

Analisa Saluran Transmisi Nonhomogen dengan Metoda Persamaan Integral

Mudrik Alaydrus

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

Abstrak

Saluran transmisi adalah salah satu komponen penting di teknik elektro, baik untuk mentransmisikan energi ataupun informasi. Saluran transmisi yang memiliki besaran karakteristik yang tidak homogen (nonhomogen) biasa digunakan untuk rangkaian matching, delay equalizer, filter, wave shaping, pemrosesan sinyal analog dan interkoneksi VLSI. Metoda persamaan integral digunakan untuk menganalisa struktur saluran transmisi ini. Metoda persamaan integral yang diimplementasikan dengan metoda momen memberikan hasil yang sangat baik. Kasus kanonikal, saluran transmisi homogen dengan dan tanpa kerugian untuk kondisi matching dan tidak matching memberikan verifikasi program komputer yang dikembangkan, bekerja dengan baik, hasil yang didapatkan sejalan dengan apa yang didapatkan secara teoretis. Pengamatan saluran transmisi nonhomogen melibatkan saluran transmisi dengan besaran karakteristik yang berubah secara perlahan dan yang berubah secara mendadak. Analisa struktur filter lolos bawah memberikan hasil yang secara kualitatif sama dengan yang diberikan di pustaka.

Keywords: filter, impedansi gelombang, metoda momen, metoda persamaan integral, saluran transmisi nonhomogen.

1. PENDAHULUAN

Saluran transmisi adalah salah satu komponen penting di teknik elektro, baik untuk mentransmisikan energi ataupun informasi [1]. Pada frekuensi yang tinggi (Radio frequency/RF ataupun gelombang mikro), saluran transmisi bisa berfungsi sebagai elemen pemroses sinyal, baik bisa menjadi filter ataupun rangkaian lainnya. Saluran transmisi yang memiliki besaran karakteristik (R' , L' , C' dan G') yang tidak homogen (nonhomogen) biasa digunakan untuk rangkaian matching [2], delay equalizer [3], filter [4], wave shaping [5], pemrosesan sinyal analog [6] dan interkoneksi VLSI [7].

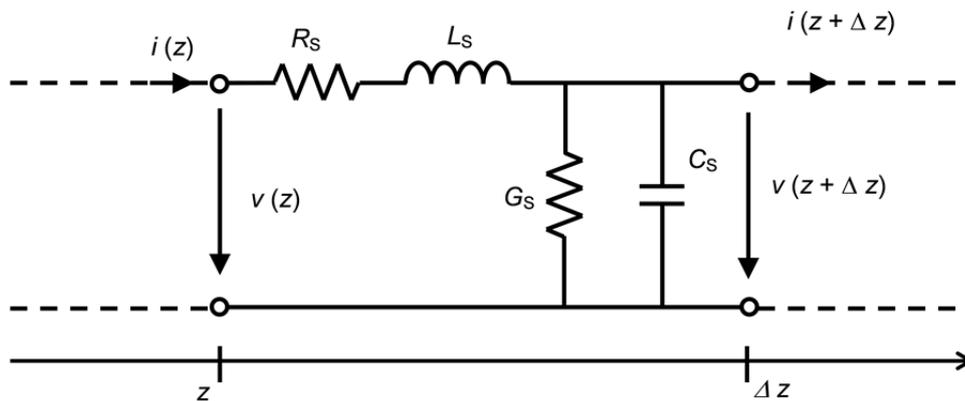
Analisa saluran transmisi nonhomogen memberikan suatu persamaan diferensial yang tidak bisa disolusikan dengan mudah seperti halnya saluran transmisi konvensional. Ada beberapa pendekatan yang telah dilakukan, misalnya penggunaan ekspansi deret Taylor [8], deret Fourier [9], dan metoda momen [10].

Di tulisan ini digunakan juga pendekatan metoda momen seperti halnya pada [10]. Secara umum metoda ini memiliki nama metoda persamaan integral [12], yang dalam sebuah persamaan terdapat variabel pada sisi integrasinya. Metoda momen adalah salah satu cara implementasi solusi dari persamaan ini, yaitu

dengan menggunakan fungsi basis dan fungsi sampel tertentu, sehingga didapatkan suatu sistem persamaan linier yang harus diinversikan untuk mendapatkan solusi berupa distribusi arus dan tegangan di sepanjang saluran transmisi. Di penelitian ini dibahas kasus-kasus berupa saluran transmisi homogen dengan beban matching dan tidak matching, baik saluran transmisi mengandung kerugian (lossy) ataupun tidak merugi (lossless). Tujuan dari kasus ini adalah untuk memverifikasi kebenaran dan akurasi dari program komputer (software) yang dibuat. Pada bagian kedua dibahas kasus yang melibatkan saluran transmisi nonhomogen, yang besaran karakteristiknya berubah sepanjang perambatan gelombang, baik berubah secara perlahan, ataupun secara mendadak. Di akhir dari tulisan ini dibahas sebuah struktur filter lolos bawah, yaitu dengan menghitung faktor refleksi dan transmisinya. Program komputer ditulis di program MATLAB.

2. PERSAMAAN GELOMBANG PADA SALURAN TRANSMISI HOMOGEN

Dengan melakukan pengandaian saluran transmisi yang diamati memiliki dimensi penampang yang kecil ($A \ll \lambda$), sehingga dimensi saluran transmisi ini panjang/besar pada sisi sumbu-nya (arah perambatan gelombang), maka potongan saluran transmisi yang sangat pendek (infinitesimal) ini bisa dimodelkan dengan rangkaian listrik berkomponen diskret (resistor, induktor dan kapasitor) seperti yang ditampilkan di gambar 1 [1]



Gambar 1. Model komponen diskret dari sebuah saluran transmisi

R_s , L_s , G_s dan C_s adalah resistansi, induktansi, konduktansi dan kapasitansi yang dimiliki saluran transmisi sepanjang Δz . Untuk saluran transmisi yang homogen, didefinisikan masing-masing sebuah konstanta R' , L' , G' dan C' , yang menggambarkan besaran-besaran listrik tersebut per satuan panjang. Dengan menggunakan Hukum Ohm, Hukum Kirrchoff tegangan dan arus pada sinyal harmonis, didapatkan dua buah persamaan berikut ini

$$\frac{dV}{dz} = -Z' \cdot I \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dz} = -Y' \cdot V \quad (2)$$

dengan $Z' = R' + j\omega L'$ dan $Y' = G' + j\omega C'$. $\omega = 2\pi f$, dengan f frekuensi dari sinyal yang merambat di saluran transmisi ini.

Solusi standard dari problem ini adalah dengan mengeliminasi arus pada sistim persamaan ini, sehingga didapatkan sebuah persamaan differensial ordo kedua dengan koefisien konstan

$$\frac{d^2V}{dz^2} - \gamma^2 \cdot V = 0 \quad (3)$$

yang solusinya cukup mudah, yaitu

$$V = V_1 \cdot e^{-\gamma z} + V_2 \cdot e^{\gamma z} \quad (4)$$

dan

$$I = \frac{1}{Z_o} (V_1 \cdot e^{-\gamma z} - V_2 \cdot e^{\gamma z}) \quad (5)$$

dengan $\gamma = \sqrt{Z'Y'}$ adalah konstanta perambatan, dan $Z_o = \sqrt{Z'/Y'}$ adalah impedansi gelombang dari saluran transmisi. Sedangkan V_1 dan V_2 adalah konstanta hasil integrasi, yang bisa dihitung dengan bantuan kondisi batas, yang diberikan dalam bentuk eksitasi saluran transmisi ini dan besar beban yang digunakan.

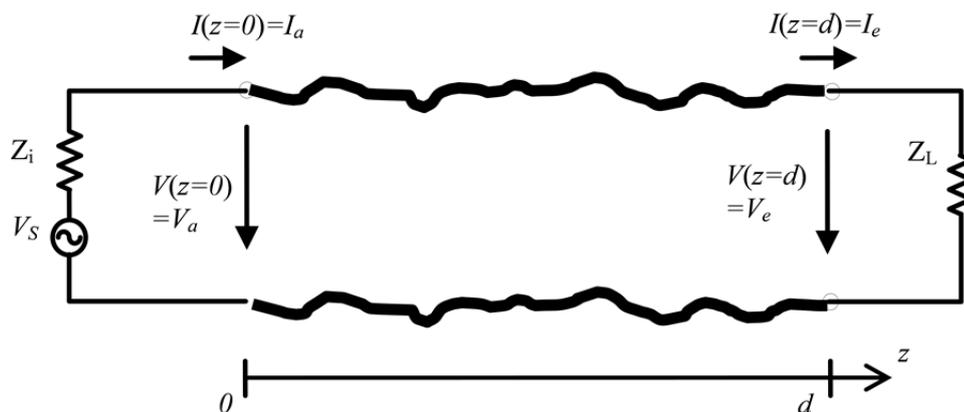
3. PERSAMAAN GELOMBANG PADA SALURAN TRANSMISI NONHOMOGEN

Saluran transmisi yang nonhomogen memiliki besaran karakteristik yang berubah dengan posisi z , seperti yang diilustrasikan pada gambar 2. Bentuk persamaan yang digunakan seperti halnya persamaan (1) dan (2), tetapi memiliki nilai Z' dan Y' yang berubah dengan posisi.

Proses eliminasi arus pada sistim persamaan ini menghasilkan persamaan diferensial ordo kedua, dengan koefisien yang berubah terhadap variabel z ,

$$\frac{d^2V}{dz^2} - f(z) \frac{dV}{dz} - \gamma^2 \cdot V = 0 \quad (6)$$

dengan $f(z) = (dZ'/dz)/Z'$.



Gambar 2. Saluran transmisi nonhomogen

Solusi dari persamaan diferensial (6) tidak lagi semudah persamaan (3). Untuk mencari solusi problem saluran transmisi nonhomogen, penelitian ini melakukan pendekatan seperti yang digunakan di [2], yaitu dengan integrasi persamaan (1) dan (2) menjadi persamaan berikut,

$$V(z) = -\int_0^z Z'(z') \cdot I(z') dz' + C_1 \quad (7)$$

$$I(z) = -\int_0^z Y'(z') \cdot V(z') dz' + C_2 \quad (8)$$

C_1 dan C_2 adalah konstanta yang muncul dari integrasi, dan bisa ditentukan dengan bantuan kondisi batas, yang diberikan di gambar 2.

Dengan kondisi batas pertama, yaitu $V_s = Z_i I(z=0) + V(z=0)$, dan dengan persamaan (8), karena dievaluasi pada $z=0$, maka $I(z=0) = I_a = C_2$, dan dengan persamaan (7), $V(z=0) = V_a = C_1$, maka didapatkan $V_s = Z_i C_2 + C_1$.

Dan kondisi batas kedua, $V_e = I_e Z_L$, memberikan data

$$-\int_0^d Z'(z') \cdot I(z') dz' + C_1 = Z_L \left(-\int_0^d Y'(z') \cdot V(z') dz' + C_2 \right)$$

Sehingga didapatkan untuk kedua konstanta integral di atas aturan perhitungan berikut ini

$$C_1 = \frac{Z_L}{Z_i + Z_L} V_s + \frac{Z_i}{Z_i + Z_L} \int_0^d [Z'(z') \cdot I(z') - Z_L Y'(z') \cdot V'(z')] dz' \quad (9)$$

Dan

$$C_2 = \frac{1}{Z_i + Z_L} V_s - \frac{1}{Z_i + Z_L} \int_0^d [Z'(z') \cdot I(z') - Z_L Y'(z') \cdot V'(z')] dz' \quad (10)$$

Persamaan (7) dan (8) bersama dengan nilai konstanta yang diberikan di persamaan (9) dan (10) adalah persamaan utama yang digunakan untuk membahas saluran transmisi nonhomogen. Bagian berikut akan membahas solusi dari persamaan tersebut.

4. SOLUSI PERSAMAAN GELOMBANG

Persamaan (7) dan (8) adalah integrasi dari arus dan tegangan sepanjang saluran transmisi dengan integran tegangan atau arus yang tidak dikenal nilainya. Adalah suatu ide yang baik dengan menganggap, bahwa arus dan tegangan di sepanjang saluran transmisi adalah kombinasi dari suatu fungsi tertentu dengan amplitudo yang tidak dikenal. Ada banyak usulan yang diberikan di literatur, dari mulai penggunaan fungsi sinus, ataupun fungsi-fungsi yang sulit lainnya. Ada juga usulan penggunaan fungsi konstan ataupun fungsi linier. Secara umum, tegangan dan arus di sepanjang saluran transmisi bisa diaproksimasikan dengan

$$V(z) = \sum_{n=1}^N V_n f_n(z) \quad (11)$$

$$I(z) = \sum_{n=1}^N I_n g_n(z) \quad (12)$$

yang mana V_n dan I_n adalah nilai yang tidak dikenal, dan f_n serta g_n adalah fungsi basis yang menggambarkan distribusi arus atau tegangan, sehingga persamaan (7) dan (8) menjadi

$$\sum_{n=1}^N \left[f_n(z) + \frac{Z_i Z_L}{Z_i + Z_L} \int_0^d Y'(z') \cdot f_n(z') dz' \right] V_n + \sum_{n=1}^N \left[\int_0^z Z'(z') \cdot g_n(z') dz' - \frac{Z_i}{Z_i + Z_L} \int_0^d Z'(z') \cdot g_n(z') dz' \right] I_n = \frac{Z_L}{Z_i + Z_L} V_S$$

$$\sum_{n=1}^N \left[\int_0^z Y'(z') \cdot f_n(z') dz' - \frac{Z_L}{Z_i + Z_L} \int_0^d Y'(z') \cdot f_n(z') dz' \right] V_n + \sum_{n=1}^N \left[g_n(z) + \frac{1}{Z_i + Z_L} \int_0^d Z'(z') \cdot g_n(z') dz' \right] I_n = \frac{1}{Z_i + Z_L} V_S$$

Kedua persamaan di atas, bisa dituliskan dalam bentuk matriks

$$\begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [C] & [D] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [V] \\ [I] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_L \\ 1 \end{bmatrix} \frac{V_S}{Z_i + Z_L} \quad (13)$$

dengan vektor koefisien $[V] = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_N]^T$ dan $[I] = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_N]^T$, dan masing-masing vektor $[A]$, $[B]$, $[C]$ dan $[D]$, yang memiliki komponen,

$$A_n(z) = f_n(z) + \frac{Z_i Z_L}{Z_i + Z_L} \int_0^d Y'(z') \cdot f_n(z') dz' \quad (14a)$$

$$B_n(z) = \int_0^z Z'(z') \cdot g_n(z') dz' - \frac{Z_i}{Z_i + Z_L} \int_0^d Z'(z') \cdot g_n(z') dz' \quad (14b)$$

$$C_n(z) = \int_0^z Y'(z') \cdot f_n(z') dz' - \frac{Z_L}{Z_i + Z_L} \int_0^d Y'(z') \cdot f_n(z') dz' \quad (14c)$$

$$D_n(z) = g_n(z) + \frac{1}{Z_i + Z_L} \int_0^d Z'(z') \cdot g_n(z') dz' \quad (14d)$$

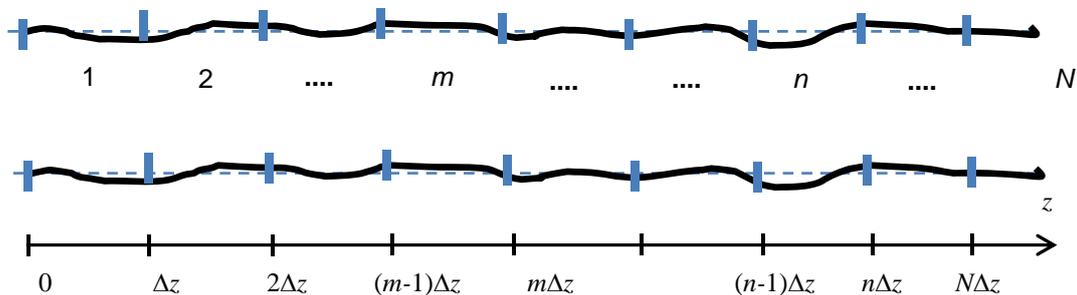
Salah satu tugas yang penting dalam perhitungan persamaan (14) adalah perhitungan integrasi sepanjang saluran transmisi ($0 \leq z \leq d$) ataupun sebagian darinya ($0 \leq z$). Untuk bisa melakukan pengintegralan secara numeris, dilakukan diskretisasi sepanjang saluran transmisi (gambar 3), yaitu membagi saluran transmisi ini menjadi N buah potongan pendek dengan panjang $\Delta z = d/N$.

Dengan menggunakan fungsi basis yang paling sederhana, yaitu

$$f_n(z) = g_n(z) = \begin{cases} 1 & \text{untuk } (n-1)\Delta z \leq z \leq n\Delta z \\ 0 & \text{untuk wilayah lainnya} \end{cases}$$

Dengan menggunakan wilayah integrasi yang kecil ini, yaitu hanya pada wilayah $(n-1)\Delta z \leq z \leq n\Delta z$, bisa juga diandaikan karakteristik saluran transmisi konstan, sehingga integrasi berubah menjadi perkalian biasa.

Selain itu, di persamaan (14) diamati tegangan dan arus pada titik observasi z (lihat persamaan (7) dan (8)), yang di sini, diamati N buah titik observasi yang berbeda, yaitu titik-titik tengah dari semua segmen diskretisasi yang didefinisikan sebelumnya (gambar 3). Sehingga akan didapatkan $2N$ buah persamaan, yang memiliki $2N$ buah variable yang tidak dikenal (persamaan (11) dan (12)).



Gambar 3 Wilayah integrasi berupa potongan-potongan interval dengan lebar Δz .

Evaluasi persamaan (14) di atas menghasilkan

$$A_n(z_m) = \delta_{mn} + \frac{Z_i Z_L}{Z_i + Z_L} Y'(z_n) \Delta z \quad (15a)$$

$$B_n(z_m) = Z'(z_n) U_{mn} \Delta z - \frac{Z_i}{Z_i + Z_L} Z'(z_n) \Delta z \quad (15b)$$

$$C_n(z_m) = Y'(z_n) U_{mn} \Delta z - \frac{Z_L}{Z_i + Z_L} Y'(z_n) \Delta z \quad (15c)$$

$$D_n(z_m) = \delta_{mn} + \frac{1}{Z_i + Z_L} Z'(z_n) \Delta z \quad (15d)$$

δ_{mn} adalah fungsi delta Kronecker ($\delta_{mn} = 1$, jika $m=n$ dan 0 jika $m \neq n$) dan

$$U_{mn} = \begin{cases} 1; & m > n \\ 1/2; & m = 1 \\ 0; & m < n \end{cases} \quad (16)$$

Jika titik pengamatan tegangan/arus berada di sebelah kanan titik/wilayah integrasi atau $m > n$, maka ada konstribusi integrasi itu, sehingga nilai U_{mn} adalah 1, jika titik pengamatan tepat berada di tengah-tengah wilayah integrasi, menghasilkan nilai $1/2$, dan jika ada di sebelah kiri ($m < n$), memberikan nilai 0.

4. HASIL PERHITUNGAN

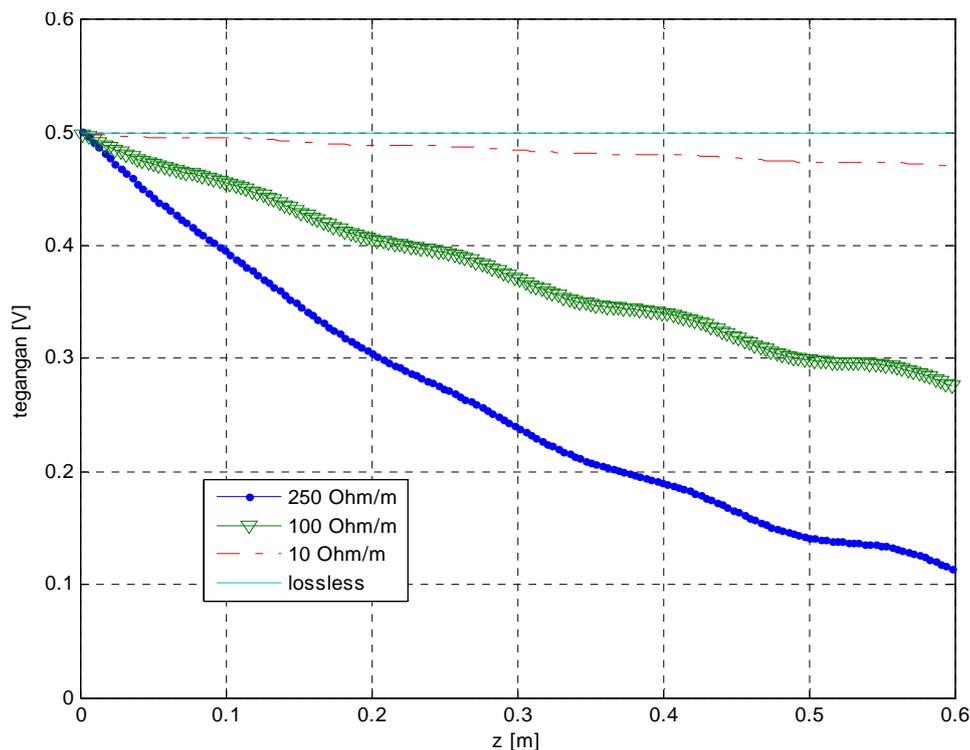
Di penelitian ini akan diamati kasus saluran transmisi homogen dengan beban matching dan tidak, sebagai parameter tambahan digunakan saluran transmisi yang mengandung kerugian (lossy) dan tak mengandung kerugian (lossless). Hal ini dilakukan untuk melakukan perbandingan dengan teori yang telah dikenal selama ini, untuk menunjukkan verifikasi dari hasil simulasi yang diberikan.

Pada bagian kedua diamati saluran transmisi tidak homogen, baik yang berubah dengan perlahan, seperti yang ditunjukkan di [10], ataupun saluran transmisi dengan perubahan yang mendadak, seperti yang dipakai untuk merancang filter [11].

4.1 Distribusi Tegangan Pada Saluran Transmisi Homogen

4.1.1 Beban Matching

Pada bagian ini, diamati kasus saluran transmisi homogen dengan beban matching ($Z_L = 50 \Omega$). Di sepanjang saluran transmisi kapasitas persatuan panjang bernilai konstan $C' = 66,7 \text{ pF}$ dan induktansi persatuan panjang $L' = 0,167 \mu\text{H}$, sehingga menghasilkan impedansi gelombang $Z_o = 50 \Omega$. Panjang saluran transmisi 0,6 m dan frekuensi kerja sebesar 1 GHz.



Gambar 4 Distribusi tegangan listrik sepanjang saluran transmisi dengan beban matching dan parameter berupa R' (resistansi persatuan panjang).

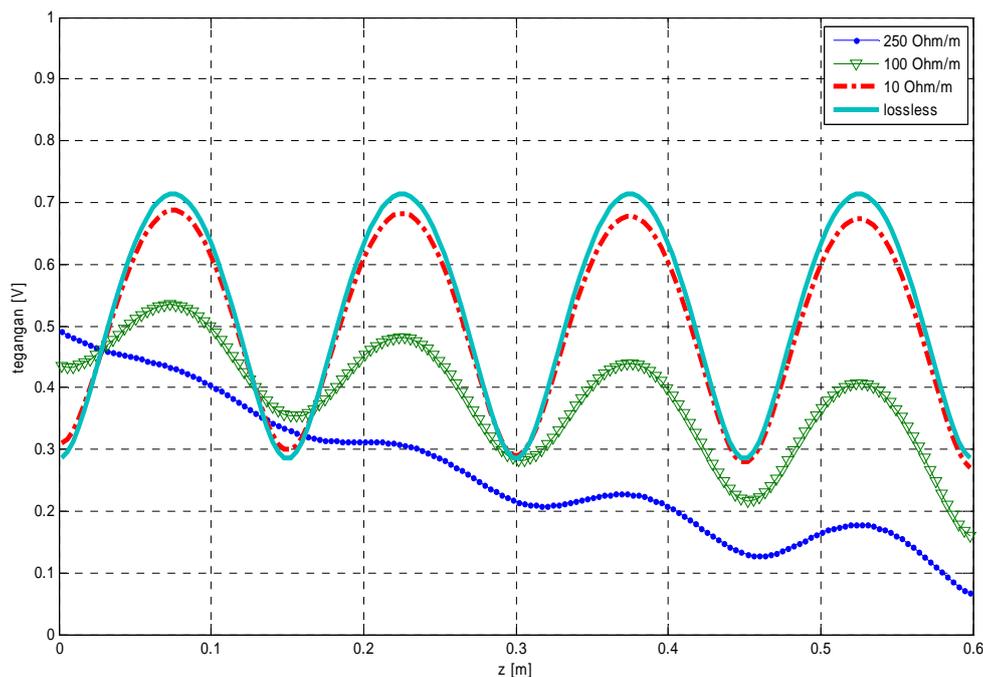
Gambar 4 menunjukkan hasil berupa distribusi tegangan di sepanjang saluran transmisi. Pada kasus tidak mengandung kerugian (lossless) tampak distribusi yang tidak dilihat adanya gelombang berdiri (standing wave), bungkus dari

gelombang tegangan bernilai konstan, yang memberikan nilai VSWR (voltage standing wave ratio) bernilai 1, yang merupakan kondisi ideal, dengan tidak adanya gelombang refleksi.

Penggunaan saluran transmisi yang memiliki kerugian, yang dinyatakan dalam $R' > 0$, memberikan peredaman terhadap gelombang yang merambat di saluran transmisi ini. Di gambar 4 terlihat, dengan semakin bertambahnya besar kerugian, tegangan yang berada jauh dari sumber semakin mengecil secara signifikan. Pada peredaman yang besar juga diamati munculnya standing wave dalam bentuk ripple, yang diakibatkan adanya gelombang refleksi yang bersuperposisi dengan gelombang datang. Refleksi ini terjadi karena, impedansi gelombang dari saluran transmisi ini dengan keberadaan R' tidak lagi bernilai 50 ohm, tetapi untuk $R' = 250$ ohm/m bernilai $50.3864 - j5.9196$ ohm, sehingga menghasilkan refleksi sebesar $|r| = 0.059$, atau VSWR sebesar 1,1254.

4.1.2 Beban Tidak Matching

Kasus yang dibahas di sini seperti pada bagian 4.1.1, tetapi dengan beban tidak matching, $Z_L = 20$ Ohm.



Gambar 5 Distribusi tegangan listrik sepanjang saluran transmisi dengan beban $Z_L = 20$ ohm dan parameter berupa R' (resistansi persatuan panjang)

Beban ini menyebabkan refleksi sebesar $r = -0,4286$ atau $VSWR = 2,5$. Kasus tanpa kerugian (lossless) di gambar 5 menunjukkan pola gelombang berdiri yang stabil, dengan $V_{max} = 0,7143$ volt dan $V_{min} = 0,2857$ volt, dan tepat pada posisi beban didapatkan nilai tegangan yang minimum, karena resistansi beban yang lebih kecil dari nilai impedansi gelombang yang digunakan (50 ohm).

Di gambar 5 terlihat, jika kerugian dimasukkan dalam perhitungan, maka pola gelombang berdiri akan mengecil (VSWR mengecil), hal ini dikarenakan

gelombang datang mengalami peredaman, dan gelombang refleksi yang bersama dengan gelombang datang juga mengalami peredaman, sehingga nilai V_{\max} akan mendekati nilai V_{\min} . Semakin gelombang ini teredam, semakin efek gelombang berdiri ini mengecil, sehingga pada sisi sumber, terlihat VSWR yang semakin mendekati nilai 1.

4.2 Distribusi Tegangan Pada Saluran Transmisi Tidak Homogen

4.2.1 Struktur Impedansi Gelombang yang berubah secara linier

Di bagian ini akan diverifikasi source code yang dikembangkan di penelitian ini dengan mengambil kasus saluran transmisi yang tidak homogen. Dengan menggunakan kasus yang sama seperti di [10], yaitu induktansi persatuan panjang yang membesar secara linier

$$L'(z) = L_o'(1 + k(z/d))$$

Sedangkan kapasitansi persatuan panjang mengecil dengan ritme yang sama dengan induktasi, yaitu

$$C'(z) = C_o'/(1 + k(z/d))$$

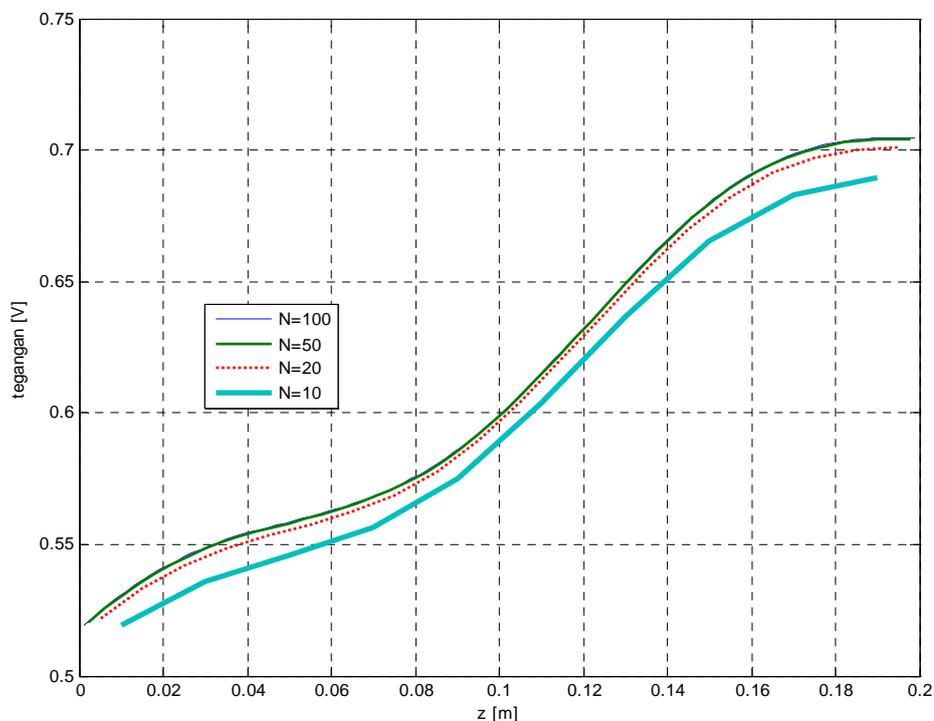
Kasus-kasus yang diamati berikut ini mengandaikan saluran transmisi yang tidak mengandung kerugian, yaitu dengan

$$R'(z) = G'(z) = 0$$

Yang mana $C_o' = 66,7$ nF dan $L_o' = 0,167$ μ H, $d = 20$ cm, $k = 1$.

Sehingga impedansi gelombang dari saluran transmisi ini bisa dihitung menjadi

$$Z_{o,non}(z) = \sqrt{\frac{L_o'}{C_o'}}(1 + k(z/d)) = \left(1 + \frac{z}{d}\right) 50\Omega$$



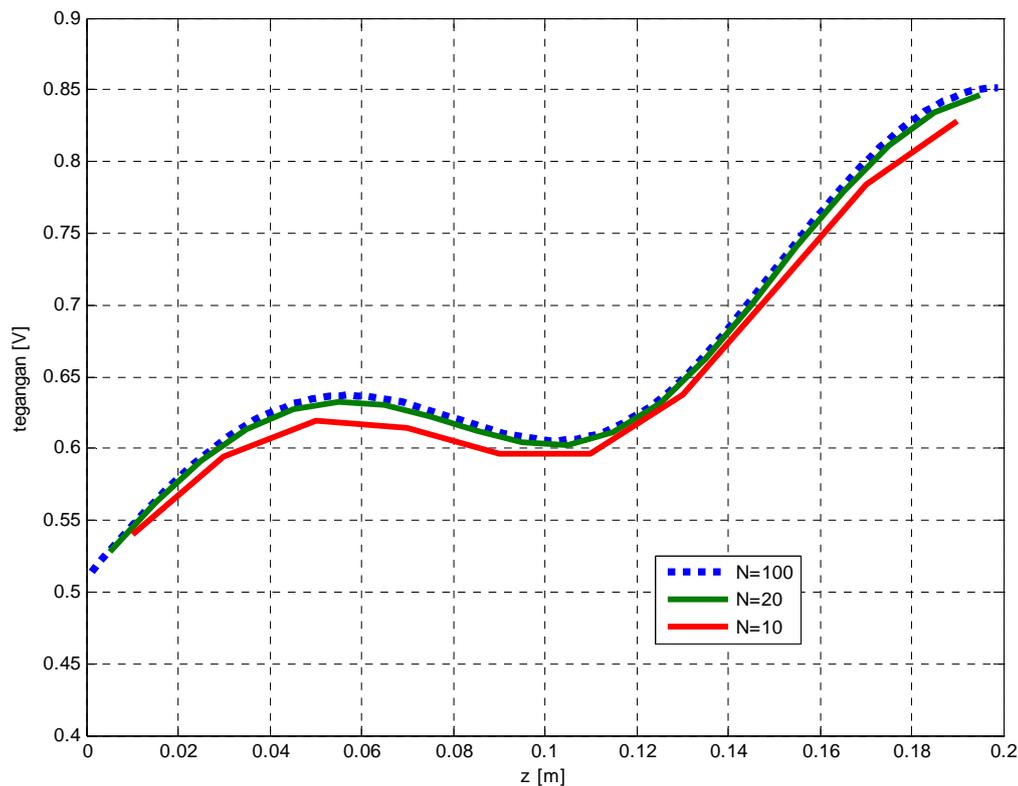
Gambar 6 Distribusi tegangan untuk $k = 1$ dan $Z_L = 100$ ohm.

Simulasi yang dilakukan di bagian ini menggunakan sumber tegangan dengan $V_S = 1$ volt dan frekuensi $f = 1$ GHz, dan impedansi dalam dari sumber tegangan ini dengan $Z_S = 50$ ohm. Pada saluran transmisi ini dipasangkan beban $Z_L = 100$ ohm, yaitu nilai yang sama dengan impedansi gelombang $Z_{o,non}$ pada ujung saluran transmisi pada posisi $z = d$. Sehingga dengan demikian tidak terbentuk refleksi.

Gambar 6 memberikan distribusi tegangan sepanjang saluran transmisi. Data ini didapatkan dengan bermacam-macam jumlah segmen. Secara teoretis, semakin banyak segmen yang digunakan, semakin akurat hasil yang didapatkan, tetapi semakin besar memori komputer (RAM) komputer yang diperlukan, dan semakin besar waktu yang diperlukan untuk mencari solusinya.

Terlihat di gambar 6, solusi dengan jumlah segmen $N = 10$ belum memberikan hasil yang cukup akurat, karena dengan dilakukan penggandaan jumlah segmen menjadi $N = 20$ terlihat perubahan yang cukup besar dari distribusi tegangan. Untuk $N=50$ didapatkan hasil yang sudah sangat baik, karena memberikan hasil yang sama dengan $N = 100$.

Kasus kedua menggunakan $k = 1,5$ dan $Z_L = 150$ ohm. Ujung saluran transmisi yang memiliki besar impedansi gelombang $Z_{o,non} = 125$ ohm, dipasangkan beban yang tidak matching, sehingga terjadi refleksi. Hal ini diverifikasi dengan adanya nilai maksimum dan minimum tegangan di sepanjang saluran transmisi (gambar 7). Terlihat, $N = 20$ sudah memberikan hasil yang cukup akurat.

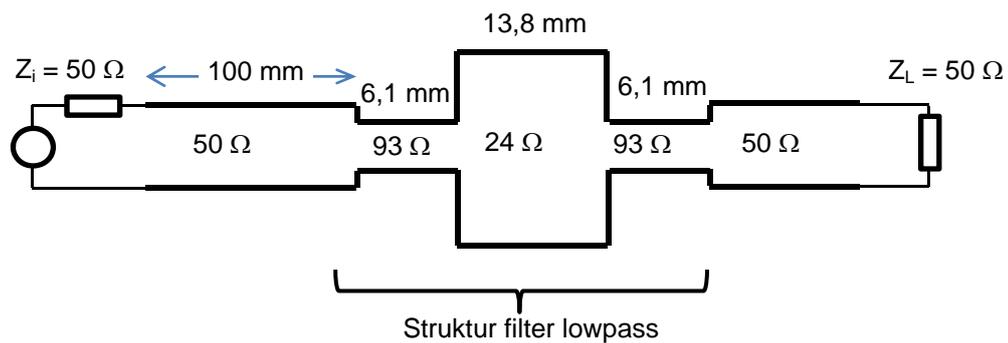


Gambar 7 Distribusi tegangan untuk $k = 1,5$ dan $Z_L = 150$ ohm.

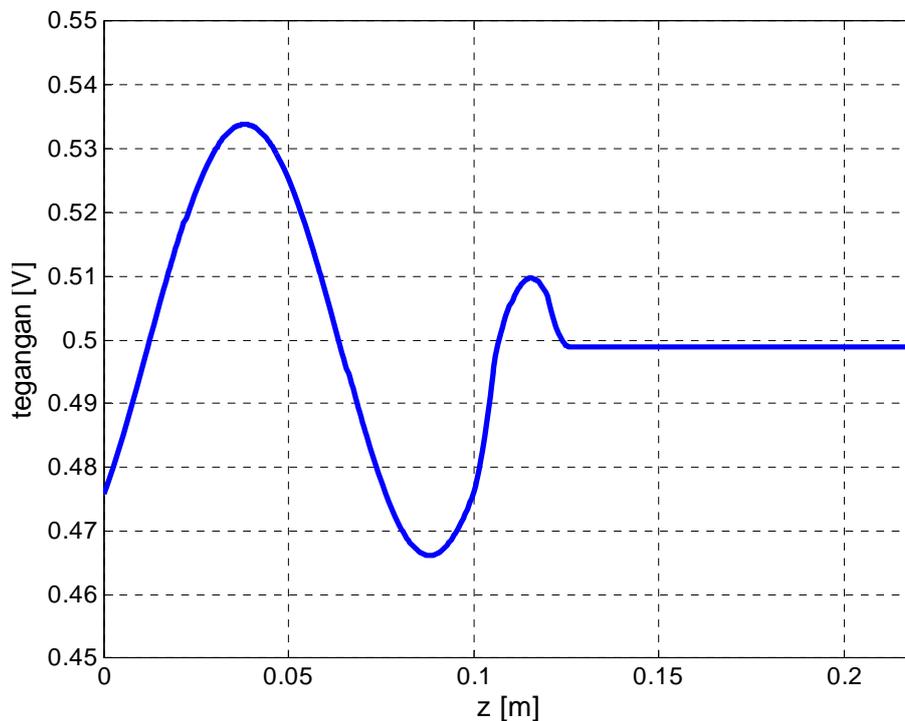
4.2.2 Struktur Impedansi Gelombang yang berubah secara Mendadak

Pada bagian ini dihitung struktur filter lolos bawah yang dibahas di [11], yaitu struktur saluran transmisi dengan tiga potongan saluran transmisi dengan impedansi gelombang berbeda-beda (gambar 8).

Besar impedansi gelombang seperti halnya di [11], sedangkan panjang masing-masing saluran transmisi dibuat tiga kali lebih panjang dibandingkan dengan data yang diberikan di [11], karena di sana digunakan PCB dengan $\epsilon_r = 9$, sehingga memiliki besar 1/3 lebih kecil dari struktur yang dibahas di sini.



Gambar 8 Filter lowpass dengan saluran transmisi penyambung di kedua sisi (sumber dan beban)



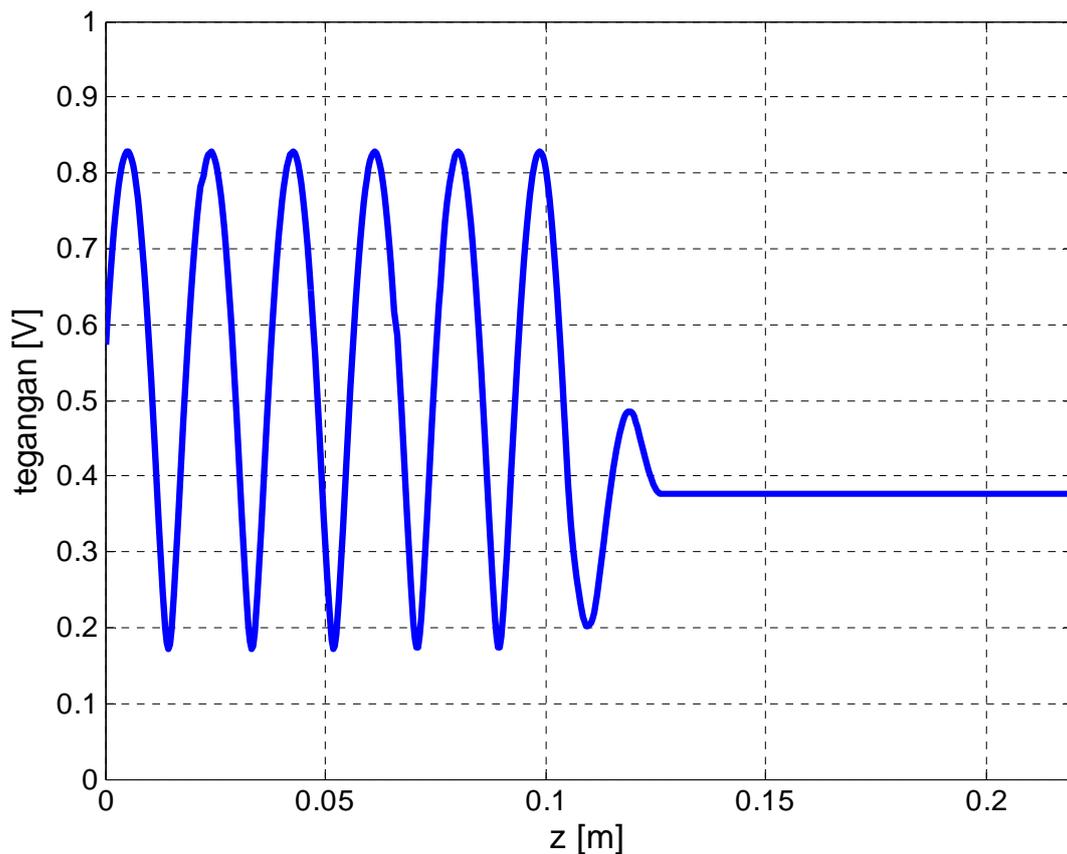
Gambar 8 Distribusi tegangan sepanjang filter lowpass pada $f = 1,5 \text{ GHz}$

Pada sisi sumber dan beban, dipasang saluran transmisi dengan impedansi gelombang 50 ohm, dan dipasang impedansi dalam sumber sebesar $Z_S = 50$

ohm, dan beban $Z_L = 50$ ohm, sehingga pada kedua sisi struktur ini dipasangkan secara matching.

Struktur filter lolos bawah ini akan dianalisa pada frekuensi 1 GHz sampai 8 GHz. Data yang akan dihasilkan adalah faktor refleksi dari filter (S_{11}) dan faktor transmisi (S_{21}). Faktor refleksi ini diakibatkan oleh struktur filter yang tidak beraturan, bukan dari beban, karena beban bersifat matching, sehingga pada saluran transmisi 50 ohm di sini beban, akan terbentuk distribusi tegangan yang konstan, karena di sana hanya terdapat gelombang yang merambat menuju beban. Sedangkan pada saluran transmisi 50 ohm pada sisi sumber, diharapkan terbentuk pola gelombang berdiri, yang memiliki tegangan maksimum dan minimum.

Gambar 8 menunjukkan distribusi tegangan di sepanjang saluran transmisi pada frekuensi simulasi sebesar 1,5 GHz. Terlihat pada sisi beban, tegangan bersifat konstan, ini adalah gelombang tegangan yang merambat ke arah beban, dengan nilai $V_t = 0,4988$ volt. Pada saluran transmisi sisi sumber didapatkan tegangan maksimal $V_{max} = 0,5338$ volt dan tegangan minimum $V_{min} = 0,4662$ volt, sehingga didapatkan $VSWR = 1.1451$, atau faktor refleksi sebesar $0,0677$ (-23,394 dB). Pada saluran transmisi 50 ohm di sisi sumber, gelombang tegangan yang merambat ke kanan, bisa dihitung dengan $V_{inc} = 0,5(V_{max} + V_{min}) = 0,5$ volt, sehingga faktor transmisi bisa didapatkan $t = 0,4988/0,5 = 0,9976$ (-0,021 dB).



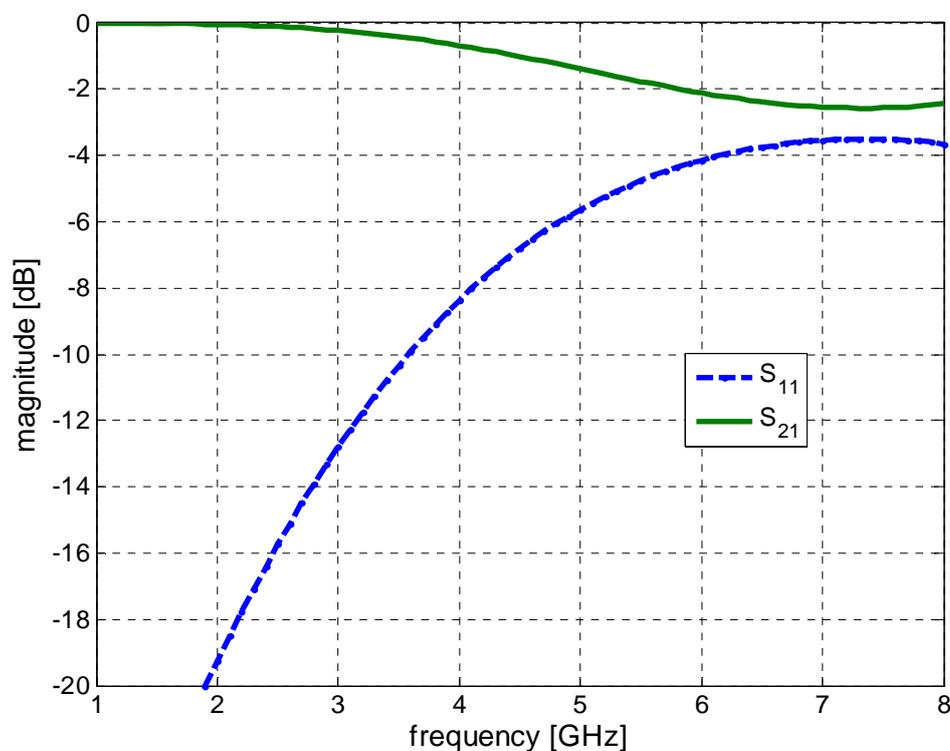
Gambar 9 Distribusi tegangan sepanjang filter lowpass pada $f = 8$ GHz

Gambar 9 memberikan distribusi tegangan sepanjang saluran transmisi pada frekuensi 8 GHz. Pada frekuensi ini didapatkan pola gelombang berdiri yang lebih

kelas, yang memberikan nilai refleksi yang lebih besar. $V_{\max} = 0,8278$ volt dan $V_{\min} = 0,1717$ volt. Nilai ini memberikan $VSWR = 4,8212$ dan faktor refleksi $r = 0,6564$ (-3,6563 dB). Nilai tegangan pada sisi beban $V_t = 0,377$ volt, memberikan nilai faktor transmisi $t = 0,7544$ (-2.4484 dB). Dengan mengecek data $r^2 + t^2$ akan didapati nilai 1.0, sehingga bisa diyakini konservasi energi berjalan dengan benar. Karena struktur saluran transmisi yang diamati tidak mengandung kerugian, energi yang dikirimkan oleh sumber akan terbagi menjadi energi yang direfleksikan dan energi yang ditransmisikan ke beban.

Faktor refleksi (S_{11}) dan faktor transmisi (S_{21}) dari filter lolos bawah yang disimulasikan ditampilkan di gambar 10. Secara kualitatif, hasil didapatkan sebanding dengan apa yang dihasilkan di publikasi [11].

Faktor refleksi dengan bertambahnya nilai frekuensi akan membesar sampai pada nilai -3,66 dB pada frekuensi 8 GHz, sedangkan faktor transmisi dari nilai 0 dB menjadi sekitar -2,45 dB pada frekuensi 8 GHz.



Gambar 10 Faktor refleksi (S_{11}) dan transmisi (S_{21}) filter lowpass.

4. KESIMPULAN

Metoda persamaan integral yang diimplementasikan dengan metoda momen memberikan hasil yang sangat baik. Kasus kanonikal, saluran transmisi homogen dengan dan tanpa kerugian untuk kondisi matching dan tidak matching memberikan verifikasi program komputer yang dikembangkan, bekerja dengan baik, hasil yang didapatkan sejalan dengan apa yang didapatkan secara teoretis.

Pengamatan saluran transmisi nonhomogen melibatkan saluran transmisi dengan besaran karakteristik yang berubah secara perlahan dan yang berubah

secara mendadak. Analisa struktur filter lolos bawah memberikan hasil yang secara kualitatif sama dengan yang diberikan di pustaka.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mudrik Alaydrus, Saluran Transmisi Telekomunikasi, Graha Ilmu, Jogjakarta, 2009.
- [2] Collin, R. E., Foundations for Microwave Engineering, McGraw-Hill, New York, 1996.
- [3] Tang, C. C. H., "Delay equalization by tapered cutoff waveguides," *IEEE Trans. Mic. Theory and Tech.*, 608–615, Nov. 1964.
- [4] Roberts, P. P. and G. E. Town, "Design of microwave filters by inverse scattering," *IEEE Trans. Mic. Theory and Tech.*, 739–743, Apr. 1995.
- [5] Burkhart, S. C. and R. B. Wilcox, "Arbitrary pulse shape synthesis via nonuniform transmission lines," *IEEE Trans. Mic. Theory and Tech.*, 1514–1518, Oct. 1990.
- [6] Hayden, L. A. and V. K. Tripathi, "Nonuniform coupled microstrip transversal filters for analog signal processing," *IEEE Trans. Mic. Theory and Tech.*, 47–53, Jan. 1991.
- [7] Dhaene, T., L. Martens, and D. D. Zutter, "Transient simulation of arbitrary nonuniform interconnection structures characterized by scattering parameters," *IEEE Trans. Circuits and Sys.-I*, 928–937, Nov. 1992.
- [8] Khalaj-Amirhosseini, M., "Analysis of nonuniform transmission lines using Taylor's series expansion," *Int. J. RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 16, No. 5, 536–544, Sep. 2006.
- [9] Khalaj-Amirhosseini, M., "Analysis of nonuniform transmission lines using Fourier series expansion," *Int. J. of RF and Microwave Computer-Aided Eng.*, Vol. 17, No. 3, 345–352, May 2007.
- [10] Khalaj-Amirhosseini, M., "Analysis of nonuniform transmission lines using the method of moments," *Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC 2007)*, Bangkok, Thailand, Dec. 12–14, 2007.
- [11] Mudrik Alaydrus, Simulasi Filter Lolos Bawah dengan Teknologi Mikrostrip menggunakan Software Sonnet, *Incomtech*, Vol. 3, no.1, 2012, hal. 49-64.
- [12] Mudrik Alaydrus, Antena, Prinsip dan Aplikasi, Graha Ilmu, Jogjakarta, 2011.