

Analisis Perhitungan *Group Delay* pada *Device Optik* dengan Menggunakan Metoda *Transfer Function*

Libianko Sianturi^{1*}, Henri P. Uranus², Kerista Tarigan³

* Corresponding author: Libianko9620@gmail.com

Sejarah penerimaan

Diterima pertama kali:
15/09/2017

Diterima setelah perbaikan:
23/11/2017

Tanggal penerbitan:
05/04/2018

Copyright © 2018 FTIE IT Del

Abstract— Group delay of an optical circuit represents the time required by a signal to propagate through the circuit. In this study, optical circuit analyzed is a two-port ring-resonator (TPRR). TPRR is a circuit consisting of a ring resonator and a straight waveguide, where the ring is placed in proximity to the straight waveguide. In this study, the characteristics of the group delay value on the TPRR circuit, in particular factors that influence the value of group delay such as coupling constant, will be analyzed through computer simulations using Matlab. Other things like critical coupling and the resonant wavelength will also be presented in the analysis. For TPRR parameters used: effective index of 1.6499, attenuation constant of ring and straight waveguide of 0.8 dB/cm and 0.6dB/cm, round-trip ring length of 11916.4 μm , laser wavelength of 1,55 μm , and long of TPRR circuit of 5cm, we retrieved some of the analysis results: critical coupling occurs when κ of -0,44394i so the position under coupling is for $\kappa = -1i$ to $\kappa = -0,4i$ on condition the group delay has a negative value, and the position over coupling is for $\kappa = -0,5i$ to $\kappa = -0,9i$ on condition the group delay has a positive value. On the conditions of the critical coupling, group delay spectrum is very sharp, the value of the group delay is strongly influenced by the coupling constant. Finally, in this study the resonant wavelength occurs at a wavelength of 1549.9583 nm.

Keywords— Group delay; two-port ring-resonator; transfer function method; coupling constant; critical coupling; resonant wavelength.

Intisari—*Group delay* suatu rangkaian optik merupakan waktu tempuh suatu sinyal ketika berpropagasi melewati rangkaian. Dalam penelitian ini, rangkaian optik yang dianalisis adalah sebuah rangkaian *two-port ring-resonator* (TPRR). TPRR merupakan rangkaian yang terdiri dari sebuah *ring resonator waveguide* dan sebuah *straight waveguide*, dimana keduanya diletakkan berdekatan. Pada penelitian ini akan dianalisis bagaimana karakteristik *group delay* pada rangkaian TPRR, secara khusus faktor yang mempengaruhi perhitungan nilai *group delay* melalui simulasi komputer menggunakan Matlab. Hal lain seperti *critical coupling* dan *resonant wavelength* juga akan disampaikan dalam analisis yang dilakukan. Untuk sampel TPRR yang digunakan: indeks efektif pada *ring* dan *straight waveguide* adalah sama sebesar 1,6499, konstanta attenuasi pada *ring* dan *straight waveguide* masing - masing 0,8 dB/cm dan 0,6 dB/cm, keliling *ring* 11916,4 μm , panjang gelombang *laser* 1,55 μm , dan panjang TPRR 5 cm, diperoleh beberapa hasil analisis antara lain: *critical coupling* terjadi pada saat κ sebesar -0,44394i sehingga posisi *under coupling* adalah untuk $\kappa = -0,1i$ hingga $\kappa = -0,4i$ pada kondisi tersebut *group delay* memiliki nilai negatif dan posisi *over coupling* adalah untuk $\kappa = -0,5i$ hingga $\kappa = -0,9i$ dimana nilai *group delay* memiliki nilai positif. Pada kondisi *critical coupling*, spektrum *group delay* adalah sangat tajam, nilai *group delay* sangat dipengaruhi oleh konstanta kopling. Dalam penelitian ini, *resonant wavelength* terjadi pada panjang gelombang 1549,9583 nm.

Kata Kunci— *Group delay*; TPRR; *Transfer function method*; konstanta kopling; *critical coupling*; *resonant wavelength*.

I. PENDAHULUAN

Group delay pada suatu *device* optik adalah waktu tempuh suatu sinyal ketika melewati *device* tersebut. *Group delay* sinyal ketika berpropagasi pada suatu *device* optik dapat

dihitung dengan menggunakan metoda *transfer function*. Dalam tulisan ini akan diuraikan tentang beberapa hal seperti: bagaimana menghitung *group delay* pada suatu *device* optik berupa *two-port ring-resonator* (TPRR) melalui simulasi komputer, bagaimana karakteristik nilai *group delay* yang dihasilkan, faktor yang mempengaruhi perhitungan *group delay*. Hal tersebut akan disampaikan dan diuraikan pada bagian selanjutnya. Pada akhirnya diperoleh pemahaman

¹Mahasiswa, Ilmu Fisika, FMIPA, Universitas Sumatera Utara, Jl. Bioteknologi No. 1 Kampus USU Padang Bulan, Medan-20155 (telp.: 061-8211050; e-mail: Libianko9620@gmail.com).

²Dosen, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pelita Harapan, Karawachi Tangerang.

³Dosen, Ilmu Fisika, FMIPA, Universitas Sumatera Utara, Jl Bioteknologi No. 1 Kampus USU Padang Bulan. Medan.

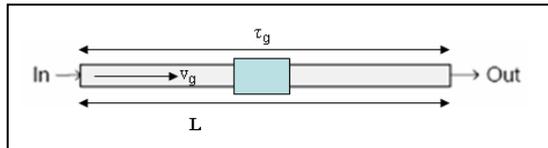
tentang fenomena dan hal - hal yang mempengaruhi nilai *group delay* pada *device* optik tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Group Delay dan Device Optik

Menghitung *group delay* berdasarkan *transfer function* diawali dari pemahaman tentang *group delay*. *Group delay* (τ_g) merupakan waktu yang dibutuhkan oleh suatu *envelope signal* untuk menempuh suatu *device* optik yang panjangnya L , ketika sinyal tersebut bergerak dengan kecepatan *group velocity* sebesar v_g . Secara matematis, *group delay* dapat dituliskan dengan persamaan[1]-[3]:

$$\tau_g = L/v_g \quad (1)$$



Gbr. 1 *Group delay* dalam suatu rangkaian optik.

Seperti ditunjukkan pada Gbr. 1, *group velocity* merupakan kecepatan *envelope signal* sebagai hasil superposisi dari beberapa gelombang atau sebagai hasil modulasi intensitas[4]-[7], *Group velocity* dapat dijelaskan melalui persamaan – persamaan gelombang berikut:

Jika suatu gelombang:

$$E_1 = E_0 \exp[i(\omega_1 t - k_1 z)] \quad (2)$$

disuperposisikan dengan suatu gelombang:

$$E_2 = E_0 \exp[i(\omega_2 t - k_2 z)] \quad (3)$$

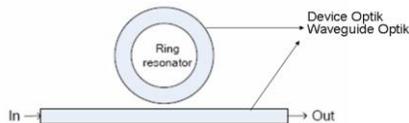
akan diperoleh persamaan gelombang yang memuat dua buah sinyal yaitu *carrier signal* dan *envelope signal*, sehingga:

$$E_1 + E_2 = 2E_0 \exp[i(\omega_0 t - k_0 z)] \text{Re}\{\exp(\delta\omega t - \delta k z)\} \quad (4)$$

dimana E_0 adalah amplitudo; $\omega_1, \omega_2, \omega_0$, dan $\delta\omega$ adalah *angular frequency*; t adalah waktu; k_1, k_2, k_0 , dan δk adalah *wave propagation vector*; dan z merupakan arah perambatan gelombang. Berdasarkan “(4)”, *carrier signal* dan *envelope signal* masing – masing akan bergerak dengan kecepatan yang berbeda. *Carrier signal* bergerak dengan istilah kecepatan *phase velocity* atau *wave velocity*, sedangkan *envelope signal* bergerak dengan istilah kecepatan *group velocity*, dimana:

$$v_g = \lim_{\delta k \rightarrow 0} (\partial\omega/\partial k) = \partial\omega/\partial k \quad (5)$$

Seperti disampaikan sebelumnya, bahwa yang dimaksud dengan *device* optik dalam tulisan ini adalah sebuah rangkaian TPRR. TPRR adalah suatu rangkaian yang terdiri dari sebuah *ring resonator waveguide* dan sebuah *straight waveguide*, dimana *ring resonator* diletakkan berdekatan dengan *straight waveguide* tersebut. *Ring resonator* merupakan *waveguide* optik berupa saluran melingkar berbentuk cincin yang memiliki jari - jari tertentu. Bentuk rangkaian TPRR dapat dilihat pada Gbr. 2.



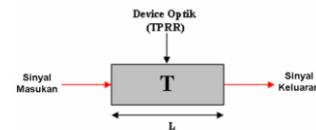
Gbr. 2 Rangkaian *two-port ring-resonator*[8].

Saat ini, *ring resonator* merupakan area riset yang populer[2]-[3], [7]–[13]. Beberapa grup riset melakukan riset pada persoalan – persoalan seperti: pemodelan *loss-induced superluminal* dan *negative group velocity* pada rangkaian TPRR[2], analisis terhadap pengukuran *group delay* dengan menggunakan TPRR sebagai *device*[3], pengamatan terhadap fenomena ‘*Back-to-the-future*’ pada *photonic chip*[7],

penelitian eksperimental terhadap perilaku *pulse temporal* pada *integrated-optical ring-resonator* dan *negative group velocity*[8], penggunaan PNA dalam menganalisis gelombang cahaya[9], analisis teori dan eksperimen terhadap *pulse with negative group velocity* yang ditransmisikan melewati sebuah *single optical ring-resonator*[10], observasi eksperimental terhadap *pulse advancement* dan *delay* pada rangkaian *integrated-optical TPRR*[11], observasi numerik terhadap *negative group velocity* pada rangkaian *two-port ring-resonator* dan potensinya sebagai sensor[12], *optical computing, filters, photonic logic* yang berbasis *ring resonator*, dan pemrograman pada *ring resonator* berbasis rangkaian *integrated photonic*[13]. Hal ini menjadi menarik karena berbagai aplikasi menggunakan *ring resonator* seperti: *integrated optic, filter, optical switch* pada teknologi WDM, *sensor, pembangkitan gelombang, wavelength conversion, signal processing, encoder-decoder* dan untuk amplifikasi[13]. Perbedaan penelitian ini dengan apa yang sudah pernah dilakukan sebelumnya terhadap TPRR adalah bahwa pada penelitian yang dilakukan, dianalisis perhitungan *group delay* pada rangkaian TPRR dengan menggunakan *transfer function method* melalui simulasi komputer dengan software Matlab.

B. Perhitungan Group Delay

Menghitung *group delay* diawali dengan menghitung *transfer function* dan besar fasa yang terjadi pada rangkaian. *Transfer function* yang terjadi pada sebuah rangkaian optik dapat dihitung apabila karakteristik rangkaian tersebut diketahui,



Gbr. 3 Formulasi *transfer function*.

Jika suatu rangkaian seperti ditunjukkan pada Gbr. 3 dimana sinyal masukan dinyatakan dengan E_{input} dan sinyal keluaran dinyatakan dengan E_{output} , maka *transfer function* yang terjadi pada rangkaian T adalah:

$$t = E_{output}/E_{input} \quad (6)$$

Dengan menggunakan *complex transmission coefficient approach* (Benedickson)[14], *transfer function* ini dapat dinyatakan dalam bentuk kompleks menjadi:

$$t = |t| \exp(-i\phi) \quad (7)$$

$$\text{atau } \phi = -\arctan(\text{Im}(t)/\text{Re}(t)) \pm 2\pi p \quad (8)$$

dimana: ϕ adalah fasa dan p adalah kelipatan bilangan bulat.

Jika sudut fasa (ϕ) telah diperoleh, maka berdasarkan sudut fasa tersebut, konstanta propagasi rangkaian dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$e^{-i\phi} = e^{-i\beta L} \quad (9)$$

$$\text{atau } \beta = \phi/L \quad (10)$$

Sementara itu, menurut definisinya, mengacu pada “(5)”, maka *group velocity* dapat dinyatakan dengan persamaan:

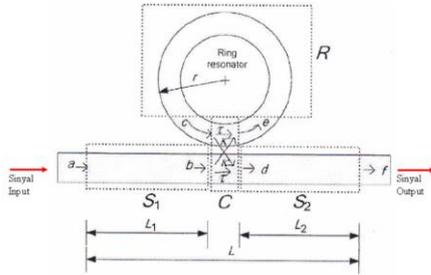
$$v_g = \partial\omega/\partial\beta = (\partial\beta_{eff}/\partial\omega)^{-1} \quad (11)$$

Jadi, apabila kita mengetahui *transfer function* suatu *device* optik dalam bentuk kompleks, maka kita bisa menghitung *group velocity*-nya. Apabila *group velocity*-nya sudah diketahui, maka *group delay* yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan “(1)”.

III. PERHITUNGAN DAN SIMULASI

Pada bagian ini, akan diuraikan bagaimana perhitungan *group delay* dilakukan dengan menggunakan simulasi komputer menggunakan program Matlab. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa untuk menghitung *group delay* pada suatu *device* optik, diawali dengan menentukan *transfer function* dalam bentuk kompleks serta menghitung fasa. Oleh karena itu, sebelum perhitungan *group delay*, berikut ini akan dijelaskan bagaimana memperoleh *transfer function* dan fasa pada TPRR, termasuk penurunan persamaan di dalamnya mengikuti uraian dalam “*Modeling of Loss-Induced Superluminal and Negative Group Velocity in Two-Port Ring-Resonator Circuits*” [2].

Rangkaian TPRR (Gbr. 4) disegmentasi menjadi empat bagian yaitu: dua buah *straight waveguide* yaitu *straight waveguide* S_1 yang panjangnya L_1 , *straight waveguide* S_2 dengan panjang L_2 , sebuah *coupler* yaitu *coupler* C , dan sebuah *ring resonator* yaitu *ring* R dengan jari-jari sebesar r . *Coupler* dan *ring resonator* sama-sama memiliki dua buah konstanta kopling yaitu *through-port amplitude coupling constant* τ dan *cross-port amplitude coupling constant* κ .



Gbr. 4 Rangkaian dan segmentasi TPRR[2].

Pada setiap segmen, terdapat *mode field input* dan *mode field output* (notasi a, b, c, d, e, f) yang merepresentasikan sinyal masukan dan sinyal keluaran dari setiap segmen. *Mode field input* dan *mode field output* tersebut memungkinkan untuk menghitung *transfer function* masing - masing segmen serta *transfer function* keseluruhan rangkaian. Jika *transfer function* keseluruhan rangkaian dinyatakan dalam bentuk kompleks maka fasa, *group velocity* dan *group delay* dapat dihitung.

Jika masing - masing S_1 , S_2 , C , dan R merupakan *transfer function* sinyal yang berpropagasi pada setiap segmen, maka S_1 , S_2 , C , dan R tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan matematis. Dalam hal ini, asumsi yang digunakan adalah: *coupler* adalah segmen yang bersifat *lossless*, *Straight waveguide* dan *ring resonator* adalah segmen yang bersifat *lossy*, *Ring resonator* dan *straight waveguide* merupakan *single-mode waveguide*, dan *Time dependence* adalah dinyatakan dalam bentuk $\exp(i\omega t)$. Dengan demikian, *transfer function* dari setiap segmen rangkaian TPRR dapat diuraikan sebagai berikut. Untuk *straight waveguide* S_1 , akan diperoleh:

$$S_1 = b/a = \exp(-i\beta_{straight} \cdot L_1) \tag{12}$$

Untuk *straight waveguide* S_2 , akan diperoleh :

$$S_2 = f/d = \exp(-i\beta_{straight} \cdot L_2) \tag{13}$$

Dengan menggunakan *scattering matrix formulation* (*Coupled-mode theory analysis* - C.K. Madsen)[6], maka *properties* pada segmen *coupler* dapat dinyatakan secara matematis dengan uraian sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} d \\ e \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} b \\ c \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\text{di mana } S = \begin{bmatrix} \tau & \kappa \\ \kappa & \tau \end{bmatrix} \tag{15}$$

dengan mensubstitusikan ”(14)” ke dalam ”(15)”, maka

$$\begin{bmatrix} d \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau & \kappa \\ \kappa & \tau \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \cdot b + \kappa \cdot c \\ \kappa \cdot b + \tau \cdot c \end{bmatrix} \tag{16}$$

Pada segmen *ring resonator*, R dinyatakan dengan persamaan :

$$R = c/e = \exp(-i\theta) \tag{17}$$

$$\theta = (\beta_{res} - i\alpha_{res,lin}) \cdot L_{roundtrip} \tag{18}$$

dimana β_{res} menyatakan konstanta propagasi pada *ring resonator*, $\alpha_{res,lin}$ menyatakan konstanta attenuasi (dalam skala linier) pada *ring resonator*, $L_{roundtrip}$ menyatakan keliling *ring resonator*, dan θ adalah fasa pada *ring resonator*. Untuk *ring resonator* yang bersifat *lossy*, fasa ini bentuknya kompleks. Untuk θ yang kompleks, maka:

$$\exp(-i\theta) = \gamma \exp(-i\theta_R) \tag{19}$$

Pada segmen *coupler*, C dinyatakan dengan :

$$C = d/b \tag{20}$$

Karena $d = \tau \cdot b + \kappa \cdot c$ dan dari ”(17)” diperoleh $c = e \exp(-i\theta)$, maka

$$d = \tau \cdot b + \kappa \cdot e \exp(-i\theta), \text{ dan}$$

$$d = \tau \cdot b + \kappa \cdot \left\{ (\kappa \cdot b) / (1 - \tau \exp(-i\theta)) \right\} \exp(-i\theta), \text{ diperoleh:}$$

$$C = d/b = \left\{ \tau + (\kappa^2 - \tau^2) \exp(-i\theta) \right\} / \left\{ 1 - \tau \exp(-i\theta) \right\} \tag{21}$$

Dengan mengikuti prinsip *transfer function*, maka *transfer function* total TPRR tersebut dapat diperoleh dan dinyatakan dengan persamaan:

$$t = f/a = (f/d)(d/b)(b/a) = S_2 \cdot C \cdot S_1 = S_2 \cdot S_1 \cdot C \tag{22}$$

$$t = \left[\exp(-i\beta_{straight} \cdot L_2) \right] \cdot \left[\exp(-i\beta_{straight} \cdot L_1) \right] \cdot \left[\frac{\tau + (\kappa^2 - \tau^2) \exp(-i\theta)}{1 - \tau \exp(-i\theta)} \right] \tag{23}$$

Dengan menggunakan analisis teori *mode-coupled*[6], yang menyatakan bahwa τ dapat dipilih murni riil dan κ murni imajiner, maka hukum kekekalan daya $|\tau|^2 + |\kappa|^2 = 1$, dapat ditulis sebagai:

$$\tau^2 - \kappa^2 = 1 \tag{24}$$

maka ”(23)” tersebut dapat disederhanakan dan dituliskan dengan :

$$t = \exp(-i\beta_{straight} \cdot (L_2 + L_1)) \cdot \left[\frac{\tau - \exp(-i\theta)}{1 - \tau \exp(-i\theta)} \right] \tag{25}$$

Jika $L = (L_2 + L_1)$ dan $C = [\tau - \exp(-i\theta)] / [1 - \tau \exp(-i\theta)]$, sehingga persamaan (25) bisa menjadi lebih sederhana:

$$t = \exp(-i\beta_{straight} \cdot L) \cdot C \tag{26}$$

Kemudian berdasarkan ”(26)”, apabila *transfer function* total ini dinyatakan dalam bentuk kompleks, maka ”(7)” dapat dituliskan kembali menjadi:

$$t = |t| \exp(-i\phi) \tag{27}$$

di mana ϕ merepresentasikan besar fasa yang terjadi pada TPRR tersebut dan dapat dihitung dengan persamaan:

$$\phi = -\arctan(\text{Im}(t)/\text{Re}(t)) \pm 2\pi p \tag{28}$$

Dari ”(18)”, kita telah mengenal fasa θ , dan karena fasa (θ) pada *ring resonator* adalah berbentuk kompleks, maka ”(21)” dapat juga dituliskan menjadi :

$$C = \left\{ (\tau - \gamma \exp(-i\theta_R)) / (1 - \tau \gamma \exp(-i\theta_R)) \right\} = |C| \exp(-i\phi_c) \tag{29}$$

$$\text{dengan } \phi_c = -\arctan \left[\frac{(1 - \tau^2 \gamma \sin \theta_R)}{\tau(1 + \gamma^2) - (1 + \tau^2) \gamma \cos \theta_R} \right] \tag{30}$$

dan total fasa TPRR yang terjadi adalah :

$$\phi = \beta_{\text{straight}}L + \phi_c = \frac{\omega}{c}n_{\text{eff, straight}}L + \phi_c \quad (31)$$

dan *effective propagation constant* (β_{eff}) pada rangkaian TPRR adalah :

$$\beta_{\text{eff}} \equiv \phi/L = \left(\frac{\omega}{c} \cdot n_{\text{eff, straight}}\right) + \left(\phi_c / L\right) \quad (32)$$

Jika *effective propagation constant* (β_{eff}) sudah diperoleh, maka *group velocity* dapat dihitung dengan "(1)". Dengan mengasumsikan bahwa *coupling constant*, *ring attenuation constant* dan *effective index mode* pada *straight waveguide* dan *ring resonator* adalah *frequency dependent*, maka *group velocity*-nya dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$v_g \equiv \left\{ \partial \beta_{\text{eff}} / \partial \omega \right\}^{-1} \quad (33)$$

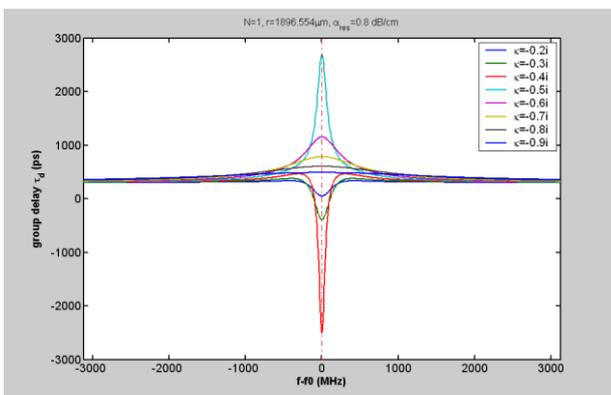
atau :

$$v_g = \left\{ \left(n_{\text{eff, straight}} / c \right) + \left((1/L) \left(\partial \theta_R / \partial \omega \right) \left(\partial \phi_c / \partial \theta_R \right) \right) \right\}^{-1} \quad (34)$$

Kemudian, apabila *group velocity*-nya sudah diperoleh, maka *group delay* TPRR dapat dihitung dengan menggunakan "(1)". Dalam penelitian ini, parameter yang digunakan pada simulasi perhitungan *group delay* adalah: jumlah *ring resonator* ($N = 1$); keliling *ring resonator* = 11916,4 μm ; konstanta attenuasi *ring resonator* (α_{ring}) = 0,8 dB/cm; konstanta attenuasi *straight waveguide* (α_{straight}) = 0,6 dB/cm; panjang TPRR (L_{straight}) = 5 cm; indeks efektif *ring resonator* ($n_{\text{eff ring}}$) = 1,6499; indeks efektif *straight waveguide* ($n_{\text{eff straight}}$) = 1,6499; panjang gelombang yang dipancarkan *laser* = 1,55 μm ; konstanta kopling (κ) = $-[0,2;0,1;0,9]$. *i; kecepatan cahaya dalam vakum $c = 2,99792458 \times 10^8$ m/s. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini merupakan parameter yang mendekati besaran - besaran pada aplikasi sistem TPRR yang sudah ada.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan ditampilkan hasil simulasi dan analisisnya. Dengan mensubsitusikan harga – harga parameter simulasi ke "(1)", untuk panjang gelombang *laser* sebesar 1,55 μm , maka *group delay* yang terjadi dapat dihitung. Jika panjang gelombang *laser* diubah, lalu dengan cara yang sama *group delay*-nya dihitung kembali, sehingga diperoleh nilai *group delay* kedua. Apabila hal ini dilakukan secara berulang-ulang setelah terlebih dahulu mengubah panjang gelombang yang dipancarkan oleh *tunable laser*, maka grafik panjang gelombang versus *group delay* akan dapat ditampilkan. Dengan menggunakan simulasi komputer program Matlab, maka *group delay* TPRR ini dapat dihitung dan hasil simulasinya dapat ditampilkan dalam grafik seperti ditunjukkan pada Gbr. 5.



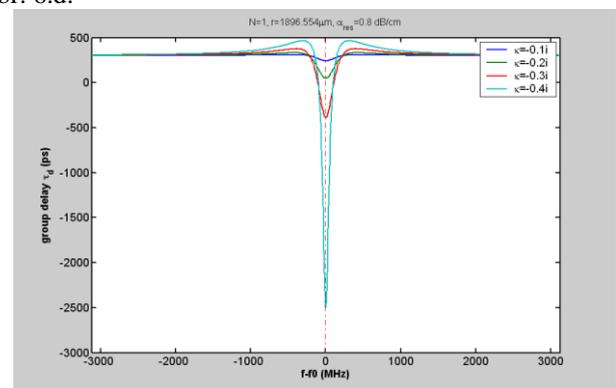
Gbr 5 Grafik $f-f_0$ vs *group delay* dengan $\kappa = -(0,2i;0,1;0,9i)$.

Gambar 5 merupakan simulasi perhitungan *group delay* berdasarkan *transfer function* untuk harga konstanta *coupling*

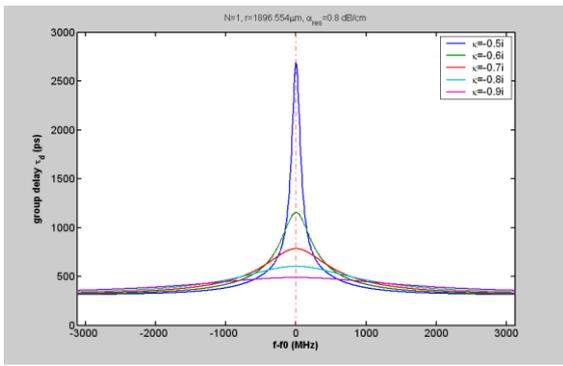
sebesar $\kappa = -0,2i$ hingga $\kappa = -0,9i$. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa terdapat beberapa kondisi atau karakteristik *group delay* tersebut antara lain:

1. Kondisi pertama adalah untuk $(f-f_0) < 0$, terdapat dua buah karakteristik *group delay* yaitu :
 - a. Pada kondisi *under coupling*, nilai *group delay* menurun secara perlahan dan kemudian menurun tajam pada saat mendekati atau mencapai *resonant wavelength*, dan pada kondisi ini, bentuk spektrumnya adalah tajam.
 - b. Pada kondisi *over coupling*, nilai *group delay* menaik secara perlahan dan kemudian menaik tajam pada saat mendekati atau mencapai *resonant wavelength*, dan pada kondisi ini, bentuk spektrum grafiknya adalah tajam.
2. Kondisi kedua adalah untuk $(f-f_0) > 0$, terdapat dua buah karakteristik *group delay* yaitu :
 - a. Pada kondisi *under coupling*, nilai *group delay* menaik secara tajam ketika melewati *resonant wavelength*, dan kemudian menaik secara perlahan.
 - b. Pada kondisi *over coupling*, nilai *group delay* pada TPRR menurun secara tajam pada saat melewati *resonant wavelength* dan kemudian menurun secara perlahan.
3. Kondisi menurun dan naiknya nilai *group delay*, tidak sama untuk setiap konstanta kopling.
4. Dalam penelitian ini, pada saat *resonant wavelength*, *group delay* akan mencapai nilai yang minimum pada kondisi $\kappa = -0,4i$ dan mencapai nilai maksimum pada kondisi $\kappa = -0,5i$.
5. Berdasarkan grafik, bentuk spektrum semakin tajam pada saat kondisi *resonant wavelength*, bentuk spektrum paling tajam terjadi pada kondisi konstanta kopling $\kappa = -0,4i$ dan $\kappa = -0,5i$.
6. Pada titik *resonant wavelength*, dapat dilihat bahwa titik puncak masing masing konstanta kopling semakin rendah mulai dari harga $\kappa = -0,2i$ dan minimum pada $\kappa = -0,4i$, lalu tiba – tiba naik dan menjadi maksimum pada saat harga $\kappa = -0,5i$ dan seterusnya turun kembali untuk harga $\kappa = -0,6i$ hingga $\kappa = -0,9$.
7. *Under coupling* terjadi pada harga $\kappa = -0,2i$ hingga $\kappa = -0,4i$, dan *over coupling* terjadi pada harga $\kappa = -0,5i$ hingga $\kappa = -0,9i$.

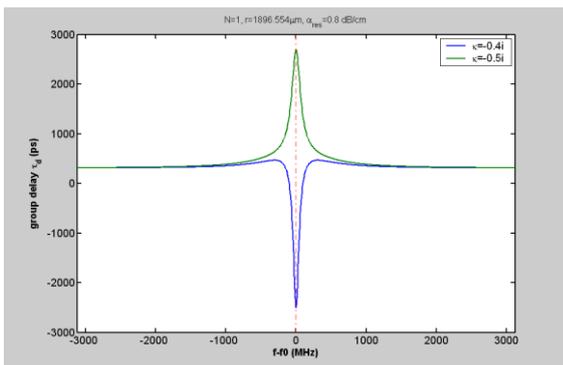
Apabila spektrum *group delay* berdasarkan kondisi konstanta kopling di atas ditampilkan, maka akan diperoleh gambar seperti yang ditunjukkan oleh Gbr. 6.a; 6.b; 6.c dan Gbr. 6.d.



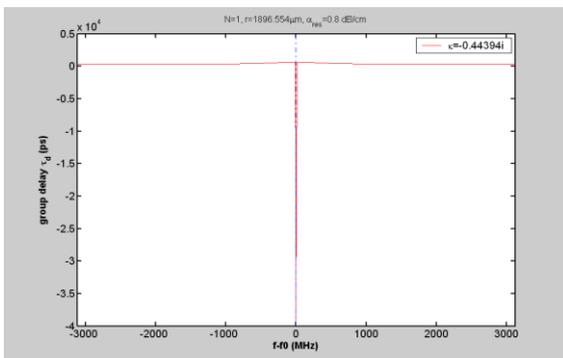
Gbr. 6.a Grafik $f-f_0$ vs *group delay* untuk *under coupling* ($\kappa = -0,1i$ hingga $\kappa = -0,4i$).



Gbr. 6.b Grafik f-f₀ vs group delay untuk over coupling (κ = -0,5 hingga κ = -0,9i).



Gbr. 6.c Grafik f-f₀ vs group delay untuk konstanta kopling yang paling dekat ke critical couplig (κ = -0,4i dan κ = -0,5i).



Gbr. 6.d Grafik f-f₀ vs group delay untuk kondisi critical coupling (κ = -i0,44394).

Berdasarkan Gbr. 6, dapat diberi pemahaman sebagai berikut:

- a. Pada kondisi *under coupling* (κ = -0,1i hingga κ = -0,4i), *group delay* bernilai negatif. *Group delay* turun tajam pada saat mendekati resonansi dan naik drastis sesaat setelah melewatinya.
- b. Pada kondisi *over coupling* (κ = -0,5i hingga κ = -0,9i), *group delay* bernilai positif. *Group delay* naik tajam pada saat mendekati *resonant wavelength* dan turun drastis sesaat setelah melewatinya.
- c. Pada kondisi konstanta *coupling* paling dekat ke *critical coupling* (Gbr. 6.c), pada titik *resonant wavelength*, *group delay* bernilai minimum untuk κ = -0,4i dan tiba – tiba bernilai maksimum pada κ = -0,5i.
- d. Pada kondisi *critical coupling* di mana κ = -0,44394i, pada titik *resonant wavelength*, *group delay* yang terjadi bernilai negatif dengan bentuk spektrum yang sangat tajam.

Critical coupling adalah suatu kondisi konstanta kopling di mana sinyal yang dikirimkan ke rangkaian TPRR, ketika

masuk ke dalam *ring resonator*, tidak ada sinyal yang keluar, tetapi sinyal tersebut berputar-putar di dalam *ring resonator* saja sehingga *group delay* menjadi tak terhingga. Dalam penelitian ini, sesuai dengan parameter perhitungan maka $\alpha_{res,lin} = 9,2103 \text{ 1/m}$ diperoleh $\gamma = \exp(\theta_l) = \exp(-2\pi\alpha_{res,lin}) = \exp(-2\pi \times 0,0019 \times 9,2103) = 0,8961$. Dengan demikian, maka $\tau_{critical} = \gamma = 0,8961$. Karena menurut persamaan bahwa $\tau = -i\sqrt{(1-|\kappa|^2)}$, maka: $\tau_{critical} = -i\sqrt{(1-|\kappa_{critical}|^2)}$, sehingga: $\kappa_{critical} = -i0,44394$.

Jadi, titik *critical coupling* sangat dipengaruhi oleh konstanta attenuasi yang terdapat pada *ring resonator*. Jika konstanta attenuasi berubah, maka titik *critical coupling* akan berubah sehingga kondisi *under coupling* dan *over coupling* juga akan berubah. Berdasarkan perhitungan di atas, maka dalam penelitian ini, untuk konstanta kopling yang berada di bawah *critical coupling* ($|\kappa_{critical}| = 0,44394$) yaitu $|\kappa| = 0,1$ hingga $|\kappa| = 0,4$ adalah sebagai posisi *under coupling*, dan untuk kondisi konstanta kopling yang berada di atas *critical coupling* yaitu $|\kappa| = 0,5$ hingga $|\kappa| = 0,9$ adalah kondisi *over coupling*. Pemahaman lain dari analisa ini adalah bahwa attenuasi yang selama ini kita anggap sebagai penyebab degradasi sinyal, diperoleh pemahaman bahwa attenuasi juga dapat sekaligus dimanfaatkan dalam mengkopling cahaya ke dalam sebuah *ring resonator* sehingga cahaya tersebut tidak keluar dari dalam *ring resonator* tersebut dan *statement* ini merupakan konsep dari sebuah memori atau media penyimpanan informasi.

Sementara itu, *resonant wavelength* yang diamati adalah yang terjadi pada panjang gelombang yang paling dekat dengan panjang gelombang yang pancarkan oleh *laser* yang digunakan. Pada penelitian ini, karena panjang gelombang yang diamati adalah sebesar 1,55 μm, maka *resonant wavelength* akan diamati pada panjang gelombang yang dekat dengan 1,55 μm dan berdasarkan perhitungan yang dilakukan, diperoleh gelombang resonansi (*resonant wavelength*) λ_0 adalah $\lambda_0 = 15499,583 \text{ Amstrong}$ atau 1549,9583 nm.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan parameter yang digunakan dan hasil simulasi yang dilakukan, diperoleh kesimpulan mengenai analisis perhitungan *group delay* pada rangkaian *two-port ring-resonator* antara lain:

1. Dalam penelitian ini diperoleh bahwa *critical coupling* terjadi pada saat κ sebesar -0,44394i.
2. Berdasarkan *critical coupling* yang terjadi, *under coupling* adalah untuk κ = -0,1i hingga κ = -0,4i dimana nilai *group delay* pada kondisi tersebut adalah negatif; *over coupling* adalah untuk κ = -0,5i hingga κ = -0,9i dimana nilai *group delay* pada kondisi tersebut adalah positif.
3. Menurut hasil simulasi, pada kondisi *critical coupling*, spektrum *group delay* adalah sangat tajam sehingga dapat dikatakan bahwa nilai *group delay* sangat dipengaruhi oleh konstanta kopling.
4. Dalam penelitian ini, *resonant wavelength* terjadi pada panjang gelombang sebesar 15499,583 Amstrong atau 1549,9583 nm.

REFERENSI

- [1] Robert W. Boyd, Daniel J. Gauthier, ““Slow” and “fast” light”, The institute of optics University of Rochester, New York 14627 USA, September 24, 2001.

- [2] H. P. Uranus and H. J. W. M. Hoekstra, "Modeling of Loss-induced Superluminal and Negative Group Velocity in Two-port Ring-resonator Circuits," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 25, No. 9, Sept. 2007, pp.2376-2384. ISSN 0733-8724. (<http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2007.901524>).
- [3] Libianko Sianturi and Henri P. Uranus, "Theoretical Assessment on the Accuracy of Phase Shift Method in Measuring the Group Delay of Optical Two-Port Ring-Resonator Circuit," *Procedia Engineering*, Vol. 50, Oct. 2012, pp.748-757. ISSN 1877-7058 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.10.082>).
- [4] Joseph C. Palais, "Fiber optic communications", 5th edition, Pearson Prantice Hall, 2005.
- [5] Gerd Keiser, "Optical fiber communications", Second edition, McGraw Hill Inc., 1991.
- [6] C. K. Madsen and J. H. Zhao, "Optical filter design and analysis: a signal processing approach", John Wiley and sons, 1999.
- [7] H.P. Uranus, L. Zhuang, C.G.H. Roeloffzen, and H.J.W.M. Hoekstra, "Observing 'Back-to-the-future' phenomenon with photonic chip", Seminar on "Photonic: Theory, Technology and Application", 2008.
- [8] H. P. Uranus, L. Zhuang, C.G.H. Roeloffzen, and H.J.W.M. Hoekstra, "Direct experimental observation of pulse temporal behavior in integrated-optical ring-resonator with negative group velocity", post deadline paper FPD, *European Conf. on Integrated Optics (ECIO)* 2007, Copenhagen Denmark, 25-26 April 2007.
- [9] *Agilent PNA Network Analyzers*, "Using the PNA series to analyze lightwave components", Agilent Technologies, Inc. Printed in USA, 5989-3385EN, June 2005.
- [10] H.P. Uranus, L. Zhuang, C.G.H. Roeloffzen, and H.J.W.M. Hoekstra, "Pulse transmission across a single optical ring-resonator with negative group velocity: theory and experiment", Proc. Symposium of Nanophotonics, *IEEE Photonics Global at Singapore 2008*, Conf., 8-11 Dec. 2008, pp A-139-A142.
- [11] H. P. Uranus, L. Zhuang, C.G.H. Roeloffzen, and H. J. W. M. Hoekstra, "Pulse Advancement and Delay in An Integrated Optical Two-Port Ring-Resonator Circuit: Direct Experimental Observations," *Optics Letters*, Vol. 32, No. 17, Sept. 2007, pp. 2620-2622. ISSN 0146-9592 (print) ISSN 1539-4794 (online). (<http://dx.doi.org/10.1364/OL.32.002620>).
- [12] H.P. Uranus, and H.J.W.M. Hoekstra, "Numerical observation of negative group velocity in a two-port ring-resonator circuit and its potential for sensing applications", *Proceeding Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*, Eindhoven, 2006.
- [13] A. Agarwal, P. Toliver, R. Menendez, S. Etemad, J. Jackel, J. Young, T. Banwell, "Fully-programmable ring resonator based integrated photonic circuit for phase coherent applications", *Telcordia Technologies, Red Bank, NJ 07701 USA*, 2005.
- [14] J.M. Bendickson, J.P. Dowling, and M. Scalora, "Analytic expressions for the electromagnetic mode density in finite, one-dimensional, photonic band-gap structure," *Phys. Rev. E, Stat. Phys. Plasmas Fluids Reat Interdiscip. Top.*, vol.53, no. 4, pp.4107-4121, Apr. 1996.