

Pergeseran *Transmission Zeros* Akibat Perubahan Komponen Penggandeng Silang

Mudrik Alaydrus

Teknik Elektro, Universitas Mercu Buana, Jakarta
mudrikalaydrus@yahoo.com

Abstrak

Filter memainkan peranan yang penting dalam pemrosesan data. Di dalam teknik telekomunikasi, filter memilih sinyal terima/pancar yang diinginkan dengan membuang sinyal lainnya. Filter digunakan untuk memisahkan sinyal-sinyal yang memiliki frekuensi yang berbeda. Filter digunakan untuk memilih atau membatasi sinyal frekuensi radio atau gelombang mikro ini dalam batas spektral yang telah disepakati. Aplikasi-aplikasi telekomunikasi yang muncul memberikan batasan-batasan yang sangat kritis, sehingga spesifikasi filter yang diberikan memiliki kinerja yang sangat tinggi, seperti performansi yang lebih tinggi, fungsionalitas yang lebih, kemampuan untuk bisa di-tuning, bisa direkonfigurasi, ukuran yang mini, bobot yang ringan serta bisa diproduksi dengan biaya yang rendah. Pendekatan Butterworth dan Chebychev dalam mendapatkan spesifikasi filter adalah cara awal yang diperkenalkan melalui teknik penggandengan langsung antar resonator, baik dalam teknologi koaxial, waveguide ataupun mikrostrip. Teknik penggandengan secara silang antara resonator yang tidak saling berdekatan memperbaiki selektivitas filter di sekitar wilayah transisi lolos dan stop karena kemunculan *transmission zeros* (TZ). Tergantung dari jenis penggandengan silang ini, induktif ataupun kapasitif, dan tergantung dari nilai komponennya, TZ akan memiliki suatu posisi-posisi tertentu. Penggandengan silang simetris memberikan TZ ganda di bagian atas dan bawah dari wilayah lolos, sedangkan penggandengan silang asimetris hanya memberikan TZ tunggal, di sebelah atas wilayah lolos untuk penggandeng induktif dan sebelah bawah untuk penggandeng kapasitif. Nilai kapasitor atau induktor ini berada pada suatu interval tertentu sehingga dihasilkan faktor transmisi yang sesuai dengan spesifikasi kerja dari filter

Keywords: *Cross-coupling*, Filter lolos tengah, Penggandengan langsung, Penggandengan Silang, *Transmission Zeros*

Received Maret 2014

Accepted for Publication May 2014

1. PENDAHULUAN

Filter digunakan untuk memisahkan sinyal-sinyal yang memiliki frekuensi yang berbeda [1, 2]. Pita spektrum elektromagnetik adalah sumber yang terbatas (resource) yang dimanfaatkan oleh teknologi nirkabel dan harus dibagi. Filter digunakan untuk memilih atau membatasi sinyal frekuensi radio (*radio frequency*/RF) atau gelombang mikro (*microwave*/MW) ini dalam batas spektral yang telah disepakati. Aplikasi-aplikasi telekomunikasi yang muncul memberikan

batasan-batasan yang sangat kritis, spesifikasi filter yang diberikan memiliki kinerja yang sangat tinggi, seperti performansi yang lebih tinggi, fungsionalitas yang lebih, kemampuan untuk bisa di-tuning, bisa direkonfigurasi, ukuran yang mini, bobot yang ringan serta bisa diproduksi dengan biaya yang rendah. Monograf [3] yang merupakan kumpulan riset original membahas sejarah dan perkembangan filter untuk memenuhi tuntutan aplikasi yang ada. Pendekatan Butterworth dan Chebychev dalam mendapatkan spesifikasi filter adalah cara awal yang diperkenalkan oleh Cohn di tahun 1957 melalui teknik penggandengan langsung (*direct coupling*) antar resonator, Levy di tahun 1967 mengaplikasikan dalam teknik waveguide secara *direct-coupled-cavity*. Di [4] dibahas perancangan filter dengan penggandengan langsung ini dalam teknologi mikrostrip pada frekuensi 3.2 GHz. Publikasi [5] memberikan suatu prosedur otomatis perancangan filter bandpass yang tergandeng langsung dengan bantuan MATLAB, yang mana teknologi yang digunakan adalah mikrostrip paralel. Lapidus dan Rossiter [6] memberikan uraian tentang filter yang tergandeng secara silang dengan teknologi koaxial dan waveguide. Teknik penggandengan secara silang ini menyebabkan munculnya transmission zeros (TZ) pada frekuensi yang hingga (*finite frequency*) sehingga memperbaiki selektivitas filter di sekitar wilayah transisi lolos dan stop. Implementasi proses perancangan filter dengan TZ yang memiliki posisi bebas dilakukan dalam bahasa pemrograman MATLAB, output yang diberikan penelitian [7] ini adalah matriks penggandengan (*coupling matrix*), yang bisa digunakan untuk perancangan lebih lanjut yang diberikan di [8, 9]. Kedua penelitian di atas mengimplementasikan hasil perancangan dalam teknologi mikrostrip.

Di penelitian ini akan dilakukan studi parameter variasi nilai komponen yang terlibat dalam penggandengan silang antar resonator. Dasar dari penelitian ini adalah publikasi Wenzel [10]. Diamati sebuah filter Chebychev dengan empat resonator yang tergandeng secara langsung. Di penelitian ini dilakukan penggandengan silang simetris dan asimetris dengan kapasitor atau dengan induktor. Perubahan nilai komponen ini memberikan posisi-posisi *transmission zeros* yang bergeser.

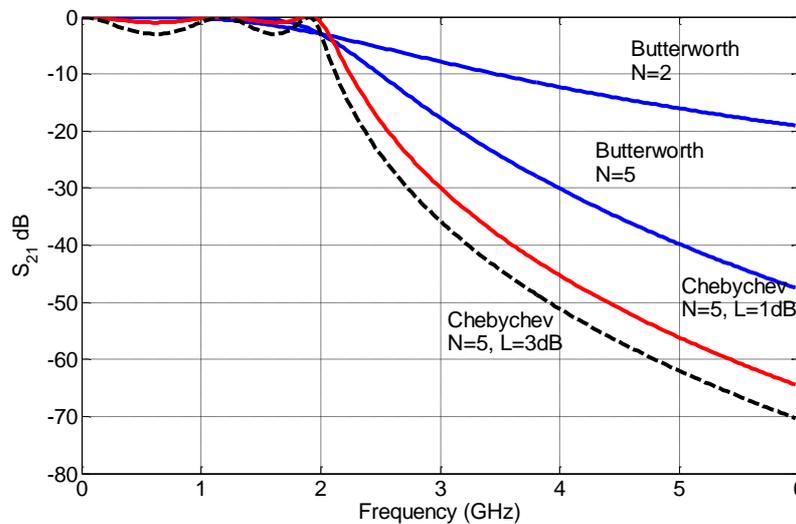
2. FILTER DENGAN PENGGANDENGAN LANGSUNG DAN SILANG

Filter bertugas menyaring sinyal yang terletak pada wilayah spektrum yang berbeda-beda. Filter akan meloloskan sinyal yang memiliki frekuensi pada wilayah lolos dari filter ini (*pass band*) dan menahan atau menolak sinyal-sinyal yang berada di luar wilayah lolos (*stop band*).

Dalam merealisasikan tuntutan dari lapangan, bisa digunakan beberapa pendekatan perancangan filter, seperti pendekatan Butterworth dan Chebychev [1, 2]. Pendekatan Butterworth menggunakan prinsip *maximal flat* pada wilayah lolosnya, dan nilai faktor transmisi S_{21} secara monoton akan mengecil menuju nol (atau $-\infty$ dB). Untuk mendapatkan ketajaman yang lebih tinggi (*filter selectivity* yang lebih baik), ordo filter dinaikkan. Gambar 1 menunjukkan perbandingan S_{21} untuk pendekatan Butterworth dengan ordo $N=2$ dan $N=5$. Ketajaman filter bisa dilihat contohnya pada frekuensi 4 GHz, filter Butterworth dengan ordo $N=2$ meredam sinyal sebesar sekitar 13 dB, sedangkan dengan ordo $N=5$ meredam dengan 30 dB.

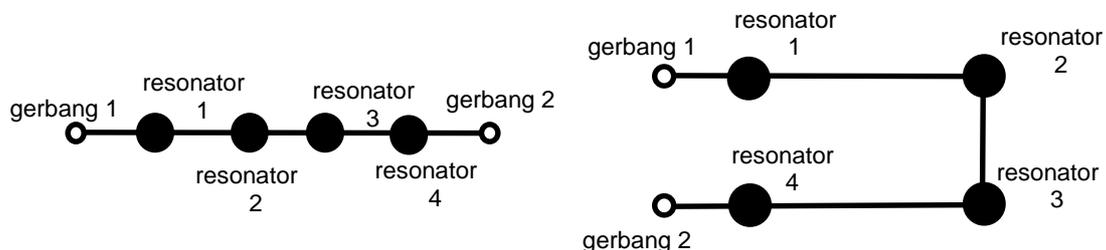
Pendekatan Chebychev menawarkan hal menarik yang didapatkan dengan merujuk pada kondisi di lapangan. Pada banyak aplikasi, faktor transmisi pada wilayah lolos tidak harus nol. Peredaman di wilayah ini boleh mengambil suatu faktor reduksi maksimal tertentu L . Dengan mengizinkan hal ini, bisa dihasilkan suatu selektifitas filter yang lebih baik. Di gambar 1 juga ditunjukkan filter dengan pendekatan Chebychev yang mengizinkan reduksi maksimal dari sinyal masing-masing sebesar $L = 1$ dB dan $L = 3$ dB. Dengan ordo yang sama $N = 5$, didapatkan masing-masing peredaman sebesar 46 dB dan 52 dB.

Jadi, perbaikan selektivitas filter bisa didapatkan dengan cara memperbesar ordo, yang menyebabkan rangkaian membesar karena dibutuhkan tempat untuk komponen tambahan, atau dengan cara ‘mengorbankan’ peredaman pada wilayah lolos, berupa *ripple* atau fluktuasi nilai dari 0 dB sampai redaman L .



Gambar 1 Perbandingan faktor transmisi dari filter Butterworth dan Chebychev.

Filter dengan pendekatan Butterworth dan Chebychev direalisasikan dalam bentuk penggandengan langsung (*direct-coupled resonators*) dari resonator-resonator yang dilibatkan dalam filter ini. Gambar 2 menunjukkan topologi filter dengan empat resonator yang saling terganggu secara langsung. Penggandengan bisa terjadi secara induktif, kapasitif ataupun campuran (*mixed*).

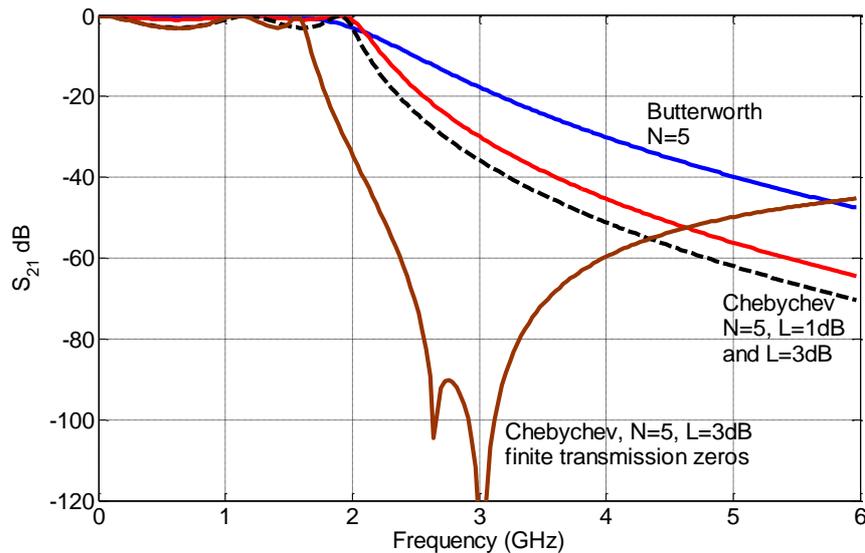


Gambar 2 Topologi filter yang resonatornya saling terganggu secara langsung.

Untuk mendapatkan selektifitas yang lebih tinggi, di samping menaikkan ordo filter, ataupun menaikkan *ripple factor* L , ada cara lain yang bisa dilakukan.

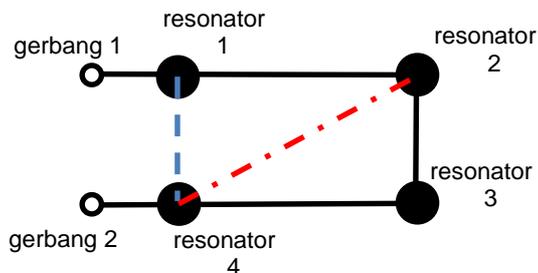
Selektifitas filter akan didapatkan dalam bentuk *transmission zeros* pada frekuensi tertentu di wilayah transisi atau di wilayah tolak. Posisi *transmission zeros* pada wilayah ini dikatakan terletak pada *finite frequencies*.

Gambar 3 menunjukkan perbandingan faktor transmisi untuk filter yang memiliki *transmission zeros* pada *finite frequencies*. Posisi dari *transmission zeros* ini bisa diatur sedemikian rupa, sehingga tuntutan spesifikasi yang diberikan bisa dipenuhi. Dari contoh di gambar 3 terlihat, pada frekuensi sekitar 3 GHz bisa diatur didapatkan peredaman lebih dari 100 dB.



Gambar 3 Perbandingan faktor transmisi dari filter dengan penggandengan langsung (Butterworth dan Chebyshev) dan filter dengan penggandengan langsung dan silang.

Salah satu cara untuk mendapatkan *transmission zeros* seperti itu adalah dengan menghubungkan (menggandeng) resonator yang tidak bersebelahan. Tipe gandingan yang tidak langsung ini dinamakan penggandengan silang (*cross coupling*). Gambar 4 menunjukkan dua buah penggandengan silang; penggandengan silang simetris antara resonator 1 dan 4, yang akan menghasilkan *transmission zeros* yang simetris (dua buah), dan penggandengan silang asimetris (tidak simetris) antara resonator 2 dan 4 (atau resonator 1 dan 3), yang akan menghasilkan *transmission zero* yang tidak simetris (tunggal).

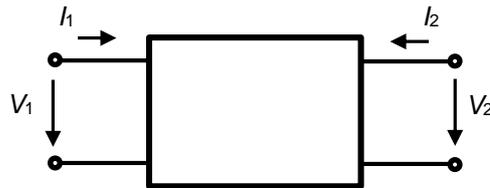


Gambar 4 Topologi filter dengan penggandengan silang, secara simetris (penggandengan resonator 1 dan 4) dan secara asimetris (penggandengan resonator 2 dan 4).

3. TEORI DUA GERBANG PADA RANGKAIAN GELOMBANG MIKRO [11]

3.1 Matriks Admitansi [Y]

Rangkaian dua gerbang adalah sebuah *black box*, yang di dalamnya terdapat komponen-komponen yang terkoneksi, yang bisa diakses pada dua gerbang (*port*). Untuk kebutuhan analisa rangkaian dua gerbang ini, pada masing-masing gerbang digunakan tegangan dan arus, seperti yang ditunjukkan di gambar 5.



Gambar 5 Rangkaian dua gerbang dengan tegangan dan arus pada gerbang masukan (1) dan keluaran (2).

Besaran-besaran sinyal ini satu sama lain saling terkait melalui besaran yang dimiliki oleh rangkaian dua gerbang di atas. Dengan mengandaikan hanya komponen pasif yang terlibat di dalamnya, besaran-besaran ini biasanya berupa impedansi Z atau admitansi Y . Dengan melakukan pengandaian komponennya bersifat linier, bisa diformulasikan dua hubungan berikut ini,

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \quad (1)$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 \quad (2)$$

Atau penulisan secara matriks

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Secara ringkas persamaan (3) bisa juga dituliskan dengan

$$[I] = [Y][V] \quad (4)$$

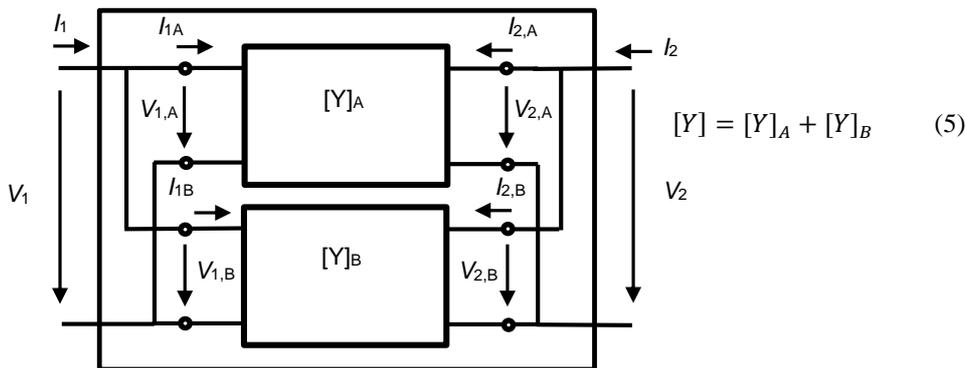
Matriks $[Y]$ dinamakan matriks admitansi, memiliki elemen Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} dan Y_{22} yang merupakan besaran internal dari rangkaian dua gerbang, yang bisa ditentukan dengan melakukan pengukuran arus dan tegangan pada gerbangnya. Penentuan elemen dari matriks admitansi $[Y]$ dilakukan dengan mengkondisikan short salah satu gerbangnya, misalnya penentuan elemen Y_{12} dilakukan dengan men-set $V_1=0$, yaitu dengan men-short gerbang 1. Sehingga dari persamaan (5) didapatkan

$$Y_{12} = \frac{I_1}{V_2}$$

I_1 adalah arus yang mengalir pada gerbang 1 dalam kondisinya yang *short*, dan V_2 adalah tegangan di gerbang 2. Elemen yang lainnya juga bisa ditentukan dengan prosedur yang sama.

Jika ada dua rangkaian dua gerbang yang digandeng secara paralel (tegangan pada gerbang 1 dan 2 dari kedua rangkaian ini bernilai sama, sedangkan arus total adalah jumlah arus yang masuk/atau keluar dari keduanya), seperti yang ditunjukkan di gambar 6, maka dihasilkan rangkaian gerbang total yang matriks admitansinya merupakan penjumlahan dari kedua matriks admitansi penyusunnya. Sehingga bisa dilakukan penyederhanaan dalam pengamatan rangkaian secara keseluruhan.

Perhitungan rangkaian dua gerbang yang paralel ini nanti akan dimanfaatkan untuk mengamati pengaruh komponen penggandeng silang, berupa impedansi atau admitansi feedback.



Gambar 6 Dua rangkaian dua gerbang yang dipasangkan paralel. Matriks admitansi rangkaian keseluruhan adalah jumlah dari matriks admitansi masing-masing rangkaian penyusunnya.

3.2 Matriks ABCD

Matriks ABCD diperkenalkan menggunakan model rangkaian dua gerbang yang sama seperti di gambar 5 tetapi dengan arah arus I_2 yang dibalik (keluar dari rangkaian menuju ke kanan). Persamaan matriks yang digunakan sebagai berikut ini

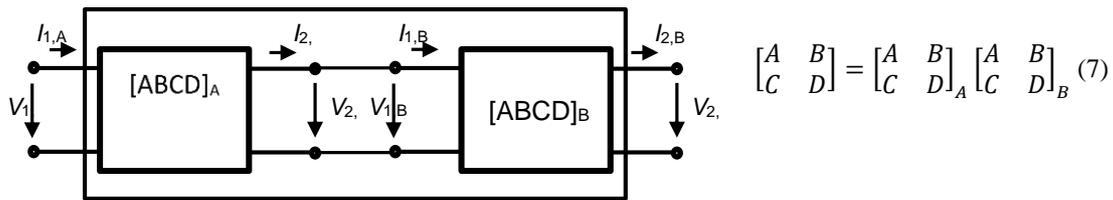
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Perhitungan dilakukan dengan prosedur yang sama, tetapi sekarang digunakan kombinasi kondisi *short* dan *open*.

$$A = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_2=0} \quad B = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{V_2=0}$$

$$C = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{I_2=0} \quad D = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{V_2=0}$$

Karakteristik dari matriks ABCD adalah: Jika ada dua rangkaian dua gerbang yang digandeng secara berbaris atau *cascaded* (arus dan tegangan gerbang 2 dari rangkaian dua gerbang pertama adalah arus dan tegangan gerbang 1 dari rangkaian dua gerbang kedua) maka dihasilkan rangkaian gerbang total yang matriks ABCD-nya merupakan perkalian dari kedua matriks.



Gambar 7 Dua rangkaian dua gerbang yang dipasangkan berbaris (*cascade*). Matriks ABCD dari rangkaian keseluruhan adalah hasil kali dari kedua matriks rangkaian penyusunnya.

3.3 Matriks *Scattering* [S]

Dalam teknik gelombang mikro, sering kali tidak digunakan tegangan dan arus. Sebagai besaran sinyal yang masuk dan keluar ke atau dari dalam suatu rangkaian lebih sering digunakan gelombang, yang dinyatakan dengan a_n sebagai gelombang yang masuk ke dalam rangkaian pada gerbang n dan b_n sebagai gelombang yang keluar dari rangkaian melalui gerbang n . Gambar 8 menunjukkan kondisi ini. Dari definisi, gelombang yang masuk ke dalam rangkaian memiliki daya $a_n^2/2$ dan daya yang keluar $b_n^2/2$.



Gambar 8 Rangkaian gelombang mikro yang dikarakteristikan dengan matriks scattering.

Keempat besaran gelombang pada gambar 8 saling terkait melalui persamaan matriks berikut ini

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Jika di sisi kiri dari rangkaian dua gerbang di gambar 8, dipasangkan sebuah sumber gelombang mikro, akan masuk gelombang a_1 ke dalam rangkaian. Sebagian gelombang akan langsung direfleksikan balik oleh gelombang, dan sebagian lainnya akan diteruskan ke sisi kanan (*output*), sisi beban. Jika beban yang dipasangkan di rangkaian ini memberikan kondisi matching, gelombang yang menuju beban ini akan dikonsumsi secara sempurna, atau $a_2 = 0$. Dengan cara seperti ini, koefisien dari matriks scattering bisa ditentukan. Dengan kondisi beban matching pada gerbang 2, atau $a_2 = 0$, maka

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \qquad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}$$

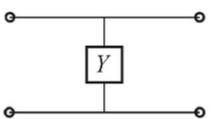
Jika rangkaian di atas dibalik, dan gerbang 1 dipasangkan beban matching, maka didapatkan

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \qquad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}$$

3.4 Perhitungan antar Matriks

Di bagian ini akan dibahas konversi antara matriks-matriks. Koefisien dari matriks bisa ditentukan dengan cara mengkondisikan short pada gerbang 1 atau 2 atau dengan mengkondisikan match pada gerbang 1 atau 2.

Terlebih dahulu ditunjukkan gambar 9 yang memberikan struktur dasar rangkaian yang digunakan secara intensif di pembahasan filter nanti.

Rangkaian	Matriks ABCD	Matriks Admitansi
	$A = 1, B = Z$	$Y_{11} = 1/Z, Y_{12} = -1/Z$
	$C = 0, D = 1$	$Y_{21} = -1/Z, Y_{22} = 1/Z$
	$A = 1, B = 0$ $C = Y, D = 1$	--

Gambar 9 Matriks ABCD dan matriks admitansi dari dua struktur dasar rangkaian listrik.

Di gambar 9, struktur Y parallel tidak memiliki matriks admitansi, karena kondisi short pada gerbang 2 ataupun gerbang 1 akan membuat seluruh sistem menjadi short.

Konversi antar matriks yang diperlukan di penelitian ini sebagai berikut, konversi matriks admintansi ke matriks ABCD

$$\begin{aligned} A &= -Y_{22}/Y_{21} & B &= -1/Y_{21} \\ C &= -(Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21})/Y_{21} & D &= -Y_{11}/Y_{21} \end{aligned} \qquad (9)$$

Konversi matriks ABCD ke matriks admitansi

$$\begin{aligned} Y_{11} &= D/B & Y_{12} &= -(AD - BC)/B \\ Y_{21} &= -1/B & Y_{22} &= A/B \end{aligned} \qquad (10)$$

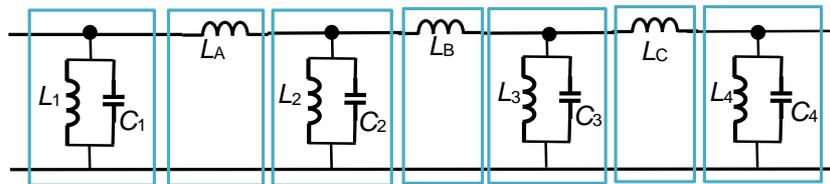
Dan konversi matriks ABCD ke matriks scattering

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{A + \frac{B}{Z_0} - CZ_0 - D}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} & S_{12} &= \frac{2(AD - BC)}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} \\ S_{21} &= \frac{2}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} & S_{22} &= \frac{-A + \frac{B}{Z_0} - CZ_0 + D}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} \end{aligned} \qquad (11)$$

Perhitungan akhir dari rangkaian ini adalah memberikan nilai faktor refleksi S_{11} dan faktor transmisi S_{21} dari rangkaian lengkap dalam suatu interval frekuensi kerja tertentu.

3.5 Penggunaan Matriks pada Struktur Filter Lolos Tengah

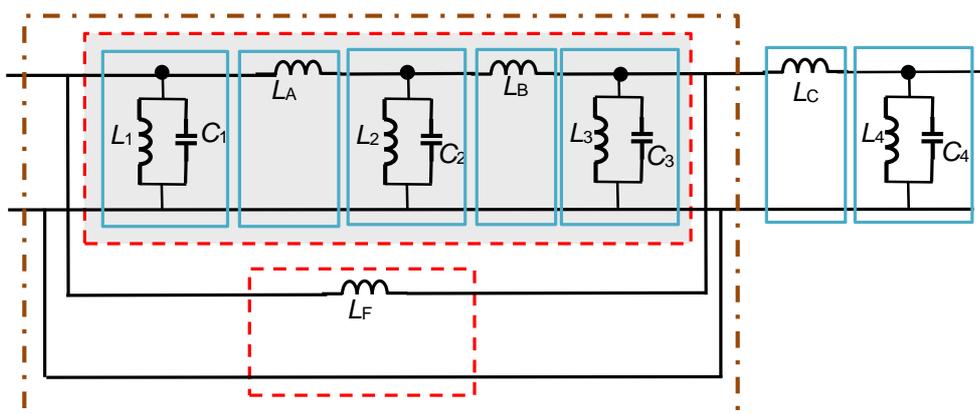
Matriks yang diberikan pada bagian yang lalu, digunakan untuk menghitung faktor transmisi dan faktor refleksi dari struktur filter lolos tengah. Prosedur yang dilakukan adalah dengan menguraikan rangkaian filter yang kompleks menjadi rangkaian-rangkaian bagian yang sederhana, yang bisa diterangkan sebagai rangkaian dua gerbang dengan matriks pengenalnya. Dengan bantuan perhitungan rangkaian paralel dan rangkaian *cascaded*, rangkaian-rangkaian bagian ini akan digabungkan kembali menjadi rangkaian lengkap yang utuh. Merujuk pada kedua gerbangnya, akan diberikan nilai faktor refleksi S_{11} dan faktor transmisi S_{21} .



Gambar 10 Rangkaian filter lolos tengah dengan empat resonator yang terhubung secara induktif.

Gambar 10 menunjukkan sebuah filter lolos tengah dengan empat resonator yang terhubung secara induktif. Rangkaian lengkap ini diuraikan menjadi tujuh buah rangkaian dua gerbang yang sederhana, yang ditunjukkan di gambar 9, dengan impedansi $Z = j\omega L_P$ (dengan $P=A, B$ atau C) dan admitansi $Y = j(\omega C_i - 1/\omega L_i)$ (dengan $i=1, 2, 3$ atau 4). Masing-masing rangkaian dua gerbang ini memiliki matriks ABCD yang berbeda-beda tergantung dari nilai masing-masing komponen penyusunnya.

Ketujuh rangkaian ini akan digabungkan kembali menggunakan persamaan (7), yang dengan bantuan persamaan (11) bisa ditentukan faktor refleksi dan transmisinya.



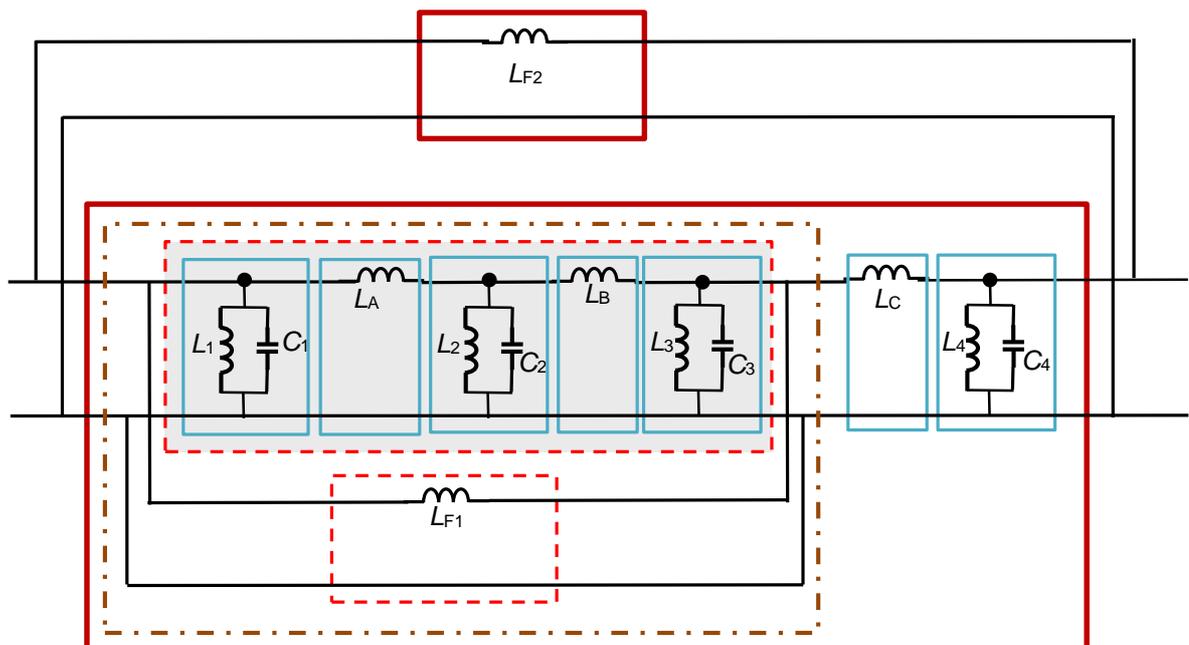
Gambar 11 Rangkaian filter lolos tengah dengan empat resonator yang terhubung secara induktif dan sebuah induktor penggandeng resonator 1 dan 3.

Implementasi penggandengan silang antara resonator 1 dan 3 secara induktif, bisa diilustrasikan sebagai rangkaian feedback yang terhubung secara paralel

dengan sisi input rangkaian pertama dan sisi output rangkaian kelima. Gambar 11 menunjukkan posisi dari induktor ini terhadap rangkaian filter dasar.

Penggabungan rangkaian-rangkaian dasar dilakukan secara suksessif. Pertama, lima rangkaian yang tersambung secara *cascaded* digabungkan dengan bantuan persamaan (7). Sehingga didapatkan rangkaian yang berada di dalam kotak merah putus-putus. Komponen feedback L_F terletak secara paralel dengan rangkaian ini. Sehingga matriks ABCD akan dikonversikan menjadi matriks admitansi dengan bantuan persamaan (10), yang akan dijumlahkan dengan matriks admitansi dari rangkaian feedback sesuai dengan gambar 9. Hasil dari penjumlahan matriks admitansi adalah rangkaian yang di gambar 11 berada di dalam kotak garis putus titik. Matriks admitansi dikonversikan kembali menjadi matriks ABCD dengan persamaan (9), yang kemudian digabungkan dengan dua rangkaian lainnya dengan bantuan persamaan (7). Sehingga didapatkan matriks ABCD untuk rangkaian lengkap.

Gambar 12 menunjukkan rangkaian filter dengan dua penggandengan silang, yaitu penggandengan antara resonator 1 dan resonator 3 dan penggandengan antara resonator 1 dan resonator 4.



Gambar 12 Rangkaian filter lolos tengah dengan empat resonator yang terhubung secara induktif dan induktor penggandeng resonator 1 dan 3 dan resonator 1 dan 4.

Penguraian rangkaian di gambar 12 menunjukkan proses penggabungan kembali rangkaian-rangkaian dasar ini menjadi rangkaian lengkap filter lolos tengah dengan penggandeng silang.

4. SIMULASI

4.1 Filter lolos tengah dengan empat resonator yang tergendeng langsung secara induktif

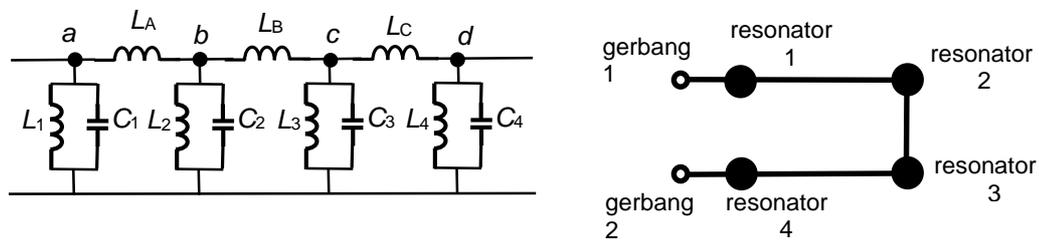
Filter lolos tengah yang dibahas di bagian ini akan dijadikan pembanding bagi filter-filter lainnya. Filter yang dirancang memiliki bentuk dan topologi seperti yang diberikan di gambar 13. Strategi yang digunakan adalah menggunakan pendekatan Chebychev dengan $L = 0.01$ dB dengan ordo 7 (hanya empat nilai yang akan diambil, yaitu bagian paralel). Frekuensi bawah diatur $f_1 = 5.35$ GHz dan frekuensi atas $f_2 = 5.6$ GHz dan impedansi gelombang 50 Ohm. Dengan menggunakan pendekatan Chebychev standar dan transformasi frekuensi dengan data di atas, didapatkan resonator berupa rangkaian paralel kapasitor dan induktor

$$\begin{array}{ll}
 C_1= 10.15 \text{ pF}, & L_1=83.32 \text{ pH} \\
 C_2= 22.26 \text{ pF}, & L_2=37.98 \text{ pH} \\
 C_3=22.26 \text{ pF}, & L_3=37.98 \text{ pF} \\
 C_4=10.15 \text{ pF}, & L_4=83.32 \text{ pH}
 \end{array}$$

Bagian yang serial, yang seharusnya juga terdiri dari kapasitor dan induktor yang terpasang serial, diganti dengan induktor berikut ini

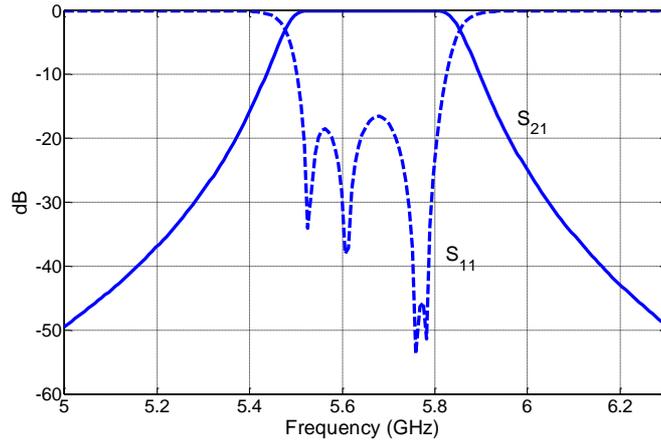
$$L_A=1.1 \text{ nH}, \quad L_B=1 \text{ nH}, \quad L_C=1.1 \text{ nH}$$

Nilai induktor yang baru ini dipilih sehingga didapatkan faktor refleksi yang cukup baik pada wilayah lolos tengah (< -15 dB).



Gambar 13 (kiri) rangkaian filter lolos tengah dengan empat resonator (direct-coupled), (kanan) topologi filter tergendeng langsung

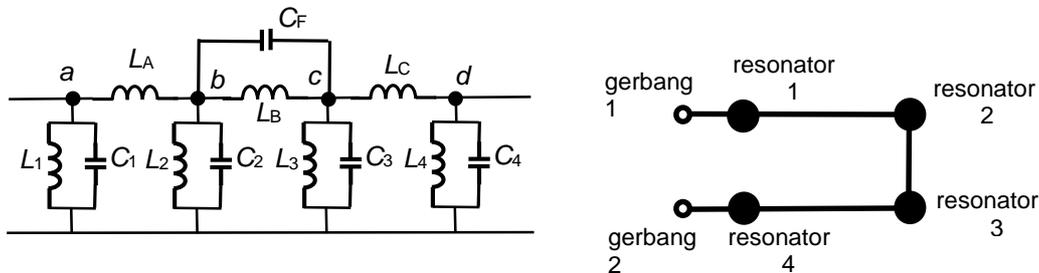
Hasil perhitungan faktor refleksi dan transmisi dari filter ini ditampilkan di gambar 14. Wilayah kerja filter ($S_{21} > -3$ dB) adalah 5.477 GHz – 5.854 GHz, dengan faktor refleksi yang lebih kecil dari -15 dB. Di luar wilayah lolos, S_{21} seperti yang diharapkan mengecil secara monoton.



Gambar 14 Faktor refleksi dan transmisi filter lolos tengah (direct-coupled).

4.2 Filter lolos tengah dengan kapasitor paralel

Untuk mendapatkan *transmission zeros* pada frekuensi tertentu, ditambahkan sebuah kapasitor secara paralel dengan salah satu induktor yang serial. Gambar 15 kiri menunjukkan rangkaian dengan tambahan kapasitor C_F yang paralel dengan induktor L_B . Gambar 15 kanan menunjukkan topologi rangkaian ini. Walaupun tambahan kapasitor paralel ini memberikan dampak yang signifikan terhadap faktor transmisi filter, tetapi secara topologi tidak berubah, tetap penggandengan langsung.

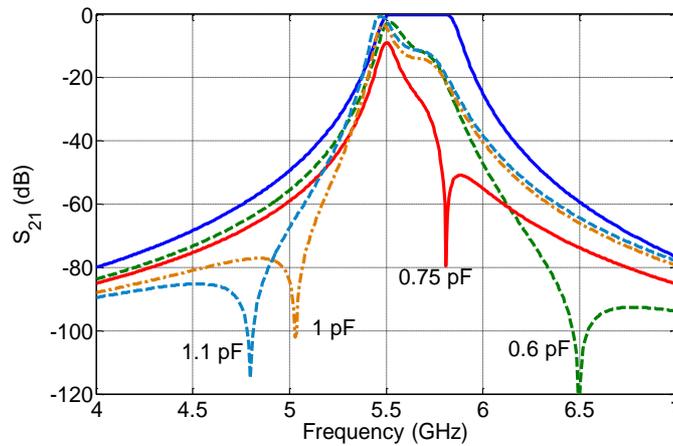


Gambar 15 (kiri) rangkaian filter lolos tengah dengan tambahan kapasitor paralel, (kanan) topologi filter tergangdeng langsung dengan tambahan kapasitor paralel.

Rangkaian paralel induktor L_B dan kapasitor C_F akan beresonansi pada suatu frekuensi tertentu, yang akan memutus rangkaian, karena impedansinya menuju tak terhingga, sehingga pada frekuensi ini terbentuk *transmission zero*. Frekuensi resonansi ini bernilai $1/(2\pi\sqrt{L_B C_F})$. Sehingga dengan mudah bisa diatur posisi *transmission zero* ini, tergantung nilai kapasitor yang digunakan.

Gambar 16 menunjukkan faktor transmisi untuk berbagai nilai kapasitor paralel yang dipasangkan. Untuk nilai-nilai kapasitansi yang kecil didapatkan *transmission zero* pada posisi sebelah atas wilayah lolos, dan untuk nilai-nilai kapasitansi yang tinggi, didapatkan pada *transmission zero* posisi sebelah bawah wilayah lolos. Tepat pada posisi *transmission zero* ini, faktor transmisi filter sangat kecil (menuju

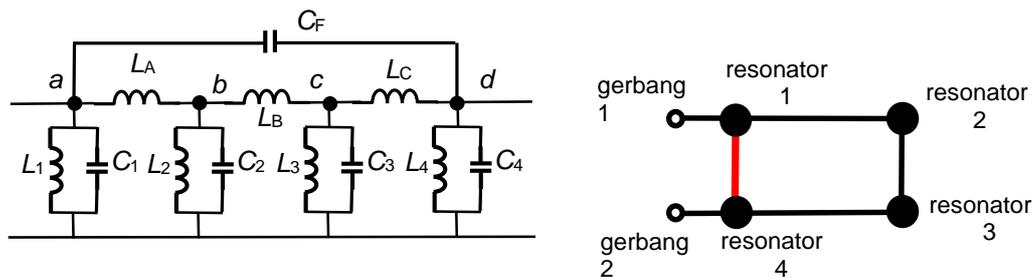
nol), tetapi secara keseluruhan, seperti yang terlihat di gambar 16, faktor transmisi filter juga berubah, sehingga bisa mengganggu transmisi sinyal pada wilayah lolos.



Gambar 16 Faktor transmisi filter lolos tengah (direct-coupled) dengan kapasitor paralel. Posisi *transmission zero* bisa diatur dengan variasi nilai kapasitor.

4.3 Filter lolos tengah dengan gandengan silang secara induktif atau kapasitif

Di bagian ini dibuat penggandengan silang (*cross coupling*) antara dua resonator. Gambar 17 menunjukkan penggandengan resonator 1 dengan 4. Pengandengan silang secara induktif diamati tidak memberikan perubahan pada faktor transmisi filter. Oleh karena itu untuk penggandengan silang resonator 1 dan 4 hanya diamati secara kapasitif C_F . Topologi rangkaian ini menunjukkan adanya jalur silang antara resonator 1 dan resonator 4.

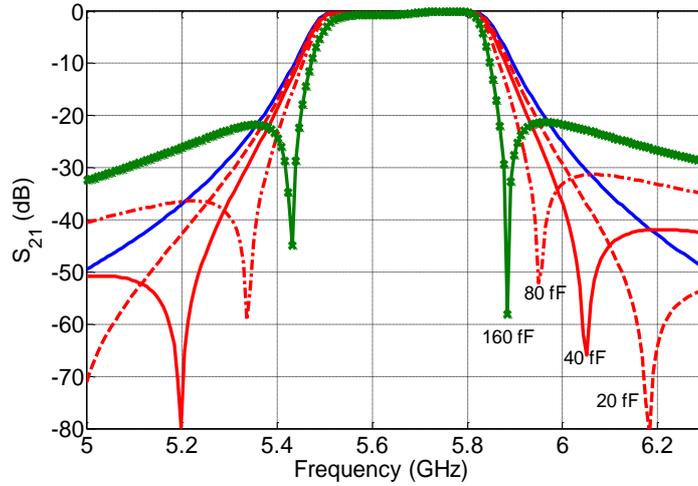


Gambar 17 (kiri) rangkaian filter lolos tengah dengan *capacitive cross coupling* antara resonator 1 dan 4, (kanan) topologi filter.

Gambar 18 memberikan faktor transmisi dari filter lolos tengah dengan penggandengan resonator 1 dan 4. Terlihat terbentuknya dua *transmission zeros* yang menandakan penggandengan yang simetris.

Nilai kapasitansi yang sangat kecil, memberikan efek impedansi yang sangat besar, artinya penggandengan lemah (*weak coupling*) tidak terbentuk *transmission zeros*. Dengan membesarnya nilai kapasitansi, posisi *transmission zeros* bergeser ke arah wilayah lolos. Sampai suatu nilai maksimum tertentu, jika nilainya

kapasitansi terus diperbesar, filter ini tidak akan memiliki karakteristik sebuah filter lolos tengah lagi.



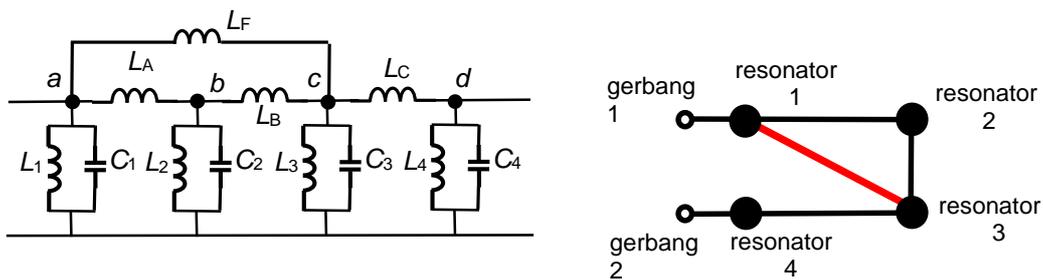
Gambar 18 Faktor transmisi filter lolos tengah dengan *cross-coupling* antara resonator 1 dan 4.

Tabel 1 Posisi *transmission zeros* vs nilai kapasitor penggandeng

C_F (fF)	1	10	20	30*	40*	50*	100 *
$f_{TZ,1}$ (GHz)	-	4.540	4.964	5.110	5.197	5.249	5.373
$f_{TZ,2}$ (GHz)	7.380	6.358	6.183	6.099	6.052	6.015	5.927

Tabel 1 memberikan posisi eksak dari *transmission zeros* sebagai fungsi dari nilai kapasitansi C_F yang dipasangkan sebagai penggandeng antara resonator 1 dan 4. Nilai kapasitansi dengan simbol * di tabel 1 menginformasikan, faktor refleksi untuk parameter ini tidak lagi bagus (> -15 dB).

Gambar 19 sebelah kanan menunjukkan topologi dari sebuah filter dengan pengandengan antara resonator 1 dan resonator 3. Pengandengan ini bisa dilakukan secara induktif, seperti yang ditampilkan di gambar 19 kiri dengan L_F atau secara kapasitif, dengan menggantinya dengan C_F .

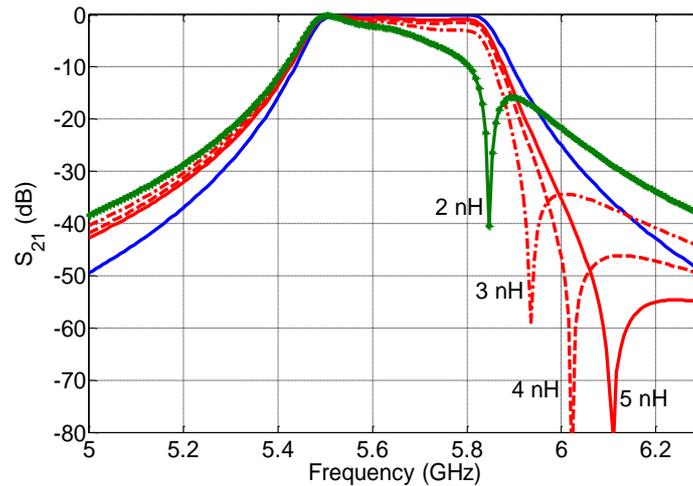


Gambar 19 (kiri) rangkaian filter lolos tengah dengan *inductive cross coupling* antara resonator 1 dan 3, (kanan) topologi filter.

Dari pengamatan hasil studi parameter yang dilakukan didapatkan perubahan posisi *transmission zeros* seperti di gambar 20. Jika nilai induktansi sangat besar, maka bentuk faktor transmisi rangkaian ini seperti tanpa pengandengan, karena nilai impedansi bertingkah laku seperti kondisi open. Dengan memperkecil nilai

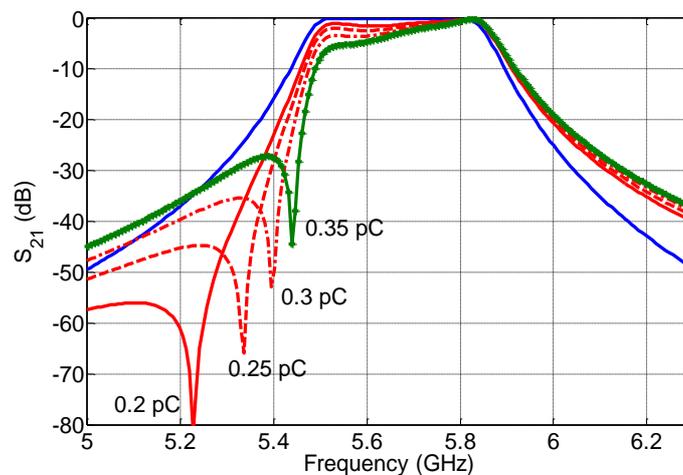
induktansi, barulah terlihat efek dari penggandengan silang ini. Nilai induktansi 5 nH menghasilkan posisi transmission zero di sekitar 6,15 GHz. Dengan memperkecilnya ke 4 nH dan 3 nH, posisi transmission zero bergeser ke 6,02 GHz dan 5,93 GHz. Seluruh transmission zeros terletak pada posisi sebelah atas dari wilayah lolos.

Fenomena lain yang diamati adalah, nilai induktansi yang kecil akan merusak karakteristik filter. Contohnya nilai 2 nH memang menggeser transmission zero ke posisi yang lebih rendah, tetapi nilai faktor transmisi pada wilayah lolos telah berubah secara signifikan.



Gambar 20 Faktor transmisi filter lolos tengah dengan *cross-coupling* antara resonator 1 dan 3 secara induktif.

Gambar 21 menunjukkan hasil untuk penggandengan secara kapasitif. Nilai kapasitansi yang kecil sekali mengakibatkan kondisi open (impedansi besar sekali), karakter transmisi sama seperti tanpa gandengan. Dengan memperbesar nilai kapasitansi, posisi transmission zero akan bergeser ke arah frekuensi yang tinggi. Seluruh posisi transmission zeros berada di bawah wilayah lolos.

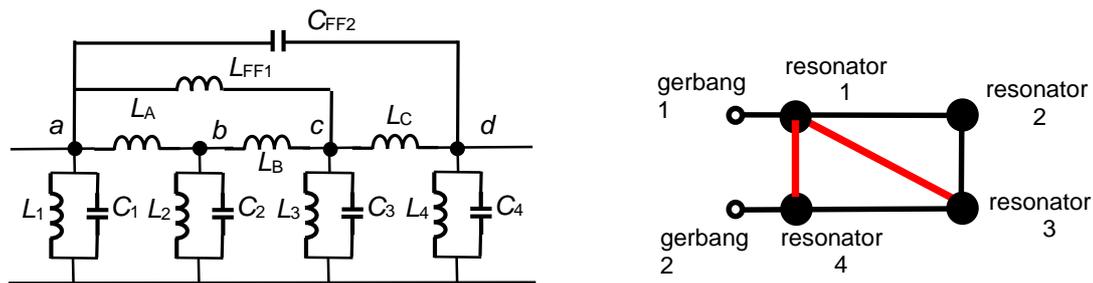


Gambar 21 Faktor transmisi filter lolos tengah dengan *cross-coupling* antara resonator 1 dan 4 secara kapasitif.

4.4 Filter lolos tengah dengan beberapa gandingan silang

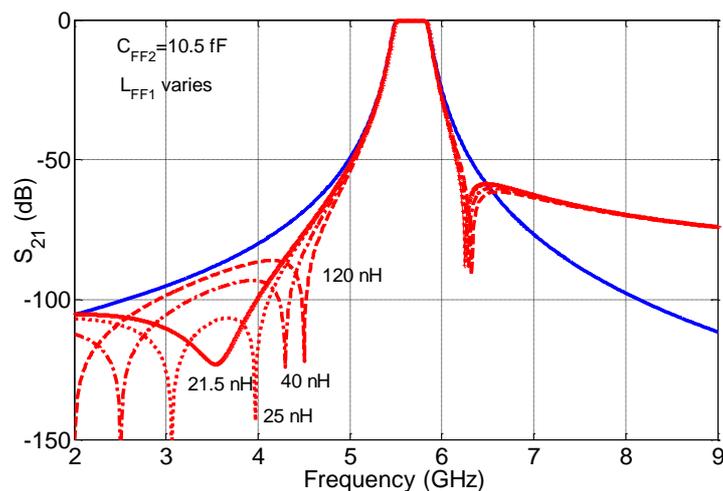
Kasus yang dibahas di bagian ini merupakan kombinasi dari penggandengan simetris (penggandengan resonator 1 dan 4) dan penggandengan asimetris (penggandengan resonator 1 dan 3).

Gambar 22 menunjukkan contoh rangkaian dan topologi dari jenis filter ini. Harapan yang ingin didapatkan adalah, filter yang memiliki transmission zeros yang simetris, sesuai dengan nilai C_{FF2} yang digunakan, dan sebuah transmission zero yang asimetris di sebelah atas atau bawah wilayah lolos sesuai dengan komponen yang digunakan untuk menggandeng resonator 1 dengan 3.



Gambar 22 (kiri) rangkaian filter lolos tengah dengan *capacitive cross coupling* antara resonator 1 dan 4 dan *inductive cross coupling* antara 1 dan 3, (kanan) topologi filter.

Gambar 23 menampilkan hasil untuk studi parameter dengan nilai kapasitansi yang konstan $C_{FF2} = 10.5$ femtoFarad dan nilai induktansi L_{FF1} yang divariasikan. Terlihat untuk nilai L_{FF1} yang sangat besar, faktor transmisi filter ini seperti pada kasus hanya ada gandingan antara resonator 1 dan 4, karena impedansi akibat L_{FF1} sangat besar sehingga praktis kondisi open di dapatkan.



Gambar 23 Faktor transmisi filter lolos tengah dengan *cross-coupling* antara resonator 1 dan 4 dan antara resonator 1 dan 3.

Jika nilai L_{FF1} diperkecil, ternyata terjadi gangguan pada bagian bawah wilayah lolos, dengan sisi bagian atas wilayah lolos yang praktis tidak berubah. Selain dari

itu posisi transmission zero akibat C_{FF2} juga bergeser secara signifikan. Jika nilai induktansi ini terus diperkecil, bahkan transmission zero ini akan menghilang.

5. KESIMPULAN

Di penelitian ini ditunjukkan, filter dengan aproksimasi Butterworth dan Chebychev bisa dimodifikasi menjadi filter yang memiliki transmission zeros pada frekuensi finite dengan bantuan penggandengan silang antar resonatornya.

Pemakaian kapasitansi paralel pada sebuah induktor penggandeng langsung (sehingga ini bukan penggandeng silang) selalu bisa menghasilkan transmission zero pada posisi yang diinginkan, tetapi faktor transmisi pada wilayah lolos berubah menjadi buruk.

Pada rangkaian dengan penggandengan langsung secara induktif yang dibahas di penelitian ini, penggandengan silang simetris dengan kapasitor memberikan transmission zeros kembar yang simetris dengan wilayah lolos. Sedangkan penggandengan silang yang asimetris dengan kapasitor atau induktor memberikan transmission zero tunggal pada sisi bawah atau atas dari wilayah lolos.

Penggandengan kombinasi simetris dan asimetris pada kasus terakhir tidak memberikan suatu level kebebasan yang diharapkan. Transmission zeros yang dihasilkan saling terkait jika nilai komponen diubah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J.-S. Hong, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, 2nd ed. Wiley, 2011.
- [2] R. J. Cameron, R. Mansour, and C.M. Kudsia, *Microwave Filters for Communication Systems*, Wiley, 2007.
- [3] R. Levy (ed.), *Classic Works in RF Engineering, vol. 2, Microwave and RF Filters*, Artech House, 2007.
- [4] Alaydrus, M., Designing Microstrip Bandpass Filter at 3.2 GHz, *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 2, no.2, pp.71-83, 2010.
- [5] Mudrik Alaydrus, Perancangan Filter Bandpas Terkopel paralel dengan bantuan MATLAB, Prosiding SNPPTI 2011, hal. 241-245
- [6] A.D. Lapidus and C. Rossiter, Cross-Coupling in Microwave Bandpass Filters, *Microwave Journal*, vol. 47, issue 11, November, 2004, p22-46.
- [7] Alaydrus, M., Perhitungan Matriks Penggandeng dalam Perancangan Prototip Filter Lowpass, Seminar Microwave dan Antena Propagasi, Jakarta, Oktober 2012.
- [8] Mudrik Alaydrus, Dian Widiastuti and Teguh Yulianto, Designing Cross-Coupled Bandpass Filters with Transmission Zeros in Lossy Microstrip, *IEEE ICITEE 2013 – The 5th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering*, 7-8 October 2013, Jogjakarta.
- [9] Dian Widi Astuti, Juwanto and Mudrik Alaydrus, A Bandpass Filter Based on Square Open Loop Resonators at 2.45 GHz, *ICICI-BME 2013*, November 2013, Bandung.
- [10] R.J.Wenzel, Understanding Transmission Zero Movement In Cross-Coupled Filters, *Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International*, pp.1459 - 1462.
- [11] D. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Wiley, 2012.