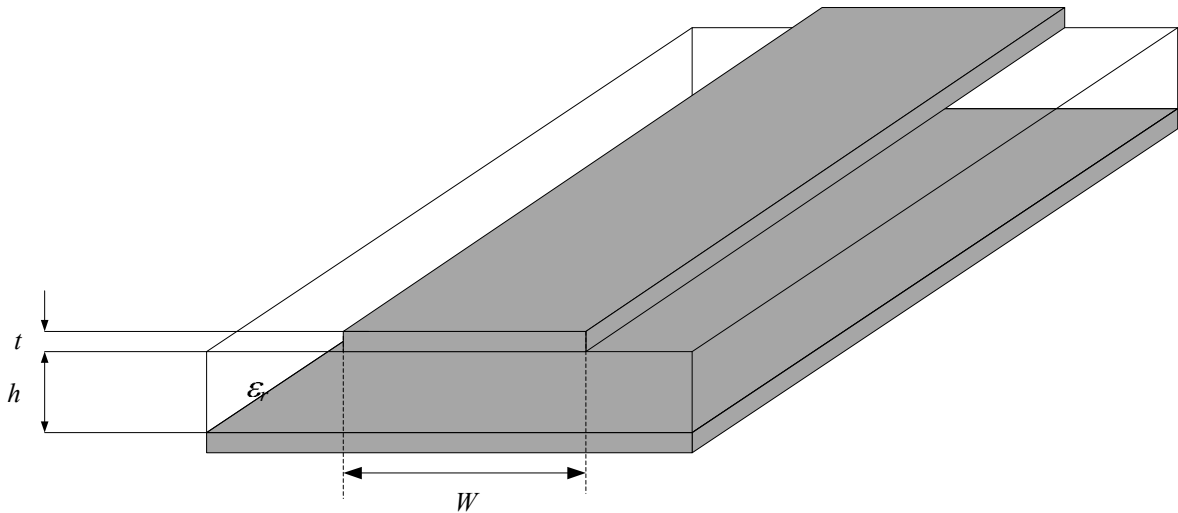


## Saluran Mikrostrip

Saluran mikrostrip, untuk singkatnya disebut mikrostrip saja, adalah saluran transmisi yang paling banyak digunakan pada teknik gelombang mikro dan RF. Hal ini karena sejumlah kelebihan dari mikrostrip, diantaranya: kemudahan pabrikan, murah, ringan, dan kemudahannya untuk diintegrasikan dengan rangkaian aktif. Konfigurasi mikrostrip diperlihatkan pada Gambar 1.

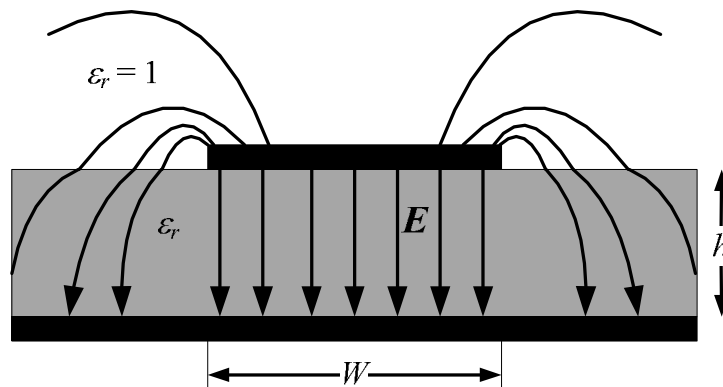
Mikrostrip terdiri dari substrat berupa dielektrik dengan konstanta dielektrik  $\epsilon_r$  dan ketebalannya  $h$ , di atas dan bawahnya dilapisi dengan konduktor, biasanya tembaga, yang tebalnya  $t$ . Jika dilihat dari konstruksinya, konduktor bagian atas disebut line; di situ kita membentuk saluran dengan lebar  $W$ , sedangkan konduktor bagian bawah disebut groundplane (bidang tanah). Mikrostrip termasuk ke dalam saluran planar bersama-sama stripline, coplanar waveguide, dan slotline.

Dielektrik yang melingkupi line, pada mikrostrip, tidak homogeny. Bagian bawahnya berupa substrat dengan konstanta dielektrik  $\epsilon_r > 1$ , sedangkan bagian atasnya adalah udara dengan  $\epsilon_r = 1$ . Dengan demikian konfigurasi medan listrik dan medan magnetiknya bukan lagi mode TEM, dan konstanta dielektrik keseluruhannya menjadi konstanta dielektrik efektif,  $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ . Mode gelombang yang menjalar dalam mikrostrip disebut quasi TEM.



Gambar 1 Konfigurasi saluran mikrostrip

Konfigurasi medan listrik dalam saluran mikrostrip diperlihatkan pada Gambar 2. Pada ujung ujung saluran, terjadi diskontinuitas sehingga medan listrik akan menghambur. Jika lebar strip,  $W$  besar, maka medan hamburan akan lebih besar daripada medan di dalam saluran sehingga medan radiasinya besar. Dengan demikian saluran tersebut menjadi sebuah antenna. Untuk keperluan mikrostrip sebagai saluran, maka dirancang lebar strip tidak terlalu besar.



Gambar 2 Pola Medan Listrik dalam Saluran mikrostrip

Besaran saluran yang sangat penting adalah impedansi karakteristik dan kecepatan fasa. Dalam praktek, untuk menganalisis saluran mikrostrip digunakan pendekatan quasi-statik; mikrostrip dimodelkan dengan saluran TEM dengan kapasitansi/satuan panjang,  $C$ , dan induktanso/satuan panjang  $L$ , dievaluasi dengan penyelesaian persamaan Laplace. Dengan pendekatan ini akan dapat dihitung impedansi karakteristik dan konstanta fasa dari saluran.

Model static dari saluran, dapat dinyatakan dengan  $C$  dan  $C_0$ , bukan lagi dengan  $C$  dan  $L$ . besaran  $C$  adalah kapasitansi saluran jika udaranya diganti dengan dielektrik yang konstanta dielektriknya  $\epsilon_r$ , sedangkan  $C_0$  adalah kapasitansi saluran jika dielektriknya, secara hipotetik, kita ganti dengan udara sehingga  $\epsilon_r = 1$ . Kemudian konstanta dielektrik efektif didefinisikan sebagai

$$1 < \epsilon_e = \frac{C}{C_0} < \epsilon_r$$

Pada frekuensi rendah, dengan syarat static, konstanta dielektrik dan impedansi karakteristik, dicari dengan metoda conformal mapping (Collin), dan diperoleh, konstanta dielektrik efektif

$$\varepsilon_e = \begin{cases} \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12W/h}} \right) + 0.04 \left( 1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right], & \frac{W}{h} \leq 1 \\ \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12W/h}} \right), & \frac{W}{h} > 1 \end{cases} \quad (1)$$

Impedansi karakteristik

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_e}} \ln \left( \frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right) & \frac{W}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi/\sqrt{\varepsilon_e}}{W/h + 1.393 + 0.667 \ln(W/h + 1.444)} & \frac{W}{h} > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Jadi jika diketahui, konstanta dielektrik  $\varepsilon_r$ , lebar strip  $W$ , dan ketebalan dielektrik  $h$ , maka konstanta dielektrik  $\varepsilon_e$  dan impedansi karakteristik  $Z_0$  dapat dihitung. Persamaan (1) dan (2) di atas disebut persamaan analisis.

Dalam praktek, biasanya yang diketahui adalah impedansi karakteristik  $Z_0$ , konstanta dielektrik  $\varepsilon_r$ , dan ketebalan dielektrik  $h$ , sedangkan lebar strip dicari. Dengan demikian kita harus menggunakan persamaan untuk sintesis, yaitu:

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \frac{W}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ (B - 1) - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left( \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right) \right] & \frac{W}{h} > 2 \end{cases} \quad (3)$$

dengan

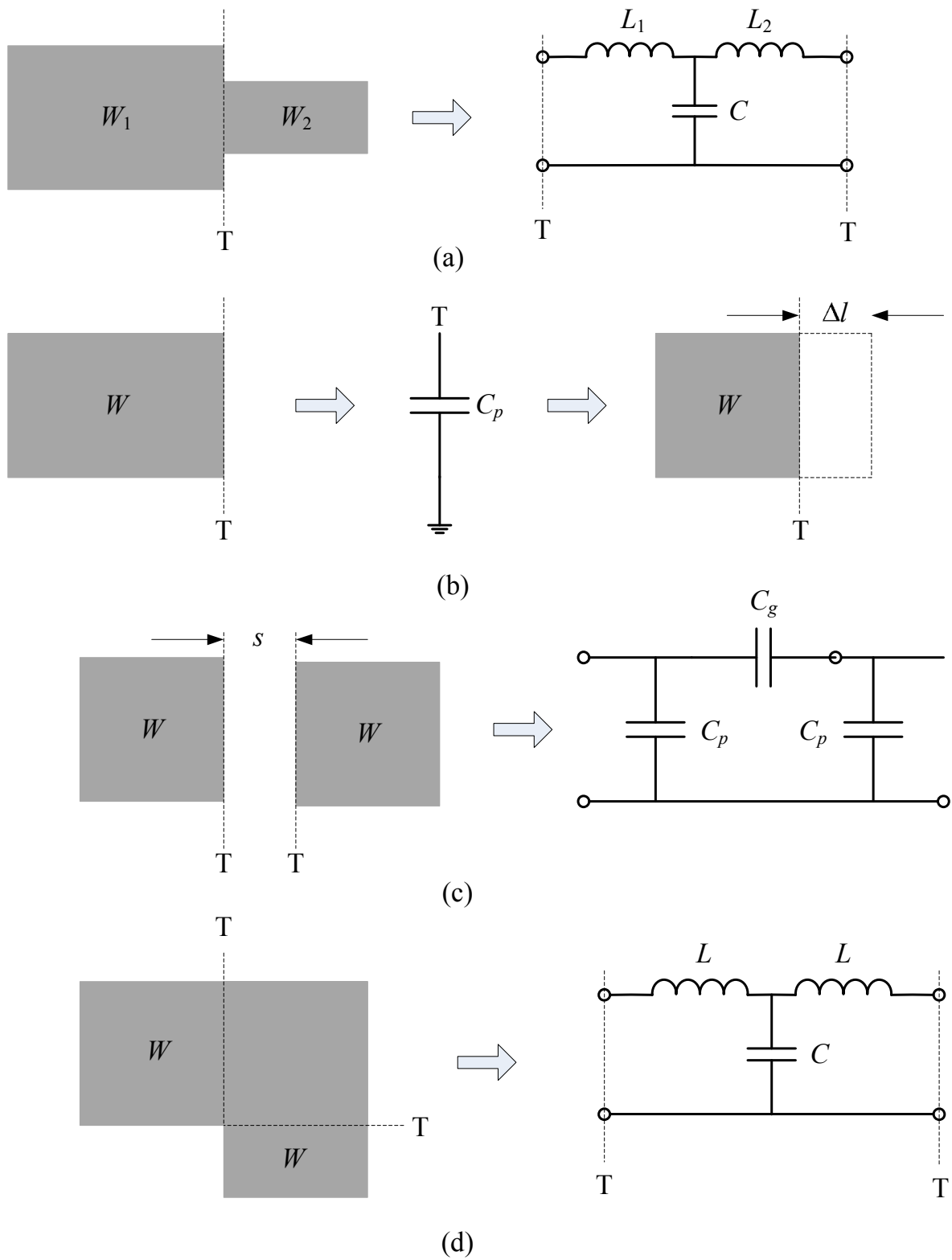
$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r - 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r} \right)} \quad (4a)$$

$$B = \frac{60\pi}{Z_0 \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (4b)$$

Jika diketahui  $Z_0$ ,  $\varepsilon_r$ , dan  $h$ , gunakan persamaan (3) atas untuk menghitung  $W/h$ . Jika memenuhi syarat  $W/h < 2$ , maka itulah nilai  $W/h$  yang diinginkan. Jika tidak, maka  $W/h$  dihitung menggunakan persamaan (3) yang bawah.

## Diskontinuitas

Diskontinuitas pada mikrostrip biasanya ditemui pada perancangan filter praktis, seperti: step, ujung terbuka (open end), bend, gap, dan junction. Gambar 3 memperlihatkan beberapa struktur diskontinuitas bersama rangkaian ekivalennya.



Gambar 3 Diskontinuitas dalam mikrostrip (a) step; (b) open end; (c) gap; (d) bend

## 1. Step pada Lebar

Untuk Step yang simetris, kapasitansi dan induktansi dari rangkaian ekuivalen pada Gambar 3 diberikan oleh:

$$C = 0.00137h \frac{\sqrt{\epsilon_{e1}}}{Z_{01}} \left(1 - \frac{W_2}{W_1}\right) \left(\frac{\epsilon_{e1} + 0.3}{\epsilon_{e1} - 0.258}\right) \left(\frac{W_1/h + 0.264}{W_1/h + 0.8}\right) \quad (5)$$

$$L_1 = \frac{L_{w1}}{L_{w1} + L_{w2}} L, \quad L_1 = \frac{L_{w2}}{L_{w1} + L_{w2}} L \quad (6)$$

dengan

$$L_{wi} = \frac{Z_{0i} \sqrt{\epsilon_{ei}}}{c}$$

$$L = 0.000987h \left(1 - \frac{Z_{01}}{Z_{02}} \sqrt{\frac{\epsilon_{e1}}{\epsilon_{e2}}}\right)^2 (nH)$$

Dimana  $L_{wi}$ ,  $i = 1, 2$  adalah induktansi/satuan panjang untuk mikrostrip, yang lebarnya  $W_1$  dan  $W_2$ , sedangkan  $Z_{0i}$  adalah impedansi karakteristik mikrostrip dengan lebar  $W_i$ , dan  $c$  adalah kecepatan cahaya di vakum,  $h$  adalah ketebalan substrat.

## 2. Open End

Pada mikrostrip dengan lebar  $W$  dan ujung terbuka, medan listrik dan magnetic tidak berhenti secara mendadak, tapi akan meluap akibat dari fringing field. Efek ini dapat dimodelkan dengan sebuah kapasitor  $C_p$  atau dengan penambahan panjang sebesar  $\Delta l$ , seperti pada Gambar 3b. Pada perancangan filter penambahan panjang  $\Delta l$  lebih disukai daripada kapasitor parallel  $C_p$ . Hubungan antara penambahan panjang dengan kapasitor diberikan oleh:

$$\Delta l = \frac{cZ_0C_p}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (7)$$

Dengan  $c$  adalah kecepatan cahaya di vakum. Bentuk tertutupnya diberikan oleh

$$\frac{\Delta l}{h} = \frac{\xi_1 \xi_3 \xi_5}{\xi_4} \quad (8)$$

Dimana

$$\xi_1 = 0.434907 \frac{\epsilon_e^{0.81} + 0.26(W/h)^{0.8544} + 0.236}{\epsilon_e^{0.81} - 0.189(W/h)^{0.8544} + 0.87}$$

$$\xi_2 = 1 + \frac{(W/h)^{0.371}}{2.35\epsilon_r + 1}$$

$$\xi_3 = 1 + \frac{0.5274 \tan^{-1}(0.084(W/h)^{1.9413/\xi_2})}{\varepsilon_e^{0.9236}}$$

$$\xi_4 = 1 + 0.037 \tan^{-1}(0.067(W/h)^{1.456}) \times [6 - 5 \exp(0.036(1 - \varepsilon_r))]$$

$$\xi_5 = 1 - 0.218 \exp(-7.5 W/h)$$

Akurasinya lebih baik dari 0.2% untuk  $0.01 \leq W/h \leq 100$  dan  $\varepsilon_r \leq 128$ .

### 3. Gap

Gap pada saluran mikrostrip diperlihatkan pada Gambar 3c. Kapasitansi paralel dan seri,  $C_p$  dan  $C_g$  diberikan oleh

$$C_p = 0.5C_e, \quad C_g = 0.5C_o - 0.25C_e \quad (9)$$

dimana

$$\frac{C_o}{W} = \left(\frac{\varepsilon_r}{9.6}\right)^{0.8} \left(\frac{s}{W}\right)^{m_o} \exp(k_o) \text{ pF/m}$$

$$\frac{C_e}{W} = 12 \left(\frac{\varepsilon_r}{9.6}\right)^{0.9} \left(\frac{s}{W}\right)^{m_e} \exp(k_e) \text{ pF/m}$$

dengan

$$\begin{aligned} m_o &= \frac{W}{h} (0.619 \log(W/h) - 0.3853) \\ k_o &= 4.26 - 1.453 \log(W/h) \end{aligned} \quad \text{Untuk } 0.1 \leq s/W \leq 1.0$$

$$\begin{aligned} m_e &= 0.8675 \\ k_e &= 2.043 \left(\frac{W}{h}\right)^{0.12} \end{aligned} \quad \text{Untuk } 0.1 \leq s/W \leq 0.3$$

$$\begin{aligned} m_e &= \frac{1.565}{(W/h)^{0.16}} - 1 \\ k_e &= 1.97 - \frac{0.03}{W/h} \end{aligned} \quad \text{Untuk } 0.3 \leq s/W \leq 1.0$$

Akurasi rumus di atas berada sekitar 7% untuk  $0.5 \leq W/h \leq 2$  dan  $2.5 \leq \varepsilon_r \leq 15$ .

### 4. Bend

Right angle bend pada Gambar 3d dapat dimodelkan dengan rangkaian T. Kapasitansi dan induktansi diberikan oleh:

$$\frac{C}{W} \text{ (pF/m)} = \begin{cases} \frac{(14\varepsilon_r + 12.5) W/h - (1.83\varepsilon_r - 2.25)}{\sqrt{W/h}} + \frac{0.02\varepsilon_r}{W/h} & \frac{W}{h} < 1 \\ (9.5\varepsilon_r + 1.25) W/h + 5.2\varepsilon_r + 7.0 & \frac{W}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (10a)$$

$$\frac{L}{h} \text{ (nH/m)} = 100 \left( 4 \sqrt{\frac{W}{h} - 4.21} \right) \quad (10b)$$

Akurasi untuk ekspresi kapasitansi sekitar 5% untuk  $2.5 \leq \varepsilon_r \leq 15$  dan  $0.1 \leq W/h \leq 5$ . Akurasi untuk induktansi sekitar 3% untuk  $0.5 \leq W/h \leq 2.0$ .

### Komponen-komponen mikrostrip

Komponen-komponen mikrostrip sering ditemui pada perancangan filter dan matching network. Komponen-komponen tersebut diantaranya: kapasitor dan inductor lumped, elemen quasi lumped (yaitu potongan saluran pendek dan stub), dan resonator.

#### 1. Inductor dan Kapasitor Lumped

Gambar 4 dan 5 memperlihatkan beberapa konfigurasi inductor dan kapasitor planar mikrostrip. Komponen-komponen ini dikategorikan sebagai elemen-elemen yang dimensi fisiknya jauh lebih kecil dari panjang gelombang di udara,  $\lambda_0$ , dari frekuensi kerja yang paling tinggi, misalnya  $0.1\lambda_0$ . Dengan demikian mereka mempunyai karakteristik ukuran fisik kecil, murah, dan bandwidth lebar; hanya saja factor kualitas  $Q$  mereka kecil.

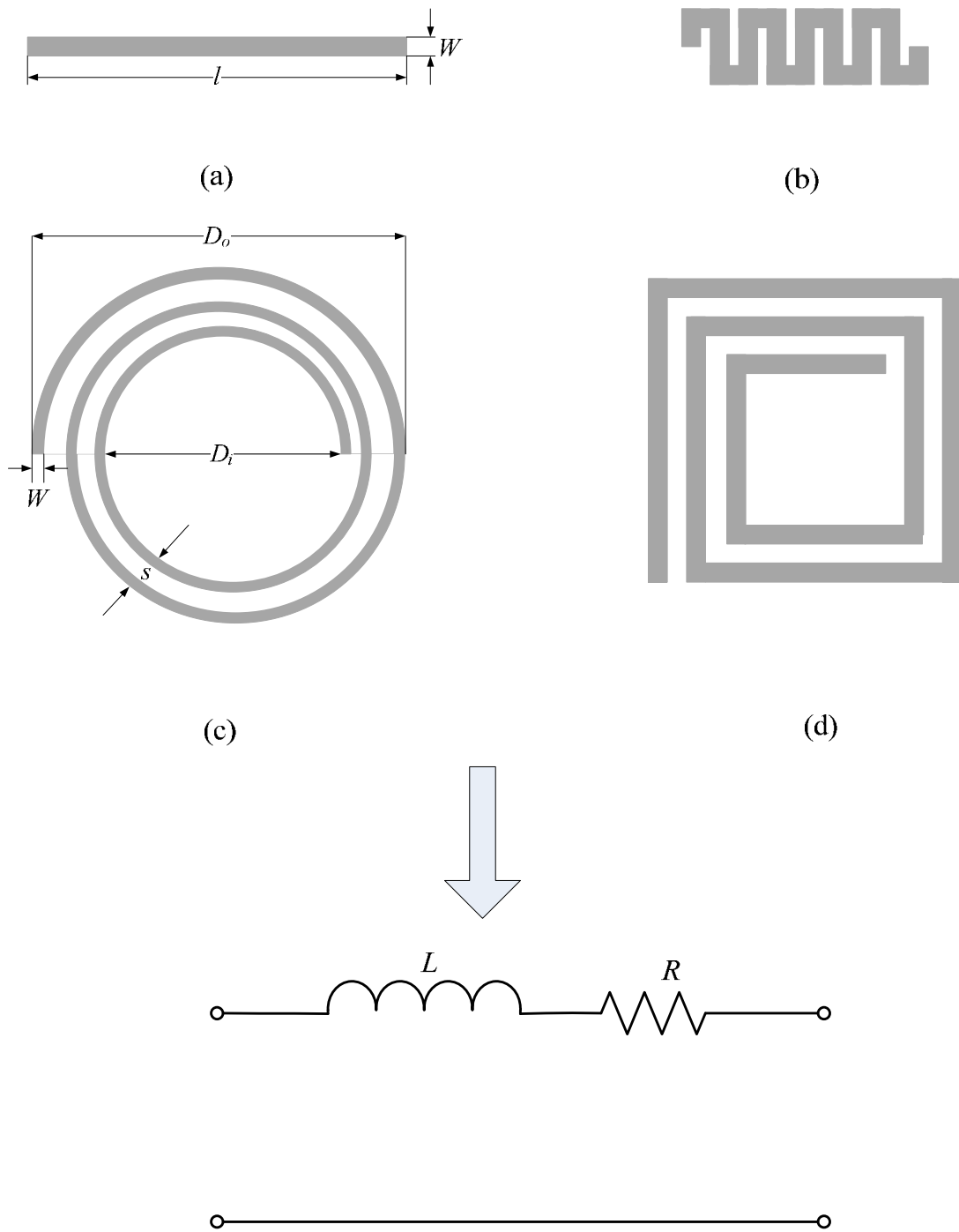
*Inductor*: untuk perancangan inductor digunakan persamaan-persamaan pendekatan berikut. Lebar, ketebalan, dan panjang dari strip kita tuliskan sebagai  $W$ ,  $t$ , dan  $l$ . Ketebalan konduktor  $t$  harus lebih besar dari tiga kali skin depth. Pada kasus inductor spiral,  $n$  menunjukkan jumlah putaran, dan  $s$  adalah jarak antar konduktor. Kemudian  $R_s$  adalah resistansi permukaan dalam ohm/m<sup>2</sup>.

Untuk inductor saluran lurus:

$$L \text{ (nH)} = 2 \times 10^{-4} l \left[ \ln \left( \frac{l}{W+t} \right) + 1.193 + 0.2235 \frac{W+t}{l} \right] \cdot K_g \quad l \text{ dalam } \mu\text{m} \quad (11a)$$

$$R = \frac{R_s l}{2(W+t)} \left[ 1.4 + 0.217 \ln \left( \frac{W}{5t} \right) \right] \quad 5 < \frac{W}{t} < 100 \quad (11b)$$

Untuk inductor spiral lingkaran:



Gambar 4 Induktor Lumped elemen (a) saluran impedansi tinggi; (b) saluran meander; (c) spiral lingkaran; (d) spiral kotak; (e) rangkaian ekuivalen



$$L(\text{nH}) = 0.03937 \frac{a^2 n^2}{8a + 11c} \cdot K_g \quad \text{untuk } a \text{ dalam } \mu\text{m} \quad (12a)$$

$$a = \frac{D_o + D_i}{4}, \quad c = \frac{D_o - D_i}{2}$$

$$R = 1.5 \frac{\pi a n R_s}{W} \quad (12b)$$

Untuk induktor loop digunakan induktor spiran lingkaran dengan mengambil  $n = 1$ . Pada persamaan induktor,  $K_g$  adalah factor koreksi akibat dari efek ground plane, yang cenderung mengurangi nilai induktansi jika ground plane mendekati konduktor. Dengan pendekatan orde pertama, ekspresi bentuk tertutup untuk  $K_g$  adalah:

$$K_g = 0.57 - 0.145 \ln\left(\frac{W}{h}\right) \quad \frac{W}{h} > 0.05 \quad (13)$$

dengan  $h$  adalah ketebalan substrat. Factor kualitas tak-terbebani (unloaded)  $Q$  dapat dihitung dari

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (14)$$

*Kapasitor:* Komponen lumped kapasitor diperlihatkan pada Gambar 5. Gambar 5a berupa kapasitor interdigital, sedangkan Gambar 5b adalah kapasitor MIM (metal-insulator-metal). Gambar 5c memperlihatkan rangkaian ekuivalen idealnya.

Kapasitor interdigital: lebar jari-jari konduktor adalah  $W$  dan jarak antar jari-jari dinyatakan dengan  $s$ , nilai estimasi kapasitansinya adalah

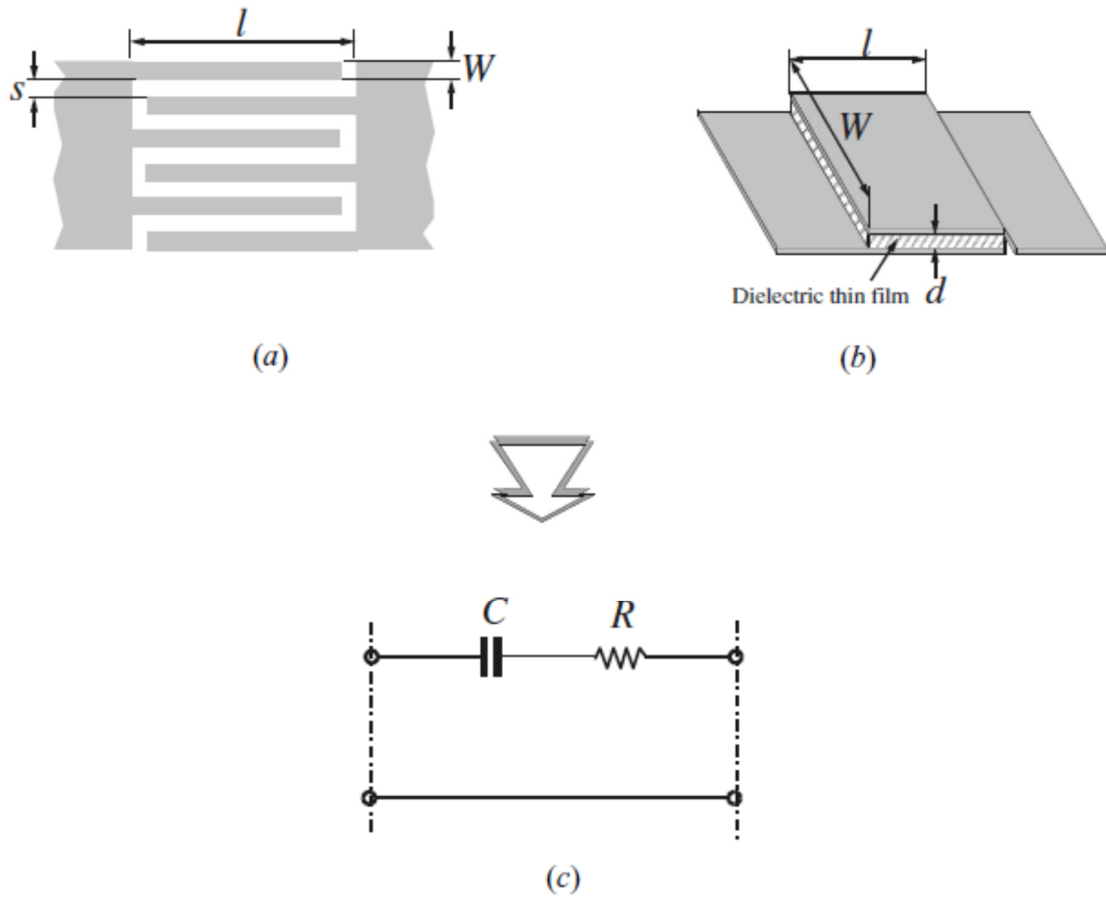
$$C(\text{pF}) = 3.937 \times 10^{-5} l (\epsilon_r + 1) [0.11(n - 3) + 0.252] \quad \text{untuk } l \text{ dalam } \mu\text{m} \quad (15a)$$

Dimana  $n$  adalah jumlah jari-jarinya dan  $\epsilon_r$  adalah konstanta dielektrik dari substrat. Factor kualitas,  $Q$  yang berhubungan dengan rugi-rugi konduktor diberikan oleh

$$Q_c = \frac{1}{\omega C R} \quad \text{untuk} \quad R = \frac{4 R_s l}{3 n W} \quad (15b)$$

Factor kualitas karena rugi-rugi dielektrik mendekati  $Q_d = 1/\tan(\delta)$ , dengan  $\tan(\delta)$  adalah tangen rugi-rugi dari dielektrik. Faktor kualitas total menjadi

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (16)$$



Gambar 5 Kapasitor lumped elemen (a) kapasitor interdigital; (b) kapasitor MIM; (c) rangkaian ekivalen ideal

Kapasitor MIM: untuk kapasitor MIM nilai kapasitansi hampir sama dengan kapasitor plat sejajar

$$C = \frac{\epsilon(W \times l)}{d} \quad (17a)$$

Dimana  $(W \times l)$  adalah luas plat metal yang dipisahkan oleh substrat dielektrik (thin film) dengan ketebalan  $d$  dan konstanta dielektrik  $\epsilon$ . Faktor kualitas konduktor,  $Q_c$  diberikan oleh

$$Q_c = \frac{1}{\omega CR}, \quad R = \frac{R_s l}{W} \quad (17b)$$

Faktor kualitas total sama seperti pada (16).

## 2. Quasilumped Element

Potongan pendek dan stub saluran mikrostrip yang panjang fisiknya lebih kecil dari seperempat panjang gelombang dalam saluran,  $\lambda_g$ , paling banyak digunakan untuk realisasi komponen microwave dalam struktur filter mikrostrip, dan biasa disebut *quasilumped element*.

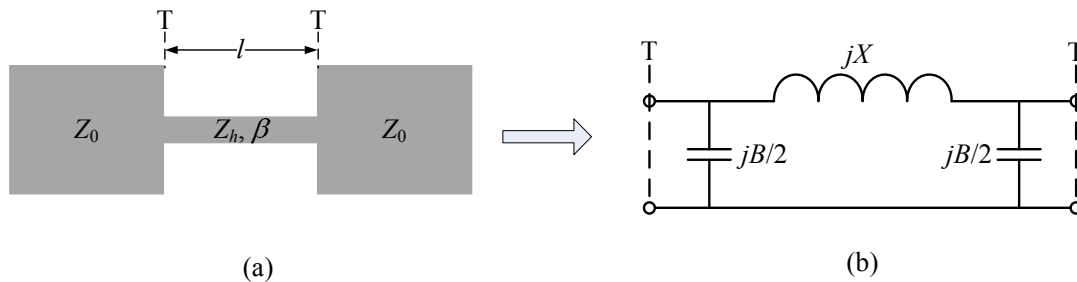
*Saluran pendek dengan impedansi tinggi dan rendah:* Gambar 6 memperlihatkan sebuah segmen saluran tak meredam dengan impedansi karakteristik tinggi,  $Z_h$ , diapit oleh saluran dengan impedansi yang lebih rendah,  $Z_0$ , direpresentasikan dengan sebuah rangkaian- $\pi$  ekuivalen. Untuk konstanta propagasi  $\beta = 2\pi/\lambda_g$  dari sebuah saluran pendek, parameter rangkaian diberikan oleh

$$X = Z_h \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} l\right) \quad \frac{B}{2} = \frac{1}{Z_h} \tan\left(\frac{\pi}{\lambda_g} l\right) \quad (18)$$

Jika  $l < \lambda_g/8$ , maka

$$X \approx Z_h \frac{2\pi}{\lambda_g} l \quad \frac{B}{2} \approx \frac{1}{Z_h} \frac{\pi}{\lambda_g} l \quad (19)$$

Dapat diperlihatkan bahwa jika  $Z_h \gg Z_0$ , efek dari susceptansi parallel dapat diabaikan, dan saluran pendek tersebut ekuivalen dengan sebuah induktor seri. Nilai induktansinya diperoleh dari  $L = X/\omega$ .



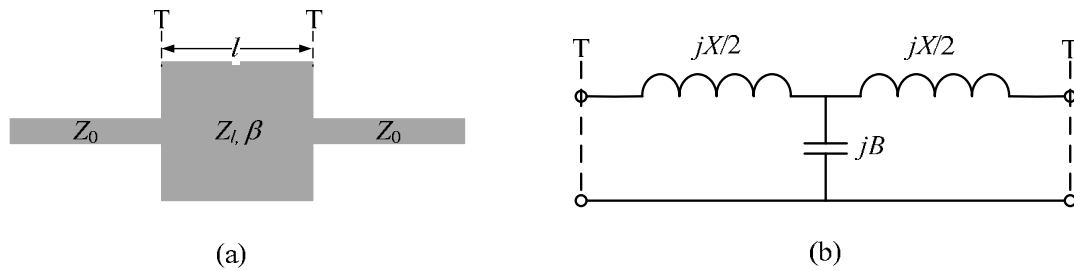
Gambar 6 Elemen saluran pendek dengan impedansi karakteristik tinggi

Kebalikan dari Gambar 6, Gambar 7 memperlihatkan saluran dengan impedansi karakteristik rendah,  $Z_l$ , diapit dengan saluran yang impedansi karakteristiknya lebih besar,  $Z_0$ , yang direpresentasikan dengan rangkaian ekuivalen bentuk T. Parameter rangkaian diberikan oleh

$$B = \frac{1}{Z_l} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} l\right) \quad \frac{X}{2} = Z_l \tan\left(\frac{\pi}{\lambda_g} l\right) \quad (20)$$

Untuk  $l < \lambda_g/8$ , maka

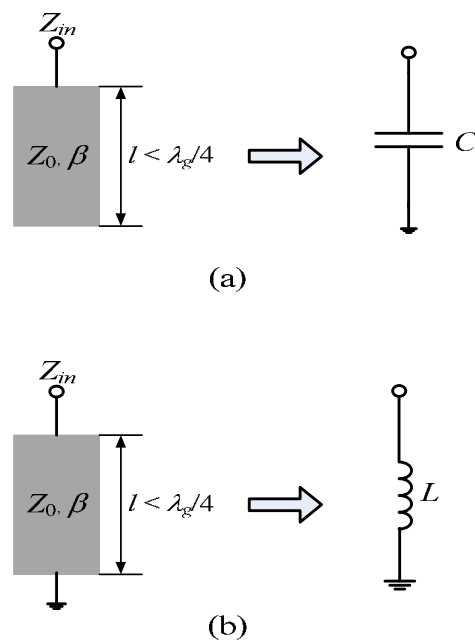
$$B \approx \frac{1}{Z_l} \frac{2\pi}{\lambda_g} l \quad \frac{X}{2} \approx Z_l \frac{\pi}{\lambda_g} l \quad (21)$$



Gambar 7 Elemen saluran pendek dengan impedansi karakteristik rendah

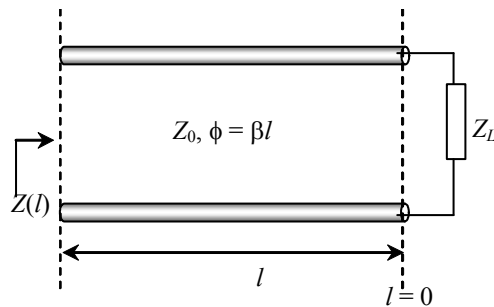
Jika  $Z_l \ll Z_0$ , efek dari reaktansi seri dapat diabaikan. Dengan demikian rangkaian ekuivalennya hanya tinggal kapasitor parallel dengan nilai kapasitansi  $C = B/\omega$ .

*Stub ujung terbukan dan ujung tertutup:* Stub ujung terbuka (open circuit) dan ujung tertutup (short circuit) diperlihatkan pada Gambar 8a dan Gambar 8b. Untuk panjang saluran kurang dari seperempat panjang gelombang, stub ujung terbuka identik dengan kapasitor, sedangkan untuk stub ujung tertutup identik dengan induktor.



Gambar 8 Elemen stub pendek (a) stub ujung terbuka; (b) stub ujung tertutup

untuk mengerti hal tersebut, mari kita ulas kembali tentang impedansi masukan dari sebuah saluran transmisi yang diterminasi dengan beban  $Z_L$ . Gambar 9 memperlihatkan sebuah saluran dengan impedansi karakteristik  $Z_0$  dengan ujung kanan diterminasi dengan impedansi beban  $Z_L$ . Impedansi masukan pada jarak  $l$  dari beban diberikan oleh



Gambar 9 Impedansi saluran pada jarak  $l$  dari beban

$$Z_{in}(l) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)} \quad (22)$$

### Saluran dengan panjang $\lambda/4$ dan $\lambda/2$

Saluran yang panjangnya seperempat panjang gelombang mengakibatkan  $\beta l = \pi/2$  sehingga  $\tan(\beta l) = \infty$ . Dengan demikian impedansi dan admitansi masukan untuk saluran  $\lambda/4$  adalah

$$Z_{in}(l = \lambda/4) = Z_0 \lim_{\tan(\beta l) \rightarrow \infty} \frac{Z_L / \tan(\beta l) + jZ_0}{Z_0 / \tan(\beta l) + jZ_L} = \frac{Z_0^2}{Z_L} \quad (23)$$

Untuk saluran setengah panjang gelombang,  $\beta l = \pi$  sehingga  $\tan \beta l = 0$ . Jadi impedansi dan admitansi masukan paa saluran  $\lambda/2$  adalah

$$Z_{in}(l = \lambda/2) = Z_L \quad (24)$$

### Impedansi dan admitansi untuk saluran dengan beban short dan open circuit

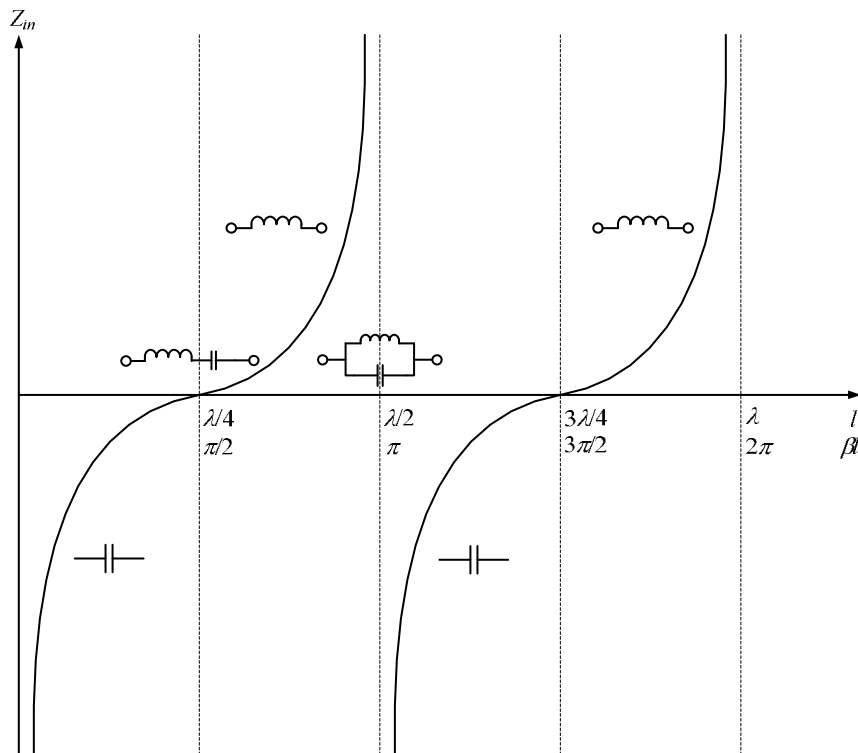
Saluran yang ujung bebannya diterminasi dengan beban short circuit,  $Z_L = 0$ , akan memiliki impedansi masukan pada jarak  $l$  dari beban

$$Z_{sc} = jZ_0 \tan(\beta l) \quad (25)$$

sedangkan untuk beban open circuit,  $Z_L = \infty$ ,

$$Z_{oc} = Z_0 \lim_{Z_L \rightarrow \infty} \frac{1 + j Z_0 \tan(\beta l) / Z_L}{Z_0 / Z_L + j \tan(\beta l)} = -j Z_0 \cot(\beta l) \quad (26)$$

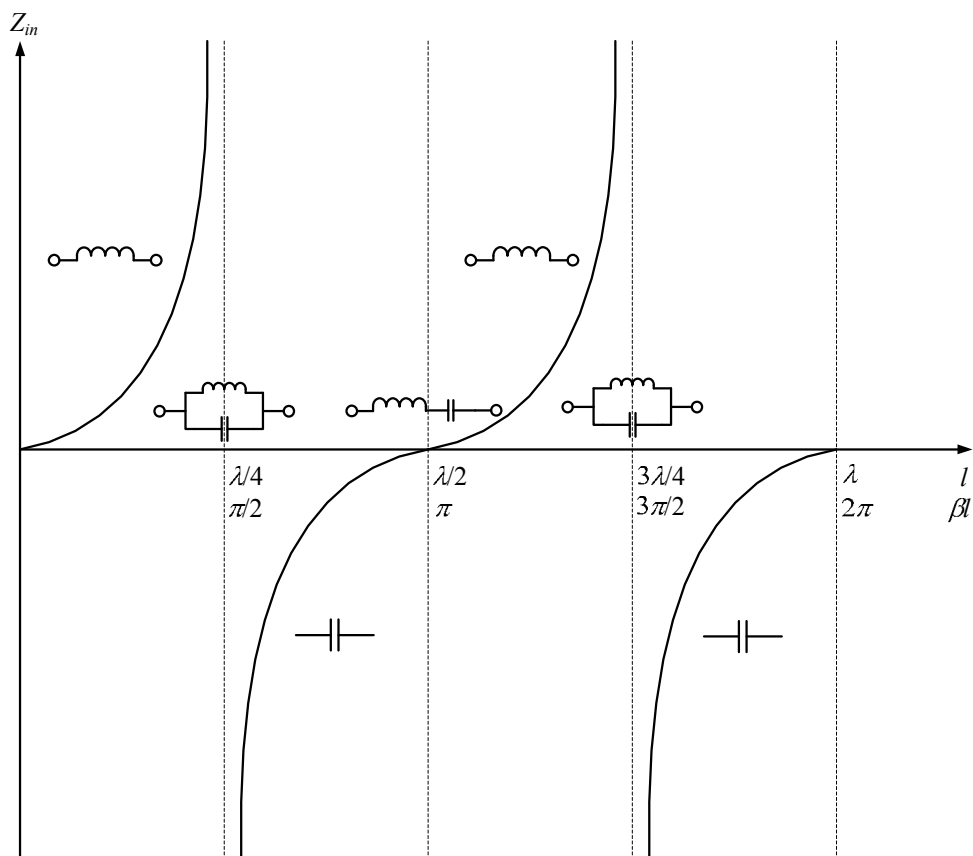
Jika disajikan dalam bentuk grafik, untuk beban open circuit, diberikan pada Gambar 10. Dari Gambar 10 tersebut terlihat (panjang saluran dibatasi hanya sampai  $\lambda_g$ ) bahwa sifat kapasitif terjadi untuk panjang saluran  $l < \lambda_g/4$  dan  $\lambda_g/2 < l < 3\lambda_g/2$ , sedangkan untuk  $\lambda_g/4 < l < \lambda_g/2$ , dan  $3\lambda_g/4 < l < \lambda_g$ , saluran bersifat induktif. Pada  $l = \lambda_g/4$  saluran identik dengan rangkaian resonansi seri, sedangkan jika  $l = \lambda_g/2$  ia menjadi identik dengan rangkaian resonansi paralel.



Gambar 10 Impedansi untuk saluran dengan beban ujung terbuka (open circuit)

Nilai kapasitansi untuk Gambar 8a diperoleh dari  $C = 1/\omega Z_{in}$

Untuk beban ujung tertutup (short circuit), impedansi sebagai fungsi dari panjang saluran diperlihatkan pada Gambar 11. Dari Gambar 11 dapat kita lihat sifat saluran dengan beban ujung tertutup merupakan kebalikan dari saluran dengan beban ujung terbuka. Jika pada ujung terbuka bersifat C, pada ujung tertutup bersifat L. Begitu juga sifat resonansi; jika pada ujung terbuka bersifat resonansi seri, maka pada ujung tertutup menjadi resonansi paralel. Untuk saluran pada Gambar 8b, nilai induktansi diberikan oleh  $L = Z_{in}/\omega$ .



Gambar 11 Impedansi untuk saluran dengan beban ujung tertutup (short circuit)