

2. SEKILAS MEDAN EM DAN APLIKASINYA

2.1 Pendahuluan

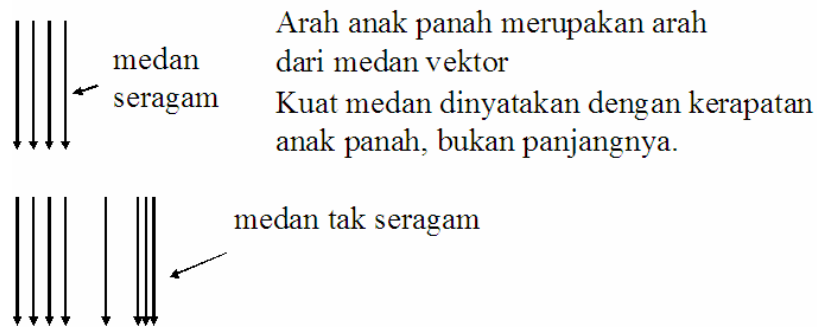
Pada kuliah dasar telah dipelajari rangkaian listrik (RL). Teori mengenai RL berhubungan dengan rangkaian parameter terdistribusi (*lumped-parameter*), yang terdiri dari komponen-komponen listrik berupa resistor, induktor dan kapasitor. Variabel utama dari sistem yang ditinjau adalah tegangan (V) dan arus (I). Untuk rangkaian arus searah (DC), variabel dan tegangan bernilai konstan dan hukum yang mengatur perilaku sistem dinyatakan sebagai suatu persamaan aljabar. Dalam rangkaian arus bolak-balik (AC), variabel sistem akan bergantung-waktu, yakni, kuantitas-kuantitas skalar dan tidak bergantung pada koordinat ruang. Sedangkan perilaku dari sistem diatur oleh persamaan diferensial biasa. Sebaliknya, didalam EM kebanyakan variabel adalah fungsi dari waktu maupun ruang. Persamaannya banyak melibatkan besaran vektor sehingga perlu aljabar dan kalkulus vektor.

Elektromagnetika pada dasarnya adalah studi tentang muatan-muatan listrik, baik yang diam maupun yang bergerak. Muatan positif maupun muatan negatif adalah sumber dari medan listrik. Muatan yang bergerak menghasilkan arus listrik yang kemudian menimbulkan medan magnetik.

Medan pada dasarnya merupakan distribusi spasial (misalnya $\phi(x,y,z)$ atau $\mathbf{A}(x,y,z)$) dari suatu kuantitas, yang bisa jadi juga merupakan fungsi waktu (dan bisa pula bukan fungsi waktu, misalnya dalam kasus medan gravitasi). Medan listrik yang berubah-waktu akan membangkitkan medan magnet, dan begitu pula sebaliknya. Jadi, medan listrik dan medan magnet yang berubah-waktu bersifat ter-kopel. Secara grafis, medan vektor dinyatakan sebagai garis fluks yang berupa sekumpulan anak panah, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.1.

Saat-saat penting berkaitan dengan sejarah EM adalah pada waktu Maxell merumuskan persamaannya pada tahun 1870. Pada tahun 1940-an, selama

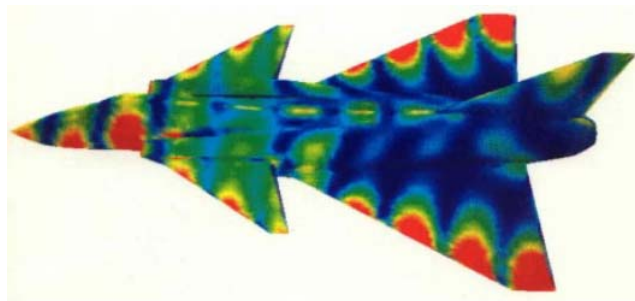
perang dunia ke-2, EM diterapkan pada bidang militer. Pada tahun 1960 ditemukan gejala *electromagnetic pulse* (EMP), yakni pulsa EM berkekuatan tinggi yang mampu merusak peralatan elektronika. EMP dapat dihasilkan oleh ledakan nuklir atau peralatan yang khusus dedesain untuk memancarkan EMP.



Gambar 2.1 Penggambaran medan vektor

2.2 Aplikasi EM

Dalam kehidupan kini, elektronika berkecepatan tinggi membutuhkan analisis EM untuk mendisain. Salah satu momen penting dalam komunikasi adalah ditemukannya serat optik yang memiliki redaman sangat kecil untuk keperluan komunikasi pita lebar. Perkembangan terakhir menunjukkan semakin diperlukannya EM, terutama melihat pesatnya perkembangan komunikasi nirkabel.

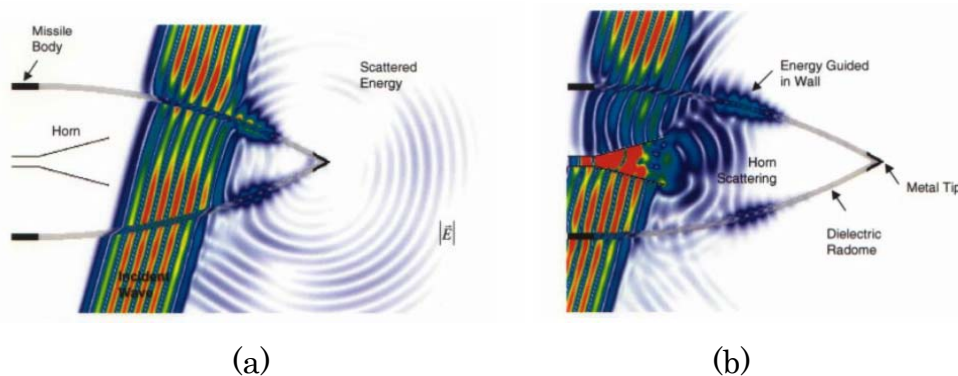


Gambar 2.2 Sebaran arus permukaan disekitar pesawat tempur hasil simulasi CEM

Salah satu bidang penting berkaitan dengan EM adalah CEM-*Computational ElectroMagnetics*. Solusi eksak dari permasalahan medan EM hanya

didapatkan untuk geometri-geometri yang sederhana, sedangkan pada prakteknya kita berhadapan dengan geometri yang lebih kompleks. Dalam hal ini, CEM mengambil peranan penting dalam simulasi dan analisis medan disekitar benda, seperti diperlihatkan pada contoh berikut ini.

Gambar 2.2 menampilkan sebaran arus permukaan pada prototip pesawat tempur, oleh gelombang datar 100 Mhz yang datang dari arah kiri (hidung pesawat). Arus ini meradiasikan kembali gelombang ke arah sumber radar (akibatnya, pesawat ini terdeteksi oleh radar).



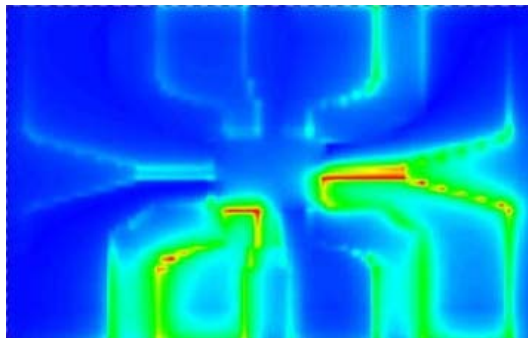
Gambar 2.3 Distribusi medan akibat EMP disekitar *radome* dari rudal; (a) sesaat setelah datang dan (b) gelombang pantul dipandu oleh dinding dan merusak peralatan elektronik di titik fokus

Contoh lainnya diperlihatkan pada Gb.2.3, dimana (a) pulsa gelombang mikro menembus radom dari rudal yang berisi antenna horn. Gelombang datang dari arah kanan dng sudut 15° . Pada (b) terlihat energi dipandu oleh dinding, interaksi gelombang terlihat dalam struktur radom.

Teori RL sebenarnya merupakan bagian (*subset*) dari teori EM. Perlu dicatat bahwa Hukum Kirchoff untuk arus dan tegangan tidak cocok (gagal) pada rangkaian biasa yang beroperasi pada kecepatan tinggi. Hal ini harus dianalisa dengan teori EM. Untuk melihat secara jelas, kita tinjau dua buah kasus berikut ini:

- Rangkaian gelombang mikro (Microwave circuits), biasanya bekerja dng frekuensi >3GHz.; mis. kopler, saluran transmisi, transistor, rangkaian penyesuai (matching). Rangkaian didasarkan pada fenomena EM.
- Rangkaian digital (digital circuits) dengan laju detak (clock rates) dibawah 2GHz. Dikemas sangat rapat, multilayer. Rangkaian ini tdk didasarkan pada efek interaksi gelombang EM.

Peristiwa-peristiwa yang harus dipertimbangkan adalah sinyal bisa berubah bentuk saat merambat. Disamping itu, perlu diperhatikan pula efek coupling antar rangkaian. Dan yang terakhir efek radiasi bisa menimbulkan interferensi ke rangkaian atau sistem lain.



Gb.2.4 Analisis CEM dari sirkit berkecepatan tinggi

Pada Gb. 2.4 diperlihatkan *coupling* dan *cross-talk* dari pulsa lojik berkecepatan tinggi yang keluar-masuk suatu microchip dengan DIP (*dual in-line package*) konvensional. Medan yang dibangkitkan pulsa tidak terkumpul dalam sirkit metal, melainkan tersebar dan ter-kopel dengan lintasan rangkaian di sebelahnya.

Dari pelajaran medan dasar, kita tahu adanya fakta-fakta mendasar berikut, yakni: (a) bahwa medan listrik dihasilkan oleh partikel bermuatan, baik yang diam maupun yang bergerak, (b) arah gaya (gaya Lorenz) adalah sepanjang garis yang menghubungkan dua muatan dan karenanya tidak bergantung arah

gerak dari partikel bermuatan, dan (c) medan gaya listrik menimbulkan perpindahan energi antara medan dengan partikel bermuatan.

Sedangkan untuk medan magnet: (a) medan magnet dapat dihasilkan oleh arus searah yang tak lain adalah muatan yang bergerak, (b) gaya magnet selalu tegak-lurus arah vektor kecepatan partikel pembawa muatan, dan (c) kerja yang dilakukan pada partikel bergerak selalu nol. Ini karena gaya magnetik selalu tegak lurus kecepatan dan karenanya tdk mengubah kecepatan.

2.3 EM versus RL: Mengapa harus EM?

Ada beberapa alasan mengapa kita harus memakai EM dan tidak cukup dengan teori RL. Pertama-tama Konsep/teori RL adalah versi terbatas (kasus khusus) dari teori EM. Jika frekuensi sumber sangat rendah sehingga dimensi penghantar dalam rangkaian jauh lebih kecil dari panjang gelombang, sistem berada pada keadaan kuasi-statik, sehingga permasalahan EM bisa disederhanakan menjadi permasalahan RL. Disamping itu, perumusan teori EM lebih “*rigorous*” dan ada fenomena-fenomena yang tidak bisa dijelaskan oleh teori RL sederhana. Contoh kasus berikut memperjelas tidak cukupnya RL menjelaskan suatu fenomena.

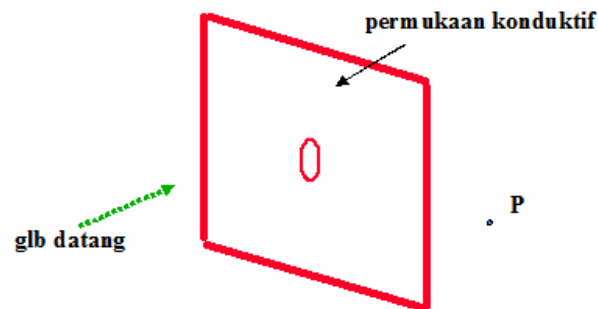
Kasus-1: Komunikasi ruang bebas. Tinjau 2 buah antena berjarak x -meter, seperti diperlihatkan dalam gambar berikut ini:



Gambar 2.4 Konfigurasi komunikasi ruang-bebas

Pada saat transmisi dari antena 1, sumber mencatu antena dengan arus pembawa pesan pada frekuensi tertentu. Dari sudut pandang teori RL, sumber

dianggap mencatu suatu rangkaian terbuka. Karena ujung atas antenna tidak tersambung secara fisik ke benda apapun maka tidak akan ada arus yang mengalir dan tidak terjadi peristiwa apapun. Akan tetapi pada kenyataannya, antenna-2 menerima sinyal listrik pancaran dari antenna-1. Hal ini hanya bisa dijelaskan dengan EM, yakni, arus pada antenna 1 memancarkan gelombang EM berubah waktu yang selanjutnya menginduksi arus di antenna 2.



Gambar 2.5 Gejala difraksi gelombang tidak bisa dijelaskan dengan teori RL tetapi EM bisa menjelaskannya

Kasus-2: gejala difraksi gelombang. Fenomena berikutnya yang tidak bisa dijelaskan dengan teori RL adalah difraksi gelombang. Tinjau gelombang EM jatuh pada permukaan konduktif sangat luas dan berlubang. Medan EM akan muncul di sisi lain permukaan (mis. di P) yg mungkin tidak langsung berada di belakang lubang. Disini teori RL tidak bisa menjelaskan munculnya medan listrik di titik P.

2.4 Persamaan Maxwell

Teori EM adalah gabungan dari hukum eksperimental dari kelistrikan dan kemagnetan. Teori EM modern dimulai oleh Oersted yang menemukan bahwa kawat yang mengalirkan arus listrik akan mengakibatkan kompas di dekatnya menyimpang. Ini merupakan bukti eksperimental pertama bahwa arus listrik dapat menghasilkan medan magnet. Pada jaman sebelum Oersted, kelistrikan dan kemagnetan dianggap dua fenomena yang tidak berhubungan.

Selanjutnya, Faraday menunjukkan bahwa medan magnet yang berubah dapat menghasilkan arus listrik. Jadi, Oersted menemukan fakta bahwa kelistrikan bisa menimbulkan kemagnetan, sedangkan Faraday menemukan hal yang sebaliknya, yaitu kemagnetan bisa menimbulkan kelistrikan.

Fenomena listrik dan magnet pada tingkat makroskopik digambarkan oleh persamaan Maxwell, yang dipublikasikan James C. Maxwell pada tahun 1873. Karya ini menyarikan ilmu EM saat itu dan, berdasar pertimbangan teoritis, memberi dugaan adanya arus perpindahan listrik, yang selanjutnya menuntun penemuan perambatan gelombang EM oleh Hertz & Marconi. Karya Maxwell didasarkan pada sejumlah besar pengetahuan empiris dan teoritis yang dikembangkan oleh Gauss, Ampere, Faraday dan ilmuwan-ilmuwan lainnya.



James Clark Maxwell (1831-1879) adalah Matematikawan dan Fisikawan Skotlandia, lulus dari Cambridge pada tahun 1855, kemudian menjadi Professor di Aberdeen pada tahun 1856. Kerja terbaiknya dilakukan pada periode 1864-1873 ketika ia menggantikan spekulasi Faraday mengenai garis-garis gaya magnet dengan bentuk formulasi matematikanya. Maxwell berperan penting dalam menyatukan teori kelistrikan dan kemagnetan. Dia juga menunjukkan bahwa osilasi muatan listrik menimbulkan radiasi. Maxwell percaya bahwa ether itu ada. Ramalan dari teorinya dibenarkan oleh percobaan Heinrich Hertz. Sampai sekarang, persamaan Maxwells masih valid, bahkan setelah Einstein menemukan relativitas!

Oleh Maxwell, gejala kelistrikan dan kemagnetan berhasil dirumuskan kedalam empat buah persamaan, yang dalam bentuk diferensialnya terdiri dari dua buah persamaan pusaran medan dan dua buah persamaan divergensi medan, yakni:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.1.a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1.b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.1.c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.1.d)$$

Berikut ini adalah definisi dan satuan dari kuantitas-kuantitas listrik magnet yang perlu kita ketahui:

- E** : Kuat medan listrik (electric field strength), (V/m)
D : Rapat fluks listrik (electric flux density), (coulombs/m²)
 ϵ : permitivitas bahan, (Farads/m)
H : Kuat medan magnet (magnetic field strength), (A/m)
B : Rapat fluks magnet (magnetic flux density), (Wb/m²)
 μ : Permeabilitas bahan, (Henries/m)
J : Rapat arus konduksi, (A/m²)
 σ : Konduktivitas bahan, (Siemens/m)
 ρ : Rapat muatan, (coulombs/satuan ruang)

Gauss telah menunjukkan bahwa sumber medan listrik adalah muatan listrik yang tidak ada kaitannya dengan kemagnetan dan Ampere memberikan hubungan kuantitatif dari medan magnet dengan arus listrik. Jadi, sebelum Maxwell, persamaan EM kira-kira berbebnentuk spt ini

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{hukum Gauss untuk medan listrik}) \quad (2.2.a)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{hukum Gauss untuk medan magnet}) \quad (2.2.b)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{hukum Faraday}) \quad (2.2.c)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{hukum Ampere}) \quad (2.2.d)$$

Maxwell menyadari bahwa “sesuatu” telah hilang dari persamaan-persamaan tersebut. Sejauh itu, persamaan belum lengkap. Jika persamaan Ampere diambil divergensi-nya dan dengan memakai kesamaan bahwa *div curl* sebarang vektor adalah nol, maka diperoleh:

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{H} = 0 = \nabla \cdot \vec{J} \quad (2.3)$$

Jelas ini salah karena ini berarti bahwa sumber arus listrik adalah nol. Kita tahu bahwa arus berhubungan dengan pergerakan muatan. Secara matematis, ini tak lain adalah persamaan kontinuitas,

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.4)$$

Maxwell menambahkan pada suku muatan sedemikian hingga persamaan kontinuitas terpenuhi

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{H} = 0 = \nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.5)$$

Jika sekarang kita gunakan persamaan Gauss untuk menghilangkan suku muatan, yaitu $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$, maka akan diperoleh versi baru dari hukum Ampere, dengan suku tambahan:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.6)$$

Suku kedua di ruas kanan disebut juga sebagai arus perpindahan (*displacement current*).

Jika kita menghubungkan \mathbf{D} (rapat fluks listrik) dng medan listrik \mathbf{E} , melalui $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, kita melihat bahwa arus listrik —atau medan listrik berubah waktu— adalah sumber medan magnet. Jadi, bahkan ketika $\rho = 0$ atau $\mathbf{J} = 0$, medan berubah-waktu \mathbf{E} dan \mathbf{H} dapat saling membangkitkan dan ini menjelaskan perambatan medan EM yang merupakan fenomena yang swa-dukung (*self-sustain*). Jelas kita masih perlu muatan dan arus untuk memulai proses ini (yang terjadi di antena), tapi begitu dimulai, medan akan lepas dari antena dan merambat. Inilah dasar dari perambatan gelombang radio. Tetapi baru pada tahun 1880 Hertz berhasil mendemonstrasikan teori Maxwell dng membuat pemancar dan penerima radio yang pertama.

Saat ini penemuan Maxwell memiliki aplikasi luas dalam berbagai aspek kehidupan manusia, misalnya: komunikasi satelit, komunikasi bergerak,

komunikasi serat optik, RADAR, penginderaan jarak jauh, permasalahan kompatibilitas EM (EMC) dan juga astronomi. Spektrum gelombang EM dan aplikasi terkait dilukiskan pada gambar berikut ini.

