



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**PERENCANAAN *ARRAYED WAVEGUIDE GRATING*
(*AWG*) *UNTUK WAVELENGTH DIVISION*
MULTIPLEXING (WDM) PADA *C-BAND***

Frezza Oktaviana Hariyadi
NRP 2213 105 014

Dosen Pembimbing
Sri Rahayu, ST., M.Kom.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 141599

**PLANNING ARRAYED *WAVEGUIDE* GRATINGS (AWG)
FOR WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING (WDM)
AT *C-BAND***

Frezza Oktaviana Hariyadi
NRP 2213 105 014

Supervisor
Sri Rahayu, ST., M.Kom.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**PERENCANAAN ARRAYED WAVEGUIDE GRATING
(AWG) UNTUK WAVELENGTH DIVISION
MULTIPLEXING (WDM) PADA C-BAND**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui

Dosen Pembimbing

Sri Rahayu S.T., M.Kom

NIP. 19680228 199702 2 001



PERENCANAAN *ARRAYED WAVEGUIDE GRATING (AWG) UNTUK WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING (WDM) PADA C-BAND*

Frezza Oktaviana Hariyadi
2213 105 014

Dosen Pembimbing I : Sri Rahayu S.T., M.Kom

ABSTRAK

Teknologi *Arrayed Waveguide Grating (AWG)*, salah satu solusi membagi kanal menjadi sub kanal lebih kecil dengan mengatur selisih panjang *array* tetap. Teknik AWG bisa menghasilkan transmisi koheren, yang cocok untuk *wavelength division multiplexing (WDM)*, baik sebagai *multiplexer, demultiplexer, filter, add-drop device*, dan lainnya.

Dalam Tugas Akhir ini, dilakukan perencanaan desain parameter AWG beroperasi pada kanal *C-Band* (1530-1560 nm), untuk mendukung kebutuhan kanal WDM, baik *coarse-WDM (CWDM)*, *dense-WDM (CWDM)* maupun *very high density-WDM (VHDWDM)*. Perencanaan dilakukan lewat perhitungan teoritis dan menggunakan bantuan *tool* berupa *WDM_Phasar*.

Perhitungan parameter AWG secara teoritis bertujuan menghasilkan parameter desain ideal, sementara lewat *WDM_phasar* dengan menambahkan batasan ukuran devais, *crosstalk* dan *nonuniformity*, diharapkan akan diperoleh parameter desain yang lebih realistis. Adapun parameter yang diamati meliputi besarnya orde difraksi (m), panjang *free propagation range (FPR)*, perbedaan panjang *array* (ΔL), jumlah *array* (N_{array}), jumlah kanal I/O (N_{max}) dan *free spectral range (FSR)*.

Dengan contoh spasi kanal 100 GHz pada *C-band*, dihasilkan parameter hitungan teoritis sebesar 1308,61 μm , 25,1698 μm , 43,7143, 108 buah, 27 kanal dan 21,211 nm, masing-masing untuk nilai FPR, ΔL , m , N_{array} , N_{max} dan FSR. Sedangkan lewat bantuan *WDM_Phasar* dengan batasan ukuran devais (15000x9000 μm^2), *crosstalk* (-35 dB) dan *nonuniformity* (0,5), menghasilkan parameter AWG 1197,347 μm (FSR), 23,764 μm (ΔL), 41(m), 56 (N_{array}), 16(N_{max}) dan 11,2 nm(FSR). Semakin besar spasi kanal, jumlah bit yang bisa diangkut juga semakin banyak.

Kata Kunci : *AWG, WDM, C-Band, crosstalk, non-uniformity*

PLANNING ARRAYED WAVEGUIDE GRATINGS (AWG) FOR WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING (WDM) AT C-BAND

Frezza Oktaviana Hariyadi
2213 105 014

Supervisor I : Sri Rahayu S.T., M.Kom

ABSTRACT

Arrayed waveguide Grating (AWG) technology is one solution divides the channel into sub-channels, the smaller the margin set fixed array length. The AWG technique can produce coherent transmission, which are suitable for wavelength division multiplexing (WDM), either as a multiplexer, demultiplexer, filters, add-drop device and so on.

In this final project, planned the design parameters of the AWG operates on C-band channel (1530-1560 nm), to support the needs of WDM channels, both coarse-WDM (CWDM), dense-WDM (CWDM) and very high-density WDM (VHDWDM). AWG design planning is done through theoretical calculations and use a tool assistance such WDM_Phasar.

AWG theory parameter calculation is purpose in order to produce an ideal design parameters, while WDM_phasar by adding device size limitations, crosstalk and nonuniformity, is expected to be obtained more realistic design parameters. The parameters include the magnitude of the observed diffraction order (m), free propagation length range (FPR), the array length difference (ΔL), the number of arrays (N_{array}), the number of channels of I / O (N_{max}) and the free spectral range (FSR).

Taking the example of a 100 GHz channel *spacing* in C-band, after the calculation of the theoretical yield AWG parameters of 1308.61 μm , μm 25.1698, 43.7143, 108 pieces, 27 channels and 21.211 nm, respectively for the value of FPR, ΔL , m , N_{array} , N_{max} and FSR. While passing WDM_Phasar assistance device size limit (15000x9000 μm^2), crosstalk (-35 dB) and nonuniformity (0.5), generate parameter 1197.347 μm AWG (FSR), 23.764 μm (ΔL), 41 (m), 56 (N_{array}), 16 (N_{max}) and 11.2 nm (FSR). The larger the channel *spacing*, the number of bits that can be transported also increased.

Keyword : AWG, WDM, C-Band, crosstalk, non-uniformity

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan buku Tugas Akhir dengan judul **“PERENCANAAN ARRAYED WAVEGUIDE GRATING (AWG) UNTUK WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING (WDM) PADA C-BAND”**.

Tugas akhir merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan program studi Strata-1 pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini banyak mengalami kendala, namun berkat bantuan, bimbingan, dan kerjasama dari berbagai pihak sehingga kendala-kendala tersebut dapat diatasi. Untuk itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan banyak terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada :

1. Kedua orang tua, Usman Riyadi dan Tati Hartini, adik saya Rifki Hariyadi, Sarah Aulia Aziizah yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa kepada penulis.
2. Ibu Sri Rahayu S.T., M.Kom selaku Dosen Pembimbing atas segala bantuan, perhatian, dan arahan selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Endroyono, DEA selaku Koordinator Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia Jurusan Teknik Elektro ITS.
4. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono S.T., M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS.
5. Bapak dan Ibu dosen bidang studi Telekomunikasi Multimedia, Teknik Elektro ITS
6. Rekan-rekan LJ Telekomunikasi Multimedia, dan LJ Gasal 2013, Grup Markas dan Barudak Plumbon

Penulis menyadari bahwa pada penyusunan laporan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan-kekurangan karena keterbatasan kemampuan yang penulis miliki, walaupun demikian penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi yang membutuhkannya.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Pembahasan	3
1.7 Relevansi	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pendahuluan	5
2.2 Semikonduktor Optik	6
2.2.1 <i>Energy Gap</i> (Rumus E_g)	8
2.2.2 <i>Numerical Apperture</i>	10
2.2.3 Bilangan V	12
2.2.4 Jumlah <i>Mode</i>	13
2.3 <i>Band</i> Optik	13
2.4 WDM	13
2.4.1 Klasifikasi WDM	14
2.4.2 Teknologi WDM	15
2.4.3 Pemanfaatan WDM	18
2.4.4 Komponen WDM	18
2.5 <i>Arrayed Waveguide Grating</i>	19
2.5.1 Komponen AWG	19
2.5.2 Prinsip Kerja AWG	20
2.5.3 AWG dalam Jaringan	21
2.6 Parameter AWG	22

2.6.1	Parameter yang Dipilih	23
2.6.2	Parameter yang Dihitung	23
2.6.2.1	Orde Difraksi	23
2.6.2.2	Perbedaan Panjang <i>Array</i>	24
2.6.2.3	Panjang Lintasan <i>Slab Waveguide</i>	24
2.6.2.4	<i>Free Spectral Range</i>	25
2.6.2.5	Jumlah Maksimum dari <i>Input/Output</i> Kanal	25
2.6.2.6	Jumlah <i>Arrayed Waveguide</i>	25
2.6.3	Parameter Lain	25
2.6.3.1	<i>Insertion Loss</i>	25
2.6.3.2	<i>Non-Uniformity</i>	26
2.6.3.3	<i>Crosstalk</i>	27
2.7	Kinerja WDM	27
2.7.1	<i>Line Coding</i>	28
2.7.2	<i>Bit rate</i> Standar ITU	28
2.7.3	<i>Bit rate</i>	29
2.7.3.1	<i>Nyquist</i>	29
2.7.3.2	<i>Rise Time</i>	29
2.7.3.3	<i>Gaussian</i>	30

BAB 3 PERENCANAAN SISTEM ARRAYED WAVEGUIDE GRATING..... 31

3.1	<i>AWG Tool (WDM_Phasar)</i>	31
3.1.1	Perhitungan Parameter AWG dengan <i>WDM_Phasar</i>	31
3.1.2	Hasil Desain AWG menggunakan <i>WDM_Phasar</i>	35
3.2	Skenario Pengujian	35
3.2.1	Perhitungan Parameter Semikonduktor ..	36
3.2.2	Parameter yang Dipilih	37
3.2.3	Parameter yang Dihitung	37
3.2.4	Perencanaan dengan <i>WDM_Phasar</i>	38
3.2.5	Perhitungan Performansi Sistem	38

BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA 39

4.1	Parameter Semikonduktor	39
4.1.1	Penentuan Nilai <i>Energy gap</i> (E_g)	39

4.1.2	Perhitungan <i>Numeric Aperture</i> (NA)	39
4.1.3	Perhitungan Bilangan V	40
4.1.4	Perhitungan Jumlah Mode Transmisi.....	40
4.2	Perhitungan Parameter AWG	41
4.2.1	Orde difraksi (m)	41
4.2.2	Perbedaan Panjang Array (ΔL).....	41
4.2.3	Panjang Lintasan <i>Slab</i> (L_j).....	42
4.2.4	<i>Free Spectral Range</i> (FSR)	42
4.2.5	Jumlah Kanal (N_{max})	43
4.2.6	Jumlah <i>Array</i> (N_{array}).....	43
4.3	Parameter AWG pada WDM	44
4.4	Parameter AWG dengan <i>WDM Phasar</i>	45
4.4.1	Pengaruh Ukuran <i>Device</i>	45
4.4.2	Pengaruh Jumlah Kanal	48
4.4.3	Pengaruh <i>Crosstalk</i>	49
4.4.4	Pengaruh Spasi Kanal	50
4.4.5	Pengaruh <i>Non-Uniformity</i>	51
4.5	Pembahasan Parameter AWG.....	52
4.5.1	Perhitungan Teoritis vs <i>WDM Phasar</i> ...	52
4.5.2	CWDM pada <i>C-Band</i>	54
4.5.3	Perbandingan Kanal WDM	55
4.6	Perhitungan Performansi Kanal WDM.....	58
BAB 5	PENUTUP	61
5.1	Kesimpulan	61
5.2	Saran	62
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN A PROPOSAL TUGAS AKHIR.....		65
LAMPIRAN B HASIL PERENCANAAN AWG.....		73
LAMPIRAN C LANGKAH-LANGKAH SIMULASI.....		77
LAMPIRAN D HASIL SIMULASI		81
LAMPIRAN E LISTING PROGRAM MATLAB		85
BIOGRAFI PENULIS		87

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	<i>Energy Gap</i> pada <i>Window</i> Optik.....	10
Tabel 2.2	<i>Numerical Aperture</i> Beberapa Diameter Optik.....	12
Tabel 2.3	Pembagian klasifikasi <i>band</i> optik	13
Tabel 2.4	<i>Bit rate</i> Standar ITU dan Sonet	29
Tabel 3.1	Parameter AWG yang Dipilih	37
Tabel 3.2	Parameter yang Dihitung	38
Tabel 4.1	Hasil Perhitungan Parameter AWG	44
Tabel 4.2	Parameter Perencanaan AWG	47
Tabel 4.3	Pengaruh Ukuran AWG	47
Tabel 4.4	Pengaruh Jumlah Kanal	48
Tabel 4.5	Pengaruh <i>Crosstalk</i>	49
Tabel 4.6	Pengaruh Spasi Kanal	50
Tabel 4.7	Pengaruh <i>Non-uniformity</i>	52
Tabel 4.8	Perbedaan Hasil Perhitungan Teoritis dan <i>WDM_Phasar</i>	53
Tabel 4.9	Pengaruh spasi kanal CWDM	54
Tabel 4.10	<i>Bit rate</i> Kanal WDM.....	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar	2.1	Klasifikasi <i>Window</i> Optik	5
Gambar	2.2	Struktur Fiber Optik	6
Gambar	2.3	<i>Single-mode, Step-index</i> dan <i>Graded-index</i>	7
Gambar	2.4	Perbedaan <i>Energy Gap</i> Material	8
Gambar	2.5	<i>Energy gap</i> beberapa Material Semikonduktor	10
Gambar	2.6	<i>Numerical Aperture</i> Fiber Optik	11
Gambar	2.7	Komponen Sistem DWDM	14
Gambar	2.8	FBG dan <i>Dichroic Filter</i>	15
Gambar	2.9	Sistem <i>Arrayed Waveguide Grating</i>	16
Gambar	2.10	Prinsip <i>Single Thin-film</i>	16
Gambar	2.11	Prinsip <i>Multilayer Thin-film</i>	17
Gambar	2.12	Sistem <i>Thin-film Filter</i>	17
Gambar	2.13	Komponen Sistem WDM	18
Gambar	2.14	Komponen Dasar AWG	20
Gambar	2.15	Pembagian Sistem AWG	20
Gambar	2.16	Konfigurasi OADM pada AWG	21
Gambar	2.17	Aplikasi AWG dalam Sistem	22
Gambar	2.18	Spektrum <i>Insertion Loss</i>	26
Gambar	2.19	Pengkodean Saluran NRZ dan RZ	28
Gambar	2.20	Kurva <i>Rise Time</i> sebagai Fungsi Waktu	30
Gambar	3.1	Tampilan Data Awal	32
Gambar	3.2	Parameter WDM	32
Gambar	3.3	<i>Non-uniformity</i> dan <i>Output</i> Kanal	33
Gambar	3.4	Tampilan Spasi Kanal, dan <i>Array Maximum Transmission</i>	34
Gambar	3.5	Tampilan Parameter Hasil Perhitungan	34
Gambar	3.6	Hasil Desain AWG	35
Gambar	3.7	Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir	36
Gambar	4.1	Hasil Dimensi Fisik perencanaan AWG	53
Gambar	4.2	Perbandingan Hasil Orde Difraksi WDM	55
Gambar	4.3	Perbandingan Nilai ΔL WDM	56
Gambar	4.4	Perbandingan Jumlah <i>Array</i> Putus WDM	56
Gambar	4.5	Perbandingan Jumlah <i>Input/Output</i> putus WDM	57
Gambar	4.6	Perbandingan Nilai FSR WDM	57

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Spektrum operasional optik dapat diklasifikasikan dalam 3 bagian yaitu *window-1* (800-900 nm), *window-2* (1270-1350 nm) dan *window-3* (1480-1600 nm), yang masing masing berpusat di 850 nm, 1310 nm dan 1550 nm [2]. *Window-1* perlahan sudah mulai ditinggalkan karena redamannya yang cukup besar, sehingga *window-2* dan *window-3* yang akhir-akhir ini banyak digunakan sebagai *range* operasional optik. Dan oleh ITU-T lewat rekomendasi G.957, membagi 2 *window* tersebut menjadi 6 *band* yaitu, band O,E,S,C,L,dan U.

Dari 6 *band* yang ada, *C-Band* yang paling banyak digunakan. *Band* ini menempati spektrum 1530-1565 nm, setara dengan *bandwidth* sekitar 4000 Ghz. Kelebihan lain dari *band* ini terletak di *window-3*, yang lebih menguntungkan dibandingkan *window-2*. Hampir semua provider berebut *band* ini, karena memiliki kelebihan atenuasi rendah, *range* lebih besar dan tersedianya amplifier yang dibuat pabrikan. *C-Band* banyak diimplementasikan untuk sistem komunikasi optik jarak jauh maupun sebagai jaringan akses.

Mengingat spektrum *C-Band* terbatas, sementara penggunaanya banyak, maka *band* tersebut harus digunakan seefisien mungkin, dengan membaginya menjadi kanal-kanal lebih kecil lewat sistem *wavelength division multiplexing* (WDM). Berdasarkan besarnya spasi kanal, WDM dapat diklasifikasikan menjadi *dense* WDM (DWDM), *coarse* WDM (CWDM) dan *wide* WDM (WWDM).

Tugas akhir ini akan membahas *arrayed waveguide grating* (AWG), sebagai salah satu cara membagi *bandwidth* besar (kanal *C-Band*) menjadi kanal-kanal yang lebih kecil dalam lingkup WDM. Dengan membagi kanal menjadi lebih banyak, diharapkan akan terbentuk sub-sub kanal optik dengan spasi lebih kecil, dengan standar DWDM (≤ 1000 GHz), CWDM (>100 GHz) atau WWDM (> 50 nm). Bahkan ada katagori WDM dengan spasi kanal sangat kecil (< 10 GHz), dikenal dengan nama menjadi *very high density* WDM (VHDWDM). [3]

1.2 Perumusan Masalah

Untuk mencapai target Tugas Akhir, beberapa permasalahan yang harus diselesaikan antara lain :

1. Bagaimana memilih material semikonduktor optikal, yang bisa bekerja pada *C-Band*.
2. Bagaimana memilih parameter AWG untuk WDM yang bekerja pada kanal *C-band*, dengan spesifikasi seperti yang dikehendaki.
3. Bagaimana menghitung parameter AWG berdasarkan data parameter yang diberikan, hingga menghasilkan spesifikasi yang diinginkan.
4. Bagaimana membuat desain AWG yang lebih realistis, dengan bantuan *tool WDM Phasar*.
5. Bagaimana memprediksi kemampuan AWG membawa data standar ITU(SDH).

1.3 Batasan Masalah

Beberapa hal yang dibahas dalam Tugas Akhir ini, memiliki beberapa batasan, antara lain :

1. Material semikonduktor optik diarahkan pada golongan III-V.
2. Menggunakan spektrum kanal C-Band (1530-1565 nm)
3. Spasi kanal DWDM yang digunakan 50 GHz dan 100 GHz.
4. Spasi kanal CWDM yang digunakan 1200 GHz dan 2000 GHz.
5. Spasi kanal VHDWDM yang digunakan 8 GHz dan 10 GHz.
6. Jenis pengkodean yang digunakan NRZ.
7. Perhitungan laju bit, menggunakan pendekatan *Nyquist*, *rise time* dan *gaussian*.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Mendesain sistem AWG untuk WDM.
2. Membandingkan teknik AWG pada DWDM, CWDM, dan VHDWDM.
3. Membandingkan perhitungan parameter AWG secara teoritis dan menggunakan bantuan *WDM Phasar*.
4. Menghasilkan desain AWG dalam bentuk gambar 2 dimensi.
5. Menganalisa performansi kanal AWG.

1.5 Metodologi

Langkah-langkah yang digunakan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, antara lain :

1. Studi Literatur

Mencari referensi yang berkaitan dengan *arrayed waveguide grating (AWG)*. Literatur yang digunakan meliputi buku referensi, jurnal, makalah dan dokumen ilmiah di internet.

2. Perhitungan Parameter Semikonduktor

Memilih material semikonduktor yang dapat beroperasi pada *C-Band*, dengan menghitung besarnya *energy gap*, *numeric aperture (NA)*, bilangan *V* dan jumlah mode.

3. Perhitungan Parameter AWG

Memilih parameter AWG, kemudian dipakai menghitung parameter AWG yang lain secara teoritis.

4. Desain Parameter AWG dengan WDM_Phasar

Menghitung parameter AWG menggunakan *tool WDM_Phasar*, dengan menambahkan batasan *crossstalk*, *nonuniformity* dan ukuran divais.

5. Analisa Data

Menghitung besarnya potensial laju bit pada kanal WDM.

6. Kesimpulan

Melakukan pembahasan terhadap seluruh hasil pengujian, selanjutnya dilakukan penarikan kesimpulan.

1.6 Sistematika Pembahasan

Pembahasan dalam Tugas Akhir ini akan dibagi dalam lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

Bab I PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika pembahasan, dan relevansi.

Bab II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan mengenai teori dasar yang menyangkut semikonduktor optikal, sistem WDM, klasifikasi pita optik, jenis pengkodean dan metode penentuan laju bit.

Bab III SISTEM ARRAYED WAVEGUIDE GRATING (AWG)

Pada bab ini akan diuraikan mengenai komponen AWG, cara kerja AWG, parameter AWG, perencanaan desain AWG, penempatan AWG dan skenario pengujian.

Bab IV HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

Bab ini menampilkan seluruh hasil pengujian dan pembahasannya, perbandingan parameter hasil perhitungan teoritis dan memakai tool WDM_Phasar, juga analisa laju bit kanal AWG.

Bab V KESIMPULAN

Pada bagian berisi kesimpulan yang ditarik dari pembahasan sebelumnya, serta saran berdasarkan apa yang telah dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

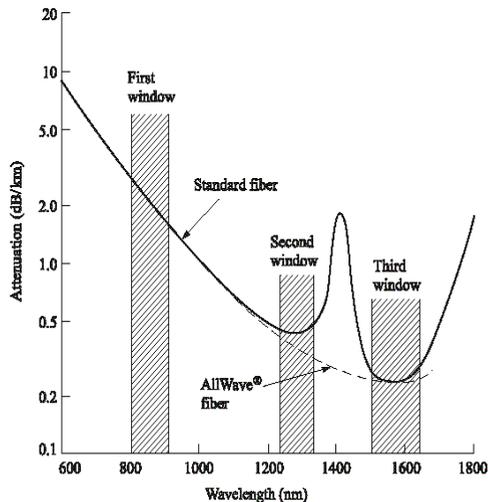
Dari semua yang telah dilakukan dalam Tugas Akhir ini, diharapkan dapat memberi manfaat dalam hal :

1. Memberikan gambaran hasil perencanaan parameter *arrayed waveguide grating (AWG)* pada pita *C-band*.
2. Memberikan gambaran realisasi AWG, dalam devais 2 dimensi.
3. Memberikan gambaran perbandingan parameter AWG pada jenis WDM berbeda.
4. Memberikan gambaran kemampuan kanal AWG membawa data standar ITU (SDH).

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pendahuluan

Kebutuhan *bandwidth* untuk transmisi data dewasa ini, mengharuskan pengalihan medium tembaga ke fiber optik. Alasan yang mendasari integrasi ke medium optik tidak terlepas dari keunggulan yang dimiliki antara lain, kapasitasnya yang besar, redamannya rendah, ukuran fisik yang kecil dan ringan, isolasi elektromagnetik yang bagus serta jarak *repeater* yang lebih jauh dibandingkan tembaga. Area kerja sistem komunikasi optik dikenal dengan istilah *window*. *Window* merupakan rentang panjang gelombang tertentu (range) yang dipilih dengan pertimbangan redaman yang lebih rendah.



Gambar 2.1 Klasifikasi *Window* Optik [2]

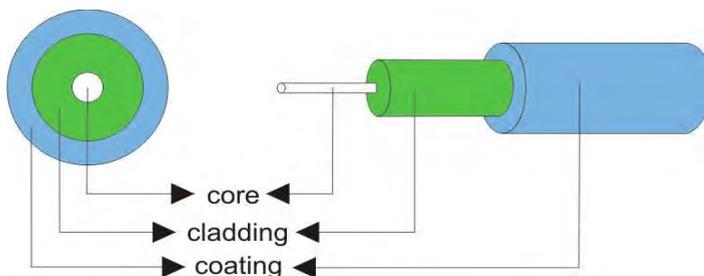
Sedikitnya ada 3 buah *window* yang sering digunakan, yaitu *window-1* (800 nm - 900 nm), *window-2* (1270 nm - 1350 nm) dan *window-3* (1480 nm - 1600 nm), yang masing-masing berpusat di 850 nm, 1310 nm dan 1550 nm. Hanya saja *window-2* dan *window-3* paling banyak digunakan, selain karena alasan redaman lebih rendah, juga

karena *bandwidth*-nya lebih lebar dan ketersediaan *amplifier* di pasaran. Sebenarnya ada *window-4* untuk *L-band* (1565 nm – 1625 nm), namun masih jarang dikelola.

Gambar 2.1 menunjukkan atenuasi versus panjang gelombang untuk serat optik pada umumnya. Bentuk yang tidak biasa dari kurva tersebut disebabkan kombinasi dari beragam faktor yang berkontribusi pada atenuasi, terutama penyerapan (*absorbsi*) dan hamburan. Daya serap fiber optik sangat dipengaruhi jenis material semikonduktor yang digunakan. Sementara hamburan merupakan fenomena yang mengacu pada perubahan arah sinar setelah mereka menabrak partikel-partikel kecil atau karena ketidakmurnian material (efek *doping*) dalam media tersebut.

2.2 Semikonduktor Optik

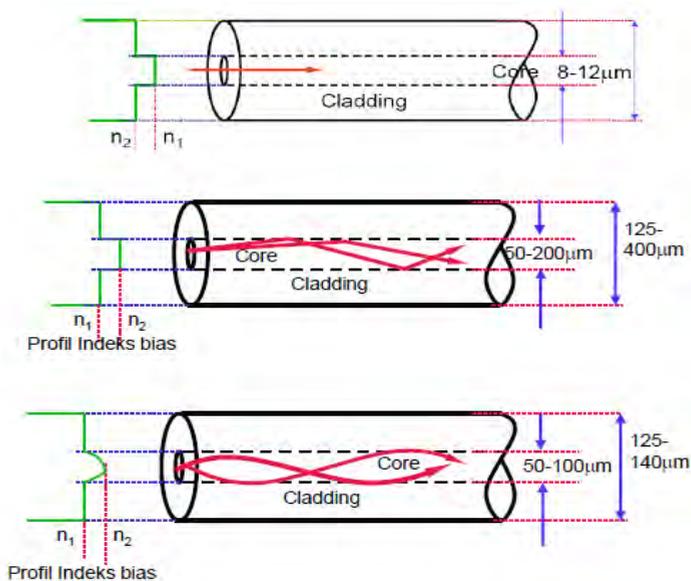
Struktur dasar fiber optik silindris terdiri dari 3 bagian konsentris, yaitu bagian inti (*core*), selubung (*cladding*) dan jaket (*coating*).



Gambar 2.2 Struktur Fiber Optik

Inti (*core*), merupakan bagian dalam dari serat optik yang terdiri dari satu helai tipis, terbuat dari kaca atau plastik, berdiameter 8 - 50 μ m atau lebih. Selubung (*cladding*) yang mengelilingi masing-masing serat, terbuat dari kaca atau plastik yang berbeda sifat dengan inti, berdiameter 125 μ m atau lebih, juga berguna sebagai antarmuka inti-selubung dan berfungsi sebagai pemantul agar cahaya tidak keluar inti. Sedangkan jaket (*coating*), merupakan lapisan paling luar, mengelilingi satu atau bundel serat berselubung, terbuat dari plastik atau materi berlapis untuk melindungi serat optik dari uap, abrasi, kerusakan atau bahaya lingkungan lain.

Serat optik dapat juga diklasifikasikan berdasarkan jumlah berkas cahaya yang mampu dilewatkan dalam sebuah inti serat tunggal. *Core* yang hanya dapat melewatkan sebuah berkas cahaya, disebut *single-mode* (SM). Sedangkan serat optik yang mampu mentransmisikan dua atau lebih berkas cahaya pada *core* tunggal, disebut *multi-mode* (MM). *Multimode* sendiri bisa dibedakan menjadi 2, yaitu *step-index* dan *graded-index*.



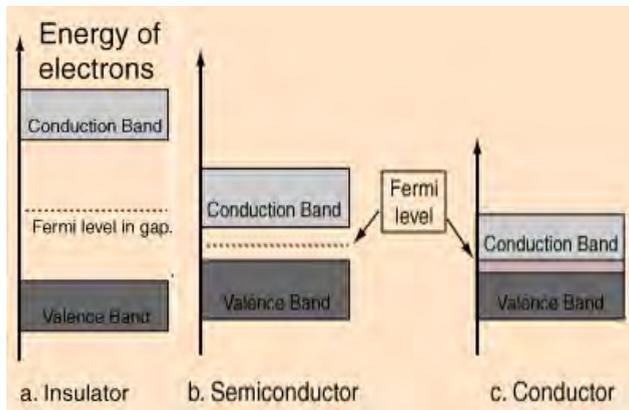
Gambar 2.3 *Single-mode, Step-index dan Graded-index*

Uraian sub-bab berikut, akan membahas beberapa karakteristik penting dari bahan optik yang terkait dengan operasional sistem komunikasi serat optik (SKSO), khususnya panjang gelombang (λ), indeks refraksi (n) dan jumlah mode, antara lain :

1. *Energy Band Gap* (E_g)
2. *Numerical aperture* (NA)
3. *V Number* (Bilangan V).

2.2.1 Energy Gap (E_g)

Cara yang mudah untuk menggambarkan perbedaan antara material konduktor, isolator dan semikonduktor adalah dengan melihat besarnya *energy gap* (E_g) yang tersedia untuk elektron di dalam material. Terjadinya proses konduksi tergantung ada atau tidaknya elektron dalam pita konduksi. Dalam bahan isolator, elektron terletak dalam pita valensi yang dipisahkan oleh celah (*gap*) cukup lebar dengan pita konduksi. Sementara pada bahan konduktor (seperti metal), kondisi pita valensi overlap dengan pita konduksi sehingga tidak ada celah diantaranya ($E_g = 0$), akibatnya sedikit elektron yang dapat bergerak dalam material ini. Sedangkan E_g bahan semikonduktor berada diantara isolator dan konduktor.



Gambar 2.4 Perbedaan *Energy Gap* Material

Dalam bahan semikonduktor terdapat celah cukup kecil antara pita valensi dan pita konduksi, sehingga dengan cara eksitasi termal (proses intrinsik) atau yang lain, dapat menjembatani celah tersebut. Material kristal murni atau golongan IV (C, Si, Ge, Sn, Pb) memenuhi sifat semikonduktor ini. Pada suhu rendah, kondisi pita valensi penuh dengan elektron, sedangkan pada pita konduksi tidak terdapat elektron sama sekali yang dapat menimbulkan arus listrik.

Proses intrinsik, dimana perubahan E_g dicapai dengan cara mengatur temperatur semikonduktor, dirasa kurang praktis karena pada kenyataannya optik bekerja pada suhu ruang (sekitar 300°K).

Cara lain yang bisa ditempuh adalah proses ekstrinsik (*doping*), menggabungkan 2 atau lebih jenis material semikonduktor dengan komposisi tertentu. Cara ini lebih efektif untuk mendapatkan E_g yang dikehendaki. Karena celah *band* semikonduktor yang tidak terlalu lebar, dengan menambahkan material *doping* yang kecil, sudah dapat meningkatkan konduktivitas secara dramatik. Artinya telah terjadi perpindahan elektron dari pita valensi ke pita konduksi dan berdampak pada celah *band* yang kian mengecil.

Semikonduktor ekstrinsik bisa berbentuk *compound/alloy* yang dikomposisi dari dua atau lebih elemen dari golongan berbeda. Semikonduktor ekstrinsik yang banyak digunakan untuk material fiber optik adalah dari golongan III (Al, Ga, In) dan golongan V (P, As, Sb). *Compound* bisa bersifat *binary* (contoh: GaAs, InP), *ternary* (contoh: AlGaAs, InPAs) maupun *quaternary* (contoh: AlGaPAs, AlGaInP).

Karena nilai E_g tertentu diperlukan agar fiber optik dapat beroperasi pada panjang gelombang (λ) tertentu, maka hubungan antara E_g dan λ dapat diturunkan dari persamaan *energy* kuantum, seperti uraian berikut ini.

$$\begin{aligned} E_g &= h \cdot f \\ &= h \cdot \frac{c}{\lambda} \\ &= \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{\lambda} \\ &= \frac{1,9875 \cdot 10^{-25}}{\lambda} \quad (\text{Joule}) \quad (2.1) \end{aligned}$$

dimana :

h = konstanta Plank ($6,625 \times 10^{-34}$ J.s)

c = kecepatan cahaya di ruang hampa (3×10^8 m/s)

Jika E_g ingin dinyatakan dalam elektron-volt (eV), maka harus dibagi dengan $1,6 \cdot 10^{-19}$ ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule), sehingga persamaan E_g sebelumnya dapat ditulis kembali menjadi :

$$E_g = \frac{1,9875 \cdot 10^{-25}}{1,6 \cdot 10^{-19} \lambda} = \frac{1,242 \cdot 10^{-6}}{\lambda} \quad (\text{eV}) \quad (2.2)$$

Dan persamaan E_g tersebut, dapat juga dikembangkan untuk menurunkan persamaan panjang gelombang (λ) sebagai berikut :

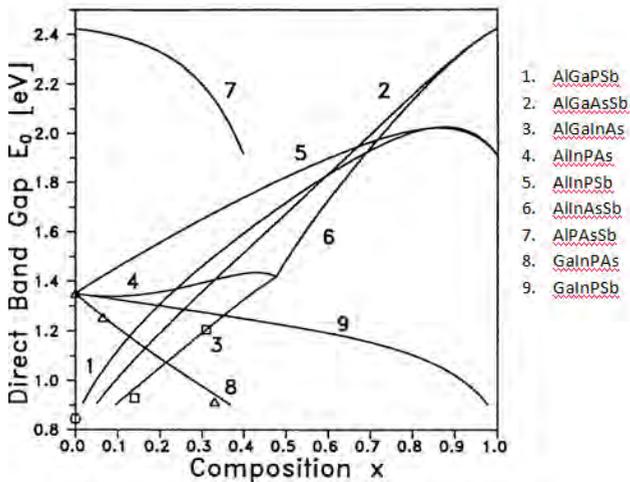
$$\lambda(\mu\text{m}) = \frac{1,242 \text{ (eV)}}{E_g \text{ (eV)}} \quad (2.3)$$

Tabel 2.1 memperlihatkan parameter kerja dari *window* optik, serta hasil perhitungan *energy gap* yang diperlukan agar komponen optikal dapat bekerja pada *window-window* yang ada.

Tabel 2.1 *Energy Gap* pada *Window* Optik

Window	Panjang Gelombang (nm)			Hasil Perhitungan <i>Energy Celah Pita</i> (eV)		
	λ_1	λ_2	$\Delta\lambda$	E_{g1}	E_{g2}	ΔE_g
1	800	900	100	1,5525	1,38	0,1725
2	1270	1350	80	0,978	0,92	0,058
3	1480	1600	120	0,838	0,775	0,063

Sedangkan gambar 2.5, memperlihatkan besarnya *energy gap* beberapa material semikonduktor dari golongan III dan golongan V dalam bentuk kombinasi 4 buah unsur atom (*ternary*).



Gambar 2.5 *Energy Gap* Beberapa Material Semikonduktor [6]

2.2.2 Numerical Aperture (NA)

Numerical aperture (NA) menggambarkan seberapa lebar cahaya bisa dipancarkan dalam sebuah fiber optik.

Besarnya NA juga menentukan apakah sebuah fiber optik dapat dioperasikan hanya untuk *single-mode* (SM) saja atau bisa untuk *multi-mode* (MM). Besarnya NA sangat dipengaruhi oleh indeks refraksi *core* (n_1) dan indeks *cladding* (n_2).

Sementara indeks refraksi atau indeks bias material optik (n), adalah perbandingan antara cepat rambat cahaya di ruang hampa (c) dengan cepat rambat cahaya melintasi material optik (v). Karena v selalu lebih kecil dari c , maka nilai $n \geq 1$. Dengan demikian, jika n semakin besar, maka kecepatan cahaya dalam material optik akan semakin lambat.

$$n = c/v$$

dimana :

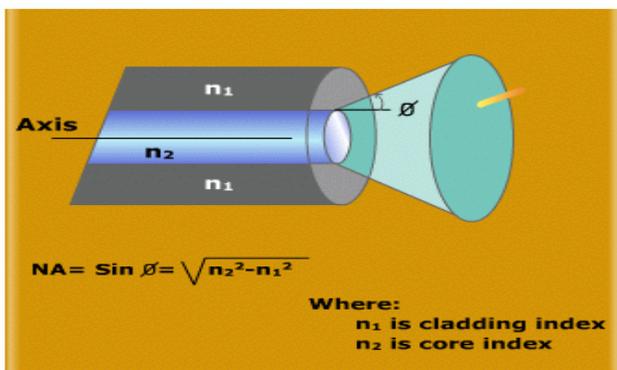
n = indeks refraksi

$c = 3 \cdot 10^8$ (m/s)

v = kecepatan cahaya dalam material/bahan optik (m/s).

Dengan mengetahui besarnya indeks refraksi *core* (n_1) dan *cladding* (n_2), maka besarnya NA dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \sin \theta \quad (2.4)$$



Gambar 2.6 Numerical Aperture Fiber Optik

Pendekatan rumus *numeric apperture* (NA) bukan hanya mengutamakan nominal n_1 dan n_2 semata, namun juga dipengaruhi oleh selisih n_1 dan n_2 .

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.5)$$

Dimana :

$$\Delta = \text{core-cladding difference} = (n_2 - n_1) / n_1.$$

$$\Delta = 0,01 - 0,03 = 1\% - 3\% \text{ untuk MM}$$

$$\Delta = 0,002 - 0,01 = 0,2\% - 1\% \text{ untuk SM}$$

$$n_2 \approx n_1 (1 - \Delta)$$

Dalam implementasinya indeks *cladding* (n_2) dibuat sedikit lebih kecil dari indeks *core* (n_1) untuk mendapatkan *internal totally reflection*, dengan harapan cahaya tetap tinggal di *core*. Syarat mendapatkan *internal totally reflection*, cahaya harus dipancarkan $<$ dari Θ (sudut kritis).

Jika *core* dan *cladding* memiliki indeks refraksi hampir sama, *numerical aperture* akan kecil. Hal ini berarti bahwa cahaya harus ditembakkan lurus (*shooting right down*) ke pusat fiber agar tetap tinggal pada inti (*core*). Prinsip ini cocok digunakan dalam *single-mode* (SM). Jika selisih indeks refraksi *core* dan *cladding* 'besar', NA juga besar sehingga dapat dipakai untuk *Multi-Mode* (MM). Pada *graded index*, n_1 dibuat gradasi turun dari pusat *core* (n_1) hingga bidang batas (n_2).

2.2.3 Bilangan V

Bilangan V merupakan bilangan yang tidak berdimensi, disebut juga frekuensi ternormalisasi. Bilangan V menentukan seberapa banyaknya mode (berkas cahaya) bisa dilewatkan dalam sebuah fiber. Besarnya bilangan V dipengaruhi oleh jari-jari *core* (a) dan NA, seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.6.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \times \text{NA}$$

$$= \frac{2\pi a}{\lambda} \times (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.6)$$

Besarnya bilangan V umumnya $\geq 2,405$. Jika $V < 2,405$ menandakan bahwa fiber tersebut hanya dapat dilewati *Single Mode* (SM).

Tabel 2.2 Numerical Aperture Beberapa Diameter Optik [2]

Diameter Core (μm)	Diameter Cladding (μm)	Numerical Aperture
50	125	0.19 – 0.25
62,5	125	0.27 – 0.31
85	125	0.25 – 0.30
100	140	0.25 – 0.30

Tabel 2.2 menunjukkan hubungan diameter *core-cladding* dan *numerical aperture* beberapa jenis fiber optik. Diameter *core* diatas biasanya digunakan untuk fiber optik MM, sedangkan untuk SM ukuran diameter *core* umumnya lebih kecil, yaitu sekitar 8 atau 10 μm .

2.2.4 Jumlah Mode

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa besarnya bilangan V menentukan banyaknya mode yang dapat di transmisikan dalam fiber yang sama. Untuk menghitung banyaknya mode sebuah fiber optik dapat digunakan persamaan berikut:[2]

$$M = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) \approx \frac{V^2}{2} \quad (2.7)$$

2.3 Band Optik

Berdasarkan Rekomendasi ITU-T G.957 dan Supplement 39 (ITU-T G-series), *band* optik dapat dibagi menjadi beberapa klas, yaitu O, E, S, C, L dan U.

Tabel 2.3 Pembagian Klasifikasi *Band* Optik

Band Optik	Panjang Gelombang	Energy gap
O (<i>Original – Band</i>)	1260 – 1360 nm	0.913 - 0.985 eV
E (<i>Extended – Band</i>)	1360 – 1460 nm	0.850 - 0.913 eV
S (<i>Short – Band</i>)	1460 – 1530 nm	0.811 - 0.850 eV
C (<i>Conventional – Band</i>)	1530 – 1565 nm	0.793 - 0.811 eV
L (<i>Long – Band</i>)	1565 – 1625 nm	0.764 - 0.793 eV
U (<i>Ultralong – Band</i>)	1625 – 1675 nm	0.741 - 0.764 eV

2.4 WDM

Wavelength Division Multiplexing (WDM) adalah teknik penggabungan beberapa sinyal dengan panjang gelombang berbeda-beda. Teknologi WDM pada dasarnya adalah teknologi *transport*, untuk menyalurkan berbagai jenis trafik (data, suara, dan video) secara transparan, dengan menggunakan panjang gelombang yang berbeda-beda dalam suatu fiber tunggal secara bersamaan. Implementasi WDM dapat diterapkan baik pada jaringan *long haul* (jarak jauh) maupun untuk aplikasi *short haul* (jarak dekat).

2.4.1 Klasifikasi WDM

Berdasarkan lebar kanal, WDM dapat diklasifikasikan menjadi 3 kelas, *dense* (padat), *coarse* (jarang), *wide* (lebar). Berdasarkan rekomendasi ITU-T G.671, perbedaan ketiga jenis WDM tersebut dicirikan oleh :

1. CWDM

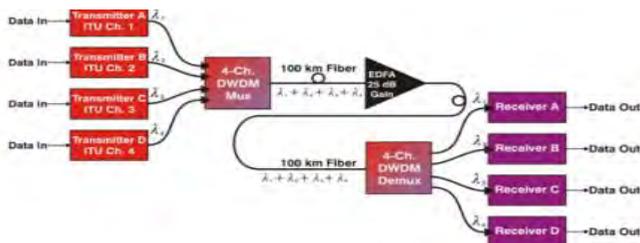
- *Coarse WDM* (CWDM), memiliki spasi kanal < 50 nm tetapi lebih besar dari 1000 GHz (> 8 nm pada 1550 nm atau 5,7 nm pada 1310 nm).
- Berdasarkan rekomendasi G.694.2, ITU menyarankan lebar kanal standar CWDM adalah 20 nm.[9]

2. DWDM

- *Dense WDM* (DWDM), memiliki karakteristik besarnya spasi kanal ≤ 1000 GHz.
- Berdasarkan rekomendasi G.694.1, ITU menyediakan *grid* kanal DWDM sebesar :
 - (i) 12.5 GHz *spacing*;
 - (ii) 25 GHz *spacing*;
 - (iii) 50 GHz *spacing*;
 - (iv) 100 GHz *spacing*.
- Pada implementasinya, juga terdapat teknologi yang membagi *bandwidth* dalam spasi kanal ≤ 10 GHz dan dikenal dengan istilah *Very High Density Wavelength Division Multiplexing* (VHDWDM).

3. WWDM

- *Wideband WDM* (WWDM), memiliki spasi kanal ≥ 50 nm. [10]
- WDM ini masih belum banyak dimanfaatkan.



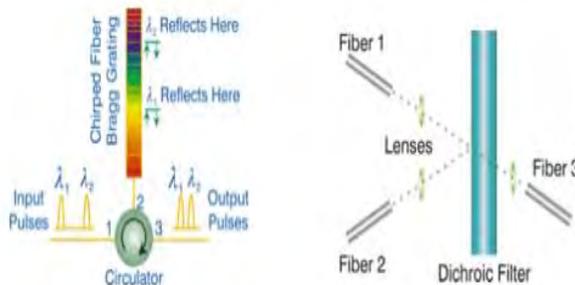
Gambar 2.7 Komponen Sistem DWDM

2.4.2 Teknologi WDM

Teknologi WDM mengadopsi teknik membagi *bandwidth* (*splitting*) menjadi beberapa bagian dengan panjang gelombang (λ) yang berbeda. Prinsip teknik WDM ini, membagi *bandwidth* menjadi spasi kanal yang teratur sesuai dengan kebutuhan. Beberapa teknik WDM yang banyak digunakan antara lain, *fiber bragg grating* (FBG) dan *arrayed waveguide grating* (AWG) dan *thin film*.

1. *Fibre Bragg Grating* (FBG)

- *Fiber Bragg Gratings* (FBG) dapat dikelompokkan ke dalam *interference filter*, tetapi FBG memiliki perbedaan fungsi yang signifikan.
- Umumnya, FBG memantulkan sebuah gelombang yang dipilih dan melewati gelombang yang lainnya. Sementara pada *interference filter*, akan melewati gelombang yang dipilih dan memantulkan gelombang lainnya.
- FBG merupakan serat optik yang dicampurkan kisi-kisi ke dalamnya dan mudah digabungkan dengan serat optik lainnya.
- Teknologi terkini FBG, terdapat *slab* (penggabung dan pemisah *power wavelength*), dilengkapi dengan *dichroic filter* untuk menghilangkan *noise* dan *crosstalk* pada sistem WDM.

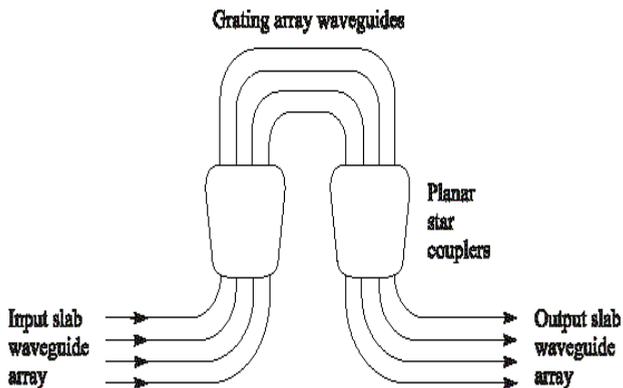


Gambar 2.8 FBG dan *Dichroic Filter*

2. *Arrayed Waveguide Grating* (AWG)

Sistem AWG terdiri dari 2 buah *slab* dan *array waveguide*. *Slab* pertama berupa *star coupler*, yang menerima masukan dari *waveguide input*. Sinyal masuk *slab* akan berpropagasi secara bebas menuju kanal *waveguide* yang tersusun secara *array* dengan selisih panjang tetap (ΔL) antar *array* bersebelahan.

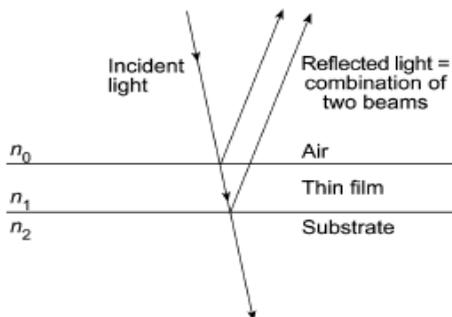
Setelah menjarlar dalam *array waveguide*, sinyal akan masuk pada *coupler* kedua, yang berfungsi kebalikan dari *slab* pertama menuju *waveguide output*.



Gambar 2.9 Sistem Arrayed Waveguide Grating

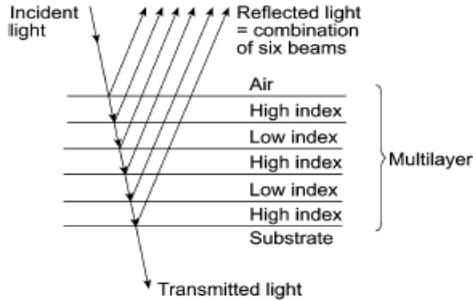
3. Thin Film Filter

Thin Film Filter (TFF) termasuk dalam katagori filter *passband*, yang digunakan pada aplikasi WDM. Filter ini mentransmisikan λ dalam range sempit (*Narrow bandpass filter*). Seperti karakteristik *Narrow bandpass filter* pada umumnya, TFF harus memiliki *cut-on* dan *cut-off* yang curam/tajam di dua sisi dari *passband*.



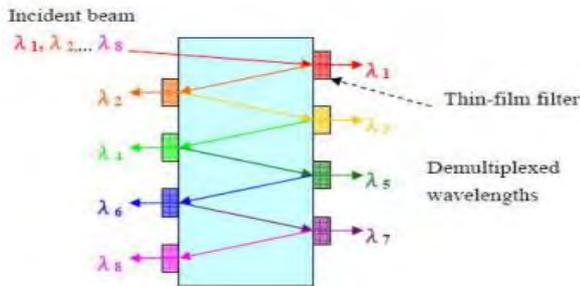
Gambar 2.10 Prinsip Single Thin-film

Sebagian cahaya datang akan dipantulkan pada daerah antarmuka (*interface*) dari 2 material yang berbeda indeks refraksi. Tingkat ketebalan material akan mengubah secara konstruktif atau destruktif terhadap pola interferensi, yang bisa menyebabkan peningkatan ataupun pengurangan panjang gelombang tertentu.



Gambar 2.11 Prinsip *Multilayer Thin-film*

Struktur thin film yang lain disusun secara bertumpuk dengan indeks refraksi material film yang berubah-ubah (tinggi-rendah). *Dielectric thin-film (DTF) interference filter* ini terdiri dari lapisan-lapisan yang berbeda indeks refraksi, sedemikian rupa sehingga akan terjadi perubahan λ menjadi $\frac{1}{4} \lambda$.



Gambar 2.12 Sistem *Thin-film Filter*

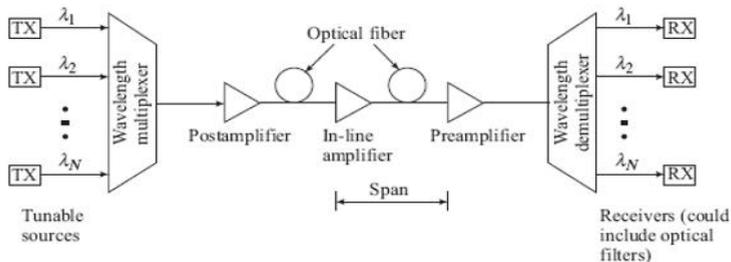
2.4.3 Pemanfaatan WDM

Teknologi WDM mempunyai beberapa keunggulan, sehingga dapat dimanfaatkan untuk beberapa keperluan, antara lain :

1. Diimplementasikan pada jaringan telekomunikasi jarak jauh (*long haul*), baik untuk sistem *point-to-point* maupun *ring topology*.
2. Lebih fleksibel untuk mengantisipasi pertumbuhan trafik yang tidak terprediksi.
3. Transparan terhadap berbagai *bit rate* dan protokol jaringan.
4. Cocok diterapkan pada daerah dengan perkembangan kebutuhan *bandwidth* sangat cepat (jaringan metro).
5. Tingkat keamanan terhadap *noise* lebih tinggi karena sistem komunikasi optik redaman yang kecil.
6. Mudah di-*update*, karena terdapat fasilitas *add drop multiplexing* untuk melakukan penambahan dan pengurangan jaringan, tanpa mengubah struktur jaringan *backbone* yang ada. [11]

2.4.4 Komponen WDM

Pada teknologi WDM, terdapat beberapa komponen utama yang membentuk sebuah sistem WDM.



Gambar 2.13 Komponen Sistem WDM

1. **Transmitter** yaitu komponen yang menjembatani antara sumber sinyal informasi dengan multiplexer.
2. **Receiver** yaitu komponen yang menerima sinyal informasi dari demultiplexer untuk dapat dipilah berdasarkan informasi.
3. **Terminal multiplexer** terminal mux sebenarnya terdiri dari *transponder converting wavelength* untuk setiap signal panjang gelombang tertentu yang akan dibawa.
4. **Intermediate optical terminal** (amplifier). Komponen ini merupakan *amplifier* jarak jauh yang menguatkan sinyal dengan banyak panjang gelombang yang ditransfer sampai sejauh 140 km atau lebih.

5. **Terminal demux.** Terminal ini mengubah sinyal dengan banyak panjang gelombang menjadi sinyal dengan hanya 1 panjang gelombang dan mengeluarkannya ke dalam beberapa fiber yang berbeda untuk masing-masing *client* untuk dideteksi. [11].

2.5 *Arrayed Waveguide Grating*

AWG dapat disebut juga *phased array* (PHASAR), adalah sistem multiplekser dan demultiplekser pada sistem WDM, baik pada DWDM, VHDWDM maupun CWDM

Beberapa kelebihan AWG dalam integrasinya dalam jaringan optik, antara lain memiliki kerugian transmisi yang sangat kecil, spasi kanal yang lebih akurat, jumlah kanal yang besar dan stabilitas sistem yang cukup tinggi.

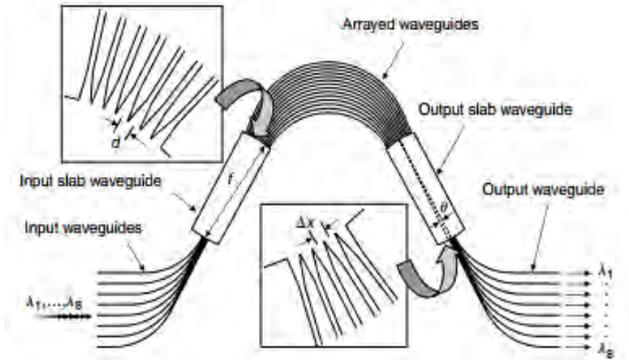
2.5.1 **Komponen AWG**

Sistem AWG terdiri dari 3 komponen utama yaitu sekelompok kanal pada sisi *input* dan *output*, 2 buah *slab* (*star coupler*) dan sekelompok *array waveguide*.

Kanal *input* berfungsi menghubungkan jaringan luar dengan *slab* pertama lewat kisi-kisi yang terdapat dalam jalur masuk *slab*. Sedangkan kanal *output* bertugas meneruskan berkas cahaya dari *output slab* kedua menuju jaringan luar yang dituju.

Berkas cahaya yang masuk ke dalam *slab* pertama lewat kisi-kisi *input*, akan menjalar secara divergen menuju *array*. *Slab* ini berperan sebagai *free propagation region*, yang memiliki jarak lintasan dan sudut simpangan tertentu. Tiap panjang gelombang (λ) berbeda yang masuk ke dalam *slab* akan memfokuskan diri pada *output* yang berbeda, sehingga tidak akan ada berkas cahaya yang bersinggungan satu sama lain. Hal ini juga terjadi pada *slab* kedua, hanya saja propagasi cahaya yang melintas bersifat konvergen.

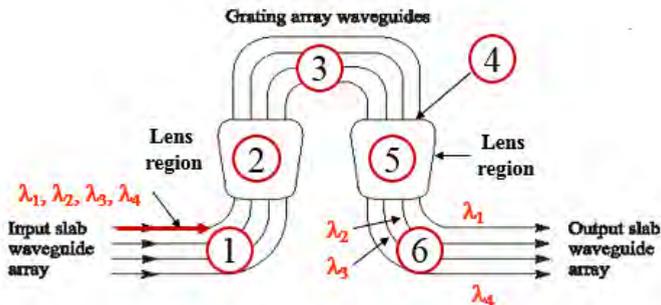
Sementara, *array waveguide* akan menerima berkas cahaya hasil *splitting* dari *slab* pertama, masuk ke dalam beberapa *array* dimana masing-masing *array* memiliki perbedaan panjang *adjacent* sebesar ΔL . Karena panjang *array* berbeda satu sama lain, ada kemungkinan berkas cahaya akan mengalami gangguan dispersi. Selanjutnya sinyal yang keluar dari *array* masuk *slab* kedua dan berlanjut ke kanal output. Komponen dasar AWG dapat dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Komponen Dasar AWG

2.5.2 Prinsip Kerja AWG

Untuk menjelaskan prinsip kerja AWG, sistem AWG pada gambar 3.1 akan dijelaskan lebih terperinci menjadi beberapa bagian seperti yang terlihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Pembagian Sistem AWG

Gambar 3.2 memperlihatkan bagian-bagian penting dari sistem AWG, yang bisa dibagi ke dalam 5 bagian, yaitu :

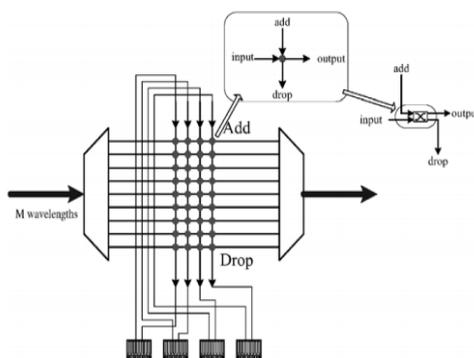
1. Sekelompok kanal *input*
2. *Slab* pertama.
3. Beberapa *array waveguide*
4. *Slab* kedua
5. Beberapa kanal *output*.

Adapun cara kerja dari sistem AWG, dapat dijelaskan seperti tahapan berikut:

1. Berkas cahaya dari *waveguide input* akan masuk ke dalam *slab* pertama, yang juga berperan sebagai lensa fokal.
2. *Slab* tersebut akan membagi daya diantara *waveguide* berbeda, dalam tingkatan *array*.
3. Masing-masing tingkatan *array waveguide* memiliki perbedaan panjang yang tetap, sebesar ΔL terhadap tetangganya.
4. Berkas cahaya dalam tiap *array waveguide* mengalami perbedaan delay fase sebesar $\Delta\theta$ ketika sampai di ujung *waveguide* atau *input slab* kedua.
5. *Slab* kedua, yang bertindak sebagai lensa kedua, akan melakukan pemfokusan kembali cahaya dari semua *array waveguide* ke dalam beberapa *waveguide output*. Maka terbentuklah *free spectral range* (FSR) yang merupakan periodisitas dari AWG.
6. Masing-masing λ difokuskan ke dalam *waveguide output* berbeda, pada kanal *output*.

2.5.3 AWG dalam Jaringan

AWG merupakan teknik membagi *bandwidth* menjadi beberapa spasi kanal yang lebih kecil sesuai dengan kebutuhan WDM. Umumnya devais AWG dapat digunakan untuk menjalankan berbagai fungsi, seperti sebagai multiplekser, demultiplekser, filter dan divais *add-drop* pada WDM optikal atau aplikasi DWDM lainnya.



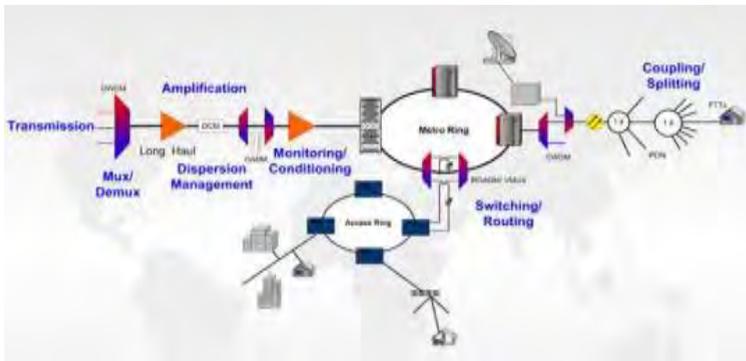
Gambar 2.16 Konfigurasi OADM pada AWG [5]

Dalam jaringan optik jarak jauh, devais AWG dapat mengambil peran untuk menjalankan beberapa fungsi, antara lain :

1. Dapat dipakai untuk memultiplek sejumlah kanal dalam sebuah serat, sebelum masuk penguat fiber optik.
2. Dapat difungsikan sebagai demultiplekser pada ujung terima sejumlah sistem.
3. Dapat diimplementasikan pada bagan *Optical Add-Drop Multiplexer* (OADM).

Sedangkan pada jaringan akses menuju ke arah pengguna, sistem AWG dapat digunakan untuk meningkatkan penggunaan sistem FTTx, yaitu sebagai Mux/Demux CWDM.

Kelebihan lain dari AWG, karena sifatnya yang *low cost*, tidak bergantung dengan besarnya harga panjang gelombang (λ), filter dielektrik atau divais harga tinggi, sehingga sangat tepat diterapkan pada jaringan *metropolitan area network* (MAN), dimana menuntut *traffic* yang besar dan kecepatan data tinggi. Untuk lebih jelasnya aplikasi WDM dalam sistem, dapat dilihat pada gambar 2.17



Gambar 2.17 Aplikasi AWG dalam Sistem [3]

2.6 Parameter AWG

Parameter AWG dalam hal ini bisa dibedakan menjadi 2 bagian, yaitu parameter AWG yang bersifat pilihan, terutama yang menyangkut material semikonduktor dan parameter sasaran yang direncanakan, serta parameter AWG hasil perhitungan sebagai konsekuensi dari parameter pilihan yang sudah ditentukan.

2.6.1 Parameter yang Dipilih

Parameter ini bisa dipilih berdasarkan maksud dan tujuan perencanaan AWG. Parameter ini harus sudah ditetapkan dan diketahui terlebih dahulu sebelum dilakukan perhitungan parameter AWG lainnya. Dan beberapa parameter yang termasuk dalam kategori ini adalah :

1. Indeks Refraksi

Indeks refraksi yang harus diketahui dalam desain AWG adalah indeks refraksi *slab* (n_s), indeks refraksi material *array* (n_c atau n_{eff}) dan indeks grup (n_g).

2. Panjang Gelombang

Panjang gelombang ini terkait dengan range λ kerja yang diinginkan, sehingga menyangkut batas bawah (λ_1), batas atas (λ_2) dan panjang gelombang tengahnya (λ_0).

3. Lebar *Pitch* (Kisi-kisi)

Lebar kisi-kisi (d) tak bisa dilepaskan dari eksistensi *slab*, karena celah ini bisa berposisi menghubungkan *slab* dengan kanal I/O atau bisa juga terkait dengan sambungan *slab* dengan *array*.

2.6.2 Parameter yang Dihitung

Setelah beberapa parameter pilihan ditentukan, selanjutnya bisa dilakukan perhitungan parameter AWG yang lain, seperti *orde difraksi* (m), perbedaan panjang *array* (ΔL), panjang lintasan *slab* (L_s), *Free Spectral Range* (FSR), jumlah maksimum kanal *input/output* (N_{max}) dan jumlah maksimum *array* (N_{array}).

2.6.2.1 Orde Difraksi

Orde difraksi (m) dipengaruhi oleh rentang frekuensi atau panjang gelombang dimana AWG diharapkan dapat bekerja. Misalnya, mengharapkan sistem AWG dapat bekerja pada *C-band* (1530 – 1565 nm), maka besarnya orde difraksi dipengaruhi oleh batas atas dan batas bawah pita *C-band* tersebut, seperti tautan rumus berikut :

$$m = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2.8)$$

Dimana :

m : orde difraksi

λ_1 : batas bawah rentang pita (nm)

λ_2 : batas atas rentang pita (nm)

Besarnya orde difraksi (m) bisa memberikan gambaran seberapa besar lengkungan dalam jalur AWG bisa dibentuk diantara komponen-komponennya. Semakin tinggi nilai orde difraksi, maka AWG akan membentuk lengkungan semakin kentara. Nilai orde difraksi (m) ternyata juga akan mempengaruhi besarnya parameter hitungan lainnya.

2.6.2.2 Perbedaan Panjang Array

Selisih panjang *array* (ΔL) bersebelahan (*adjacent*) merupakan salah satu karakteristik penting dalam sistem AWG. Besarnya parameter ini, selain ditentukan oleh besarnya orde difraksi (m) dan indeks refraksi material *array* (n_c), juga dipengaruhi oleh panjang gelombang tengah dimana sistem AWG akan bekerja. Parameter ΔL yang besar, berdampak pada jarak *array* yang semakin jarang dan lintasan *array* yang lebih melengkung. Tentu saja hal ini hanya bisa terjadi jika memiliki orde difraksi yang besar.

$$\Delta L = \frac{m \lambda_0}{n_c} \quad (2.9)$$

Dimana :

λ_0 : panjang gelombang tengah (nm)

n_c : indeks refraksi material *array*

2.6.2.3 Panjang Lintasan Slab Waveguide

Panjang lintasan *slab* atau biasa disebut *fokal slab waveguide* (L_f) kadang disebut juga dengan istilah *free propagation region* (FPR). Adalah merupakan panjang lintasan *slab* yang dibentuk oleh berkas cahaya divergen, yang memancar dari kisi-kisi *input slab* pertama menuju *array*. Atau bisa juga dikaitkan dengan panjang lintasan *slab* kedua yang dihasilkan oleh cahaya yang keluar dari *array* menjalar secara divergen menuju *output slab* kedua yang berhubungan dengan kanal *output*. Panjang lintasan *slab*, selain dipengaruhi oleh parameter *slab* itu sendiri juga dibatasi oleh parameter *array* dan lebar kanal.

$$L_f = \frac{n_s d^2 n_c}{m \Delta \lambda n_g} \quad (2.10)$$

Dimana :

n_s : indeks refraksi *slab*

d : lebar celah (kisi-kisi) pada *input/output slab* (μm)

n_g : indeks refraksi grup *array*

$\Delta \lambda$: spasi kanal yang diinginkan hasil dari proses *splitting*.

2.6.2.4 Free Spectral Range

Free Spectral Range (FSR), secara kasar bisa dipahami sebagai *bandwidth* efektif yang siap dibagi menjadi *bandwidth* kanal dengan ukuran lebih kecil. Nilai FSR harus lebih besar dari kebutuhan *bandwidth* seluruh kanal. Sebagai contoh, jika diinginkan 8 buah kanal masing-masing dengan spasi 200 GHz, maka FSR yang tersedia harus lebih besar dari 1600 GHz (12,8 nm). Untuk menghitung besarnya FSR, dapat digunakan persamaan berikut :

$$FSR = \frac{\lambda_0 n_c}{m n_g} \quad (2.11)$$

2.6.2.5 Jumlah Maksimum dari Input/Output Kanal

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa nilai FSR harus lebih besar dari jumlah akumulatif seluruh kanal yang dilayani. Oleh karena itu, jika diketahui besarnya FSR akan dapat dihitung jumlah kanal I/O yang bisa terbentuk (N_{\max}) dengan lebar spasi tertentu yang diinginkan ($\Delta\lambda$).

$$N_{\max} = \text{integer} \left(\frac{FSR}{\Delta\lambda} \right) \quad (2.12)$$

2.6.2.6 Jumlah Arrayed Waveguides

Seperti yang terlihat dalam persamaan pembentuknya, parameter FSR dipengaruhi oleh material *array* dan range panjang gelombang dimana sistem AWG hendak dipekerjakan. Akibatnya, nilai FSR juga akan berpengaruh pada jumlah *array* yang bisa terbentuk, seperti yang terlihat dalam persamaan berikut :

$$\begin{aligned} N_{\text{array}} &= 4N_{\max} \\ &= 4 \text{ integer} \left(\frac{FSR}{\Delta\lambda} \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.6.3 Parameter Lain

Untuk mendapatkan parameter AWG yang lebih implementatif, perlu mempertimbangkan parameter tambahan lain seperti *insertion loss*, *non-uniformity* dan *crossstalk*.

2.6.3.1 Insertion Loss

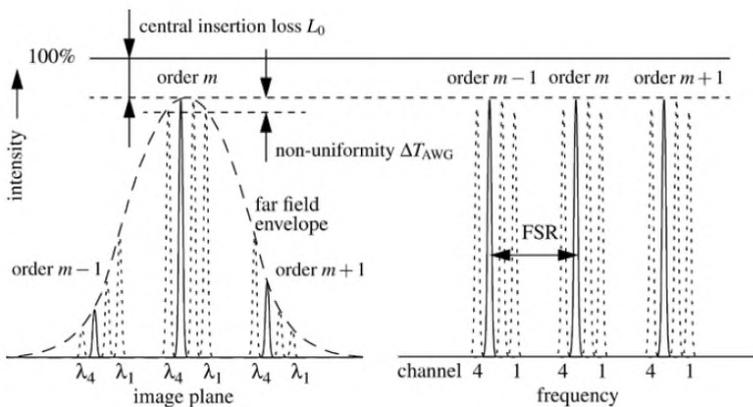
Sesuai dengan namanya, *insertion loss* merupakan rugi-rugi yang ditimbulkan akibat komponen tambahan yang disisipkan pada jalur

yang dilewati berkas cahaya. Pada sistem AWG, cahaya akan merambat dari *slab* pertama kemudian masuk *array waveguide* dan keluar menuju *slab* kedua. Hal ini potensial menimbulkan rugi-rugi, yang disebabkan oleh sambungan *slab* dan redaman di dalam *array*.

Jika transmisi kanal pusat AWG dimisalkan T_c , maka besarnya rugi-rugi yang terjadi pada kanal tersebut sebesar :

$$A_0 = -10 \log T_c \quad (2.14)$$

Sedangkan untuk kanal lebih luar, akan memiliki rugi-rugi yang lebih besar lagi, seperti yang terlihat dalam gambar 3.5 berikut ini.



Gambar 2.18 Spektrum *Insertion Loss* [5]

Seperti yang tampak pada gambar, bahwa untuk *array* yang lebih luar dibandingkan *array* pusat, dayanya akan menurun akibat dari medan jauh masing-masing *array* yang jatuh pada arah menyimpang dari sudut utamanya.

2.6.3.2 Non-Uniformity

Non-uniformity (ΔT_{AWG}) diartikan sebagai perbandingan antara kanal transmisi pusat (T_c) dengan kanal transmisi terluar ($T_{1,N}$), yang dinyatakan dalam unit dB. Persamaan *nonuniformity* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta T_{AWG} = -10 \log \frac{T_{1,N}}{T_c} \quad (2.15)$$

Sebagai contoh, jika daya pada kanal terluar turun menjadi setengahnya ($T_{1,N} = 0,5 T_c$), maka besarnya *nonuniformity* adalah 3 dB (-10 log 0,5 dB). Nilai dari *non-uniformity* sistem AWG biasanya sangat kecil, karena dipengaruhi oleh banyaknya jumlah *array waveguide* yang ditransmisikan. Nilai *nonuniformity* tersebut berkisar antara 0,5dB, 0,7dB ataupun 0,8 dB. [14]

2.6.3.3 Crosstalk

Salah satu parameter penting lain untuk sebuah divais sistem AWG adalah karakteristik dari *inter-channel crosstalk*. Hal ini diakibatkan adanya kontribusi dari sinyal yang tidak diinginkan yang berasal dari kanal lain, masuk dan bisa dideteksi oleh suatu kanal sehingga mengganggu sinyal asli pada kanal tersebut.

Secara teoritis, untuk *waveguide* penerima yang disusun bersebelahan yang terpisah jarak sejauh d , akan memiliki rugi-rugi *inter-channel crosstalk* sebesar :

$$A_x = \Gamma (d) \quad (2.16)$$

Dari persamaan 3.9, terlihat bahwa semakin besar celah antar *waveguide* penerima akan mengakibatkan rugi-rugi *crosstalk* yang semakin besar. Sebagai gambaran, dengan celah sebesar 1-2 kali lebar *waveguide* akan berkontribusi pada redaman *inter-channel crosstalk* lebih dari 40 dB.

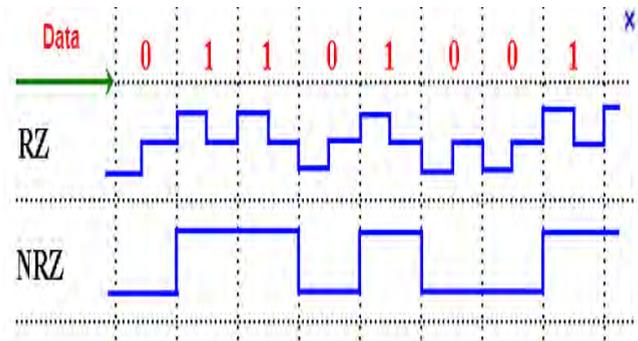
Sementara, mekanisme pendekatan lain perlu dipertimbangkan untuk meminimalkan rugi-rugi *crosstalk*. Salah satu diantaranya, adalah *error* yang disebabkan adanya perbedaan sudut transfer diantara *array waveguide*. Hal ini bisa menimbulkan *nonuniformity* pada kasus ketebalan lapisan, lebar *waveguide* dan indek refraksi. Dampaknya bisa memunculkan *noise* yang disebut '*crosstalk floor*' sebesar 35 dB untuk devais yang berkualitas bagus.

2.7 Kinerja WDM

Untuk melihat performansi kanal WDM, khususnya kemampuan kanal dalam melewatkan data (kapasitas kanal) perlunya parameter laju bit dalam menghitungnya untuk melihat kinerja pada suatu WDM. Besarnya laju bit dalam kanal, selain dipengaruhi lebar spasi kanal, juga ditentukan oleh jenis kode yang digunakan.

2.7.1 Line Coding

Line coding merupakan proses pengkodean sinyal yang menggunakan sekelompok aturan dalam simbol sinyal. Pesan digital tersebut diubah dalam deretan simbol baru (proses *encoding*). Sedangkan pada sisi *decoding*, akan terjadi proses merubah kembali deretan simbol yang sudah dikodekan menjadi pesan aslinya.



Gambar 2.19 Pengkodean Saluran NRZ dan RZ

Terdapat beberapa jenis *line coding* yang banyak digunakan, diantaranya NRZ, RZ, AMI, manchester dan sebagainya. Gambar 2.19 memperlihatkan 2 contoh *line coding* yaitu *Return to Zero* (RZ) dan *Non Return to Zero* (NRZ). Namun demikian, kode NRZ lebih banyak dipilih, karena RZ membutuhkan *bandwidth* dua kali lebih besar dibandingkan yang diperlukan NRZ.

2.7.2 Bit rate Standar ITU

International Telecommunication Union (ITU) menetapkan standar untuk struktur frame sinkron dalam pengiriman trafik digital multipleks melalui fiber optik, berbasis *synchronous digital hierarchy* (SDH). Adapun blok fundamentalnya sebesar 155,52 Mbps, yang juga dikenal sebagai *synchronous transport module-level 1* (STM-1). Sementara Amerika Utara menggunakan format standar lainnya, yang disebut *synchronous optical network* (SONET).

Sementara untuk aliran data dengan laju yang lebih besar, dapat diturunkan dari kelipatan N dengan sinyal STM-1 untuk membentuk sinyal STM-N.

Tabel 2.4 *Bit rate* Standar ITU dan Sonet

Standar ITU	Bit rate (Mbps)	Sonet (ANSI)
STM-1	155,520	STS-3/OC-3
STM-4	622,080	STS-12/OC-12
STM-16	2,488,320	STS-48/OC-48
STM-64	9,953,280	STS-192/OC-192
STM-256	39,813,120	STS-768/OC-768
STM-1024	159,152,240	STS-3072/OC-3072

2.7.3 *Bit rate*

Pengertian *bit rate* (laju bit) adalah banyaknya bit (0 atau 1) yang dapat dilewatkan dalam 1 detik. Satuan laju bit adalah *bit per second* (bps). Besarnya laju bit maksimal dibatasi oleh besarnya *bandwidth* kanal. Jika laju bit melebihi kapasitas kanal, akan terjadi *error* pada beberapa data.

Berikut ini akan dijelaskan beberapa pendekatan untuk menghitung besarnya bit-rate (*bps*), terkait dengan besarnya spasi kanal (BW) yang dimiliki WDM.

2.7.3.1 *Nyquist*

Teorema *nyquist* adalah teori untuk menghitung *bit rate* dengan hasil *bit rate* yang sebesar 2 kali *bandwidth* sinyal asli. Jika diasumsikan berada dalam kondisi ideal (tanpa *noise*), besarnya *bit rate* maksimum dapat dilihat pada rumus 2.7 berikut:

$$R_b = 2 \times BW \quad (2.17)$$

Dimana :

R_b : laju bit (bps)

BW : *bandwidth* (Hz).

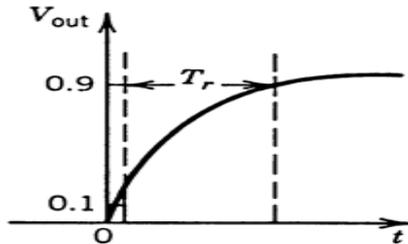
2.7.3.2 *Rise Time*

Rise time merupakan metode untuk menentukan batasan dispersi *link* suatu fiber optik, selain itu metode ini berguna untuk menganalisis sistem transmisi digital. Tujuannya adalah untuk menganalisis unjuk kerja jaringan dan melihat kapasitas kanal yang diinginkan.

Besarnya laju bit dan format pengkodean menentukan batas atas dari *rise time* pada gambar 2.20 memperlihatkan contoh *rise time*, yang diambil mulai 10% setelah waktu 'start' hingga 10% sebelum berakhir,

sehingga hanya menggunakan 80% dari waktu yang ada, dan mengabaikan 20% sisanya.

Kondisi *rise time* ini perlu dipertimbangkan, agar optimis dapat mencapai *bit rate* yang diinginkan. Dalam hal perencanaan kanal WDM, *rise time* perlu dipertimbangkan agar mampu menjamin bahwa sistem yang didesain dapat melayani *bit rate* transmisi yang diharapkan.



Gambar 2.20 Kurva *Rise Time* sebagai Fungsi Waktu

Sementara untuk pengkodean NRZ, besarnya *rise time* biasanya 70% dari waktu, sehingga *bit rate* yang terjadi juga menjadi 70% dari *bit rate* maksimalnya. Jika *bit rate* Nyquist menjadi acuan *bit rate* maksimalnya, maka besarnya *bit rate* untuk pengkodean NRZ:

$$\begin{aligned} R_b &= 0,7 \times 2 \times BW \\ &= 1,4 \times BW \quad (\text{bps}). \end{aligned} \quad (2.18)$$

2.7.3.3 Gaussian

Gaussian adalah salah satu metode lain untuk melihat kapasitas *bitrate* dengan mengacu pada *bandwidth* optikal. *Bandwith* optikal berbeda dengan *bandwith* elektrik. Jika kondisi *bandwidth* optikal mengikuti bentuk distribusi *gaussian*, maka hubungan *bandwith* optikal (BW_o) dan besarnya *bit rate* adalah:

$$R_b = 1,34 \times BW_o \quad (\text{bps}). \quad (2.19)$$

BAB 3

PERENCANAAN SISTEM ARRAYED WAVEGUIDE GRATING

3.1 AWG Tool (*WDM_Phasar*)

Di pasaran banyak dijumpai *tool* yang dapat dipakai untuk menghitung parameter AWG. Beberapa *tool* yang mampu untuk membuat desain AWG diantaranya *beamprop*, *apollo* dan *WDM_Phasar*. Yang membedakan, *beamprop* dan *apollo* bersifat *software* komersial, sedangkan *WDM_Phasar* bisa diperoleh secara gratis.

WDM_Phasar merupakan salah satu *software* bantu untuk mendesain parameter WDM pada umumnya, termasuk parameter AWG. Prosedur kerjanya dimulai dari memasukkan parameter yang dipilih hingga mendapatkan hasil desain yang diinginkan. Beberapa parameter yang dimasukkan akan secara otomatis menghitung hasil untuk kriteria AWG yang diinginkan.

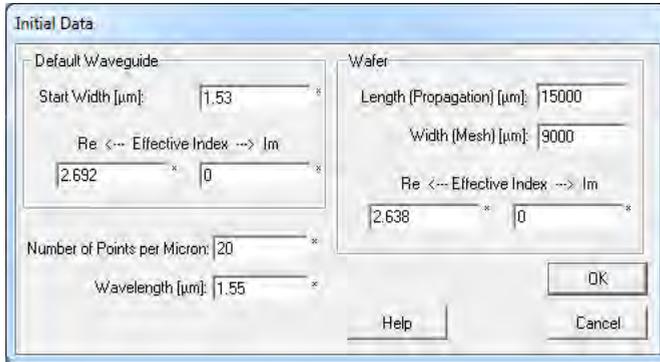
Untuk mendapatkan hasil perencanaan sistem AWG yang lebih realistis, dalam Tugas Akhir ini digunakan *tool* bantu *WDM_Phasar* untuk menghitung kembali parameter AWG, dengan menambahkan beberapa parameter tambahan yang bersifat memberi batasan desain, seperti *crossstalk*, *nonuniformity* dan ukuran devais, namun tidak mengurangi perhitungan beberapa parameter seperti orde difraksi, perbedaan panjang kanal, panjang lintasan *slab*, *free spectral range*, jumlah kanal I/O dan jumlah *array*.

3.1.1 Perhitungan Parameter AWG dengan *WDM_Phasar*

WDM_Phasar telah menyediakan fasilitas yang cukup untuk digunakan membuat desain AWG. Adapun langkah-langkah yang harus dilakukan bisa dijelaskan sebagai berikut :

1. Melakukan inisial data awal.

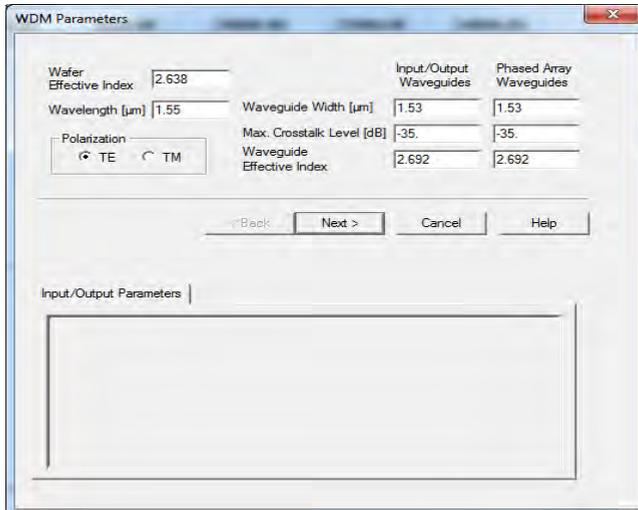
Dalam tahap ini, perlu dimasukkan beberapa data yang menyangkut λ kerja AWG (λ_0 dan λ_1), ukuran devais (misal :15000x9000 μm^2) dan indeks refraksi material devais. Selanjutnya menekan tombol 'OK'. Untuk lebih jelasnya seperti terlihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Tampilan Data Awal

2. Memasukkan parameter *waveguide* dan *crosstalk*.

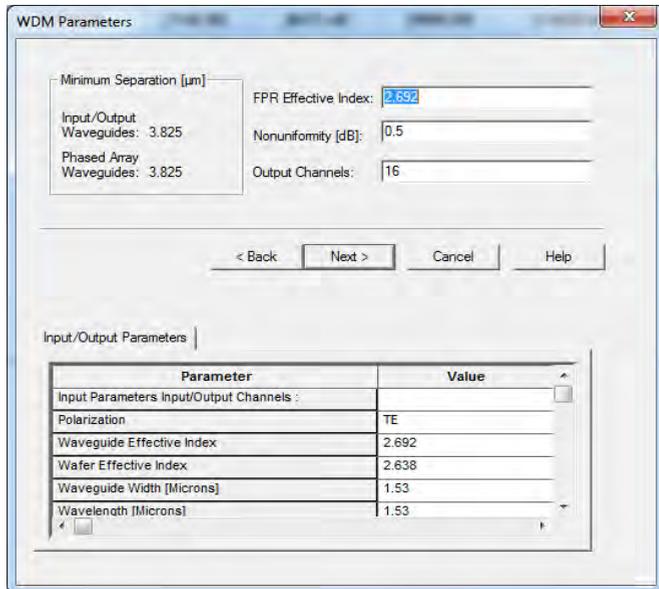
Dalam tahap ini, data sebelumnya telah masuk (indeks wafer dan λ). Selanjutnya memasukkan parameter *array*, nilai *crosstalk* (-35 dB) dan indeks *array* (2,692). Kemudian tekan 'next'.



Gambar 3.2 Parameter WDM

3. Memasukkan parameter *nonuniformity*.

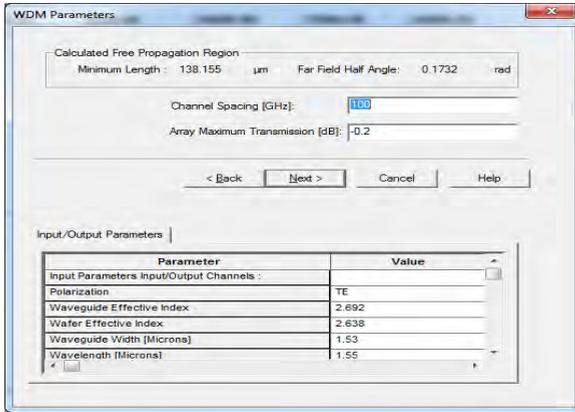
Dalam kondisi ini, data yang telah dimasukkan sebelumnya telah terekam dalam *Input/Output Parameter*. Selain itu juga menghasilkan data perhitungan jarak minimum. Selanjutnya memasukkan indeks *slab*, nilai *nonuniformity* dan jumlah kanal *output*. Tekan 'next'.



Gambar 3.3 *Non-uniformity* dan *Output* Kanal

4. Memasukkan parameter spasi kanal

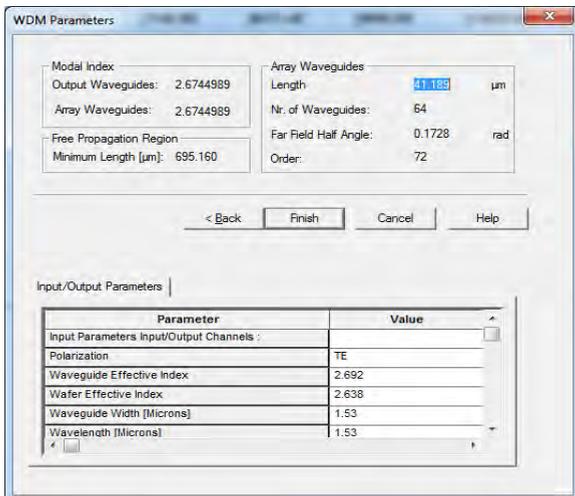
Pada langkah ini telah dihasilkan data perhitungan terkait *Free Propagation Region* (FPR) atau *slab*, yang terdiri dari panjang minimum (μm) dan *far field half angle* (rad). Selanjutnya perlu mengisikan spasi kanal yang diinginkan (100 GHz) dan besarnya rugi-rugi transmisi *array* yang bisa ditoleransi (misal : -0,2 dB). Kemudian tekan 'next'. Untuk tampilan dari memasukkan parameter spasi kanal yang lengkap dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Tampilan Spasi Kanal dan *Array Maximum Transmission*

5. Mendapatkan hasil perhitungan

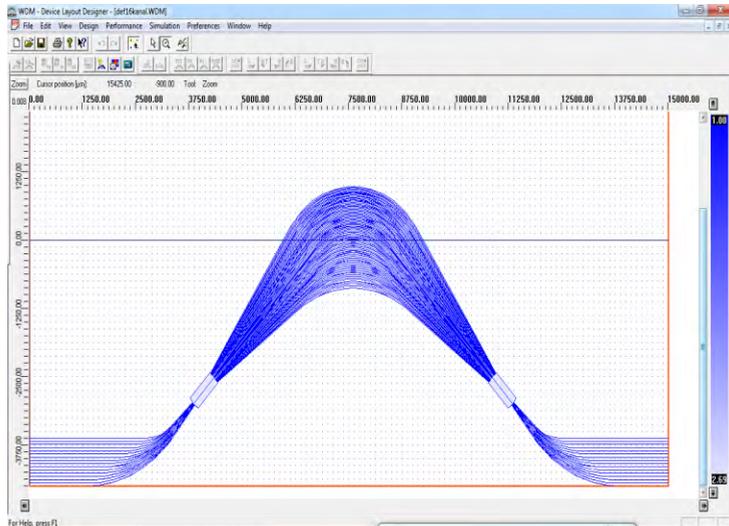
Setelah semua data yang diperlukan dimasukkan, maka tibalah menunggu hasil dan keluarlah seperti tampilan berikut ini.



Gambar 3.5 Tampilan Parameter Hasil Perhitungan

3.1.2 Hasil Desain AWG menggunakan *WDM_Phasar*

Setelah semua data parameter AWG yang diperlukan dimasukkan pada *dialog-box* yang tersedia pada *tool*, dan kemudian dilakukan perhitungan oleh *WDM_Phasar* untuk menghasilkan parameter AWG yang lain. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, selanjutnya bisa ditampilkan hasil desain AWG, berikut data detailnya.



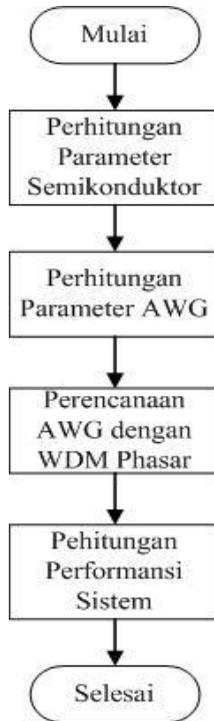
Gambar 3.6 Hasil Desain AWG

3.2 Skenario Pengujian

Skenario pengerjaan Tugas Akhir ini, secara umum bisa dibagi menjadi beberapa bagian yaitu :

1. Menghitung parameter semikonduktor, yang dapat mendukung operasional AWG pada pita panjang gelombang yang diinginkan.
2. Memilih parameter AWG, yang harus ditetapkan sebelum dilakukan perhitungan parameter lain dari AWG.
3. Melakukan perhitungan parameter AWG secara teoritis, berdasarkan parameter AWG yang sudah ditetapkan sebelumnya.

- Melakukan perhitungan parameter AWG menggunakan bantuan *WDM_Phasar*. Pada tahap ini, juga bisa diperlihatkan hasil desain AWG, dimana bisa diketahui apakah desain yang direncanakan cukup baik untuk diimplementasikan, dan dipastikan tidak ada *array* ataupun kanal I/O yang putus.



Gambar 3.7 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

3.2.1 Perhitungan Parameter Semikonduktor

Ada beberapa parameter semikonduktor yang layak diperhitungkan, terkait dengan kemampuannya mendukung operasional AWG pada kanal *C-band* (1530 – 1565 nm). Parameter tersebut terkait erat dengan material pembentuknya dan ukuran fisik dari semikonduktor.

Beberapa parameter semikonduktor yang diperlukan untuk bahan perhitungan lebih lanjut adalah nilai indeks refraksi *core* dan *cladding* (2,692 dan 2,638), panjang gelombang operasional 1550 nm dan diameter *core* (50 μm). Dengan menggunakan data yang ada tersebut, selanjutnya akan digunakan untuk menghitung besarnya *energy gap* (E_g), *numeric aperture* (NA), bilangan V dan jumlah mode.

3.2.2 Parameter AWG yang Dipilih

Parameter AWG yang dipilih ini, dimaksudkan menjadi parameter yang harus ada, sebelum melakukan perhitungan parameter lain. Setelah parameter AWG ini dipilih, selanjutnya akan dilakukan perhitungan secara teoritis terhadap parameter AWG lainnya, dalam lingkup operasional *C-band*.

Tabel 3.1 Parameter AWG yang Dipilih

Parameter	Simbol	Nilai
Panjang gelombang tengah	λ_0	1550 nm
Range panjang gelombang <i>C-Band</i>	λ_1, λ_2	1530-1565 nm
Indeks refraksi <i>slab</i>	n_s	3,06
Indeks refraksi <i>layer/cladding</i>	n_2	2,638
Indeks refraksi efektif AWG	n_c	2,692
Indeks refraksi grup	n_g	4,5
Lebar celah	d	5 μm

Selain data dalam tabel 3.1, ukuran spasi kanal yang dipilih adalah 8 GHz dan 10 GHz untuk klas VHWDM, 50 GHz dan 100 GHz mewakili DWDM, serta 1200 GHz dan 2000 GHz untuk kelompok CWDM.

3.2.3 Parameter AWG yang Dihitung

Beberapa parameter AWG yang akan dihitung berdasarkan data parameter AWG yang dipilih sebelumnya, untuk selanjutnya parameter-parameter yang akan dihitung dalam AWG seperti yang terlihat dalam tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter yang Dihitung

Parameter	Simbol
Orde difraksi	m
Perbedaan panjang kanal yang berdekatan	ΔL
Panjang <i>focal slabwaveguide</i>	L_f
<i>Free spectral range</i>	FSR
Jumlah maksimum kanal I/O	N_{\max}
Jumlah <i>array waveguide</i>	N_{array}

3.2.4 Perencanaan dengan *WDM_Phasar*

Dengan menambahkan parameter *crosstalk*, nilai *non-uniformity* dan besarnya ukuran *device*, beberapa parameter AWG yang diamati menggunakan WDM Phasar, antara lain:

1. Pengaruh besarnya ukuran *device*
2. Pengaruh banyaknya jumlah kanal *input/output*
3. Pengaruh besarnya nilai *crosstalk* yang diizinkan
4. Pengaruh lebar spasi kanal WDM
5. Pengaruh besarnya nilai *non-uniformity* yang diberikan

3.2.5 Perhitungan Performansi Sistem

Setelah mendapatkan berbagai ukuran spasi kanal dari hasil perhitungan teoritis maupun lewat *WDM_Phasar*, selanjutnya akan dianalisa kemampuan kanal tersebut dalam melewati data digital (*bit rate*). Untuk keperluan ini, dipilih jenis pengkodean NRZ dan metode perhitungan *bit rate* menggunakan pendekatan *nyquist*, *risetime* dan model distribusi *gaussian*.

BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

4.1 Parameter Semikonduktor

Dalam perancangan AWG perlu adanya penentuan perhitungan parameter semikonduktor, dalam perhitungan beberapa parameter semikonduktor ini, akan dilakukan beberapa perhitungannya diantaranya yaitu penentuan nilai *energy gap* (E_g) untuk melihat besarnya *energy gap* yang dapat beroperasi pada *C-Band* (1530-1565 nm), perhitungan *numeric aperture* yang bertujuan untuk melihat besarnya sudut lintasan ketika cahaya merambat pada fiber optik, dan yang terakhir adalah perhitungan bilangan V dimana sebagai frekuensi ternormalisasi yang akan berpengaruh pada jumlah berkas cahaya (*mode*) yang dapat ditransmisikan.

4.1.1 Penentuan Nilai *Energy Gap* (E_g)

Pita optikal *C-Band* menempati pita panjang gelombang antara 1530 nm sampai dengan 1565 nm. Besarnya rentang *energy gap* yang memenuhi range tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3. Untuk batas bawah $\lambda = 1530$ nm, besarnya E_g dapat dihitung sebagai berikut:

$$E_g = \frac{1,242 \times 10^{-6}}{1530 \times 10^{-9}} = 0,8117 \text{ eV.}$$

Sedangkan untuk panjang gelombang batas atas *C-Band* (1565 nm), besarnya E_g dapat dihitung kembali dengan menggunakan cara yang sama, yaitu :

$$E_g = \frac{1,242 \times 10^{-6}}{1565 \times 10^{-9}} = 0,7936 \text{ eV.}$$

Dengan demikian, semikonduktor yang beroperasi pada *C-Band* harus memiliki *energy gap* mulai dari 0,7936 eV sampai dengan 0,8117eV. Untuk jenis semikonduktor yang bersesuaian dengan *energy gap* diatas adalah AlGaPSb, AlGaAsSb, AlGaInAs seperti pada gambar 2.5.

4.1.2 Perhitungan *Numeric Aperture* (NA)

Pada saat berkas cahaya dilewatkan dalam sebuah fiber optik, cahaya akan terpancar di dalam area terbatas yang disebut *numerical aperture* (NA). Cahaya sendiri tidak bisa menjalar di area yang melebihi

numerical aperture. Sedangkan besar NA sangat dipengaruhi oleh indeks refraksi *core* (n_1) dan *cladding* (n_2) dari fiber optik.

Dengan mengambil contoh $n_1 = 2,692$ dan $n_2 = 2,638$, maka besarnya NA dapat dicari menggunakan persamaan 2.4, yaitu :

$$\begin{aligned} \text{NA} &= (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \\ &= (2,692^2 - 2,638^2)^{1/2} \\ &= 0,5365 \end{aligned}$$

Dan besarnya sudut kritis (Θ) dapat dicari dengan \sin^{-1} dari NA, yaitu :

$$\begin{aligned} \text{NA} &= 0,5365 = \sin \Theta \\ \Theta &= \sin^{-1} 0,5365 = 32,44^\circ \end{aligned}$$

Dengan demikian, bila $n_1 = 2,692$ dan $n_2 = 2,638$, maka cahaya akan menjalar dalam fiber optik dengan membentuk sudut lintasan yang yang tidak pernah melebihi $32,44^\circ$.

4.1.3 Perhitungan Bilangan V

Bilangan V adalah besarnya frekuensi ternormalisasi, yang akan berpengaruh pada jumlah *mode* transmisi. Selain faktor NA, bilangan V juga dipengaruhi oleh jari-jari *core* (a) dan λ kerja, seperti yang ditunjukkan persamaan 2.5 di bab 2. Dengan menggunakan hasil perhitungan NA sebelumnya, sementara besarnya jari-jari *core* adalah 50 μm dan bekerja pada $\lambda = 1550$ nm, maka besarnya bilangan V dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V &= \frac{2\pi a}{\lambda} \times \text{NA} \\ &= \frac{2\pi \cdot 50 \times 10^{-6}}{1550 \times 10^{-9}} \times 0,5365 \\ &= 108,73 \end{aligned}$$

4.1.4 Perhitungan Jumlah Mode Transmisi (M)

Besarnya bilangan V menentukan banyaknya berkas cahaya yang dapat dilewatkan dalam sebuah fiber optik. Dengan mengambil nilai V dari hasil perhitungan sebelumnya, banyaknya mode (M) yang dapat dilewatkan dalam sebuah optik sebesar :

$$\begin{aligned} M &= \frac{V^2}{2} \\ &\approx \frac{108,73^2}{2} = 5912 \end{aligned}$$

Dengan bilangan V sebesar 108,73, maka jumlah berkas cahaya yang dapat dilewatkan dalam fiber optik maksimal 5912 buah.

4.2 Perhitungan Parameter AWG

Berikut ini akan dilakukan perhitungan secara teoritis beberapa parameter AWG dalam kondisi ideal. Sebagai contoh perhitungan, dipilih spasi kanal DWDM 100 GHz (0,8 nm) pada range *C-Band*, indeks *slab* (n_s) = 3,06, indeks efektif (n_c) = 2,692 dan indeks grup (n_g) = 4,5.

Selanjutnya akan dilakukan perhitungan beberapa parameter AWG seperti :

- Orde difraksi (m)
- Selisih panjang *array* (ΔL)
- Panjang *slab* (L_s)
- *Free spectral range* (FSR)
- Jumlah *array* yang diperlukan (N_{array})
- Jumlah kanal I/O yang bisa dilayani (N_{max}).

4.2.1 Orde Difraksi (m)

Besarnya orde difraksi (m) dipengaruhi oleh range panjang gelombang, yaitu batas bawah (λ_1) dan batas atas (λ_2) sebuah pita optik. Dengan tetap mengambil *C-Band* sebagai contoh perhitungan orde difraksi, maka untuk nilai $\lambda_1 = 1530$ nm dan $\lambda_2 = 1565$ nm, dengan menggunakan persamaan 2.8, besarnya m dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Orde Difraksi (m)} &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \\ &= \frac{1530 \cdot 10^{-9}}{1565 \cdot 10^{-9} - 1530 \cdot 10^{-9}} \\ &= 43,7143 \end{aligned}$$

4.2.2 Perbedaan Panjang *Array* (ΔL)

Array dalam sebuah AWG memiliki selisih panjang lintasan yang teratur, yaitu ΔL . Besarnya ΔL dipengaruhi oleh nilai orde difraksi (m), panjang gelombang tengah (λ_0) dan indeks refraksi material *array* (n_c). Dengan mengambil $\lambda_0 = 1550$ nm dan $n_c = 2,692$ serta m yang telah dihitung sebelumnya, maka dengan menggunakan persamaan 2.9, besarnya ΔL bisa ditentukan seperti perhitungan berikut :

$$\begin{aligned} \Delta L &= \frac{m \cdot \lambda_0}{n_c} \\ &= \frac{43,7143 \times 1550 \cdot 10^{-9}}{2,692} \\ &= 25,1698 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

Dengan demikian, selisih panjang antar *array* bersebelahan (*adjacent*) untuk AWG tersebut sebesar 25,1698 μm . Nilai tersebut bisa saja berbeda dengan realisasi, jika terdapat gangguan transmisi, seperti *crosstalk*, *non-uniformity* dan sebagainya.

4.2.3 Panjang Lintasan Slab (L_f)

Kedua *slab* dalam sistem AWG sangat terkait dengan *array waveguide*. Bedanya, *slab* pertama menghubungkan kanal *input* dengan *array*, sedangkan *slab* kedua menghubungkan *array* dengan kanal *output*. Karena banyaknya kanal I/O belum tentu sama dengan banyaknya *array*, maka panjang *slab* tidak diharuskan sama dengan jarak lurus antara ujung *array* dengan kanal I/O. Panjang lintasan *slab* (L_f) sendiri kadang juga disebut *free propagation region* (FPR). Panjang lintasan efektif *slab* sangat dipengaruhi oleh parameter *slab* sendiri dan *array waveguide*. Disamping itu, juga ditentukan oleh orde refraksi (m) dan spasi kanal yang diinginkan ($\Delta\lambda$).

Dengan menggunakan data n_s , n_c , n_g yang masih sama, orde refraksi (m) hasil perhitungan sebelumnya, dan panjang *pitch* antar puncak *array* (d) sebesar 5 μm , maka jika diinginkan spasi kanal sebesar 0,8 nm (100 GHz), besarnya panjang lintasan dalam *slab* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.10 seperti berikut ini :

$$\begin{aligned} L_f &= \frac{n_s d^2 n_c}{m \Delta\lambda n_g} \\ &= \frac{3,06 \times 5 \cdot 10^{-6}^2 \times 2,692}{43,7143 \times 0,8 \cdot 10^{-9} \times 4,5} \\ &= 1308,61 \mu\text{m} \end{aligned}$$

4.2.4 Free Spectral Range (FSR)

Besarnya parameter *free spectral range* (FSR) harus lebih besar dari range frekuensi suatu kanal (spasi kanal), agar tidak terjadi *crosstalk* antar orde yang berdekatan. Besarnya FSR, selain ditentukan oleh parameter *array*, juga dipengaruhi oleh orde difraksi (m) dan panjang gelombang pusat (λ_0).

Dengan parameter *array* yang masih sama ($n_c = 2,692$ dan $n_g = 4,5$), $\lambda_0 = 1550$ nm serta orde difraksi (m) hasil perhitungan sebelumnya, maka dengan menggunakan rumus 2.11, besarnya FSR dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{FSR} &= \frac{\lambda_0 n_c}{m n_g} \\ &= \frac{1550 \cdot 10^{-9} \times 2,692}{43,7143 \times 4,5} \\ &= 21,211 \text{ nm} \end{aligned}$$

4.2.5 Jumlah Kanal (N_{\max})

Jumlah kanal (N_{\max}) adalah jumlah maksimal kanal *input* atau *output* yang dapat terhubung dengan dengan *slab*. Banyaknya kanal *input* (N_{\max}) yang dapat dilewatkan pada *array*, sangat bergantung pada besarnya FSR dan spasi kanal yang akan digunakan. Dengan memilih spasi kanal $\Delta\lambda = 0,8 \text{ nm}$ dan ketersediaan FSR hasil perhitungan sebelumnya sebesar 21,211 nm, maka jumlah kanal *input* yang bisa dilewatkan *array* atau jumlah kanal *output* yang bisa dilayani *array* sebesar :

$$\begin{aligned} N_{\max} &= \text{integer}\left(\frac{\text{FSR}}{\Delta\lambda}\right) \\ &= \text{integer}\left(\frac{21,211 \cdot 10^{-9}}{0,8 \cdot 10^{-9}}\right) \\ &= 26,51 \\ &\approx 27 \text{ kanal} \end{aligned}$$

4.2.6 Jumlah Array (N_{array})

Jumlah *array* yang bisa direalisasikan dalam suatu divais adalah terbatas. Tidak semua *array* bisa diwujudkan secara sempurna, mengingat keberadaannya dibatasi oleh selisih jarak *adjacent* yang harus sebesar ΔL , maka hal ini akan berbenturan dengan ukuran divais, yang tidak mungkin dibuat dalam ukuran yang tidak terbatas. Hanya saja persamaan 2.13 bisa dipakai sebagai salah satu cara pendekatan untuk memperkirakan jumlah *array* maksimal yang bisa direalisasikan.

$$\begin{aligned} N_{\text{array}} &= 4N_{\max} \\ &= 4 \times \text{integer}\left(\frac{\text{FSR}}{\Delta\lambda}\right) \\ &= 4 \times 27 \\ &= 108 \text{ array} \end{aligned}$$

4.3 Parameter AWG pada WDM

Langkah-langkah perhitungan parameter AWG telah ditunjukkan pada sub bab sebelumnya, dengan mengambil contoh spasi kanal 100 GHz (0,8 nm). Sedangkan untuk melihat pengaruh perbedaan spasi kanal terhadap parameter AWG pada jaringan WDM dilakukan perhitungan pada beberapa spasi kanal yang lain, yaitu 8 GHz, 10 GHz, 50 GHz, 1200 GHz dan 2000 GHz. Hasil perhitungan selengkapnya untuk kanal-kanal tersebut dapat dilihat pada tabel 4.1.

Pemilihan spasi kanal dalam tabel 4.1, didasarkan pada jenis-jenis WDM yang ada, sehingga mewakili VHDWDM (8 GHz dan 10 GHz), DWDM (50 GHz dan 100 GHz) dan CWDM (1200 GHz dan 2000 GHz). Sedangkan WWDM yang memiliki $\Delta\lambda \geq 50$ nm tidak dihitung, karena melebihi lebar spektrum *C-Band* (≈ 35 nm) dan hingga saat ini pun perhitungannya masih belum jelas.

Dari tabel 4.1 dapat dilihat perbandingan beberapa parameter AWG untuk VHDWDM, DWDM dan CWDM. Beberapa parameter AWG untuk jenis WDM berbeda memiliki nilai yang tetap, diantaranya orde difraksi (m), selisih panjang *waveguide* yang berdekatan (ΔL), dan *free spectral range* (FSR). Hal ini dimungkinkan karena *bandwidth* yang digunakan tidak berubah, yaitu *bandwidth C-Band*, dari 1530 nm hingga 1565 nm.

Tabel 4.1 Hasil perhitungan parameter AWG

WDM	VHDWDM		DWDM		CWDM	
Δf (GHz)	8	10	50	100	1200	2000
$\Delta\lambda$ (nm)	0,064	0,08	0.4	0.8	9.6	16
m	43,7143	43,7143	43,7143	43,7143	43,7143	43,7143
ΔL (μm)	25,1698	25,1698	25,1698	25,1698	25,1698	25,1698
L_f (μm)	16358	13086	2617	1308,61	109,05	84,12
FSR (nm)	21,211	21,211	21,211	21,211	21,211	21,211
N_{max}	331	265	53	27	2	1
N_{array}	1324	1060	212	108	8	4

Sementara hasil berbeda terlihat pada parameter panjang *slab* (L_f), jumlah *array waveguide* (N_{array}) dan jumlah kanal *input/output* (N_{max}). Seperti yang terlihat pada tabel, bahwa semakin lebar spasi kanal, besarnya nilai L_f , N_{array} dan N_{max} justru semakin menurun. Kejadian ini bisa dimaklumi karena range frekuensi yang dipakai tetap (*C-Band*),

sementara harus dibagi menjadi *bandwidth* kanal dengan ukuran lebih besar sehingga jumlah *array* dan kanal I/O yang dihasilkan menjadi semakin sedikit. Begitu juga harga panjang lintasan *slab* (L_i) yang berbanding terbalik dengan spasi kanal ($\Delta\lambda$), maka jika spasi kanal semakin membesar sudah pasti panjang lintasan *slab* akan mengecil.

4.4 Parameter AWG dengan *WDM_Phasar*

Perhitungan parameter AWG yang dilakukan sebelumnya, diasumsikan berada pada kondisi ideal. Sedangkan untuk memberi gambaran lebih realistis, sebuah *WDM-tool* (*WDM_Phasar*), dapat digunakan untuk membantu membuat desain parameter AWG. *WDM_Phasar* adalah merupakan sebuah *software* yang bertujuan untuk mendesain *phase array WDM device*.

Dalam Tugas Akhir ini, *WDM_Phasar* digunakan untuk membantu menghitung kembali beberapa parameter AWG di lingkungan non ideal, yang memberikan toleransi terhadap kehadiran *crossstalk*, perbedaan transmisi kanal pusat dengan kanal terluarnya (*non-uniformity*) yang dibatasi, serta pengaruh besarnya ukuran struktur *waveguide*.

Adapun parameter AWG yang akan dikaji menggunakan *WDM_Phasar* adalah:

- Pengaruh ukuran divais
- Pengaruh banyaknya jumlah kanal I/O
- Pengaruh besarnya *crossstalk*
- Pengaruh lebar spasi kanal
- Pengaruh besarnya nilai *non-uniformity*

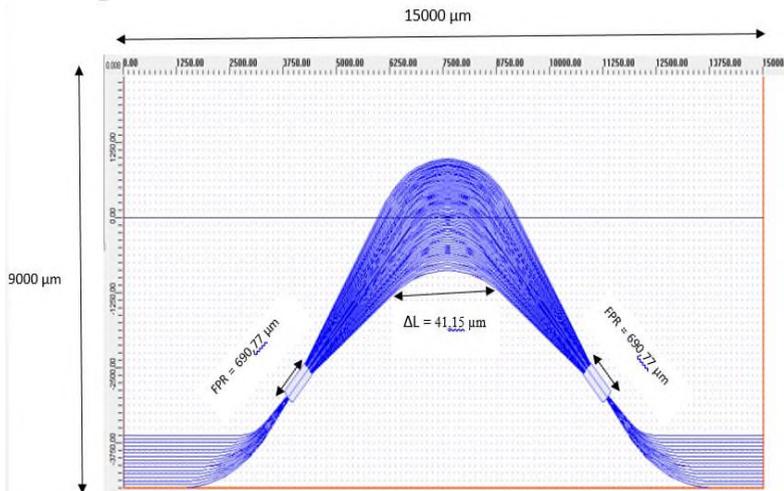
Untuk keperluan proses *WDM_Phasar*, beberapa parameter penunjang yang harus dimasukkan dalam *software*, dipilih sedemikian rupa agar semirip mungkin dengan parameter perhitungan teoritis sebelumnya. Dalam hal ini indeks refraksi efektif dari AWG (n_c) sebesar 2,692, indeks *wafer* (n_{clad}) sebesar 2,638, *center wavelength* sebesar 1,55 μm dan lebar spektrumnya dimulai dari 1,53 μm .

4.4.1 Pengaruh Ukuran *Device*

Struktur *device WDM_Phasar* yang digunakan berbentuk persegi panjang dengan ukuran panjang 15000 μm dan lebar yang bervariasi. Sedangkan, untuk melihat pengaruh ukuran *device* beberapa parameter yang ditetapkan, antara lain :

- Besarnya *crosstalk* = -35 dB
- Jumlah kanal *input/output* = 16 kanal
- Jumlah *array* = 64 *array*
- Lebar spasi kanal = 100 GHz
- Non-uniformity* = 0,5 dB.
- Ukuran *device* = 15000 x 9000 μm

Parameter tersebut sebagai parameter perencanaan untuk diujikan dengan membandingkan dengan beberapa parameter seperti ukuran devais yang diubah, jumlah kanal, *crosstalk*, spasi kanal, pengaruh *non-uniformity*. Jumlah kanal dipilih 16 agar dapat melihat kecenderungan jumlah kanal yang dibandingkan yang lebih kecil dari 16 dan lebih besar dari 16 buah yang akan membuat *array* dan kanal I/O putus, untuk jumlah *array* 4 kali nya jumlah kanal I/O seperti pada persamaan 2.13. Untuk spasi kanal yang dijadikan acuan yaitu 100 GHz agar dapat dibandingkan dengan spasi kanal yang lebih kecil dari 100 GHz (VHDWDM) dan lebih besar dari 100 GHz (CWDM) yang menyebabkan perubahan parameter orde difraksi, perbedaan panjang kanal bersebelahan, jumlah *array* dan I/O yang putus. Untuk nilai *crosstalk* dipilih -35dB sesuai referensi [4] dan nilai *nonuniformity* 0,5dB sesuai referensi yang telah diuji, sehingga tidak terjadi adanya kanal atau *array* yang putus. [14] Untuk realisasi perencanaan sesuai pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Dimensi Fisik Perencanaan AWG

Tabel 4.2 Parameter Perencanaan AWG

Parameter	Nilai (satuan)
Jumlah kanal	16 kanal
Jumlah array	64 Array
Spasi kanal	100 GHz
<i>Non-uniformity</i>	0,5dB
<i>Crosstalk</i>	-35dB
Ukuran <i>device</i>	15000 x 9000 μm
Panjang FPR	690,77 μm
Orde difraksi	71
ΔL	41,15 μm
FSR	21 nm

Untuk pengujian pertama akan membandingkan pengaruh ukuran AWG mulai 4000 μm sampai 15000 μm . Untuk hasil pada pengaruh ukuran AWG ini dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Pengaruh ukuran AWG

Ukuran (μm)	4000	6000	9000	10000	15000
Panjang FPR (μm)	690,77	690,77	690,77	690,77	690,77
Orde difraksi	71	71	71	71	71
ΔL (μm)	41,15	41,15	41,15	41,15	41,15
Jumlah Array	64	64	64	64	64
Array putus	0	0	0	0	0
Input/Output putus	15	9	0	0	0
FSR (nm)	21	21	21	21	21

Dengan panjang devais yang tetap (15000 μm), sementara lebarnya divariasasi sebesar 4000 μm , 6000 μm , 9000 μm , 10000 μm dan 15000 μm , maka perbedaan hasil parameter *WDM Phasar* diperoleh seperti yang terlihat pada tabel 4.3. Seperti yang terlihat dalam tabel 4.3, untuk ukuran dibawah 9000 μm , terdapat kanal *input/output* yang putus. maka untuk percobaan selanjutnya ukuran devais yang dipilih adalah

15000 μm x 9000 μm , untuk lebih efisien dalam pemanfaatan *space* sehingga tidak ada ruang yang kosong.

4.4.2 Pengaruh Jumlah Kanal

Dengan menggunakan parameter yang tetap sama dengan percobaan sebelumnya, ukuran *device* sebesar 15000 μm x 9000 μm , maka pengaruh jumlah kanal dapat diamati dengan cara mengubah-ubah besarnya jumlah kanal *input* dan *output*. Jika jumlah kanal sebelumnya 16 kanal, maka untuk melihat pengaruh jumlah kanal lain diganti dengan nilai 2, 4, 8, 16, 32 serta 40 kanal.

Kanal tersebut divariasikan untuk melihat karakteristik perubahan pada parameter AWG, dan hasilnya bisa dilihat seperti yang tampak dalam Tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4 Pengaruh jumlah kanal

Jumlah Kanal	2	4	8	16	32	40
Panjang FPR (μm)	46,052	138,15	322,36	690,77	1427,60	1796,02
Orde difraksi	1059	353	151	71	34	27
ΔL (μm)	613,80	204,60	87,52	41,15	19,70	15,64
Jumlah Array	5	14	30	64	131	164
Array putus	0	0	0	0	86	116
Input/Output putus	0	0	0	0	21	40
FSR (nm)	1,4	3	10	21	45,5	57

Tabel 4.4 memperlihatkan pengaruh jumlah kanal terhadap beberapa parameter AWG, dimana semakin banyak jumlah kanal semakin banyak pula jumlah *array* yang terjadi, sehingga ukuran FPR yang diperlukan juga makin membesar. Namun dengan bertambah banyaknya jumlah kanal, ada beberapa parameter yang justru menurun nilainya yaitu besarnya orde difraksi (m) dan selisih panjang *array* yang bersebelahan (ΔL).

Di sisi lain, dengan meningkatnya jumlah kanal bisa mengakibatkan beberapa *array* putus dan mengurangi jumlah kanal *input/output* yang dapat dilayani.

Karena ada beberapa *array* putus dan tidak sampai ke *slab* kedua, maka hanya beberapa *array* dan kanal yang dapat berfungsi secara normal. Nilai FSR juga akan meningkat karena jumlah kanal yang bertambah.

4.4.3 Pengaruh *Crosstalk*

Untuk melihat pengaruh keberadaan *crosstalk*, selain besarnya jumlah kanal yang dipakai, beberapa parameter yang digunakan masih mengacu pada percobaan sebelumnya, seperti ukuran *device* yang digunakan dan jumlah kanal yang diuji masih sebesar 16 kanal.

Untuk pengujian pengaruh *crosstalk* ini, dipilih range *crosstalk* beberapa di atas dan di bawah -35 dB, yang bertujuan untuk melihat perbedaan pengaruh dari nilai *crosstalk* jauh di atas dan di bawahnya -35 dB yang dipakai sebelumnya. Untuk hasil simulasi pengaruh beberapa variasi *crosstalk* pada AWG, hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Pengaruh *crosstalk*

Crosstalk	-1	-5	-10	-35	-45	-50
Panjang FPR (μm)	276,31	276,31	331,57	690,77	828,93	884,19
Orde difraksi	28	28	34	71	85	90
ΔL (μm)	16,22	16,22	19,70	41,15	49,26	52,16
Jumlah Array	64	64	64	64	64	64
Array putus	2	2	0	0	0	14
Input/Output putus	0	0	0	0	1	2
FSR (nm)	55	55	45	21	18	17

Seperti yang tampak dalam tabel 4.5, bahwa dengan menambahkan *crosstalk* yang semakin membesar pada jumlah *array* yang dipertahankan tetap, maka parameter FPR, orde difraksi (m) dan ΔL akan turut membesar. Jika pada kondisi tersebut, dimensi divais dipertahankan tetap maka beberapa *array* akan putus, karena tak tertampung pada ukuran divais yang ada. Jika terdapat *array* putus, maka ada kemungkinan berkurangnya jumlah kanal I/O yang bisa dilayani.

Hal ini juga diperkuat oleh ukuran FSR yang semakin menurun. Besarnya nilai *crosstalk* yang terlalu besar atau kecil kurang bagus untuk aplikasi AWG, karena bisa menyebabkan *array* dan kanal *input/output* putus. Hal ini dimungkinkan karena jumlah *array* dipertahankan tetap harusnya memiliki ΔL yang tetap. Jika ternyata ΔL berubah drastis (membesar/mengecil), maka akan berpotensi menyebabkan *array* putus. Banyaknya *array* putus akan mengurangi jumlah kanal I/O.

4.4.4 Pengaruh Spasi Kanal

Besarnya spasi kanal (Δf atau $\Delta \lambda$) jelas berpengaruh pada jumlah kanal *input/output* yang ada untuk ukuran *bandwidth* yang tetap. Hal ini dikarenakan ukuran lebar kanal berbanding terbalik dengan jumlah kanal. Jika spasi kanal bertambah lebar, maka banyaknya kanal akan semakin sedikit.

Tabel 4.6 Pengaruh spasikanal

Spasi Kanal	8	10	50	100	1200	2000
Panjang FPR (μm)	690,7	690,7	690,7	690,7	690,7	690,7
Orde difraksi	883	706	141	71	6	4
ΔL (μm)	511,79	409,20	81,72	41,15	3,47	2,31
Jumlah Array	64	64	64	64	64	64
Array putus	2	2	0	0	50	51
Input/Output putus	4	3	0	0	0	0
FSR (nm)	1,7	2,1	10,9	21	258	387

Untuk mengamati pengaruh lebar kanal terhadap parameter AWG pada *bandwidth* tetap (*C-Band*), dilakukan dengan mengganti spasi kanal dengan beberapa nilai yang berbeda dari percobaan sebelumnya (100 GHz). Dengan tetap mempertahankan jumlah kanal *input/output* 16 buah dan *crosstalk* kembali ke harga semula (-35 dB). Dan dampak perubahan spasi kanal yang nilainya bervariasi akan berpengaruh pada jumlah *array* dan parameter lainnya seperti pada tabel 4.6. Hasil pengujian seperti yang terlihat pada tabel 4.6 mengisyaratkan bahwa, spasi kanal yang semakin membesar, akan berdampak pada menurunnya jumlah kanal yang eksis.

Jika menghendaki jumlah kanal I/O tetap, maka ukuran spasi kanal yang diminta tidak boleh berubah terlalu drastis. Jika spasi kanal ditingkatkan terus, lebar *bandwidth* (16 x spasi kanal) juga akan bertambah besar. Sementara jika spektrumnya dibatasi, maka *bandwidth* yang terlalu besar tersebut juga akan mengalami pemangkasan sehingga akan menyebabkan *array* putus.

Hal ini ditunjukkan oleh ukuran spasi kanal 1200 GHz (*bandwidth* = 19,2 THz) tidak mampu ditampung oleh *C-Band* karena melebihi ukuran spektrumnya (≈ 4 THz).

Begitupun jika ukuran *bandwidth* terlalu kecil dibandingkan spektrum yang tersedia, maka nilai ΔL akan membesar dan berpotensi terputusnya *array*, yang berdampak pada berkurangnya jumlah kanal yang bisa dilayani. Nilai FSR yang didapat akan lebih besar seiring spasi kanal yang akan diperbesar pula, hal ini dipengaruhi dari jumlah kanal itu sendiri yang dimana nilai FSR tidak boleh lebih kecil dari spasi kanal dikalikan jumlah kanal yang ada.

4.4.5 Pengaruh *Non-uniformity*

Non-uniformity menggambarkan perbandingan antara kanal transmisi pusat dan kanal transmisi terluar, yang dinyatakan dalam dB. Untuk pengujian pengaruh besarnya *non-uniformity* terhadap parameter AWG, tetap digunakan jumlah kanal 16, *crosstalk* sebesar -35 dB, spasi kanal 100 GHz, dan ukuran devais $15000 \mu\text{m} \times 9000 \mu\text{m}$.

Dengan memvariasi beberapa nilai *non-uniformity* (0,1 dB, 0,2 dB, 0,5 dB, 1 dB, 3 dB, dan 5dB), pengaruhnya terhadap parameter AWG bisa dilihat pada Tabel 4.7. Setelah mengamati tabel tersebut, tampak bahwa semakin besar *non-uniformity* maka kemungkinan *array* putus semakin kecil, meskipun persyaratan ΔL juga turut membesar. Sebaliknya, semakin kecil nilai *non-uniformity* akan menyebabkan nilai ΔL mengecil, yang hanya bisa dipenuhi apabila jumlah *array* lebih banyak. Panjang FPR akan lebih mengecil juga karena terpengaruh dari besarnya ΔL yang membesar yang menyebabkan slab tidak dapat menampung jumlah *array* sehingga *array* akan mempunyai kecenderungan putus.

Secara teoritis, banyaknya *array* adalah empat kali jumlah kanal *input/output*. Jika jumlah *array* berlebih, maka akan berpotensi ada yang putus sehingga jumlah kanal I/O yang dapat dilayani bisa berkurang. Selain itu, *non-uniformity* akan membuat parameter FSR pun berubah.

Hasil dari *non-uniformity* dibatasi oleh ukuran dari *device* juga, karena yang membatasi kanal pusat dan kanal terluar sehingga jumlah

array yang dapat dihasilkan terbatas. Untuk hasil lengkapnya seperti pada tabel 4.7.

Tabel 4.7 Pengaruh *Non-uniformity*

<i>Non-uniformity</i>	0.1	0.2	0.5	1	3	5
Panjang FPR (μm)	1544,62	1092,21	690,77	488,45	282,00	218,44
Orde difraksi	32	45	71	100	173	223
ΔL (μm)	18,54	26,08	41,15	57,96	100,27	129,25
Jumlah Array	141	100	64	45	27	21
Array putus	84	35	0	0	0	0
Input/Output putus	14	5	0	0	0	0
FSR (nm)	48	34	21	15	8,9	6,8

4.5 Pembahasan Parameter AWG

Ada dua hal penting yang perlu dibahas secara khusus terkait dengan parameter AWG, yaitu perbedaan antara parameter hasil perhitungan teoritis dengan yang menggunakan *WDM_Phasar*. Selain itu juga perlu menganalisa secara khusus mengenai keberadaan kanal CWDM pada pita *C-band*.

4.5.1 Perhitungan Teoritis vs *WDM_Phasar*

Berbagai kondisi pengujian parameter AWG telah dilakukan pada sub bab 4.4 sebelumnya, masing-masing dengan memvariasi ukuran divais, jumlah kanal I/O, besarnya *crosstalk*, besarnya spasi kanal dan nilai *non-uniformity* yang diijinkan. Pengujian tersebut dilakukan dengan bantuan *WDM-tool (WDM_Phasar)* dan pembahasannya pun juga telah diberikan mengikuti masing-masing tabel hasil pengujiannya.

Di sisi lain, perhitungan parameter AWG secara teoritis juga telah dilakukan seperti yang dijelaskan dalam sub bab 4.2 dan 4.3. Dan perhitungan teoritis tersebut juga menggunakan parameter yang nyaris sama dengan parameter yang digunakan untuk *WDM_Phasar*.

Namun, hanya saja dalam perhitungan teoritis tidak memperhitungkan ukuran divais, kehadiran *crosstalk* maupun batasan nilai *non-uniformity*. Sedangkan untuk mengetahui perbedaan parameter

AWG hasil perhitungan teoritis dengan yang menggunakan *WDM_Phasar*, dilakukan pengujian khusus *WDM_Phasar* berbasis hasil perhitungan teoritis.

Berdasarkan hasil perhitungan teoritis, dengan menggunakan contoh spasi kanal 100 Ghz, diperoleh jumlah kanal I/O sebesar 27 kanal. Selanjutnya *WDM_Phasar* diatur untuk melayani 27 kanal I/O seperti dalam perhitungan teoritis. Adapun perbedaan besarnya parameter AWG antara hasil perhitungan teoritis dan menggunakan *WDM_Phasar* dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Perbedaan Hasil Perhitungan Teoritis dan *WDM_Phasar*

Parameter	Simbol (satuan)	Perhitungan Teoritis	WDM_Phasar
Spasi kanal	Δf (GHz)	100	100
Orde difraksi	m	43,7143	41
Selisih array	ΔL (μm)	25,1698	23,764
Panjang lintasan slab	L_f (μm)	1308,61	1197,347
Free Spectral Range	FSR (nm)	21,211	11,2
Jumlah kanal I/O	N_{max}	27	27 (16) *
Jumlah array	N_{array}	108	110 (56) **

Keterangan :

* dari 27 kanal I/O, hanya 16 yang eksis.

** dari 110 array yang mungkin, hanya 56 yang bisa digunakan

Terdapat perbedaan parameter AWG antara hasil perhitungan teoritis dan *WDM_Phasar*. Hal ini dimungkinkan karena ada sedikit perbedaan antara kondisi perhitungan teoritis dengan *WDM_Phasar*, dimana dalam perhitungan teoritis diasumsikan berada dalam kondisi ideal. Sementara kalkulasi *WDM_Phasar* menambahkan *crosstalk* (-35 dB), *non-uniformity* (0,5 dB) dan ukuran divais 15000 x 9000 μm^2 .

Dengan adanya faktor tambahan pada kalkulasi *WDM_Phasar*, besarnya orde difraksi (m), ΔL dan L_f menjadi berkurang. Jumlah array yang eksis juga bertambah sedikit, yang berdampak pada menurunnya jumlah kanal I/O yang bisa dilayani. Dan sudah dapat dipastikan besarnya FSR juga menjadi sempit.

4.5.2 CWDM pada *C-Band*

Implementasi CWDM pada *C-band* perlu dibahas secara khusus, karena CWDM memiliki spasi kanal yang besar (> 1000 GHz atau > 8 nm). Sementara spektrum *C-Band* (≈ 4 THz) tidak mungkin bisa menampung 16 kanal I/O (seperti percobaan lainnya). Dengan memilih spasi kanal CWDM 1200 GHz dan 2000 GHz, secara teoritis *C-Band* hanya mampu menampung maksimal 3 kanal dan 2 kanal sehingga tidak memungkinkan untuk menguji lebih dari 4 kanal sekaligus. Apabila menggunakan kanal lebih hasilnya dapat diimplementasikan untuk range besar namun tidak pada *C-Band*.

Untuk mengamati pengaruh spasi kanal CWDM pada parameter AWG yang beroperasi pada range *C-band*, secara khusus diuji menggunakan jumlah kanal I/O 2,3,dan 4. Sementara spasi kanal 1200 GHz dan 2000 GHz dipilih untuk mewakili CWDM. Dengan tetap menggunakan data awal yang sama dengan pengujian *WDM_Fasarr* sebelumnya (kecuali jumlah kanal I/O), untuk spasi kanal 1200 GHz dan 2000 GHz, diperoleh hasil parameter AWG seperti pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Pengaruh spasi kanal CWDM

Jumlah Kanal	2		3		4	
	1200	2000	1200	2000	1200	2000
Panjang FPR (μm)	46,05	46,05	92,10	92,10	138,15	138,15
ΔL (μm)	51,00	30,71	25,50	15,07	16,80	10,43
Jumlah Array	5	5	9	9	14	14
Orde difraksi (m)	88	53	44	26	29	18
Input/Output putus	0	0	0	2	1	2
Array putus	0	2	5	7	8	13
FSR (nm)	17	29	35	59	53	86

Seperti terlihat pada data di tabel 4.9, bahwa untuk jumlah kanal 4 dengan spasi kanal 1200 GHz ternyata terdapat 1 kanal putus, yang berarti hanya mampu melewatkan 3 buah kanal I/O.

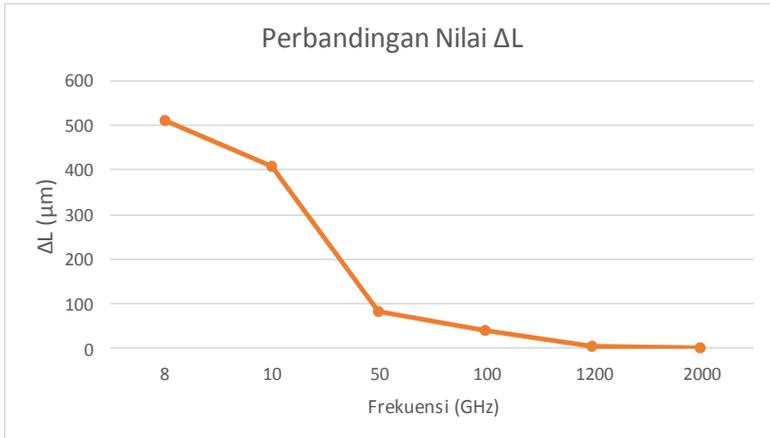
4.5.3 Perbandingan Kanal WDM

Untuk mendapatkan perbandingan kinerja kanal WDM yang mewakili VHDWDM, DWDM dan CWDM, dipilih dari hasil *WDM Phasar* dalam pengaruh spasi kanal pada tabel 4.6, dan didapatkan hasil beberapa grafik untuk perbandingan parameter AWG yang dianalisis yaitu perbandingan hasil orde difraksi, perbandingan nilai ΔL , analisa potensi *array* dan kanal I/O yang putus, dan nilai dari FSR, sehingga hasilnya sebagai berikut. Untuk gambar 4.2 yaitu perbandingan hasil orde difraksi.



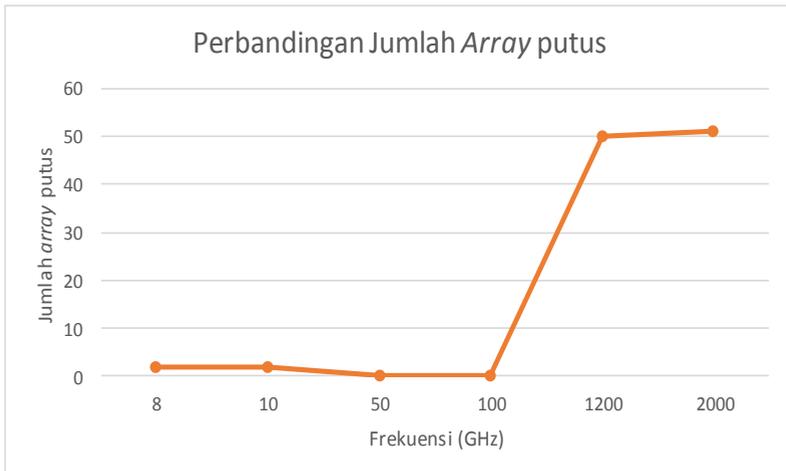
Gambar 4.2 Perbandingan Hasil Orde Diraksi WDM

Nilai orde difraksi mempengaruhi kelengkungan pada AWG, untuk perbandingan nilai orde difraksi pada WDM, semakin besar frekuensi spasi kanal yang diberikan, maka nilai dari orde difraksi yang dihasilkan akan semakin kecil. Sedangkan untuk pengaruh nilai ΔL sama seperti pada nilai orde difraksi, semakin besar frekuensi nya maka nilai selisih panjang kanal/*array* yang berdekatan akan menjadi lebih sempit (kecil) hal ini dikarenakan terbatasnya dari ukuran *device* yang menyebabkan terbatas pula nilai ΔL pada WDM. Hasil lengkapnya dapat dilihat pada gambar 4.3.



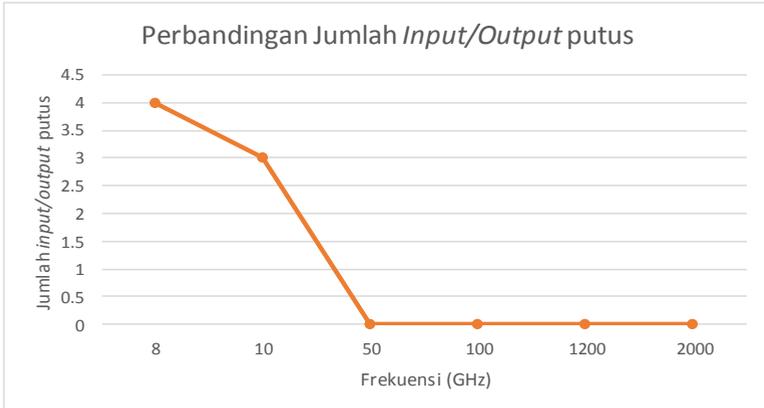
Gambar 4.3 Perbandingan Nilai ΔL WDM

Dari hasil perbandingan nilai ΔL pada gambar 4.3, karena nilai semakin kecil maka akan terjadi potensi putusnya nilai *array* yang ada dan tidak semua dapat ditransmisikan, hasil lengkapnya dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Perbandingan Jumlah *Array* Putus WDM

Dari hasil pada gambar 4.4 untuk perbandingan jumlah *array* putus, maka setelah itu ada potensi putus pada kanal seperti pada gambar 4.5 berikut:



Gambar 4.5 Perbandingan Jumlah *Input/Output* Putus WDM

Setelah itu perbandingan yang terakhir adalah nilai dari FSR, dimana akan bertambah besar sesuai dengan frekuensi yang diberikan, untuk grafiknya dapat diamati pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Perbandingan Nilai FSR WDM

Dari beberapa perbandingan yang ada, khusus untuk kanal CWDM seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, hanya mampu dioperasikan menggunakan 2 buah kanal I/O, jika menggunakan lebih dari 2 kanal yang dimana dicontohkan pada subbab 4.5.3 menggunakan jumlah kanal 16 maka akan menunjukkan hasil yang buruk, akan terjadi putusnya *array*, karena dari keterbatasan *bandwidth* yang dimiliki oleh kanal *C-Band*.

4.6 Perhitungan Performansi Kanal WDM

Seperti yang telah dijelaskan pada bab 2, ada beberapa metode pendekatan yang dapat dipakai untuk mengukur performansi kanal WDM, dalam hal ini terkait dengan kemampuan kanal dalam melewati data digital (*bit rate*). Tiga diantara metode tersebut adalah metode *Nyquist*, *rise time* dan *gaussian*, yang masing-masing ditunjukkan lewat persamaan 2.17, 2.18 dan 2.19.

Dengan mengambil contoh spasi kanal 100 GHz dan menggunakan pengkodean NRZ, maka banyaknya bit yang mampu disalurkan dalam waktu 1 detik menurut *Nyquist* sebesar :

$$\begin{aligned}R_b &= 2 \times BW \\ &= 2 \times 100 \text{ GHz} \\ &= 200 \text{ Gbps.}\end{aligned}$$

Metode *Nyquist* menggambarkan sebuah sistem dengan kondisi ideal. Jika memperhitungkan adanya pelebaran sinyal (*dispersi*) data sehingga hanya 70% waktu saja yang terbilang efektif, maka perhitungan menggunakan pendekatan *risetime* akan menghasilkan laju bit sebesar :

$$\begin{aligned}R_b &= 0,7 \times (R_b) \\ &= 0,7 \times 200 \text{ Gbps} \\ &= 140 \text{ Gbps.}\end{aligned}$$

Pendekatan yang lain, adalah dengan memperhitungkan *noise gaussian* yang mengikuti distribusi normal, dimana besarnya laju data yang bisa dilewatkan dalam kanal 100 GHz diperkirakan sebesar :

$$\begin{aligned}R_b &= 1,34 \times (BW_o) \\ &= 1,34 \times 100 \text{ GHz} \\ &= 134 \text{ Gbps.}\end{aligned}$$

Dengan mengambil kondisi terburuk dari ketiga cara pendekatan diatas, yaitu 134 Gbps, maka jika kemampuan tersebut disetarakan dengan *bit rate* terdekat versi ITU, maka kanal tersebut mampu membawa data sebesar \approx STM 1024.

Dengan menganalogi cara yang sama, maka untuk spasi kanal WDM yang lain, besarnya *bit rate* dan kemampuan membawa kanal SDH yang dibandingkan sesuai dengan *bit rate* yang telah dijelaskan diatas dapat dilihat dalam tabel 4.10.

Tabel 4.10 *Bit rate* Kanal WDM

Spasi Kanal (GHz)	<i>Bit rate</i> (Gbps)			<i>Bit rate</i> ITU
	Nyquist	Risetime	Gaussian	
8	16 Gbps	11,2 Gbps	10,72 Gbps	2 x STM 64
10	20 Gbps	14 Gbps	13,4 Gbps	2 x STM 64
50	100 Gbps	70 Gbps	67 Gbps	2 x STM 256
100	200 Gbps	140 Gbps	134 Gbps	STM 1024
1200	2,4 Tbps	1,68 Tbps	1,60 Tbps	10 x STM 1024
2000	4 Tbps	2,8 Tbps	2,68 Tbps	17 x STM 1024

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Naser Abd El, A. Mohammed, Rashed Ahmed Nabih Zaki and Fattah Abd El A. Saad “*Estimated optimization parameters of arrayed waveguide grating (AWG) for C-Band applications*”, International Journal of Physical Sciences Vol. 4 (4), pp. 1 49-1 55, April, 2009
- [2] Keiser Gerd, “*Optical Fiber Communication third edition*”, Mc Graw Hill International Edition, 2000.
- [3] Research Centre for Microtechnology “*Arrayed Waveguide Gratings: tiny structures for big ideas*, Application Note, FHV Research” DWDM 05, 2010.
- [4] Adam Ismahayati, Ibrahim Mohd Haniff, Kassimet Norazan Mohd AL, “*Design of Arrayed Waveguide Grating (AWG) for DWDM/CWDM Applications Based on BCB Polymer* VOL. 10, NO. 2,(Hal 18-21)Elektrika, 2008
- [5] Xaveer J. M. Leijtens, Berndt Kuhlow and Meint K. Smit, “*Arrayed Waveguide Gratings, Wavelength Filters in Fibre Optics*”, Springer Series in Optical Sciences, Volume 123. ISBN 978-3-540-31769-2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, hal. 125
- [6] Gudeny M and Piprek J, “*Material parameters of quaternary III–V semiconductors for multilayer mirrors at 1,55 μm wavelength*”, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 4 (349–357), Printed in the UK, 1996.
- [7] M. Linnik and A. Christou, “*Calculations of Optical Properties for Quaternary III-V Semiconductor Alloys in the Transparent Region and Above (0.2-4.0eV)*, Department of Materials and Nuclear Engineering and Materials Research Science and Engineering Center, University of Maryland.
- [8] International Telecommunication Union (ITU), Recommendation ITU-T G.694.1, “*Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*”, Approved in 2012-02.
- [9] International Telecommunication Union (ITU), Recommendation ITU-T G.694.2 “*Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*”, (12/2003)
- [10] International Telecommunication Union (ITU), Recommendation ITU-T G.671, “*Transmission characteristics of optical components and subsystems*”, (02/2012).

- [11] Andika Gilang, Mustafa Hendra Cahya, Hamzah Kamal, Kusuma Toha, “Teknologi WDM pada Serat Optik”: Departemen Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia”, 2006
- [12] Amersfoort Martin, “*Array Waveguide Grating*”, Application note A1998003, Concept to volume 1998
- [13] Abdullah Gaillan H. , Mhdi Bushra.R. , Nahla.A.AlJabar, “*Design Thin Film Narrow Band-pass Filters For Dense Wavelength Division Multiplexing*”, International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS) Vol. 1, No. 2, June 2012
- [14] Li Hongqiang , Zhou Wenqian, Yu Liu, and friend “*Preliminary Investigation of an SOI-based Arrayed Waveguide Grating Demodulation Integration Microsystem*”, Sci Rep. 2014; 4: 4848. Published online 2014 May 6

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari keseluruhan pembahasan Tugas Akhir tentang *arrayed waveguide grating* (AWG) dapat ditarik beberapa kesimpulan, antara lain yang terkait dengan parameter AWG, seperti orde difraksi (m), *free propagation range* (FPR), perbedaan panjang *array* (ΔL), jumlah *array* (N_{array}), jumlah kanal I/O (N_{max}) dan *free spectral range* (FSR), yaitu :

1. Agar AWG dapat bekerja pada λ tertentu, harus dipilih material yang memiliki *energy gap* tertentu juga.
2. *Bandwidth* kerja yang sempit menyebabkan orde difraksi (m) tinggi dan menghasilkan jalur *array* yang semakin melengkung.
3. Ukuran devais besar, memudahkan perencanaan parameter AWG sesuai yang diinginkan, tapi jelas kurang efisien.
4. Untuk melayani jumlah kanal banyak, diperlukan FPR dan FSR besar, jumlah *array* banyak, sebaliknya orde difraksi dan ΔL akan turun.
5. Spasi kanal besar membutuhkan ketersediaan FSR yang lebar, sementara orde (m) dan ΔL akan turun, juga ada potensi *array* putus.
6. Gangguan *crossstalk* besar bisa yang menyebabkan orde difraksi, FPR dan ΔL naik, sedangkan FSR akan kecil, serta ada potensi *array* putus.
7. Nilai *nonuniformity* yang tinggi, memerlukan orde difraksi dan ΔL besar. Jika ukuran devais dibuat tetap, maka hanya bisa menampung *array* dan kanal I/O sedikit. Akibatnya nilai FSR dan FPR juga kecil.
8. Untuk spasi kanal 100 GHz, lewat perhitungan teoritis memberikan hasil 1308,61 μm (FSR), 25,1698 μm (ΔL), 43,7143(m), 108 (N_{array}), 27(N_{max}) dan 21,211(FSR).
9. Untuk spasi kanal 100 GHz, lewat *WDM_Phasar* dengan batasan ukuran devais (15000x9000 μm^2), *crossstalk* (-35 dB) dan *nonuniformity* (0,5), menghasilkan parameter AWG 1197,347 μm (FSR), 23,764 μm (ΔL), 41(m), 56 (N_{array}), 16(N_{max}) dan 11,2 nm (FSR).
10. Semakin besar spasi kanal, jumlah bit yang bisa diangkut juga semakin banyak. Pada *bit rate* tinggi, tidak bisa menggunakan seluruh *bandwidth* kanal, karena untuk mengantisipasi terjadinya dispersi.

5.2 Saran

Tugas Akhir ini hanya membahas sistem AWG dengan jumlah kanal *input* dan *output* yang sama, sehingga hanya bisa difungsikan sebagai *router* dalam jaringan optik. Untuk penelitian selanjutnya, hendaknya dilakukan dengan memvariasi jumlah kanal *input* dan *output* sehingga bisa menghasilkan devais AWG yang dapat difungsikan sebagai multiplekser (kanal I > kanal O) dan demultiplekser (kanal I < kanal O).

LAMPIRAN A

PROPOSAL TUGAS AKHIR

Jurusan Teknik Elektro – FTI
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

TE 141599 TUGAS AKHIR – 4 SKS

Nama Mahasiswa : Frezza Oktaviana Hariyadi
Nomor Pokok : 2213105014
Bidang Studi : Telekomunikasi Multimedia
Tugas Diberikan : Semester Genap 2014/ 2015
Dosen Pembimbing : I. Sri Rahayu S.T., M.Kom
Judul Tugas Akhir : **Perencanaan Arrayed Waveguide Grating (AWG) untuk Wavelength Division Multiplexing (WDM) pada C-Band (Planning arrayed waveguide gratings (AWG) for Wavelength Division Multiplexing (WDM) at C – Band)**

13 FEB 2015

Uraian Singkat

Sistem komunikasi serat optik (SKSO) membuka peluang terwujudnya transmisi data berkecepatan tinggi dan berkapasitas besar, lewat mode transmisi *single mode*(SM) maupun *multimode* (MM). Penggunaan kanal *C-band* (1530 nm – 1565 nm) pada *window-3* bersifat *low lost* dan *low attenuation*, banyak diminati untuk transportasi *backbone* maupun jaringan akses, sehingga harus dikelola secara efisien.

Teknologi *Arrayed Waveguide Grating (AWG)*, salah satu solusi membagi kanal menjadi sub-sub kanal yang lebih kecil dengan prinsip difraksi. Teknik AWG bisa menghasilkan transmisi koheren, yang cocok untuk komponen *wavelength division multiplexing* (WDM), baik sebagai *multiplexer*, *demultiplexer*, *filter*, *add-drop device* dan sebagainya.

Dalam tugas akhir ini akan dibuat perencanaan desain AWG yang beroperasi pada kanal C-band, untuk mendukung kebutuhan WDM, baik *coarse-WDM* (CWDM), *dense-WDM* (CWDM) maupun *very high density-WDM* (VHDWDM). Lingkup perencanaan meliputi penentuan *band gap energy* semikonduktor dan perhitungan parameter AWG. Untuk performansi desain, akan dilakukan evaluasi pada *bandwidth* optikal dan kapasitas sistem.

Kata Kunci : AWG, WDM, C-Band, DWDM, CWDM, VHDWM

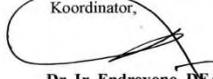
Dosen Pembimbing


Sri Rahayu S.T., M.Kom
NIP. 19680228 199702 2 001


Mengetahui,
Jurusan Teknik Elektro FTI – ITS
Ketua,

Dr. Tri Arief Sardiono, ST., MT.
NIP. 197002121995121001

Menyetujui,
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia
Koordinator,


Dr. Ir. Endrovo, DEA
NIP. 196504041991021001

A. JUDUL

Perencanaan *Arrayed Waveguide Grating* (AWG) untuk *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) pada *C-Band*

B. RUANG LINGKUP

1. Sistem Komunikasi Optik
2. Teknik Splitting Cahaya
3. Teknologi Material Semikonduktor
4. Sistem Transmisi Data

C. LATAR BELAKANG

Spektrum operasional optik dapat diklasifikasikan dalam 3 bagian yaitu *window-1* (800-900 nm), *window-2* (1270-1350 nm) dan *window-3* (1480-1600 nm), yang masing masing berpusat di 850 nm 1310 nm dan 1550 nm [4]. *Window - 1* perlahan sudah mulai ditinggalkan karena redamannya yang cukup besar, sehingga *window 2* dan *window 3* yang banyak digunakan sebagai *range* operasional *optical* dan oleh ITU-T lewat Rec G957 membagi 2 *window* tersebut menjadi 6 *band* yaitu band O,E,S,C,L,dan U.

Dari 6 *band* yang ada, *C-band* lah yang banyak digunakan. Band ini menempati spektrum 1530-1565 nm gelombang antara setara dengan bandwidth sekitar 4000 Ghz. Kelebihan lain *Band* ini terletak di *window 3* yang lebih menguntungkan dibandingkan *window 2*. Hampir semua provider berebut di band ini karena punya kelebihan atenuasi rendah, dan range lebih besar selain itu juga tersedia amplifier yang dibuat pabrikan. *C-Band* banyak diimplementasikan untuk sistem komunikasi optik jarak jauh maupun sebagai jaringan akses.

Mengingat spectrum *C-band* terbatas, sementara pengguna nya banyak maka band tersebut harus dipecah menjadi kanal – kanal yang lebih kecil lewat sistem WDM. Berdasarkan besarnya spasi kanal WDM dapat diklasifikasikan menjadi DWDM ($\leq 1000\text{Ghz}$), CWDM ($>1000\text{Ghz}$) dan VHDWDM ($<10\text{Ghz}$) [3].

Tugas akhir ini akan membahas bagaimana membagi kanal *C-band* menjadi kanal-kanal yang lebih kecil dengan menggunakan teknik AWG dalam lingkungan WDM. Dengan membagi kanal menjadi lebih banyak diharapkan akan terbentuk sub-sub kanal optik dengan spasi yang lebih kecil, dengan standar CWDM, DWDM maupun VHDWDM.

D. PERUMUSAN MASALAH

Untuk mencapai target Tugas Akhir, beberapa permasalahan yang harus diselesaikan :

1. Bagaimana memilih material semikonduktor optikal yang bisa bekerja pada *C-band*.
2. Bagaimana menentukan parameter AWG untuk kanal WDM yang diinginkan.
3. Bagaimana mengevaluasi kinerja desain sistem yang dibuat.
4. Bagaimana menghitung potensi sistem dalam menunjang penggunaan spektrum optik.

E. BATASAN MASALAH

Agar pembahasan lebih fokus maka lingkup tugas akhir dibatasi antara lain:

1. Material optik yang digunakan dari semikonduktor kombinasi Gol.III dan Gol.V (Tabel periodik unsur Berkala).
2. Spasi kanal DWDM yang dikaji 100 GHz dan 500 GHz.
3. Spasi kanal CWDM yang dikaji 1200 GHz dan 2000 GHz
4. Spasi kanal VHDWDM yang dikaji 10 GHz dan 5 GHz
5. Performansi AWG yang diamati besarnya bandwidth efektif dan kapasitas sistem

F. TUJUAN TUGAS AKHIR

Adapun tujuan dari Tugas Akhir ini adalah :

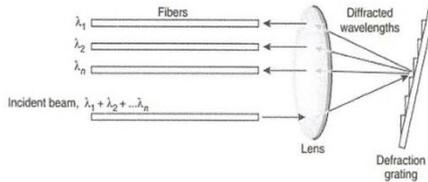
1. Mendesain sistem AWG untuk WDM.
2. Membandingkan teknik AWG pada DWDM, CWDM, dan VHDWDM
3. Menganalisa kemampuan sistem AWG dalam menunjang transmisi data.
4. Menganalisa performansi (utilitas) sistem optikal.

Desain sistem AWG yang dibahas dalam tugas akhir ini dapat diimplementasikan dalam komunikasi optik baik sebagai *multiplexer*, *demultiplexer*, *filter*, *add-drop device* dan sebagainya. Dengan memilih parameter yang tepat, diharapkan akan diperoleh rancangan devais yang efisien

G. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

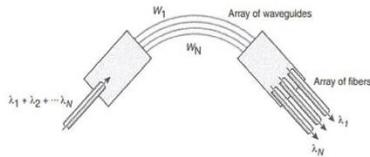
Untuk menyediakan *carrier* optik dalam jumlah banyak diperlukan sumber optik (LED atau Laser) sebanyak lintasan cahaya yang diinginkan. Jika cahaya tersebut berasal dari sumber yang berbeda-beda bisa terjadi inkohereni satu sama lain, sehingga menjadi kendala saat hendak dilakukan multipleksing maupun demultipleksing. Oleh karenanya, untuk mendapatkan *carrier* cahaya banyak dan koheren, yang biasa dilakukan adalah dengan men-*split* sebuah cahaya tunggal menjadi beberapa berkas cahaya yang berbeda sehingga akan mendapatkan hasil yang lebih baik [3][5].

Salah satu metode untuk men-*split* cahaya menjadi beberapa ataupun mengkopelnya kembali, dapat didasarkan pada prinsip-prinsip difraksi dan interferensi optikal. Ketika sebuah sumber cahaya mengenai bidang difraksi *grating* (bertekstur parutan), setiap panjang gelombang (λ) akan dibelokkan pada sudut yang berbeda, menuju titik yang berbeda dalam ruang. Selanjutnya dengan menggunakan sebuah lensa, gelombang-gelombang tersebut dapat difokuskan ke dalam fiber optik secara individual [8].



Gambar 1. Prinsip Difraksi “Waveguide Grating”

Arrayed waveguide Grating (AWG) juga didasarkan pada prinsip-prinsip difraksi. Sebuah divais AWG yang terdiri dari deretan kanal lengkung (*curved-channel waveguide*) dengan perbedaan panjang lintasan yang tetapanantar kanal bersebelahan [2][4][8]. *Waveguide* tersebut dihubungkan dengan dua buah *cavity/slab coupler* pada ujung input dan outputnya. Ketika cahaya masuk dalam *cavity* pertama, cahaya akan dibelokkan dan masuk ke *waveguide array*. Karena terdapat perbedaan panjang gelombang pd masing-masing *waveguide*, menyebabkan terjadi penundaan fase (*phase delay*) dalam *cavity* kedua [8]. *Slab/cavity* sebenarnya merupakan *free propagation region* (FPR), yang dihubungkan oleh *waveguide* berjajar yang bersifat dispersif dengan perbedaan panjang jalur yang sama (ΔL) terhadap *waveguide* bersebelahan [2].



Gambar 2. *Arrayed Waveguide Grating* (AWG)

Jika sinyal WDM (CWDM,DWDM,VHDWDM) dilewatkan ke dalam input *waveguide* (AWG) akan didifraksi terlebih dahulu oleh *slap* pertama. Selanjutnya dikopel ke dalam salah satu *waveguide berjarak* yang didesain memiliki perbedaan panjang lintasan sebesar ΔL dengan jalur *waveguide* di sebelahnya. Sebagai konsekuensi dari adanya distribusi pada *aperture* sinyal WDM pada *slab* pertama, maka akan berdampak pada *aperture* di *slab* kedua. Itulah sebabnya untuk panjang gelombang pusat (λ_c), cahaya akan berfokus pada tengah-tengah bidang medannya [5].

Sebaliknya jika panjang gelombang input diblokkan dari (λ_c), akan terjadi perubahan *phase* pada percabangan *waveguide*. Karena panjang lintasan berbeda antara *waveguide* yang bersebelahan, besarnya perubahan *phase* akan meningkat secara linier dari *waveguide* bagian dalam ke *waveguide* yang lebih luar. Akibatnya titik fokus pada gelombang yang tergeser *phase*-nya juga tergeser menjauh dari λ_c [5]. Dengan menempatkan *waveguide* penerima dalam posisi yang tepat sepanjang bidang difraksi yang sesuai, pemisahan spasial panjang gelombang kanal yang berbeda dapat dicapai.

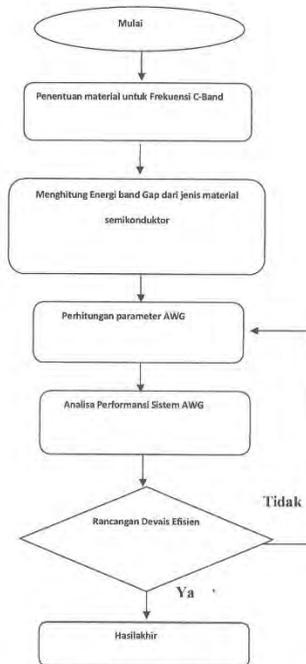
Dalam Tugas akhir ini akan dikaji, perencanaan AWG yang dapat digunakan untuk memisahkan gelombang menjadi spasi gelombang yang lebih kecil yang dapat diaplikasikan untuk sistem CWDM, DWDM dan VHDWDM.

H. METODOLOGI

Metodologi pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi literature
Mencari referensi yang berkaitan dengan *arrayed waveguide gratings*, dan beberapa bahan material yang berkaitan dengan jenis bahan optik yang bekerja pada *C-Band*. Literatur yang digunakan meliputi buku referensi, jurnal dan dokumen internet.
2. Perhitungan material semikonduktor
Memilih material semikonduktor yang dapat beroperasi pada *C-Band*, dengan menghitung energy band gap serta panjang gelombang operasional
3. Perhitungan parameter AWG
Memilih parameter komunikasi optik yang diinginkan dan menghitung parameter parameter AWG yang diperlukan.
4. Analisa performansi sistem
Menghitung besarnya potensial bandwidth dan kapasitas sistem
5. Kesimpulan.
Penarikan kesimpulan dari kinerja sistem yang selanjutnya dapat ditarik sebuah kesimpulan.

I. Flow Chart



Gambar 3. Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir

J. JADWAL KEGIATAN

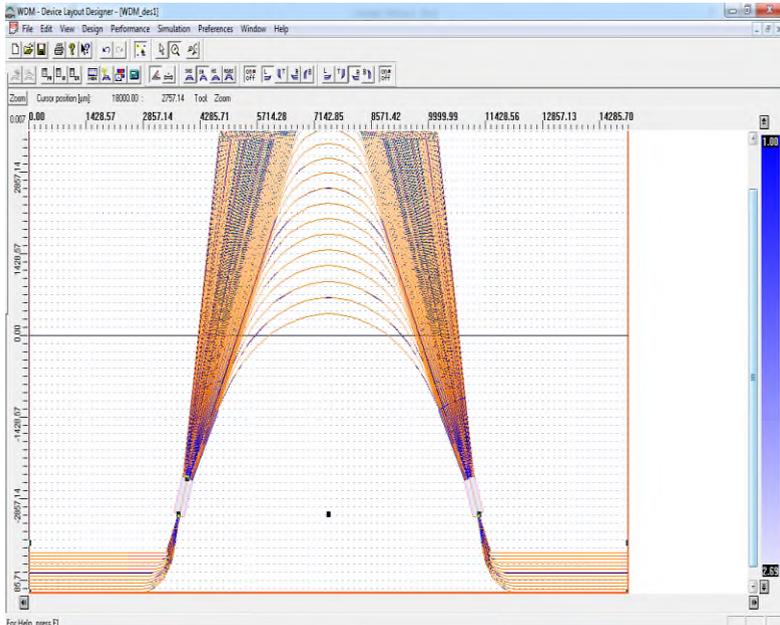
Kegiatan	Minggu Ke-															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Studi literatur	■	■	■													
Pencarian data bahan untuk frekuensi C-Band				■	■	■										
Perhitungan <i>energy Band-Gap</i> semikonduktor							■	■	■							
Perhitungan AWG dan analisa performansinya										■	■					
Analisis Data Akhir												■	■	■	■	■
Penyusunan laporan				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

K. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hiroshi Takahashi, Kazuhiro Oda, Hiroma Toba, Yasuyuki Inoue, “ *Transmission Characteristics of Arrayed Waveguide $N \times N$ Wavelength Multiplexer* “, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.13, March 1995.
- [2] Ismahayati Adam, Mohd Haniff Ibrahim, Norazan Mohd Kassimet AL, “*Design of Arrayed Waveguide Grating (AWG) for DWDM/CWDM Applications Based on BCB Polymer*”VOL. 10, NO. 2,(Hal 18-21)Elektrika, 2008.
- [3] Research Centre for Microtechnology “*Arrayed Waveguide Gratings: tiny structures for big ideas*, Application Note, FHV Research” DWDM 05, 2010.
- [4] Gerd Keiser, “*Optical Fiber Communication*”, Mc Graw Hill International Edition, 2000.
- [5] Martin Amersfoort, “*Array Waveguide Grating*”, Application note A1998003, Concept to volume 1998.
- [6] M Gudeney and J Piprek, “*Material parameters of quaternary III-V semiconductors for multilayer mirrors at 1,55 μm wavelength*” , Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 4 (349–357), Printed in the UK, 1996.
- [7] M. Linnik and A. Christou, “*Calculations of Optical Properties for Quaternary III-V Semiconductor Alloys in the Transparent Region and Above (0.2-4.0eV)*”, Department of Materials and Nuclear Engineering and Materials Research Science and Engineering Center, University of Maryland.
- [8] Cisco, “*Introduction to DWDM Technology*”, 2000.
- [9] International Telecommunication Union (ITU), Recommendation ITU-T G.694.1, “*Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*”, Approved in 2012-02.
- [10] International Telecommunication Union (ITU), Recommendation ITU-T G.671, “*Transmission characteristics of optical components and subsystems*”, (02/2012).

LAMPIRAN B HASIL PERENCANAAN AWG

1. Hasil Perencanaan DWDM 10 GHz (16x16)

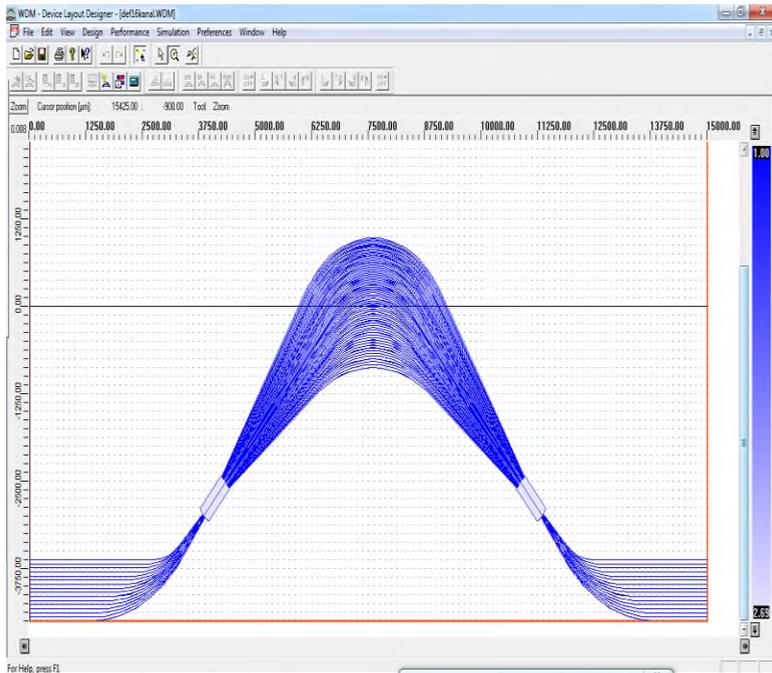


Gambar B1 Hasil Perencanaan DWDM 10GHz (16x16)

Tabel 1 Parameter DWDM 10GHz (16x16)

Parameter	Nilai (satuan)
Jumlah kanal	16 kanal
Jumlah array	64 Array
Spasi kanal	10 GHz
Non-uniformity	0,5dB
Crosstalk	-35dB
Ukuran device	15000 x 9000 μm

2. Hasil Perencanaan DWDM 100 GHz (16x16)

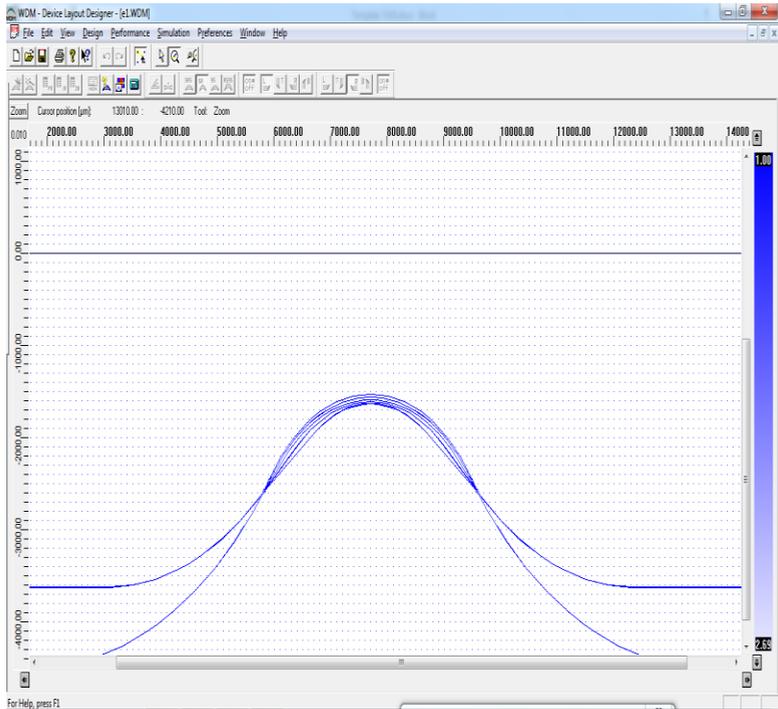


Gambar B2 Hasil Perencanaan DWDM 100GHz (16x16)

Tabel 2 Parameter DWDM 100 GHz (16x16)

Parameter	Nilai (satuan)
Jumlah kanal	16 kanal
Jumlah array	64 Array
Spasi kanal	100 GHz
Non-uniformity	0,5dB
Crosstalk	-35dB
Ukuran device	15000 x 9000 µm

3. Hasil Perencanaan CWDM 1200 GHz (2x2)



Gambar B3 Hasil Perencanaan CWDM 1200 GHz (2x2)

Tabel 3 Parameter Perencanaan CWDM 1200 GHz (2x2)

Parameter	Nilai (satuan)
Jumlah kanal	2 kanal
Jumlah array	5 Array
Spasi kanal	1200 GHz
Non-uniformity	0,5dB
Crosstalk	-35dB
Ukuran device	15000 x 9000 μm

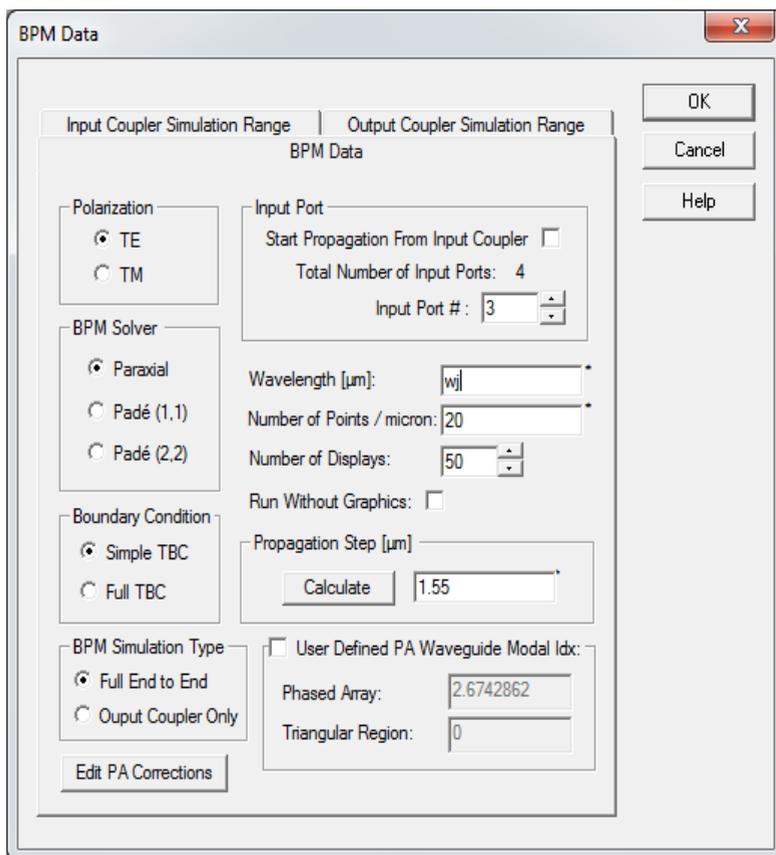
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN C

LANGKAH-LANGKAH SIMULASI

1. Melakukan Inisialisasi Input

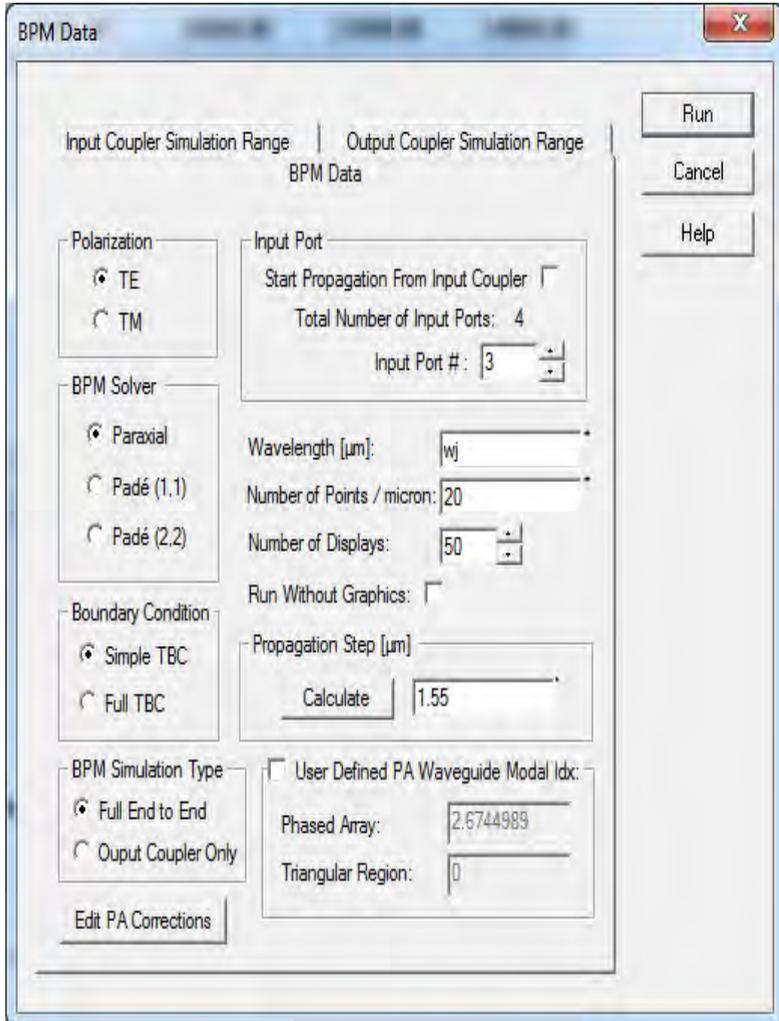
Pada input BPM data, disini menentukan panjang gelombang dan polarisasi untuk simulasi outputnya mulai dari *input* hingga *output* selain itu perlunya range panjang gelombang yang diberikan untuk pengamatan gelombang yang ditransmisikan. Setelah ini tekan 'OK'



Gambar C1 Tampilan Inisialisasi Input

4. Menjalankan *Running Program*

Langkah terakhir yaitu menjalankan program pada BPM data untuk melihat hasil simulasi, untuk menjalankan tekan 'Run'.

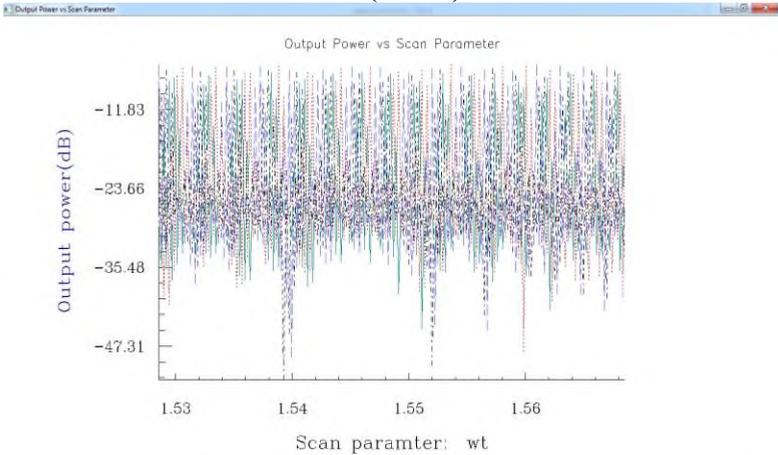


Gambar C4 Tampilan untuk *Running Program*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

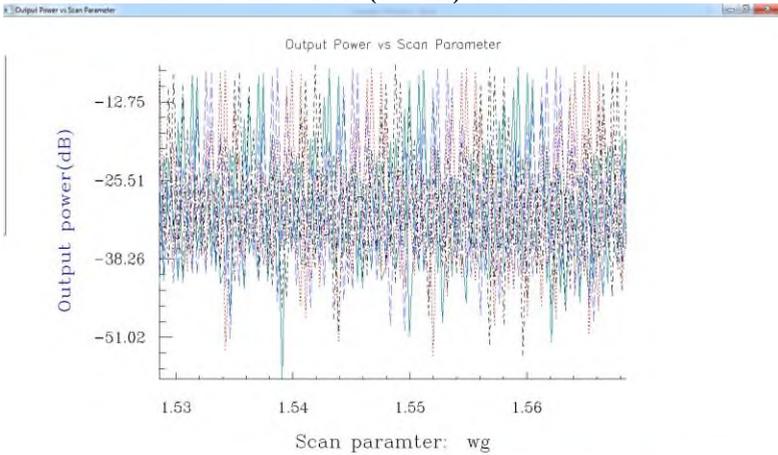
LAMPIRAN D HASIL SIMULASI

1. Hasil Simulasi VHDWDM (10GHz) 4 kanal



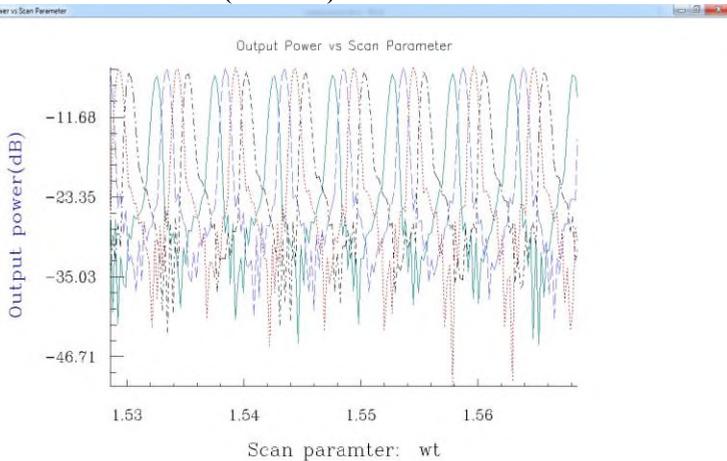
Gambar D1 Hasil Simulasi VHDWDM (10GHz) 4 Kanal

2. Hasil Simulasi VHDWDM (10GHz) 16 Kanal



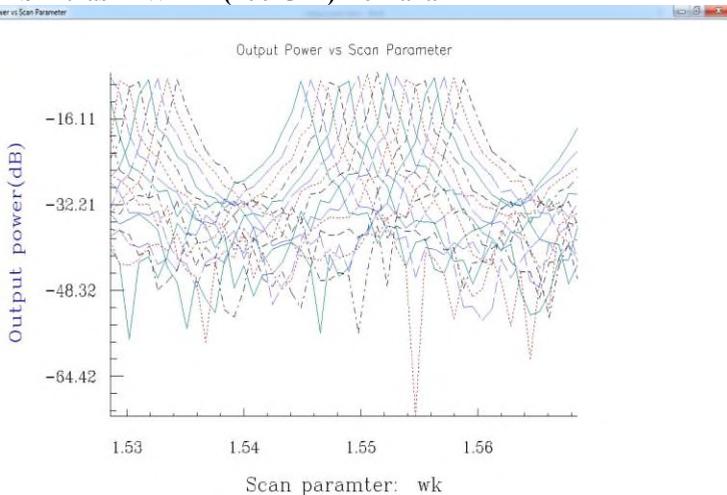
Gambar D2 Hasil Simulasi VHDWDM (10GHz) 16 Kanal

3. Hasil Simulasi DWDM (100 GHz) 4 Kanal



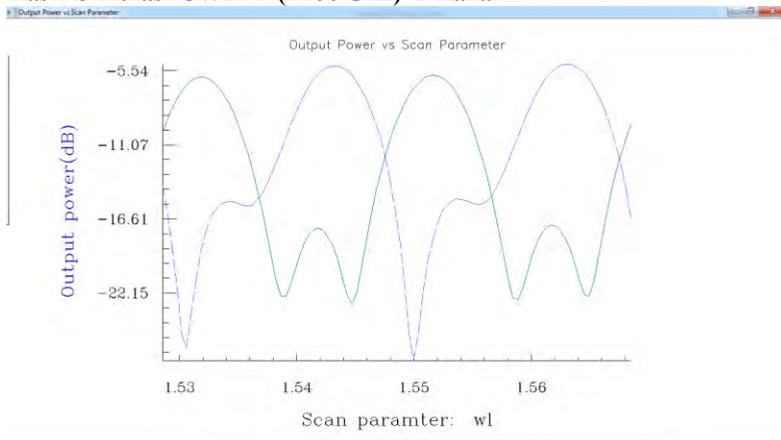
Gambar D3 Hasil Simulasi DWDM (100 GHz) 4 Kanal

4. Hasil Simulasi DWDM (100 GHz) 16 Kanal



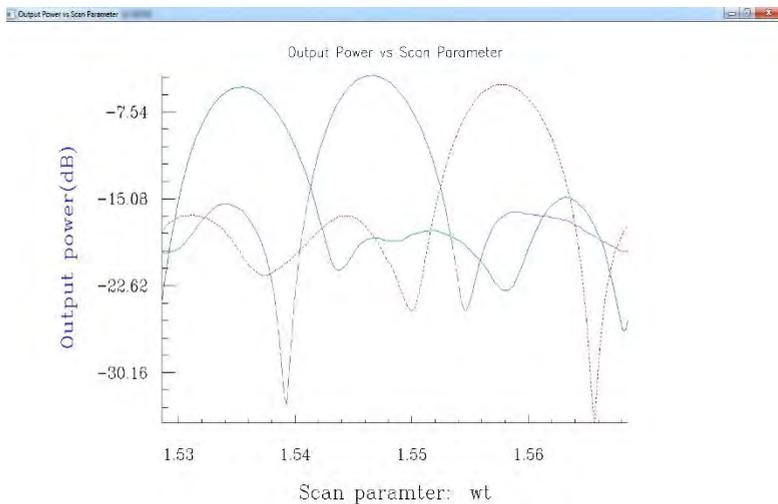
Gambar D4 Hasil Simulasi DWDM (100GHz) 16 Kanal

5. Hasil Simulasi CWDM (1200 GHz) 2 Kanal



Gambar D5 Hasil Simulasi CWDM (1200 GHz) 2 Kanal

6. Hasil Simulasi CWDM (1200GHz) 3 Kanal



Gambar D6 Hasil Simulasi CWDM (1200 GHz) 3 Kanal

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN E

LISTING PROGRAM MATLAB

1. Menghitung parameter AWG

```
clear all;
clc;
A1=input('masukan nilai panjang gelombang 1
(dalam nanometer) =');
A2=input('masukan nilai panjang gelombang 2
(dalam nanometer) =');
A0=1550e-9; %nilai panjang gelombang tengah 1550
nm
ns=input('masukan nilai indeks slab =');
nc=input('masukan nilai indeks AWG =');
d=input('masukan nilai jarak celah (dalam
mikrometer) =');
ng=input('masukan nilai indeks grup =');
deltaA=input('masukan nilai spasi kanal panjang
gelombang (dalam nanometer) =');
A1=A1*1e-9;
A2=A2*1e-9;
d=d*1e-6;
deltaA=deltaA*1e-9;
m=A1/(A2-A1);
deltaL=((m*A0)/nc)*1e6;
Lf=((ns*d^2*nc)/(m*deltaA*ng))*1e6;
fsr=((A0*nc)/(m*ng));
Nmax=round(fsr/deltaA);
Narray=round(4*Nmax);
disp ('hasil nilai orde=');
disp (m);
disp ('hasil nilai deltaL (dalam mikrometer)=');
disp (deltaL);
disp ('hasil nilai focal slab (dalam
mikrometer)=');
disp (Lf);
```

```

disp ('hasil nilai fsr (dalam meter)=');
disp (fsr);
disp ('hasil nilai jumlah kanal=');
disp (Nmax);
disp ('hasil nilai jumlah array=');
disp (Narray);

```

2. Menghitung nilai NA, V Number dan jumlah Mode

```

%program menghitung NA, V number, Mode

clc;
clear all;
d = input('diameter core dalam mikrometer=');
n1 = input('masukkan index core =');
n2 = input('masukkan index cladding =');
lamda = input('masukkan panjang gelombang kerja
dalam nanometer =');
delta = (n1-n2)/n1;
NA = ((n1^2)-(n2^2))^(1/2);
disp('nilai NA adalah = ');
disp(NA);
theta = asind(NA);
d = d*1000;% konversi diameter mikrometer ke
nanometer
Vnumber = 2*pi*d*NA/lamda;
disp('V number = ');
disp(Vnumber);
M=round(Vnumber^2)/2;
disp('M = ');
disp(M);
if Vnumber <=2.405
    disp('fiber single mode ');
else
    disp('fiber multimode ');
end

```

BIOGRAFI PENULIS



Frezza Oktaviana Hariyadi lahir di Kota Cirebon pada tanggal 6 Oktober 1991. Penulis mengenyam pendidikan dasar di Cirebon, SMPN 1 Cirebon dan SMA Negeri 1 Cirebon melanjutkan pendidikan diploma 3 di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, setelah itu bekerja di Indosat Cirebon sebagai BSS Engineer lalu melanjutkan S1 Lintas Jalur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Penulis mengambil jurusan teknik elektro dan fokus pada bidang studi telekomunikasi multimedia. Penulis pernah mengikuti beberapa sertifikasi training IT dan telekomunikasi seperti *Comba Transmision Microwave, Alcatel Lucent Microwave Packet Radio 9500, Microsoft Innovation Center MSDNAA, Google Web Academy Education and Online Basic Certification, Huawei Certified Datacomm Associated*. Pengalaman akademik dan aktivitas laboratorium sebagai asisten praktikum komunikasi data laboratorium Jaringan Telekomunikasi B.403 juga turut berkontribusi dalam mengembangkan kemampuan penulis selama berada di ITS.