

Week 5

Konstanta Saluran Transmisi  
primer dan sekunder

Konstanta kabel koax dan kabel paralel ganda

Pada pembahasan lalu:

Besaran  $\gamma$  dan  $Z$  dari sebuah saluran transmisi memainkan peranan penting pada fenomena perambatan gelombang.

Konstanta propagasi  $\gamma$ , di dalamnya terkandung

$\alpha$ : konstanta peredaman

$\beta$ : konstanta fasa

dan impedansi gelombang  $Z$  : pengaruh pada impedansi apa pada beban, yang akan menghasilkan gelombang refleksi.

Kedua besaran itu ditentukan oleh :  
besaran per-satuan panjang,  $R'$ ,  $L'$ ,  $G'$  dan  $C'$ .

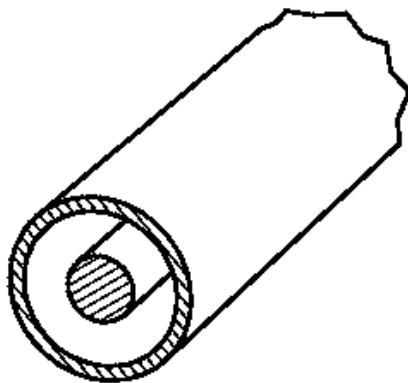
Jadi perhitungan dan penentuan  $R'$ ,  $L'$ ,  $G'$  dan  $C'$  menjadi bagian yang esensial dalam menentukan karakteristik propagasi sebuah saluran transmisi.

Nilai  $R'$ ,  $L'$ ,  $G'$  dan  $C'$  ditentukan langsung dari geometri dari saluran transmisi itu sendiri dan material penyusunnya, sehingga ke-empat besaran ini dinamakan **konstanta primer** saluran transmisi.

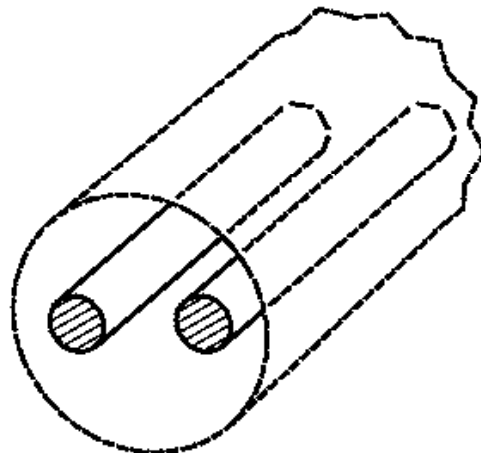
Sedangkan  $\gamma$  dan  $Z$  baru bisa dihitung setelah besaran primer di atas, maka dinamakan juga **konstanta sekunder**.

Gambar di bawah ini menunjukkan tiga tipe saluran transmisi penting yang dipakai pada aplikasi teknik.

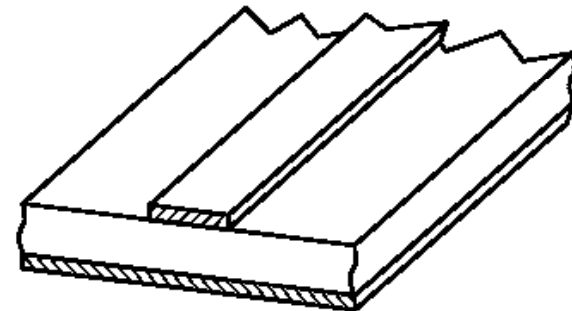
Kabel koax



kabel paralel ganda

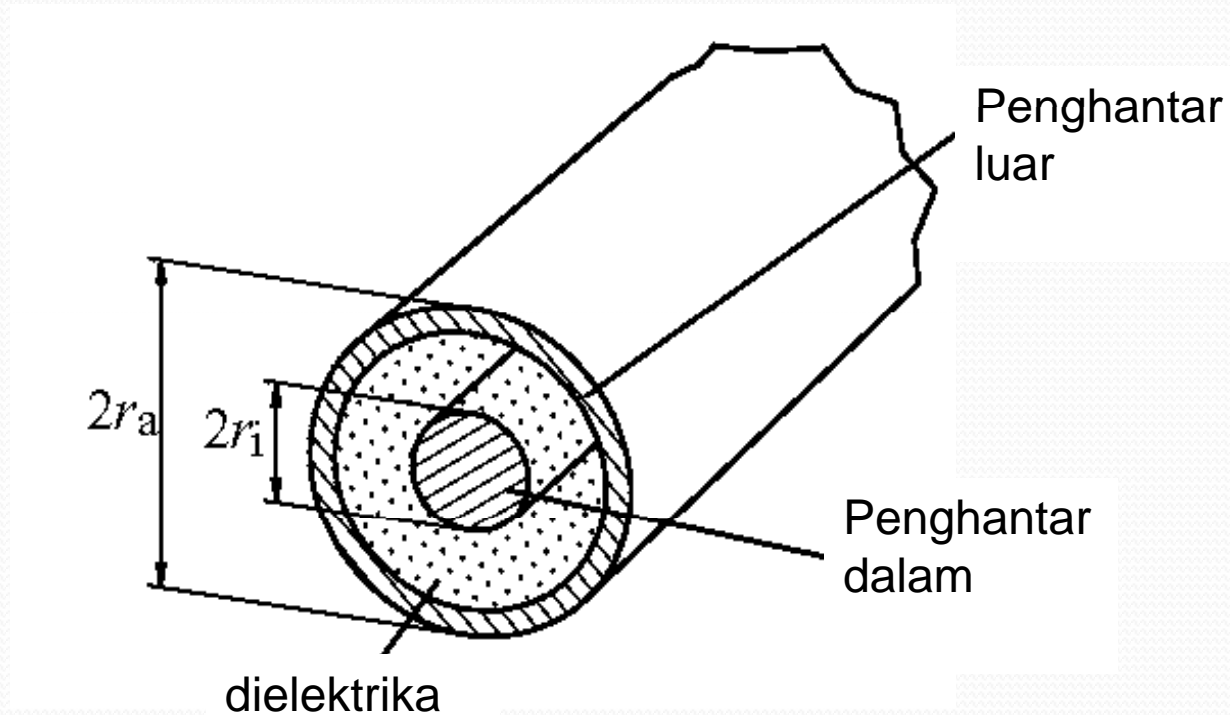


mikrostrip



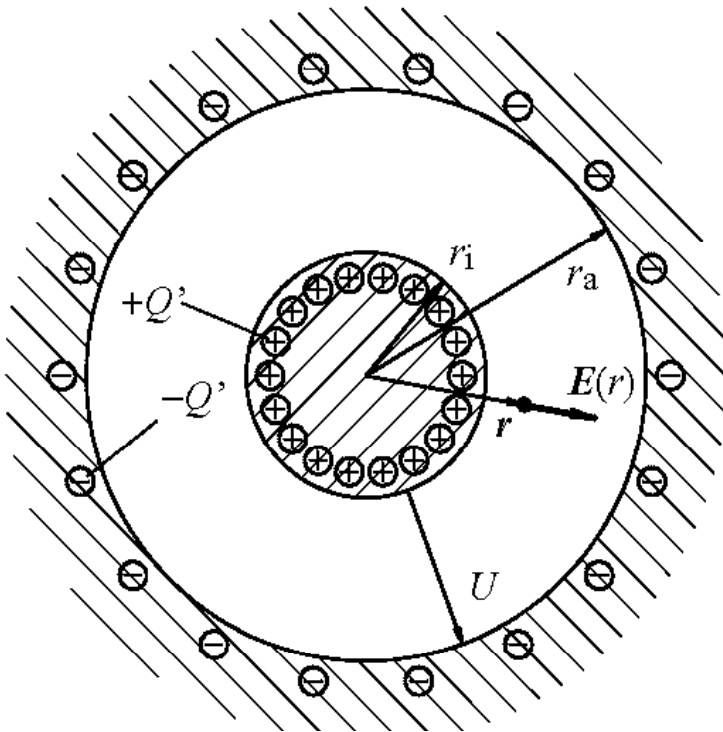
## Kabel Koax

konstanta primer dihitung dengan persamaan-persamaan Maxwell dan syarat batasnya pada struktur saluran transmisi koax ini.



Kabel koax adalah contoh saluran transmisi yang secara matematis cukup mudah untuk dianalisa, dan secara praktis mempunyai bidang aplikasi yang cukup luas

## Perhitungan C'



$$C' = \frac{Q'}{V}$$

$$E(\rho) = \frac{Q'}{2\pi\epsilon\rho}$$

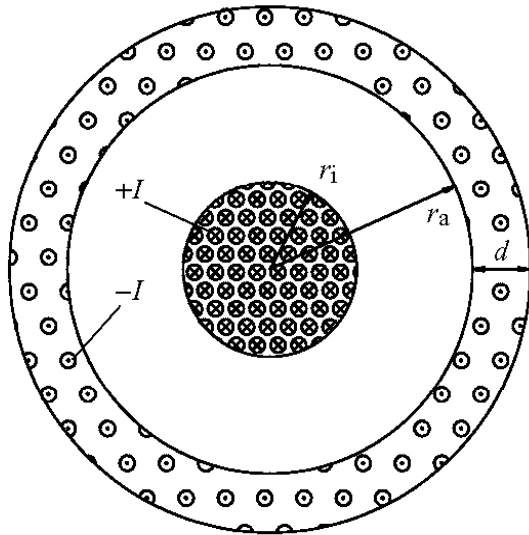
$$V = \int_{r_i}^{r_o} E(\rho) d\rho$$

$$V = \frac{Q'}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)$$

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_o\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}$$

## Perhitungan $L'$

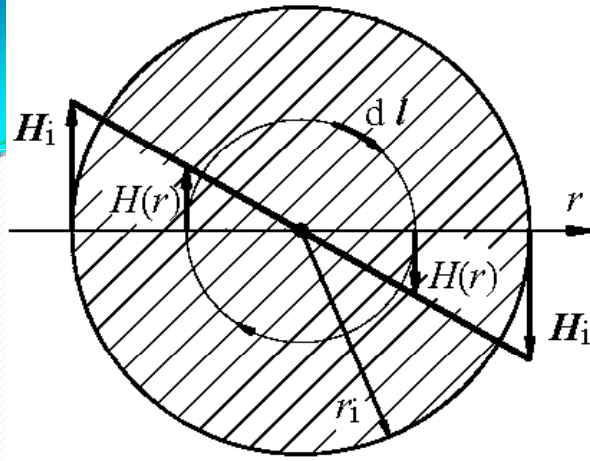
$$L' = \frac{\psi'_m}{I}$$



$\psi'_m$  adalah fluks magnetis, yang merupakan besaran aliran medan magnet yang menembus suatu permukaan

Dengan menggunakan asumsi arus yang mengalir di dalam penghantar, baik dalam atau luar, homogen (berlaku terutama sekali pada frekuensi rendah), akan dihitung medan magnet yang dihasilkan struktur tersebut.

Medan magnet di dalam penghantar dalam bisa dihitung dengan hukum Ampere



$$\oint \vec{H}(r) \cdot d\vec{r} = I(r) \quad \text{dengan} \quad I(r) = \frac{r^2}{r_i^2} I$$

$$H(r) = \frac{I(r)}{2\pi r} = \frac{I \cdot r}{2\pi r_i^2}$$

Dengan hubungan energi magnetis persatuan panjang

$$w_m = \frac{1}{2} L_i' I^2 = \int \frac{\vec{H} \cdot \vec{B}}{2} dA = \frac{\mu I^2}{8\pi^2 r_i^4} \int_0^{r_i} r^2 \cdot 2\pi r dr = \frac{\mu I^2}{4\pi r_i^4} \int_0^{r_i} r^3 dr = \frac{\mu I^2}{16\pi}$$

Sehingga  $L_i' = \frac{\mu}{8\pi}$

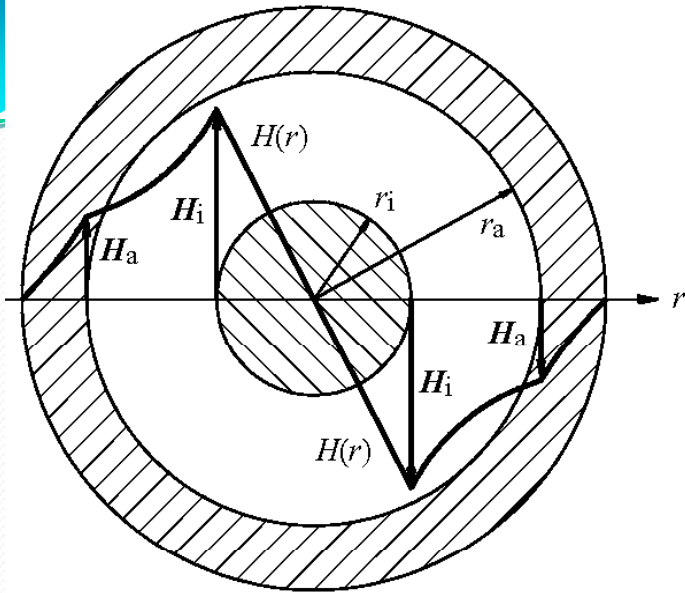
Induktivitas penghantar luar bisa dihitung dengan cara sama  
d tebal penghantar luar

$$L_o' = \frac{\mu}{8\pi} \cdot \frac{d}{r_o}$$

Induktansi dalam penghantar menjadi

$$L_i' + L_o' = \frac{\mu}{8\pi} \cdot \left( 1 + \frac{d}{r_o} \right)$$

Perhitungan medan magnet di ruang antara  
kedua penghantar



$$H(r) = \frac{I}{2\pi r}$$

Kontribusi induktansi ruang antara:

$$L_u' = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)$$

Kontribusi induktansi keseluruhan:

$$L' = \frac{\mu}{2\pi} \left( \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{d}{r_o} \right) \right)$$

Untuk perhitungan praktis, sering kali induktansi dalam diabaikan

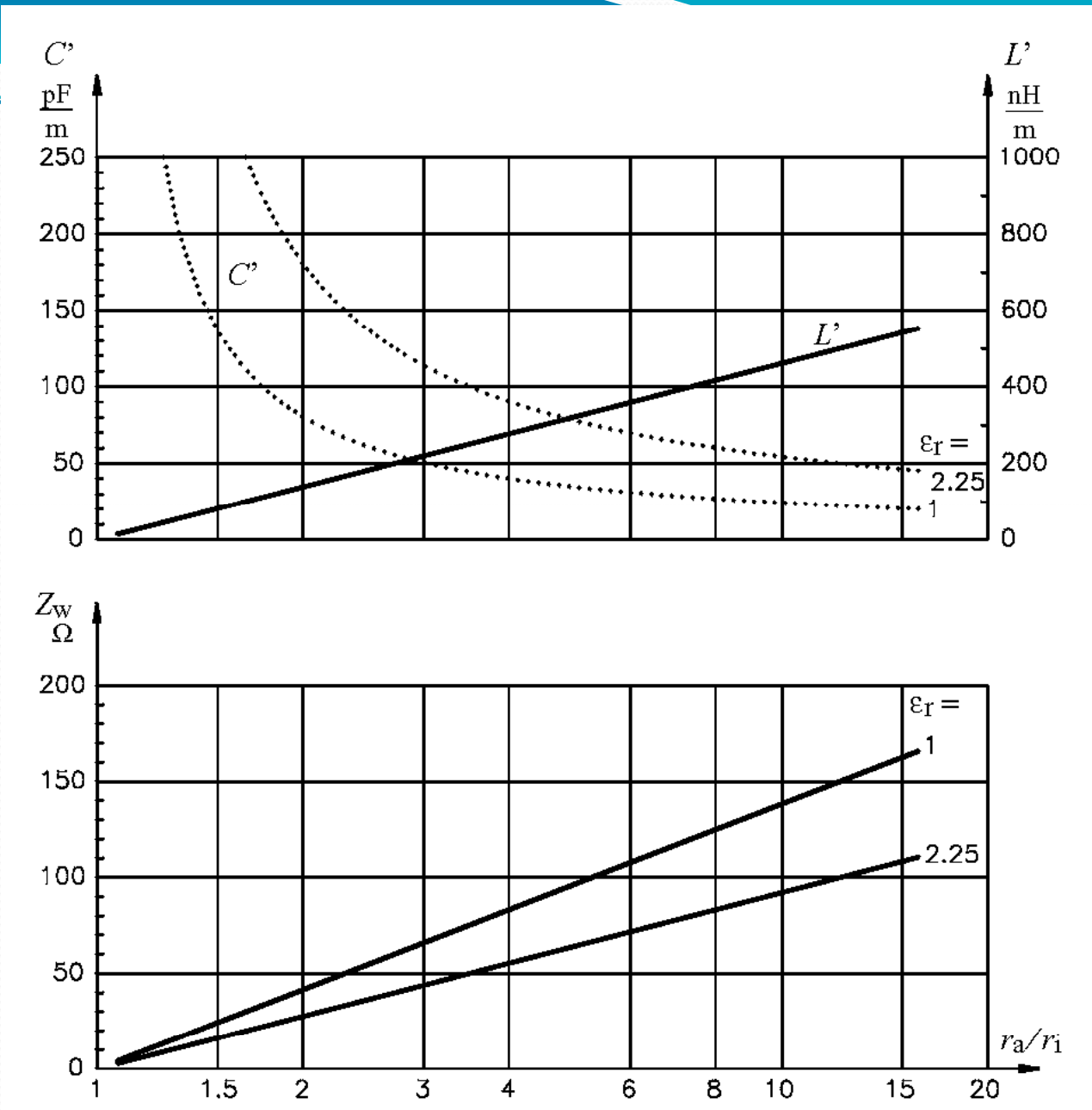
$$L' \approx \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)$$

Impedansi gelombang menjadi

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{\frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{\frac{2\pi\epsilon_o\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon} \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi}}$$

dan konstanta perambatan menjadi

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu \cdot \epsilon}$$



## Contoh perhitungan:

Rancanglah berapa radius luar dari kabel koax yang diperlukan untuk mendapatkan impedansi gelombang sebesar  $60 \Omega$ , jika tersedia kemungkinan penggunaan dielektrika dengan konstanta permittivitas relatif sebesar: 1; 2,0; dan 7,0. Radius dalam tersedia 1 mm.

Jawab:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi} \quad \text{dengan} \quad \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} = Z_o \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}$$

$$Z \approx 60 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)$$

$$60 = 60 \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \Rightarrow \left(\frac{r_o}{r_i}\right) = e^{\sqrt{\varepsilon_r}} \Rightarrow r_o = r_i e^{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

$$\text{untuk } \varepsilon_r = 1: r_o = r_i e^{\sqrt{\varepsilon_r}} = 2,72 \text{ mm}$$

$$\text{untuk } \varepsilon_r = 2: r_o = r_i e^{\sqrt{\varepsilon_r}} = 4,11 \text{ mm}$$

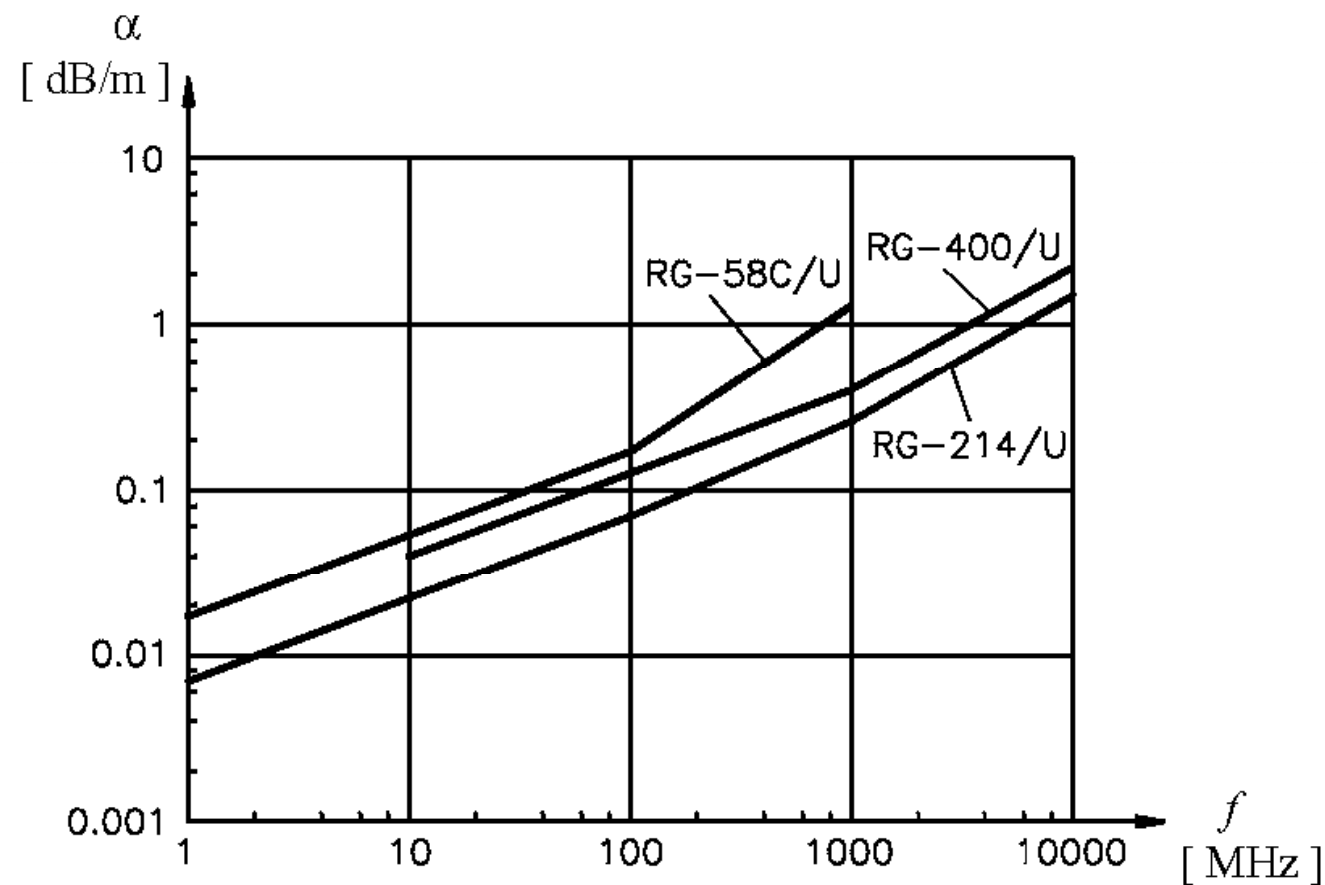
$$\text{untuk } \varepsilon_r = 7: r_o = r_i e^{\sqrt{\varepsilon_r}} = 14,09 \text{ mm}$$

Jadi penggunaan dielektrika dengan permittivitas yang tinggi, akan membesar dimensi dari kabel koax untuk impedansi yang sama.

Keuntungannya adalah, kabel koax tersebut memiliki batas break down yang lebih tinggi, artinya bisa digunakan untuk mentransmisikan energi yang lebih besar, tanpa merusak kabel itu.

Kerugian pada kabel koax terutama sekali disebabkan oleh efek kulit (skin effect) yang muncul makin nyata jika frekuensi kerja makin tinggi.

Efek kulit ini akan memberikan nilai pada  $R'$ . Nilai untuk  $G'$  terutama sekali disebabkan oleh kerugian yang ada pada dielektrika akibat proses polarisasi yang cepat, yang biasanya seringkali diabaikan.



Kabel heliak, yang sering pula dipakai untuk aplikasi WLAN 2,4 GHz memiliki peredaman sekitar 0,071 dB/m, yang jauh di bawah peredaman kabel koax pada gambar di atas, tetapi sangat mahal harganya.

Secara aproksimatif  $R'$  bisa dihitung dengan

$$R' = \frac{1}{\pi \cdot t \cdot \sigma} \left( \frac{1}{2r_i} + \frac{1}{2r_o} \right)$$

$\sigma$  adalah daya hantar elektrik dan

$t$  kedalaman akibat efek skin dengan

$$t = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

## Kabel Paralel Ganda

Kabel paralel ganda banyak dipergunakan di telekomunikasi, khususnya pada aplikasi komunikasi data (shielded/ unshielded twisted pair UTP).

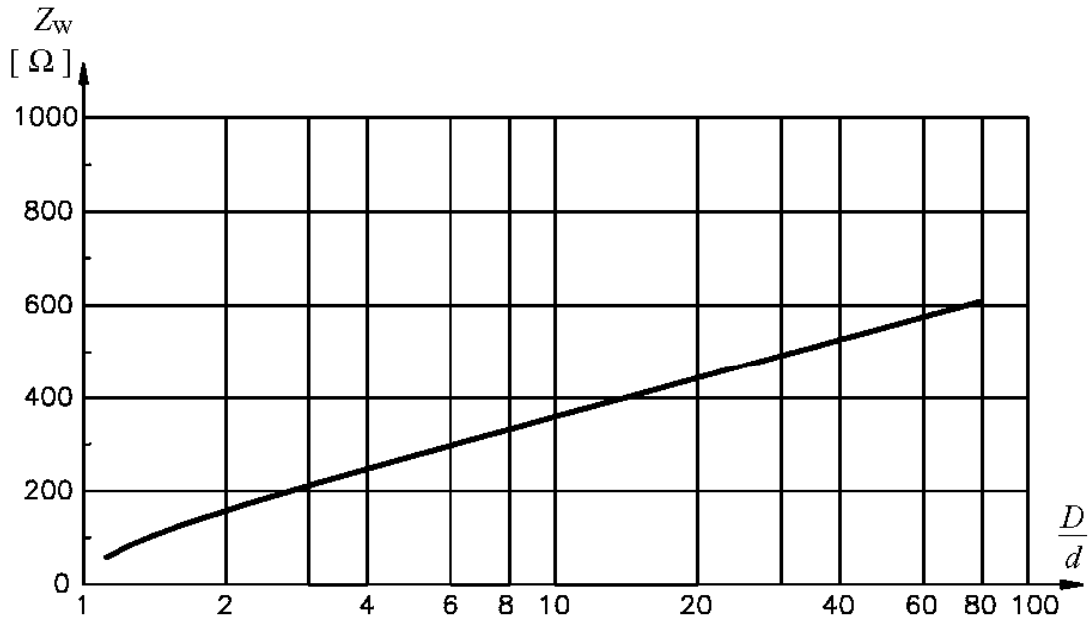
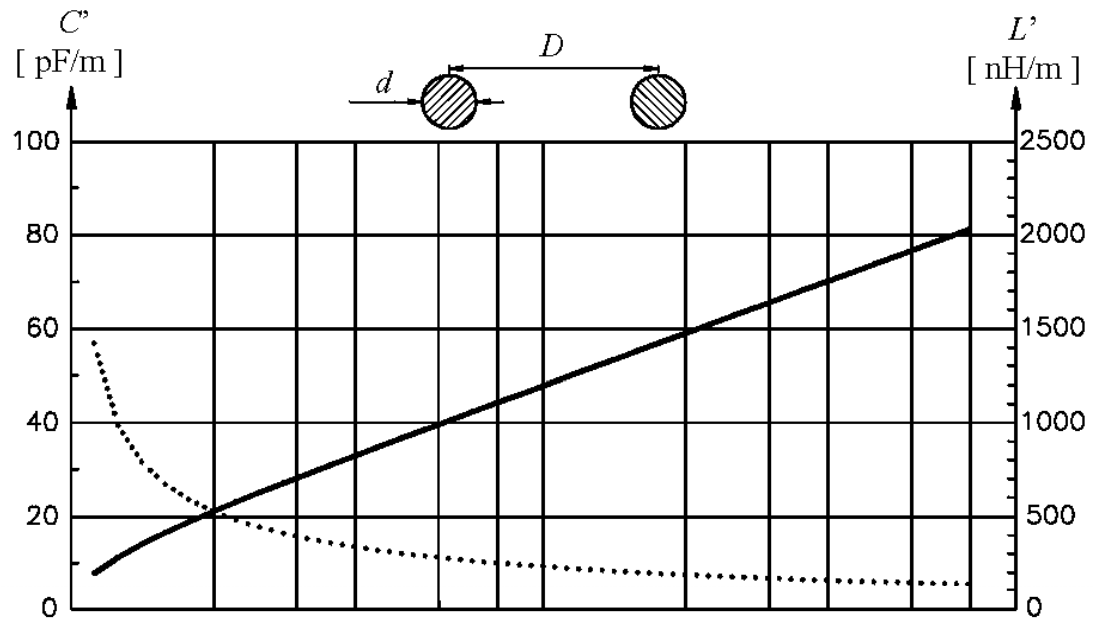
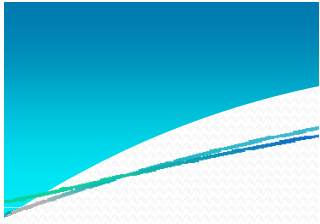
Keuntungan dari kabel ini dibandingkan kabel koax adalah biaya produksinya yang jauh lebih rendah, sedangkan kekurangannya memiliki konstanta peredaman yang lebih tinggi.

Dengan besaran geometri  $d$  diameter dari masing-masing kawat, dan  $D$  untuk jarak antara kedua kawat, impedansi gelombang kabel paralel ganda

$$Z = 120 \cdot ar \cosh\left(\frac{D}{d}\right)$$

Dengan aproksimasi  $D \gg d$

$$Z = 120 \cdot \ln\left(\frac{2D}{d}\right)$$



## Konstanta Sekunder saluran transmisi

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$$

Dengan mengkuadratkannya:

$$\alpha^2 - \beta^2 + j2\alpha\beta = R'G' - \omega^2 L'C' + j\omega(R'C' + L'G')$$

dengan nilai riilnya

$$\alpha^2 - \beta^2 = R'G' - \omega^2 L'C'$$

Nilai mutlak dari konstanta propagasi

$$\alpha^2 + \beta^2 = \sqrt{(R'^2 + \omega^2 L'^2) \cdot (G'^2 + \omega^2 C'^2)}$$

Jika kedua persamaan terakhir dijumlahkan

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ R'G' - \omega^2 L'C' + \sqrt{(R'^2 + \omega^2 L'^2) \cdot (G'^2 + \omega^2 C'^2)} \right]}$$

dan pengurangannya

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ R'G' - \omega^2 L'C' - \sqrt{(R'^2 + \omega^2 L'^2) \cdot (G'^2 + \omega^2 C'^2)} \right]}$$

Dengan penulisan sudut kerugian:

$$\tan \vartheta = \frac{R'}{\omega L'} \quad \text{dan} \quad \tan \delta = \frac{G'}{\omega C'}$$

$$Z' = R' + j\omega L' = \omega L' (\tan \vartheta + j) = \frac{\omega L'}{\cos \vartheta} \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \vartheta\right)}, \text{ dan}$$

$$Y' = G' + j\omega C' = \frac{\omega C'}{\cos \delta} \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)}$$

## Konstanta Perambatan

$$\gamma = \frac{\omega\sqrt{L'C'}}{\sqrt{\cos\vartheta\cos\delta}} e^{j(\pi-\vartheta-\delta)/2}$$

konstanta atenuasi dan konstanta fasa menjadi

$$\alpha = \frac{\omega\sqrt{L'C'}}{\sqrt{\cos\vartheta\cos\delta}} \sin\frac{\vartheta+\delta}{2}, \quad \beta = \frac{\omega\sqrt{L'C'}}{\sqrt{\cos\vartheta\cos\delta}} \cos\frac{\vartheta+\delta}{2}$$

Dan impedansi gelombang menjadi

$$Z = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{L'\cos\delta}{C'\cos\vartheta}} e^{j(\delta-\vartheta)/2}$$

### Contoh Perhitungan:

Diberikan sebuah kabel koax yang memiliki radius dalam 1mm dan radius luar 2,72 mm.

Kawat dalam dan luar terbuat dari tembaga, dengan konduktivitas sebesar  $\sigma = 6,2 \cdot 10^7$  S/m.

Dielektrika antara kedua bagian kawat ini memiliki permitivitas relatif  $\epsilon_r = 2$  dan loss angle (sudut rugi)  $\tan \delta = 2 \cdot 10^{-4}$ .

Tentukanlah nilai karakteristik dari saluran transmisi ini pada  $f = 10$  GHz.

### Solusi:

Dengan kedalaman efek skin

$$t = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 10^{10} \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 6,2 \cdot 10^7}} = 0,64 \mu m$$

$$R' = \frac{1}{\pi \cdot t \cdot \sigma} \left( \frac{1}{2r_i} + \frac{1}{2r_o} \right) = 5,49 \Omega / m$$

$$L' = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left( \frac{r_o}{r_i} \right) = 0,2 \mu H / m$$

$$C' = 2\pi \frac{\epsilon_r \epsilon_o}{\ln \left( \frac{r_o}{r_i} \right)} = 111 pF / m$$

$$G' = \omega C' \tan \delta = 1,398 ms / m$$