

SIMULASI FILTER OPTIK *SINGLE MICRORING RESONATOR* SEBAGAI OPTICAL ADD DROP MULTIPLEXER

SIMULATION OPTICAL FILTER SINGLE MICRORING RESONATOR AS OPTICAL ADD DROP MULTIPLEXER

Akbar Muhammadi¹, Erna Sri Sugesti², Dadin Mahmudin³

¹Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

²Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

³Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Bandung

¹ muhammadiakbar@gmail.com, ² ernasugesti@telkomuniversity.ac.id, ³ dradrin@gmail.com

Abstrak

Beragamnya layanan informasi dan komunikasi mengakibatkan peningkatan kebutuhan *bandwidth* dan kecepatan akses data yang tinggi. Salah satu media yang dapat menjadi solusi masalah tersebut adalah kabel serat optik. Kabel serat optik memiliki *bandwidth* yang lebar serta mampu menggabungkan beberapa informasi dengan menggunakan satu kabel. Metode penggabungan tersebut dikenal dengan sistem multipleks. Sistem multipleks yang umum digunakan pada komunikasi optik adalah *dense wavelength division multiplexing* (DWDM). DWDM membutuhkan suatu perangkat yang dapat melakukan proses add/drop panjang gelombang dengan menggunakan *optical add/drop multiplexer* (OADM). OADM terdiri dari filter optik yang dapat melewatkan suatu panjang gelombang tertentu. Salah satunya adalah *single microring resonator*. Penelitian ini membahas mengenai simulasi dan analisis *single microring resonator* sebagai filter pada OADM. Simulasi diawali dengan menentukan dimensi awal dan dilanjutkan dengan analisis. Analisis meliputi beberapa parameter kinerja seperti *free spectral range*, *bandwidth*, *finesse*, *Q factor*. Berdasarkan analisis dan optimasi yang telah dilakukan, diperoleh nilai parameter *single microring resonator* yang optimal. Hasil simulasi mampu menghasilkan rentang nilai FSR yang lebar, *bandwidth* yang sempit, nilai *finesse* yang besar serta nilai *Q factor* yang tinggi.

Kata kunci : *Dense wavelength division multiplexing, optical add/drop multiplexer, microring resonator*

Abstract

The diversity of information and communication service causes an increasing demand of bandwidth and high speed data access. One medium that can be a solution for this problem is optical fiber. Optical fiber provides huge bandwidth and it can combine several information signal into one which known as multiplexing system. In optical communication, multiplexing system commonly use *dense wavelength division multiplexing* (DWDM). DWDM need a device that consist an optical filter to perform a selection of certain wavelength known as optical add/drop multiplexer (OADM). This research discuss about simulation and analysis *single microring resonator* as OADM. Simulation start from determining the dimension simulation object then continue with analysis. Analysis covers several parameters such as *free spectral range*, *bandwidth*, *finesse*, *Q factor*. According to analysis and optimization simulation, obtained the optimal value for *single microring resonator* parameters. Simulation result can reach a high FSR value, narrow bandwidth, high *finesse* and *Q factor* value.

Keywords: *Dense wavelength division multiplexing, optical add/drop multiplexer, microring resonator*

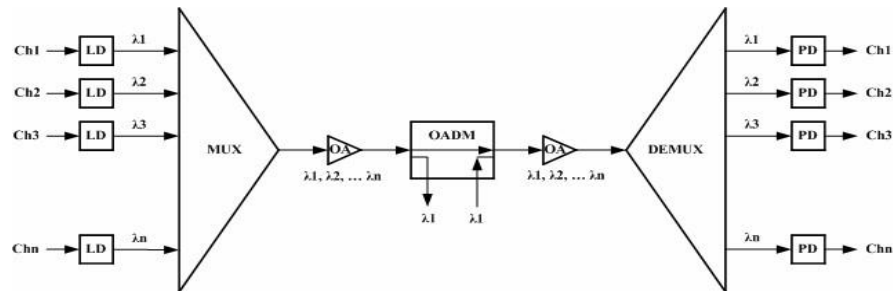
1. Pendahuluan

Teknologi DWDM akan memungkinkan untuk mentransmisikan data dengan kecepatan tinggi karena mampu menampung jumlah kanal yang cukup banyak^[5]. Untuk membuat proses multipleks lebih efektif, jaringan DWDM membutuhkan perangkat yang terdiri dari filter optik yang berguna untuk melewatkan beberapa panjang gelombang tertentu yakni *optical add/drop multiplexer* (OADM). Selain melewatkan suatu panjang gelombang, OADM juga berfungsi untuk melakukan penambahan dan pengurangan panjang gelombang tertentu.. Selain untuk aplikasi OADM, filter optik juga dapat digunakan dalam proses *wideband radio frequency*, *microwave* serta *millimetric signal* secara langsung dalam domain optik^[2]. Salah satu jenis dari filter optik tersebut adalah *single microring resonator*. *Single microring resonator* memiliki struktur yang cukup sederhana serta memiliki beberapa kegunaan untuk aplikasi lainnya seperti *beamforming antenna*, *interleaver* dan sensor.

2. Teori Penunjang

A. Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)

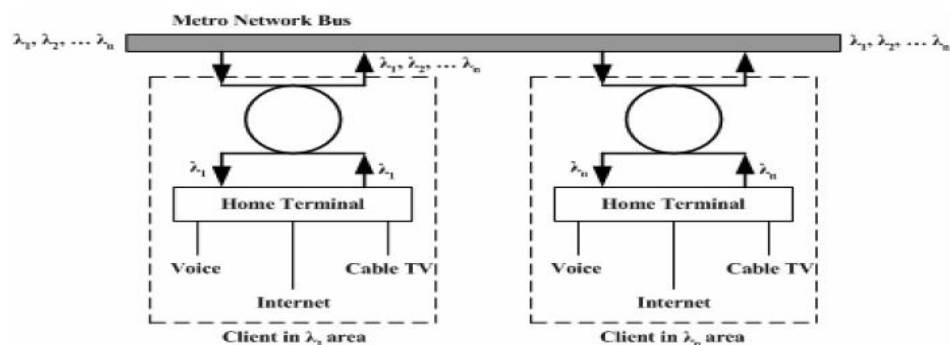
Dense wavelength division multiplexing (DWDM) merupakan salah satu jenis teknik multipleksing berbasis WDM. DWDM mampu menjangkau jaringan optik perumahan salah satunya FTTH. *Laserdiode* (LD) mengubah suatu sinyal elektrik menjadi sinyal optik kemudian sinyal optik hasil konversi dikirimkan dan digabungkan oleh multiplekser dan disalurkan melalui suatu *fiber* optik yang sama. *Optical amplifier* (OA) menguatkan sinyal tersebut sehingga dapat dideteksi oleh komponen *optical add/drop multiplexer* (OADM). OADM berfungsi untuk menyisipkan atau melepaskan sinyal optik dengan panjang gelombang yang berbeda-beda. Keluaran hasil OADM dikuatkan kembali oleh suatu *optical amplifier* dan melewati proses demultipleks. Keluaran proses demultipleksing masuk ke *photodetector* (PD) selanjutnya diubah kembali dari sinyal optik menjadi sinyal elektrik^[1]. Komponen pada jaringan DWDM diilustrasikan oleh Gambar 2.



Gambar 2 Komponen pendukung DWDM^[2]

B. Optical Add/drop Multiplexer (OADM)

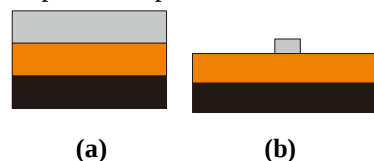
Optical Add/Drop Multiplexer (OADM) merupakan suatu perangkat optik yang dirancang untuk menyisipkan dan melepaskan panjang gelombang. Satu atau lebih kanal dapat di *drop* dan satu atau lebih kanal juga dapat ditambahkan (*add*)^[6]. OADM memiliki komponen pendukung utama yakni filter optik. Struktur umum perangkat OADM diilustrasikan oleh Gambar 3.



Gambar 3 Struktur Optical Add/Drop Multiplexer (OADM)^[2]

C. Waveguide optik

Waveguide optik merupakan suatu struktur fisik yang dapat memandu suatu gelombang elektromagnetik dalam suatu spektrum optik. *Waveguide* optik terdiri dari lapisan inti (*core*) yang terletak antara substrat dan selubung (*cladding*), struktur *waveguide* optik dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 (a) *Waveguide* optik tampak samping (b) *Waveguide* optik tampak depan^[1]

Prinsip kerja suatu *waveguide* optik didasarkan terhadap hukum Snells dan prinsip *total internal reflection* (TIR). *Total internal reflection* terjadi ketika suatu cahaya datang dari medium rapat menuju medium renggang dengan nilai sudut datang lebih besar dibandingkan dengan nilai sudut kritis^[11]. Sudut kritis merupakan sudut yang terbentuk ketika suatu sinar datang dan dibiaskan membentuk sudut sebesar 90°^[11].

D. Material polimer

Material polimer merupakan material *waveguide* yang sering digunakan. Jenis golongan polimer yang sering digunakan untuk *waveguide* optik adalah *polycarbonates* dan *olefins*^[1]. Material polimer memiliki beberapa manfaat yang cukup beragam pada bidang telekomunikasi dan elektronika. Pada bidang telekomunikasi, polimer dapat diaplikasikan sebagai filter optik^[14] sementara pada bidang elektronika polimer dapat diimplementasikan sebagai salah satu komponen sensor^[1].

E. *Microring Resonator (MRR)*

Microring resonator (MRR) merupakan suatu perangkat terintegrasi optik yang berperan sebagai filter dalam sistem transmisi serat optik berbentuk lingkaran. Struktur umum *microring resonator* digambarkan pada Gambar 5. *Microring resonator* terdiri dari dua buah *waveguide* optik lurus yang dikopling dengan suatu *waveguide* optik berbentuk lingkaran (*ring*) dengan jari-jari r . Prinsip kerja pada *microring resonator* adalah ketika gelombang cahaya masuk melalui terminal 1 pada *waveguide* lurus, sebagian cahaya tersebut akan terkopling oleh *coupler* 1 sehingga sebagian cahaya tersebut akan masuk ke *waveguide* berbentuk *ring*. Sisa cahaya yang tidak terkopling akan keluar melalui terminal 4. Terminal 4 dapat disebut juga dengan *output* anti-resonansi. Sebagian gelombang cahaya yang berada pada *waveguide* berbentuk *ring* akan terkopling oleh *coupler* 2 dan berakhir pada *waveguide* lurus terminal 2. Terminal 2 dapat disebut juga sebagai *output* resonansi. Peristiwa resonansi terjadi ketika suatu cahaya memiliki panjang gelombang yang mendekati nilai panjang gelombang resonansi^[18]. Sementara panjang gelombang cahaya yang memiliki nilai jauh dari panjang gelombang resonansi akan menjalar pada *waveguide* lurus tanpa mengalami peristiwa kopling. Panjang gelombang resonansi dinyatakan melalui persamaan (1)^[18]

(1)

dimana :

L = Panjang gelombang *waveguide* lurus (μm)

M = Bilangan integer

n_{eff} = Indeks bias efektif

Microring resonator memiliki beberapa parameter yang diperlukan untuk menganalisis performansi. Parameter tersebut meliputi :

1). *Free Spectral Range (FSR)*

Free Spectral Range (FSR) dapat didefinisikan sebagai lebar daerah *passband* yang dihasilkan oleh filter *ring resonator*^[4]. FSR dinyatakan pada persamaan (2)^[2]

(2)

2). *Bandwidth (FWHM/Full Width at Half Maximum)*

Bandwidth menyatakan besar jarak antara dua buah frekuensi pada grafik transmitansi^[1]. Nilai dari *Bandwidth resonator* diberikan oleh *full-width at half maximum* (FWHM atau *3dB bandwidth*)^[8]. Nilai *bandwidth* diukur ketika puncak berada pada -3dB dan berada pada daerah frekuensi kerja.

3). *Finesse*

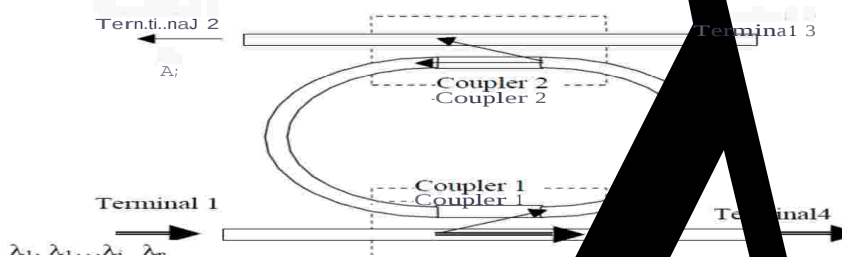
Finesse dari sebuah *microring resonator* dapat didefinisikan sebagai rasio antara nilai *free spectral range* (FSR) dengan nilai *full width at half maximum* (FWHM) atau *Bandwidth* 3 dB^[8]. Persamaan *Finesse* dinyatakan oleh persamaan (3)^[10].

(3)

4). *Quality Factor (Q)*

Quality factor atau faktor kualitas menyatakan kemampuan suatu filter untuk menyeleksi panjang gelombang tertentu. Nilai Q factor memiliki hubungan dengan nilai frekuensi kerja dan *bandwidth single microring resonator*. Q factor dinyatakan pada persamaan (4). Q factor dapat ditentukan dengan menghitung perbandingan antara frekuensi kerja dengan *bandwidth* 3 dB^[10].

$$Q \text{ Factor} = \frac{\text{Frequency}}{\text{Bandwidth}} \quad (4)$$



Gambar 5 Microring Resonator

F. Jenis Microring Resonator (MRR)

Microring resonator merupakan suatu perangkat integrasi optik dengan struktur yang mudah dibentuk. Pembentukan perangkat ini umumnya dilakukan dengan menambahkan serta menyusun waveguide berbentuk ring sesuai dengan karakteristik dan kebutuhan.

1). Single microring resonator (SMR)

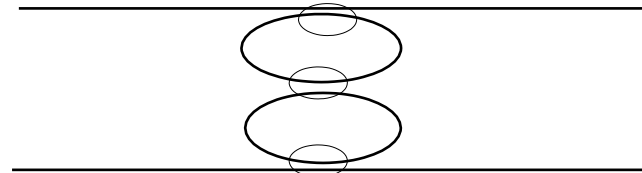
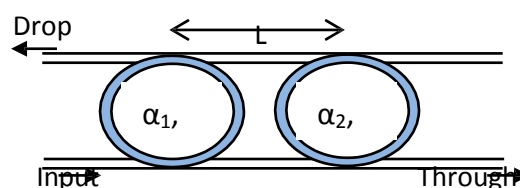
Single microring resonator (SMR) merupakan salah satu jenis dari filter optik microring resonator. Single microring resonator merupakan struktur yang paling sederhana dari microring resonator. Struktur ini terdiri dari satu buah waveguide berbentuk ring dengan ukuran jari-jari (r) tertentu yang dikopling pada dua buah waveguide berbentuk lurus^[2]. Struktur single microring resonator diilustrasikan pada Gambar 5.

2). Serial cascaded microring resonator (SCMR)

Serial cascaded microring resonator (SCMR) adalah pengembangan dari jenis single microring resonator. SCMR terdiri dari beberapa ring waveguide yang disusun secara seri ke arah vertikal^[2]. Struktur SCMR ditunjukkan pada Gambar 6.

3). Parallel cascaded microring resonator (PCMR)

Parallel cascaded microring resonator (PCMR) merupakan variasi dan pengembangan dari dua bentuk sebelumnya. PCMR terdiri dari waveguide berbentuk ring yang disusun secara paralel dengan arah horizontal. Struktur SCMR dinyatakan pada Gambar 7.

Gambar 6 Struktur serial cascaded microring resonator^[2]Gambar 7 Struktur parallel cascaded microring resonator^[2]

3. Perancangan

A. Menentukan jenis microring resonator

Microring resonator merupakan filter optik yang umum dipelajari pada beberapa dekade terakhir^[2]. Microring resonator memiliki beberapa jenis yang dapat digunakan sesuai dengan kebutuhan. Setiap jenis memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing. Microring resonator memiliki tunability yang baik^[2] selain itu, microring resonator juga dapat digunakan untuk beberapa aplikasi dunia telekomunikasi seperti sensing, beamforming antenna, interleaver^[2]. Namun, microring resonator juga memiliki kekurangan. Microring resonator memiliki ukuran yang sangat kecil (μm) sehingga dibutuhkan alat ukur dan pabrikan dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Proses simulasi menggunakan jenis single microring resonator sebagai objek simulasi. Jenis single

microring resonator dipilih karena memiliki struktur yang paling sederhana sehingga mudah untuk disimulasikan karena *software* CST 2014 memiliki keterbatasan tingkat dimensi objek simulasi.

B. Dimensi Awal *Single Microring Resonator*

Single microring resonator memiliki nilai dimensi awal yang digunakan sebagai *input* proses simulasi. Dimensi awal meliputi ukuran jari-jari, lebar *gap* antara 2 *waveguide*, lebar *waveguide*, bahan *waveguide*, tebal *waveguide*, bahan substrat, bahan selubung dan frekuensi kerja. Dimensi awal tersebut dicantumkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi *single microring resonator*

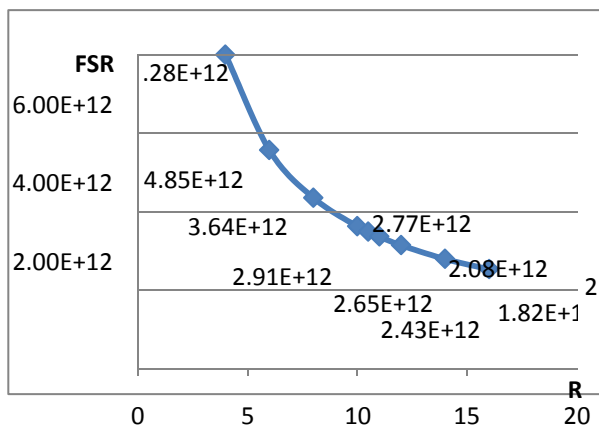
Parameter	Nilai
Panjang kopling	0-1 (μm)
Jari-jari <i>single microring resonator</i>	1-15 (μm)
Tebal <i>waveguide</i>	3 (μm)
<i>Gap</i> antara 2 <i>waveguide</i>	0-1 (μm)
Lebar <i>waveguide</i>	2 (μm)
Bahan <i>waveguide</i>	Polymide (Lossy)
Bahan Substrat	SiO ₂
Bahan Selubung	Udara
Frekuensi kerja	193 THz
Nilai <i>free spectral range</i>	≥ 100 GHz

C. Simulasi *Single Microring Resonator*

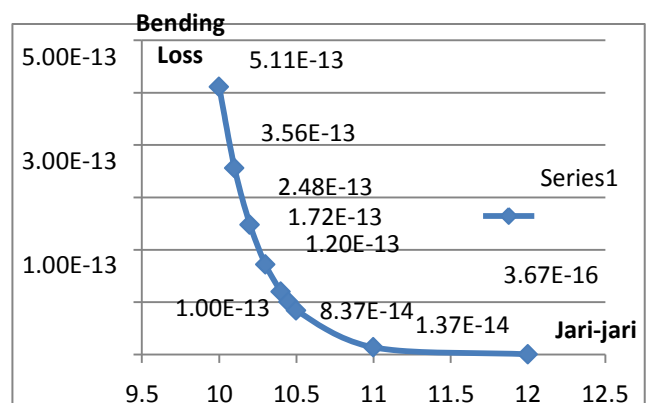
Simulasi dilakukan hingga objek simulasi mencapai titik optimal. Untuk mendapatkan nilai parameter yang optimal, perlu dilakukan proses optimasi. Optimasi dilakukan dengan mengubah beberapa dimensi objek simulasi hingga simulasi mencapai hasil yang optimal. Dimensi yang divariasikan adalah ukuran jari-jari dan ukuran *gap*. Ukuran jari-jari akan berpengaruh terhadap nilai parameter FSR dan FWHM yang didapatkan. Sementara ukuran *gap* akan berpengaruh terhadap nilai konstanta kopling yang diperoleh. *Single microring resonator* disimulasikan sebagai *optical add/drop multiplexer* sehingga harus memiliki nilai FSR yang besar^[1]. Untuk mendapatkan nilai FSR yang besar, ukuran jari-jari perlu diperkecil namun perlu diperhitungkan pula nilai *bending loss* dari material *waveguide* yang akan semakin tinggi. *Bending loss* merupakan parameter yang menyatakan tingkat redaman suatu *waveguide* ketika mengalami pembengkokan^[2]. Selain parameter FSR, parameter lain yang dianalisis adalah konstanta kopling. Untuk mendapatkan nilai konstanta kopling yang tinggi, diperlukan ukuran *gap* yang relatif cukup kecil sehingga ikatan kopling yang terjadi semakin kuat. Untuk parameter FWHM variasi dilakukan terhadap *gap* dan jari-jari hingga puncak FWHM berada pada frekuensi kerja yakni 193 THz. Simulasi dilakukan dengan menggunakan salah satu *software* untuk simulasi yaitu CST *microwave* 2014.

D. Perhitungan nilai parameter *Single Microring Resonator*

Untuk memperkuat teori matematis dilakukan perhitungan dan analisis terhadap beberapa parameter. Parameter tersebut meliputi FSR, *bending loss* dan konstanta kopling. Sementara konstanta kopling merupakan parameter yang menyatakan kuat lemahnya peristiwa kopling yang terjadi pada daerah kopling. Hasil perhitungan dinyatakan dalam bentuk grafik yang direpresentasikan pada Gambar 8 dan 9.



Gambar 9 Perbandingan nilai FSR



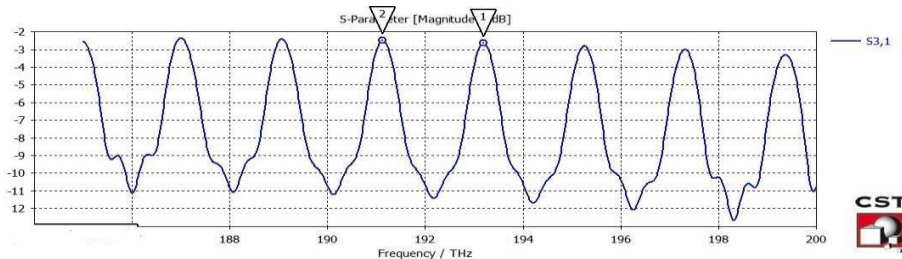
Gambar 10 Perbandingan nilai *bending loss*

Berdasarkan Gambar 9, nilai FSR akan mengalami peningkatan yang kontinu ketika ukuran jari-jari diperkecil. Selain itu, Gambar 9 membuktikan bahwa nilai FSR dan jari-jari berbanding terbalik sesuai dengan persamaan

matematis yang berlaku. Berdasarkan Gambar 10 nilai *bending loss* mengalami perubahan yang seiring dengan penambahan ukuran jari-jari sehingga untuk mendapatkan nilai redaman yang cukup rendah perangkat harus memiliki ukuran jari-jari yang cukup besar. Ukuran jari-jari yang besar menandakan *waveguide* tidak mengalami pembengkokan yang cukup besar.

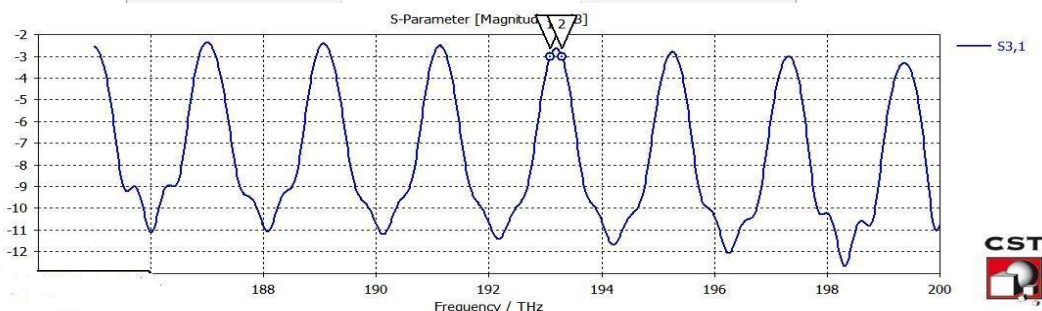
3.5 Analisis Hasil Simulasi

Analisis dilakukan terhadap beberapa parameter pendukung kinerja perangkat. Parameter itu meliputi *free spectral range*, *bandwidth*, *finesse* dan *Q factor*. Perangkat yang dianalisis merupakan perangkat yang telah dioptimasi pada proses simulasi sebelumnya, perangkat tersebut memiliki spesifikasi ukuran jari-jari 10,8 μm , *gap* antara 2 *waveguide* sebesar 0,02 μm , material *waveguide* yang digunakan adalah *polymide* (*lossy*), tebal *waveguide* sebesar 1 μm , lebar dan tinggi *waveguide* sebesar 2 μm . Analisis untuk parameter *free spectral range* ditunjukkan oleh Gambar 10.



Gambar 10 Analisis rentang nilai FSR

Rentang nilai FSR menyatakan selisih jarak antara dua daerah *passband*. Untuk mendapatkan hasil yang presisi, pengukuran digunakan dengan bantuan fitur *curve marker* pada *software* simulasi. *Curve marker* disimbolkan dengan gambar segitiga terbalik pada Gambar 10. Rentang nilai FSR yang diperoleh sebesar 2,07 THz. Nilai yang diperoleh hasil simulasi sudah cukup ideal untuk sebuah *single microring resonator* yang diimplementasikan sebagai OADM karena mampu menghasilkan nilai $\text{FSR} \geq 100 \text{ GHz}$. Tahap selanjutnya dilakukan analisis terhadap parameter *bandwidth* yang ditunjukkan oleh Gambar 11. Dengan menggunakan fitur *curve marker*, didapat nilai *bandwidth* yang sebesar 0,2 THz.



Gambar 11 Analisis rentang nilai *bandwidth*

Lebar *bandwidth* untuk sebuah filter optik ideal memiliki lebar yang cukup sempit. Hal ini berkaitan dengan tingkat selektifitas filter tersebut. Semakin sempit lebar *bandwidth* yang dihasilkan, tingkat selektifitas filter tersebut akan semakin baik sehingga sinyal optik yang difilter akan semakin presisi. Parameter selanjutnya yang dianalisis adalah *finesse*. *Finesses* menyatakan perbandingan nilai *free spectral range* dan nilai *bandwidth*. Berdasarkan persamaan 2 besar nilai *finesse* adalah sebesar 10,35. Nilai *finesse* yang dihasilkan berbanding terbalik dengan total redaman yang dihasilkan^[16]. Tahap analisis selanjutnya adalah parameter *Q factor* yang menyatakan kualitas kemampuan filter untuk menyeleksi panjang gelombang tertentu. Berdasarkan persamaan 3, besar *Q factor* adalah 965. Semakin sempit lebar *bandwidth* akan membuat kualitas filter tersebut semakin baik sehingga menandakan panjang gelombang yang dilewatkan lebih presisi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Perangkat *single microring resonator* hasil rancangan memiliki nilai FSR sebesar 2,07 THz *bandwidth* sebesar 0,2 THz, nilai *finesse* sebesar 10,35 dan nilai *Q factor* sebesar 965. Nilai parameter yang dihasilkan sudah memenuhi spesifikasi awal yakni berada pada daerah frekuensi kerja dan memenuhi nilai $\text{FSR} \geq 100 \text{ GHz}$.

2. Parameter *single microring resonator* yang dianalisis memiliki keterkaitan satu sama lain. Nilai FSR berbanding lurus dengan nilai *finesse*, nilai *finesse* berbanding terbalik dengan nilai *bandwidth*, nilai FSR berbanding lurus dengan nilai *Q factor*, nilai *finesse* berbanding lurus dengan nilai *Q factor*.
3. Berdasarkan analisis nilai parameter, *single microring resonator* yang disimulasikan sudah optimal.
4. Ukuran jari-jari suatu *single microring resonator* akan berbanding terbalik dengan nilai FSR.
5. Semakin kecil ukuran *gap*, akan membuat nilai konstanta kopling semakin besar sehingga peristiwa kopling pada daerah kopling semakin kuat.
6. Dalam dunia komunikasi optik, filter optik *single microring resonator* memiliki beberapa kegunaan yang bermanfaat. Perangkat ini dapat digunakan sebagai OADM serta untuk kebutuhan *sensing* dan *beamforming* antenna. Semakin kecil jari-jari perangkat, redaman yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini terkait dengan *bending loss* dari suatu bahan *waveguide*.
7. Semakin kecil ukuran jari-jari, *bending loss* yang dihasilkan akan semakin tinggi karena semakin kecil ukuran jari-jari menandakan *waveguide* mengalami pembengkokan yang cukup besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Angraeni. (2006). *Perancangan dan Pabrikasi Prototype Pemandu Gelombang Optik Berstruktur Planar Menggunakan Polimer*. Bandung : Institut Teknologi Nasional.
- [2] Apriady, D. (2006). *Desain dan Fabrikasi Microring-Resonator Sebagai Filter Optik Untuk Jaringan DWDM*. Bandung : Institut Teknologi Nasional.
- [3] Benvenuti, L., Farina, L. (2001). *The Design of Fiber-Optic Filters*. Lightwave Technology, Journal of Volume:19, Issue:9.
- [4] Manggolo, I., Marzuki, M., Alaydrus, M. (2011). *Optimalisasi Perencanaan Jaringan Akses Serat Optik Fiber To The Home Menggunakan Algoritma Genetika*. InComTech, Jurnal Telekomunikasi dan Komputer, Vol.2, No.2..
- [5] Maulana, W. (2008). *Analisis Ekualisasi Daya ASE Pada Penguat Raman Menggunakan Ring Resonator Analyze of ASE (Amplified Spontaneous Emission)*. Bandung : Institut Teknologi Telkom.
- [6] Laboratorium sistem komunikasi serat optik, Modul Pengukuran Numerical Aperture. Modul Praktikum Laboratorium Sistem Komunikasi Serat Optik. Bandung : Universitas Telkom.
- [7] Rashed, A.N.Z. (2011). *Optical Add/Drop Multiplexer (OADM) Based on Dense Wavelength Division Multiplexing Technology in Next Generation Optical Networks*. Electrical and Electronic Engineering, Vol. 1 No.1
- [8] Sadegh, A., Alavi, S.E., Mahdaliza, S. (2015). *Soliton Coding for Secured Optical Communication Link*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology.
- [9] Setiawan, D. (2011). *Perambatan Cahaya pada Pandu Gelombang Makro Berbentuk Trapesium*. Surakarta : Universitas Sebelas Maret.
- [10] Syah, H.S.D., Ajulian, A. (2014). *Penarikan Jaringan Baru FTTH ODC-SMT-FQ hingga ODP-SMT-FQ*. Semarang : Universitas Diponegoro.
- [11] Tan, S.F. (2004). *Integrated Optical Filters Based on Microring Resonator*.
- [12] Tseng, W.C., Tsai, W.C., Lin, C.K., Lee, C.M., Chen, J.Y. (2013). *Study of Coupling Loss on Strongly-coupled, Ultra Compact Microring Resonators*. Hsinchu : Institute of Photonics Technologies, National Tsing Hua University. Kaohsiung : Department of Photonics, National Sun Yat-sen University.
- [13] Wijayanto, N.Y., Mahmudin, D. (2014). *Pemandu Gelombang Optik Polimer pada Substrat Silikon Dioksida untuk Panjang Gelombang 1,55 μm* . Bandung : Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI).
- [14] Apollo Photonics. *APSS Apollo Application Note on Microring Resonator Computer-aided Design and Simulation*. Apollo Inc : Canada.
- [15] Wahyuni, S, P. *Karakterisasi Fiber Bragg Grating (FBG) Tipe Uniform dengan Modulasi Akustik Menggunakan Metode Transfer Matrik*
- [16] Mookherjee, S., Melloni, A. (2008) *Microring Resonator in Integrated Optic*. University of California : USA.