadi dari perhitungan, dapat diketahui bahwa daya yang seharusnya dihasilkan dari penggabungan laser ini adalah sebesar 0.869 mW. Sementara hasil pengukuran yang dilakukan, nilai daya yang dihasilkan dari penggabungan kedua laser adalah sebesar 0.873 mW. Selisih nilai yang terjadi, kemungkinan diakibatkan oleh kurang ketelitian alat ukur dan pembulatan angka yang tidak akurat.



## BAB 5

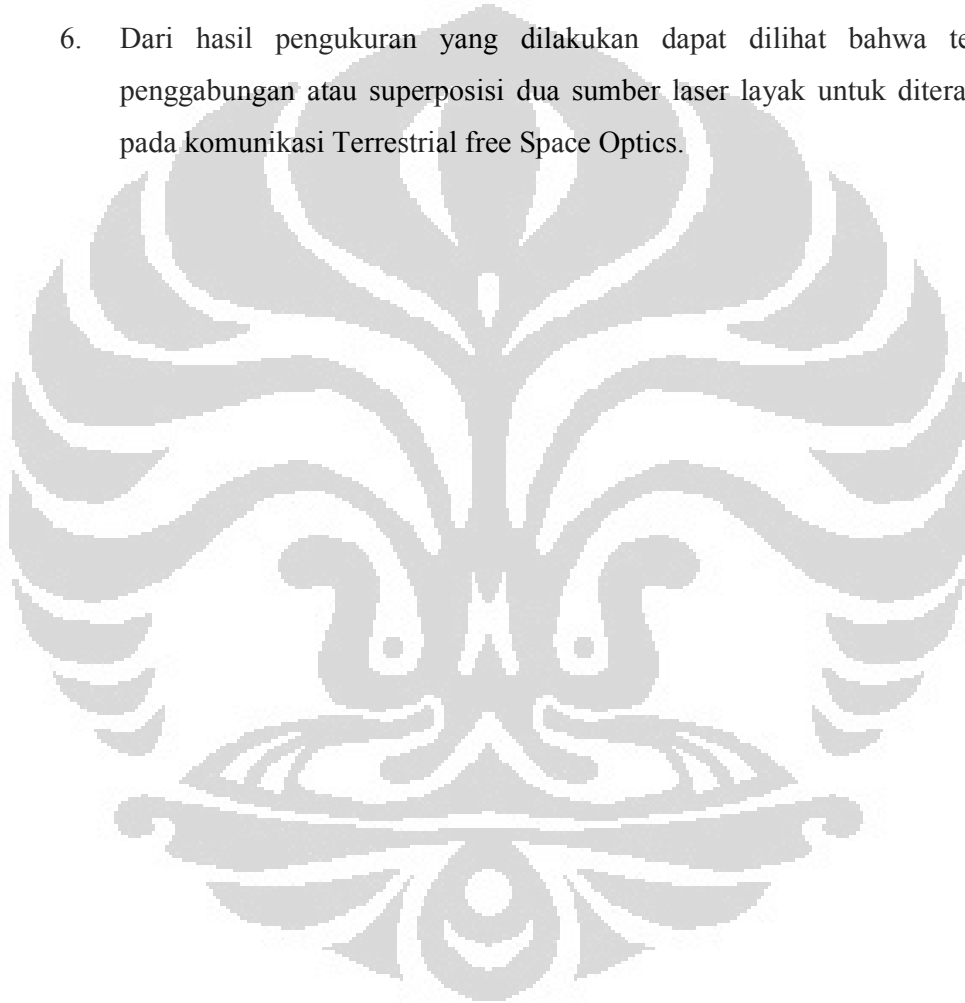
### KESIMPULAN

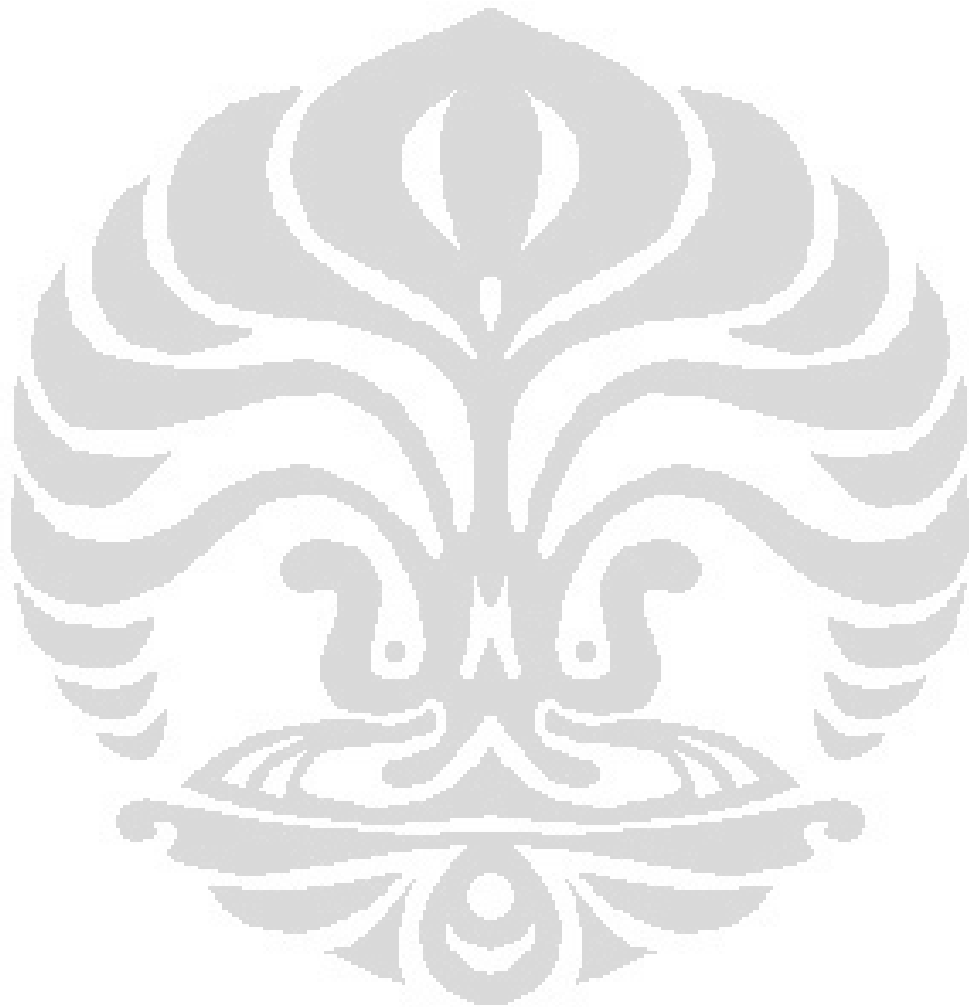
Dari hasil simulasi dan pengukuran yang telah dilakukan terhadap dua sumber cahaya dengan beda frekuensi, yaitu  $\Delta f$ , maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggabungan berkas cahaya secara superposisi ini, ditujukan untuk mendapatkan cahaya dengan intensitas yang lebih tinggi dan juga untuk memecahkan kebutuhan laser berenergi tinggi.
2. Sumber cahaya optik yang digunakan adalah dua sumber yang berbeda frekuensinya, dengan beda  $\Delta f$ . Apabila kedua sumber cahaya berbeda frekuensi tersebut saling disuperposisikan dengan polarisasi yang sama, maka akan menimbulkan terjadinya beat frekuensi amplitudo. Munculnya beat frekuensi ini sebenarnya tidak diharapkan karena akan menyebabkan perubahan amplitudo pada receiver dan menurunkan bit rate.
3. Karena munculnya beat frekuensi pada penggabungan sumber cahaya yang memiliki polarisasi sama, dalam riset ini diusulkan penggabungan sumber yang terpolarisasi  $90^\circ$ . Dari penggabungan sumber terpolarisasi  $90^\circ$  ini, beat frekuensi tidak muncul, sebagai gantinya adalah beat polarisasi yang diwujudkan dalam bentuk perubahan polarisasi. Namun perubahan ini tidak akan berpengaruh terhadap bit rate pada detektor yang insensitif terhadap polarisasi.
4. Daya yang dihasilkan dari penggabungan laser semikonduktor terpolarisasi berbeda  $90^\circ$  yaitu laser1 sebesar 0.61mW dan laser2 sebesar 0.70mW adalah sebesar 0.873 mW. Sementara hasil pengukuran yang dilakukan pada laser HeNe terpolarisasi  $90^\circ$  , untuk laser1 sebesar 9.69 mW dan

laser2 sebesar 10.71 menghasilkan daya sebesar 13.68 mW. Besarnya redaman pada coupler adalah sebesar 1.79 dB.

5. Besarnya daya yang dihasilkan dari penggabungan dua buah sumber cahaya laser adalah kurang lebih sebesar penjumlahan kedua daya laser tersebut setelah dikurangi redamannya.
6. Dari hasil pengukuran yang dilakukan dapat dilihat bahwa teknik penggabungan atau superposisi dua sumber laser layak untuk diterapkan pada komunikasi Terrestrial free Space Optics.





## DAFTAR REFERENSI

- [1] Oleksiy. A., et al, *Spectral Beam Combining and Coherent Coupling of laser by Volume Bragg gratings*, IEEE journal of selected Topics in Quantum Electronics, Vol.15, No.2, March/April 2009.
- [2] Tso. Yee. Fan, et al, *Laser Beam Combining for Power and Brightness Scaling*, MIT Lincoln Laboratory, IEEE, 2000.
- [3] Free Space Optic Communication report  
<<http://www.seminarprojects.com/Thread-freespace-optics-full-report?m>>
- [4] H. Hemmati, *Interplanetary laser communications*, *Optics and Photonics News*, vol. 18, pp. 22-27, Nov. 2007.
- [5] H. Hemmati, *Deep Space Optical Communications*, in *Deep Space Communications and navigation series* Canifornia: Wiley-Interscience, 2006.
- [6] X. Zhu and J. M. Kahn, *Free-Space Optical Communication Through Atmospheric Turbulence Channels*, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, pp. 1293-1300, Aug. 2002.
- [7] D. Killinger, *Free Space Optics for Laser Communication Through The Air*, *Optics & Photonics News*, vol. 13, pp. 36-42, Oct. 2002.
- [8] Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, 1991.
- [9] Ajoy Ghatak, *Optics*, third edition, International Edition, McGraw Hill, 2005.
- [10] CVI Melles Griot, *Gaussian Beam Optic*, Technical Guide, 2009.  
<<https://cvmellesgriot.com/Products/Documents/TechnicalGuide/Gaussian-Beam-Optics.pdf>>
- [11] Circular Polarization, <[http://en.wikipedia.org/wiki/Circular\\_polarization](http://en.wikipedia.org/wiki/Circular_polarization)>
- [12] John Proakis, Masoud Salehi, *Digital Communication*, 4<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, 2008.

- [13] John P. Powers, *An Introduction to fiber Optic System*, Second Edition, McGraw-Hill International Edition, 1997.
- [14] Joseph C. Palais , *Fiber Optic Communications*, Third Edition, Englewood, NJ : Prantice Hall, 1992.
- [15] T.Y.Fan, *Laser Beam Combining for High-Power, High-Radiance Source*, IEEE Journal of Selected Topic in Quantum Electronic, Vol.II, No.3, June 2005.
- [16] Radoslaw Uberna, at al, *Coheren Polarization Beam Combination*, IEEE Journal of Quantum Electronic, Vol.46, No.8, August 2010.

