

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

Frezza Oktaviana Hariyadi, Sri Rahayu

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

frezza.oktaviana@gmail.com, yayuk@ee.its.ac.id

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 Makalah 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*

I. PENDAHULUAN

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 [1]. *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, yang setara dengan *bandwidth* sekitar 4000 Ghz (4 THz). 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 penggunaannya banyak, maka *band* tersebut harus digunakan seefisien mungkin, dengan membaginya menjadi kanal-kanal lebih kecil lewat sistem *wavelength division multiplexing (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)*. [2]

Makalah ini membahas penggunaan *arrayed waveguide grating (AWG)*, sebagai salah satu cara membagi *bandwidth* besar (kanal *C-Band*) menjadi kanal-kanal yang lebih kecil dalam lingkup WDM, baik DWDM (50 GHz dan 100 GHz), CWDM (1200 GHz dan 2000 GHz), bahkan VHDWDM (8 GHz dan 10 GHz).

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pengertian WDM

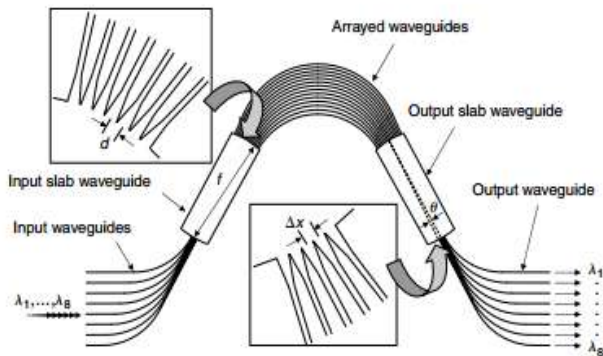
Wavelength Division Multiplexing (WDM) adalah teknik penggabungan beberapa sinyal dengan panjang gelombang berbeda-beda. Teknologi WDM pada dasarnya adalah teknologi *transport*, untuk menyalurkan berbagai jenis trafik (data, suara, dan video) secara transparan, dengan menggunakan panjang gelombang yang berbeda-beda dalam suatu fiber tunggal secara bersamaan. Di bagian ujung terima divais *demultiplexing* harus digunakan, untuk memisah kembali kanal *multiplexing* menjadi seperti semula. Teknologi WDM banyak digunakan pada jaringan *bandwidth* yang lebar, sehingga dapat diterapkan pada

jaringan *metropolitan area network* (MAN) dimana diterapkan untuk menunjang transmisi data kecepatan tinggi.

B. Arrayed Waveguide Grating (AWG)

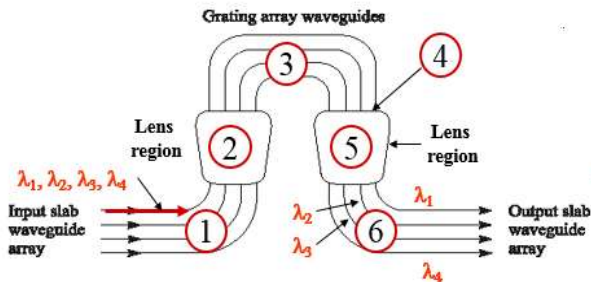
Arrayed Waveguide Grating (AWG) terkadang disebut juga *phased array* (PHASAR), adalah sistem multiplekser dan demultiplekser pada sistem WDM.

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.



Gambar 1. Komponen Dasar AWG

Gambar 1 memperlihatkan bagian-bagian penting dari sistem AWG, yang terdiri dari sekelompok kanal input, 2 buah *slab* (*slab* pertama dan *slab* kedua), beberapa kanal output.



Gambar 2. Prinsip Kerja AWG

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.

C. Parameter AWG

Beberapa parameter AWG yang dipilih dan dijadikan dasar untuk menghitung parameter lainnya, diantaranya yaitu:

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*.

D. Parameter yang diperhitungkan

Setelah mengetahui prinsip kerja dari AWG, maka yang harus diperhatikan selanjutnya yaitu parameter dalam perhitungan AWG dan desain yang dibutuhkan seperti *orde difraksi*, perbedaan panjang *array*, panjang fokal *slab*, *Free Spectral Range* (FSR), jumlah maksimum kanal *input/output waveguide*, dan jumlah maksimum dari *arrayed waveguide*.

1. Orde Difraksi

Orde difraksi (m) dipengaruhi oleh rentang frekuensi atau panjang gelombang dimana AWG diharapkan dapat bekerja. Misalnya, diharapkan 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 :

$$\text{Orde Difraksi (m)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \tag{1}$$

Dimana :

- m : orde difraksi
- λ_1 : batas bawah rentang pita (nm)
- λ_2 : batas atas rentang pita (nm)

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. Nilai ΔL akan menentukan beberapa jumlah kanal I/O maupun *array* yang dapat dilewati pada AWG.

$$\Delta L = \frac{m \lambda_0}{n_c} \tag{2}$$

Dimana :

- λ_0 : panjang gelombang tengah (nm)
- n_c : indeks refraksi material *array*

3. Panjang *Fokal 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* menjaral secara divergen menuju *output slab* kedua yang berhubungan dengan kanal *output*.

$$L_f = \frac{n_s d^2 n_c}{m \Delta \lambda n_g} \tag{3}$$

Dimana :

- n_s : indeks refraksi *slab*
- d : lebar celah (kisi-kisi) pada *input/output slab* (μm)
- n_g : indek refraksi grup *array*
- $\Delta \lambda$: spasi kanal yang diinginkan hasil dari proses *splitting*.

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).

$$FSR = \frac{\lambda_0 n_c}{m n_g} \tag{4}$$

5. Jumlah Maksimum dari *Input/Output* Kanal

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa nilai FSR harus lebih besar dari jumlah akulatif 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 ($\Delta \lambda$).

$$N_{max} = \text{integer} \left(\frac{FSR}{\Delta \lambda} \right) \tag{5}$$

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 :

$$N_{array} = 4N_{max} = 4 \text{ integer} \left(\frac{FSR}{\Delta \lambda} \right) \tag{6}$$

E. *AWG Tool (WDM_Phasar)*

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.

Untuk mendapatkan hasil perencanaan sistem AWG yang lebih realistis, dalam Makalah 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.

F. Perhitungan Performansi Sistem

Setelah mendapatkan ukuran spasi kanal, selanjutnya dianalisa kemampuan kanal tersebut dalam melewati data digital (*bit rate*). Untuk keperluan ini, dipilih jenis pengkodean *non return zero* (NRZ) dan metode perhitungan *bit rate* menggunakan pendekatan model distribusi *gaussian*.

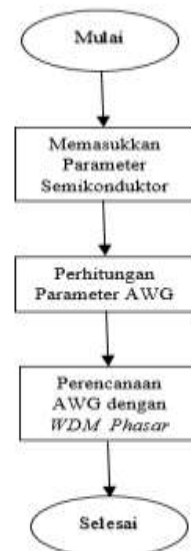
Besarnya nilai *bitrate* (bps) berdasarkan teori *gaussian* dapat dihitung menggunakan rumus :

$$B_t = 1,34 \times (BW_o) \tag{7}$$

Dimana BW_o adalah bandwidth kanal (GHz).

III. PERANCANGAN SISTEM AWG

Pada bagian ini akan dibahas perencanaan sistem AWG, yang terdiri dari pemilihan parameter desain, perhitungan teoritis, perencanaan dengan *WDM_Phasar* dan analisa performansi, seperti yang terlihat dalam gambar 3.



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

Gambar 3. Alur Perencanaan Sistem AWG

Tabel 1
Parameter AWG yang ditentukan

Parameter	Simbol	Nilai
Frekuensi tengah	λ_0	1550 nm
Range frekuensi	λ_1, λ_2	1530-1565 nm
Indeks refraksi slab	n_s	3,06
Indeks refraksi layer	n_2	2,638
Indeks refraksi efektif	n_c	2,692
Indeks refraksi grup	n_g	4,5
Panjang pitch	d	5 μm

A. Perhitungan Parameter AWG

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_f), Free Spectral Range (FSR), jumlah maksimum kanal input/output (N_{max}) dan jumlah maksimum array (N_{array}).

Tabel 2
Parameter AWG yang dihitung

Parameter	Simbol
Orde difraksi	m
Perbedaan panjang kanal yang berdekatan	ΔL
Panjang focal slabwaveguide	L_f
Free spectral range	FSR
Jumlah maksimum input/output kanal	N_{max}
Jumlah arrayed waveguides	N_{Array}

B. Perencanaan dengan WDM Phasar

Dibandingkan dengan perhitungan teoritis, perencanaan dengan tool WDM Phasar, dengan menambahkan parameter crosstalk, nilai nonuniformity dan ukuran divais. Selanjutnya dilakukan pengamatan terhadap beberapa parameter AWG, antara lain :

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

Secara normal rancangan awal dibuat dalam kondisi berikut :

- a. Ukuran device 15000 x 9000 μm
- b. Jumlah kanal input/output = 16 kanal
- c. Besarnya crosstalk = -35 dB
- d. Non-uniformity = 0,5 dB.
- e. Lebar spasi kanal = 100 GHz

IV. ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perhitungan AWG

Dengan memilih spasi kanal 8 GHz, 10 GHz, 50 GHz, 100 GHz, 1200 GHz dan 2000 GHz, maka diperoleh hasil perhitungan parameter AWG sebagai berikut:

Tabel 3
Hasil perhitungan AWG

B. Hasil Perencanaan dengan WDM Phasar

Untuk mengetahui pengaruh besarnya ukuran device, dilakukan pengujian dengan berbagai variasi lebar device dengan panjang tetap (15000 μm). Hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4
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

Pengaruh jumlah kanal diamati dengan mengatur jumlah kanal I/O yang berbeda-beda yaitu 2, 4, 8, 16, 32, dan 40 kanal, yang hasilnya dapat diamati seperti dalam tabel 5.

Tabel 5
Pengaruh jumlah kanal

Jumlah Kanal	2	4	8	16	32	40
Panjang FPR (μm)	46,05	138,1	322,3	690,7	1427,6	1796,0
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

Sedangkan untuk melihat hasil perencanaan parameter AWG sebagai pengaruh dari besarnya nilai *crosstalk*, dilakukan dengan mengubah-ubah nilai *crosstalk* yang diberikan. Seperti pada tabel 6.

Tabel 6
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

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 7.

Tabel 7
Pengaruh *non-uniformity*

Non-uniformity	0.1	0.2	0.5	1	3	5
Panjang FPR (µm)	1544,6	1092,2	690,7	488,4	282,0	218,4
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

Sementara untuk menjawab permasalahan pengaruh ukuran spasi kanal WDM terhadap besarnya parameter AWG, dilakukan dengan mengubah-ubah besarnya lebar kanal WDM menjadi 8 GHz, 10 GHz, 50 GHz, 100 GHz, 1200 GHz dan 2000 GHz, untuk mewakili VHDWDM, DWDM dan CWDM.

Tabel 8
Pengaruh spasi kanal

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

C. Pembahasan Parameter AWG

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 9.

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 µm². Untuk hasil perbandingannya dapat dilihat pada tabel 9.

Tabel 9
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 _r (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) **

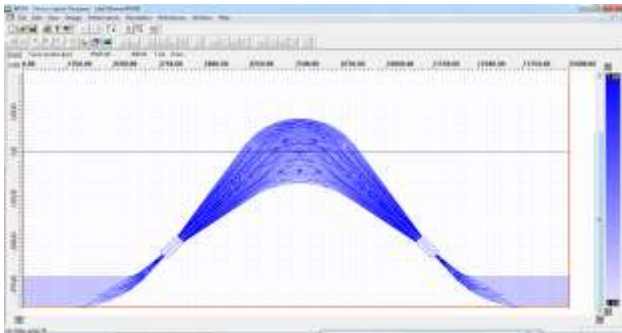
Keterangan :

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

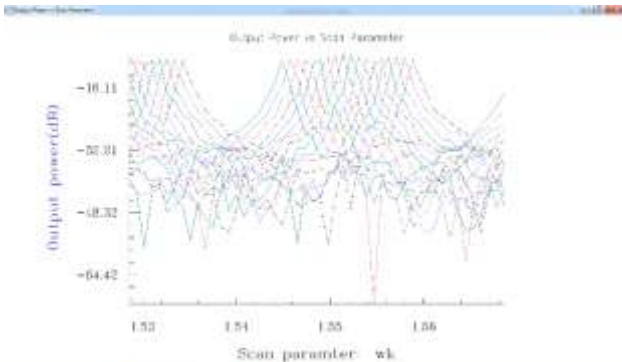
** dari 110 array yang mungkin, hanya 56 yang bisa digunakan

Terdapat perbedaan parameter AWG antara hasil perhitungan teoritis dan *WDM Phasar*, hal ini dimungkinkan karena adanya 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 µm².

Selain menghasilkan parameter perencanaan AWG, *WDM Phasar* juga dapat digunakan untuk melihat hasil desain AWG dan spektrumnya.

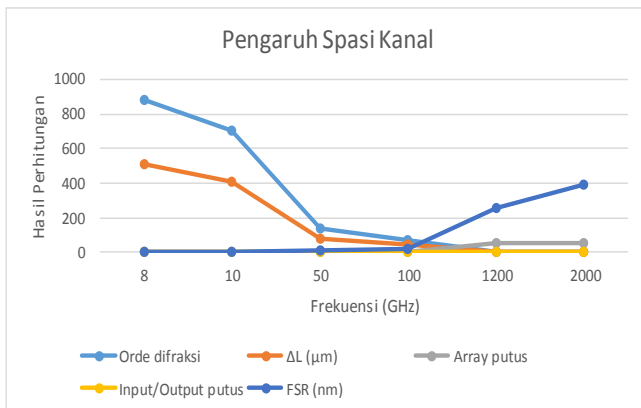


Gambar 4 Hasil Desain AWG 100 GHz (16x16)



Gambar 5 Spektrum AWG 100 GHz (16x16)

Sementara untuk mendapatkan gambaran pengaruh spasi kanal WDM terhadap parameter AWG, dilakukan dengan memvariasi ukuran spasi kanal pada parameter rancangan normalnya, dan hasilnya dapat dilihat dalam grafik berikut.



Gambar 6 Grafik pengaruh spasi kanal

Dari grafik gambar 6 terlihat bahwa, semakin besar ukuran spasi kanal, maka besarnya orde difraksi (m) akan turun, selisih panjang *array* (ΔL) mengecil dan ukuran FSR akan membesar. Sedangkan pengaruh ukuran spasi kanal yang semakin lebar (sementara ukuran *bandwidth* dibuat tetap) berdampak pada peningkatan *array* yang putus dan jumlah kanal I/O yang dilayani akan menurun.

D. Perhitungan Performansi *Bit Rate*

Dengan menggunakan pengkodean sinyal NRZ dan persamaan laju bit *gaussian*, untuk berbagai spasi kanal

WDM yang diuji, dihasilkan performansi kanal seperti pada tabel 10

Tabel 10
Bit Rate Kanal WDM

Spasi Kanal (GHz)	Bit Rate Gaussian	
8	10.72 Gbps	2 x STM 64
10	13.4 Gbps	2 x STM 64
50	67 Gbps	2 x STM 256
100	134 Gbps	STM 1024
1200	1.60 Tbps	10 x STM 1024
2000	2.68 bps	17 x STM 1024

V. KESIMPULAN

Dari keseluruhan pembahasan tentang *arrayed waveguide grating* (AWG) untuk *wavelength division multiplexing* (WDM), dapat ditarik beberapa kesimpulan terkait dengan 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. Ukuran devais besar, memudahkan perencanaan parameter AWG sesuai yang diinginkan, tapi jelas kurang efisien.
2. Gangguan *crosstalk* bisa menyebabkan orde difraksi, FPR dan ΔL naik, sedangkan FSR akan kecil, serta ada potensi *array* putus.
3. Nilai *nonuniformity* yang tinggi, menyebabkan orde difraksi (m) 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.
4. Semakin besar spasi kanal (jumlah input tetap), orde difraksi (m) dan ΔL akan turun, sebaliknya FSR yang diperlukan besar sehingga banyak *array* yang putus.
5. 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).
6. Untuk spasi kanal 100 GHz, lewat *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).
7. Semakin besar spasi kanal, jumlah bit yang bisa diangkat juga semakin banyak. Pada *bit rate* tinggi, tidak bisa menggunakan seluruh *bandwidth* kanal, karena untuk mengantisipasi terjadinya dispersi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Gerd Keiser, "Optical Fiber Communication third edition", Mc Graw Hill International Edition, 2000.
 [2] Research Centre for Microtechnology "Arrayed Waveguide Gratings: tiny structures for big ideas, Application Note, FHV Research" DWDM 05, 2010.