

Literature Review: Metode Komputasi Numerik untuk Analisis Gelombang Elektromagnetik

Nabila Husna Shabrina

Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Multimedia Nusantara
nabila.husna@umn.ac.id

Diterima 19 Desember 2017

Disetujui 30 Desember 2017

Abstract—This paper reviews the conceptual background and some application of numerical computational method for electromagnetic waves. In this literature review, our discussion is limited to Finite Element Method (FEM), Finite Difference Time Domain (FDTD) Method, and Method of Moment (MoM). Definition and characteristic of each method is explained, including the theoretical principles along with strength and weakness for every method. The method for solving electromagnetic problems can be selected based on the object's shape, researcher's domain concerned, and Maxwell equation associated with the problem. By reading this paper, readers will not only grasp the theoretical explanation but also gain the big picture of each numerical computational method.

Indeks Terms— FEM, FDTD, MoM, Numerical Computational Method

I. PENDAHULUAN

Gelombang elektromagnetik merupakan gelombang yang secara bersamaan membawa muatan elektrik dan magnetik. Gelombang elektromagnetik memiliki beragam aplikasi dalam kehidupan sehari-hari seperti dalam bidang komunikasi, elektronika, sains atmosfer hingga kedokteran [1].

Dalam dekade terakhir, gelombang elektromagnetik semakin banyak diaplikasikan dalam berbagai teknologi mutakhir. Namun, pemahaman mengenai karakteristik gelombang elektromagnetik dalam setiap aplikasinya cukup kompleks untuk dilakukan dan membutuhkan waktu yang lama. Oleh karena itu, dibutuhkan metode komputasi elektromagnetik untuk dapat menyelesaikan dan menemukan solusi gelombang elektromagnetik dengan tepat dan cepat.

Gelombang elektromagnetik dijabarkan dalam Persamaan Maxwell baik dalam bentuk diferensial maupun integral. Namun, untuk menemukan solusi dari Persamaan Maxwell cukup rumit untuk dilakukan. Sehingga dibutuhkan suatu pendekatan yang kita kenal sebagai metode komputasi elektromagnetik. Metode komputasi elektromagnetik

merupakan metode yang digunakan untuk menganalisis gelombang elektromagnetik dengan proses komputasi. [2]. Ada banyak jenis metode komputasi elektromagnetik yang dapat digunakan untuk memecahkan permasalahan gelombang elektromagnetik. Secara umum, metode komputasi elektromagnetik dapat dibagi ke dalam tiga jenis metode yaitu metode numerik, metode frekuensi tinggi, dan metode lainnya [3]. Dari beberapa metode tersebut, metode numerik merupakan metode komputasi yang paling banyak digunakan karena telah banyak digunakan untuk berbagai aplikasi dan telah diimplementasikan dalam beberapa *software* komputer [2] Oleh karena itu, dalam *literature review* ini akan dibahas mengenai jenis-jenis metode komputasi numerik yaitu MoM, FEM, dan FDTD. Selain itu akan dijelaskan beberapa aplikasi dan penelitian yang telah dilakukan dengan metode-metode tersebut. Hasil dari *literature review* ini diharapkan dapat membantu para peneliti khususnya dalam fokus elektromagnetik untuk dapat memilih metode yang tepat untuk memecahkan permasalahan gelombang elektromagnetik dalam objek penelitiannya.

II. METODE KOMPUTASI NUMERIK

Metode komputasi numerik pada dasarnya digunakan sebagai solusi dari Persamaan Maxwell untuk medan listrik dan medan magnetik, khususnya dalam Hukum Faraday dan Ampere baik bentuk integral maupun diferensial seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (1) sampai (4).

$$\oint_l E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int_s B \cdot ds \quad (1)$$

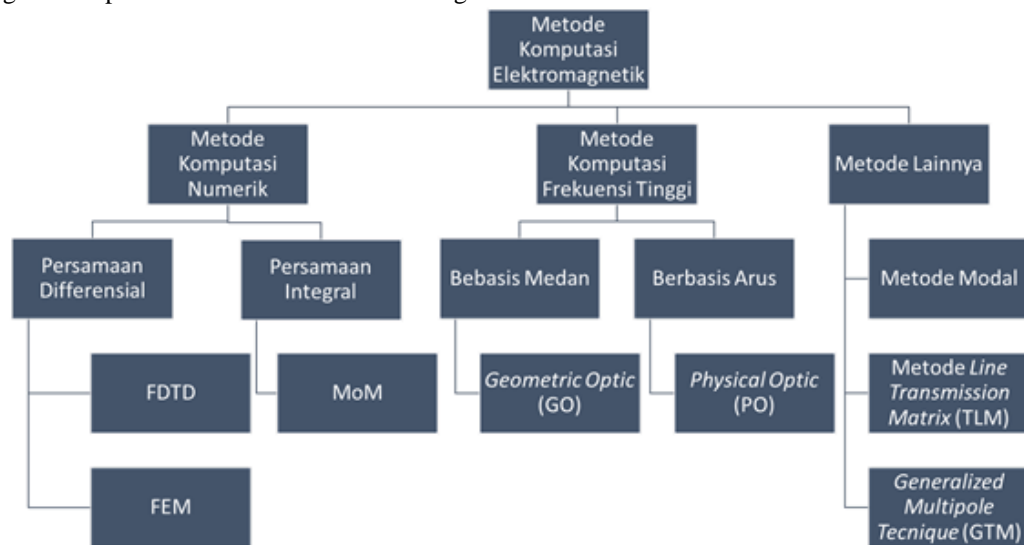
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\oint_c \frac{B}{\mu_0} \cdot dl = \int_s J \cdot ds + \frac{d}{dt} \int_s \epsilon_0 \cdot E \cdot ds \quad (3)$$

$$\nabla \times \frac{B}{\mu_0} = J + \frac{\partial \epsilon_0 E}{\partial t} \quad (4)$$

Secara garis besar, metode komputasi elektromagnetik dapat diklasifikasikan ke dalam tiga

jenis metode yaitu metode komputasi numerik, metode komputasi untuk frekuensi tinggi dan metode lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Klasifikasi Metode Komputasi Elektromagnetik.

Dalam *literature review* ini, pembahasan akan dibatasi untuk metode komputasi numerik karena metode ini memiliki aplikasi yang cukup luas dan merupakan metode yang paling banyak digunakan untuk menganalisis karakteristik gelombang elektromagnetik. Penjelasan untuk masing-masing metode beserta kelebihan dan kekurangannya akan dibahas secara lengkap pada setiap sub bab berikut.

A. Finite Elemen Method (FEM)

Metode *Finite Elemen Method* pada awalnya dikembangkan untuk aplikasi dalam teknik sipil maupun teknik mesin, namun kemudian metode ini juga digunakan untuk analisis gelombang elektromagnetik. Dalam elektromagnetik, FEM dapat digunakan untuk memodelkan antena Yagi-Uda, bumbung gelombang, dan antena *horn* [4]. Pada dasarnya, metode FEM membagi objek analisis yang besar menjadi bagian-bagian kecil yang jumlahnya berhingga yang disebut sebagai *finite element* [5]. Bagian-bagian kecil yang sudah dianalisis tersebut kemudian digabungkan kembali untuk membentuk hasil analisis secara keseluruhan.

Metode FEM memiliki beberapa keunggulan diantaranya sebagai berikut [2].

1. Metode FEM cukup mudah digunakan dalam menganalisis dan menentukan solusi untuk objek yang kompleks dengan material non homogen.

2. Metode FEM memungkinkan untuk dianalisis dalam *multi-problem*, artinya, metode ini bisa digunakan untuk menganalisis masalah elektromagnetik dan mekanik secara bersamaan.
3. Metode FEM memiliki potensi *frequency scaling* yang lebih baik jika dibandingkan dengan metode MoM.

Selain kelebihan di atas, metode FEM juga memiliki kekurangan yang dijabarkan sebagai berikut.

1. Metode FEM cukup kompleks jika digunakan untuk menganalisis objek 3D dengan ukuran yang besar.
2. Metode FEM lebih sulit untuk diimplementasikan jika dibandingkan dengan metode FDTD.

Metode FEM dapat diturunkan dengan dua metode yaitu *variational method* dan *weighed-residual method*. Pendekatan *variational method* menggunakan konstruksi fungsional dari objek yang akan diamati sedangkan *weighed-residual method* yang sering juga disebut sebagai *Galerkin method* adalah metode yang dilakukan dengan membentuk *residual* dari persamaan diferensial parsial yang terasosiasi dengan objek yang akan dianalisis [6].

Penurunan metode FEM secara prosedural dapat dijelaskan sebagai berikut [7]

1. Identifikasi persamaan matematis dari sistem yang akan dianalisis.

2. Buat bentuk integral untuk persamaan tersebut dengan memilih salah satu dari *variational method* maupun *weighed-residual method*.
3. Lakukan diskritisasi pada objek yang akan diamati.
4. Buat persamaan untuk setiap elemen yang telah didiskritisasi.
5. Evaluasi bentuk persamaan integral untuk setiap elemen.
6. Buat persamaan matrik untuk setiap elemen objek yang telah dibuat.
7. Selesaikan persamaan matrik yang telah dibuat.
8. Lakukan perhitungan untuk setiap solusi yang ditemukan.

B. Finite Difference Time Domain (FDTD)

Metode FDTD mulai dikembangkan oleh Kane Yee pada tahun 1966. Metode FDTD bisa disimulasikan baik untuk satu dimensi, dua dimensi, maupun tiga dimensi. Metode ini cukup mudah untuk dilakukan penurunannya untuk tiga sistem koordinat standar yaitu kartesian, silinder, dan bola. Metode ini digunakan untuk menganalisis permasalahan gelombang elektromagnetik karena memiliki beberapa kelebihan yaitu sebagai berikut [8].

1. FDTD merupakan metode yang sederhana karena penurunan persamaan yang digunakan dalam metode ini cukup mudah.
2. FDTD mudah dipahami karena mengikuti bentuk diferensial Persamaan Maxwell dan pengembangan prosedurnya mudah untuk dimengerti.
3. FDTD memiliki waktu pengembangan yang singkat karena proses diskritisasinya sederhana.
4. FDTD memberikan penjelasan yang eksplisit.

Selain memiliki beberapa kelebihan yang telah disebutkan di atas, FDTD juga memiliki beberapa kekurangan yang dijelaskan sebagai berikut.

1. FDTD membutuhkan waktu simulasi yang cukup lama. Semakin besar ruang yang akan disimulasikan, maka waktu yang dibutuhkan akan semakin lama.
2. FDTD memiliki struktur ujung yang berundak. Hal tersebut dapat menjadi masalah untuk bentuk permukaan melengkung maupun bentuk lain yang lebih kompleks.

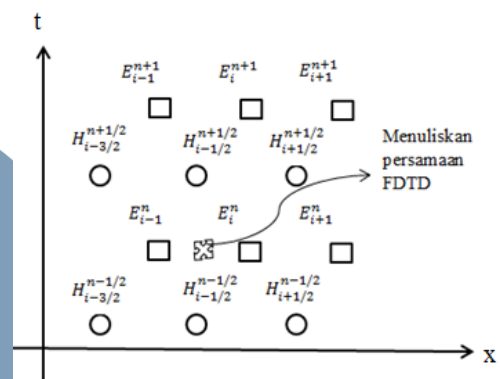
Untuk dapat memodelkan fenomena elektromagnetik dengan metode FDTD, digunakan persamaan Diferensial Maxwell untuk medan listrik dan medan magnetik seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (5) dan (6) [9]. Medan listrik dan medan

magnetik diasumsikan merambat ke arah $z +$ sebagai $e(j\omega t - j\beta z)$. Dari konsep operasi *curl*, dua pasang medan listrik dan magnetik di setiap sistem koordinat dapat diperoleh. Unit dasar pada metode FDTD disebut sebagai *Yee cell*.

$$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times H = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (6)$$

Dasar dari penggunaan metode FDTD adalah metode *leapfrog* [10]. Penentuan medan listrik dan medan magnetik dengan menggunakan metode *leapfrog* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Penentuan medan listrik dan medan magnetik menggunakan metode *leapfrog*.

Persamaan pembaruan medan magnetik dan medan listrik diturunkan dari persamaan diferensial Maxwell [11]-[12]. Proses penurunan persamaan untuk metode FDTD dijelaskan sebagai berikut [8].

1. Gunakan persamaan Ampere dan Faraday dalam bentuk turunan terbatas.
2. Dengan operasi *curl*, turunkan Persamaan Ampere dan Faraday sehingga didapatkan persamaan Maxwell untuk sistem koordinat yang dibutuhkan.
3. Tentukan persamaan medan magnetik dan medan listrik dengan mendiskritkan hasil dari prosedur kedua terhadap ruang dan waktu.
4. Selesaikan persamaan turunan yang didapatkan sebelumnya sehingga didapat persamaan medan listrik dan medan magnetik baru yang bergantung dengan medan sebelumnya.

C. Method of Moment (MoM)

Method of Moment (MoM) merupakan metode komputasi numerik yang paling banyak digunakan untuk menganalisis gelombang elektromagnetik, khususnya untuk menangani permasalahan *scattering* dan radiasi [2]. Metode ini digunakan untuk

menyelesaikan persamaan Maxwell dalam bentuk integral di domain frekuensi [13]

MoM memiliki beberapa keunggulan yaitu sebagai berikut.

1. MoM secara otomatis terhubung dengan kondisi radiasi, hal ini akan sangat membantu saat menganalisis permasalahan *scattering* maupun radiasi.
2. Dapat diturunkan formula yang cukup efisien untuk objek yang berbentuk strata atau bertingkat.
3. Memiliki ketersediaan NEC-2 yang berfungsi sebagai dasar untuk banyak desain antena.
4. Variabel kerjanya merupakan rapat arus sehingga sangat mudah untuk mengintegrasikan dalam numerik.

MoM juga memiliki kekurangan yang dijabarkan sebagai berikut.

1. MoM tidak dapat menyelesaikan permasalahan elektromagnetik dalam bentuk diferensial.
2. MoM tidak dapat melakukan *scaling* yang cukup baik dengan domain frekuensi.
3. Beberapa formula MoM diturunkan berdasarkan persamaan medan magnetik dalam bentuk integral dengan permukaan tertutup. Hal tersebut cukup sulit untuk diimplementasikan.

MoM pertama kali dipopulerkan oleh Harrington pada saat melakukan penelitian mengenai elektromagnetik [14]. Metode ini pada dasarnya memiliki kemiripan dengan metode FEM. MoM mengubah persamaan Maxwell bentuk integral ke dalam sistem persamaan linier yang lebih sederhana. Persamaan yang merupakan solusi dari MoM merupakan persamaan medan listrik dalam bentuk integral (WIEE) atau persamaan medan magnetik dalam bentuk integral seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (7) dan (8).

$$\begin{aligned} \text{EFIE} & \quad (7) \\ \mathbf{E} &= \mathbf{f}_e(\mathbf{J}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{MFIE} & \quad (8) \\ \mathbf{H} &= \mathbf{f}_m(\mathbf{J}) \end{aligned}$$

Performansi dari MoM didasarkan pada kecepatan, keakuratan, dan penggunaan memori. Kesalahan dalam penggunaan MoM dapat ditekan dengan mengatur amplitudo hamburan, kondisi batas dan arus. Dalam MoM, kesalahan dalam proyeksi bertindak sebagai kesalahan referensi [15].

III. APLIKASI METODE KOMPUTASI NUMERIK DALAM MENYELESAIKAN PERMASALAHAN ELEKTROMAGNETIK

Metode komputasi numerik untuk medan elektromagnetik telah banyak digunakan untuk berbagai aplikasi. A. Kost dan H. Igarashi menggunakan metode FEM untuk memodelkan pengamatan dan pengontrolan sensitivitas gangguan elektromagnetik pada berbagai perangkat elektronik dengan menggunakan lapisan perisai tipis [16]. M. Solal, M. Gallagher dan A. Tajik juga menyimulasikan resonator *Surface Acoustic Wave (SAW)* dalam 3D menggunakan FEM. [17] V. Plessky et al seperti dalam [18] memanfaatkan metode FEM untuk memodelkan Filter 5-IDT CRF/DMS. Dalam penelitiannya, V. Plessky melakukan simulasi untuk mencari resonansi dalam struktur filter, radiasi energi pada *interface* IDT dan lekukan pada filter *passband* pada mode akustik parasit.

Metode FDTD juga cukup banyak digunakan untuk menyimulasikan fenomena elektromagnetik dalam domain waktu. FDTD dapat digunakan untuk mensimulasikan fenomena *seismo-elektromagnetik*, yaitu fenomena seismik yang berhubungan dengan perambatan gelombang elektromagnetik. Pemodelan baik dalam 2D maupun 3D telah dilakukan dalam penelitian [19]-[20] Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa FDTD cukup mudah diimplementasikan dan digunakan untuk memodelkan gelombang elektromagnetik dalam domain waktu. FDTD juga dapat digunakan untuk menghitung frekuensi resonansi dalam *coaxial cavity* maupun dalam bumbung gelombang silinder seperti yang telah dilakukan pada penelitian [21]-[22].

MoM sebagai salah satu metode komputasi numerik yang diturunkan menggunakan Persamaan Maxwell bentuk integral digunakan oleh F.M. Abdussalam et al untuk memodelkan dan menghitung resonansi dari antena *microstrip* [23]. A Schroder et al menggunakan MoM untuk melihat efek gelombang elektromagnetik yang terbentuk dari *High Intensity Radiated Fields (HIRF)* pada struktur pesawat terbang [24]. Dalam penelitiannya, A Schroder melihat hubungan dari hasil pemodelan dan simulasi yang telah dilakukan dengan hasil pengukuran sebenarnya. MoM cocok digunakan untuk mengamati gelombang elektromagnetik dalam domain frekuensi seperti penelitian yang telah dilakukan oleh M.E. Gruber dan T.F. Eibert dalam memodelkan *rectangular cavity* dengan pendekatan fungsi Green [25].

Secara umum, berbagai permasalahan gelombang elektromagnetik dapat diselesaikan dengan metode komputasi numerik yang sesuai. Kategori jenis permasalahan gelombang elektromagnetik yang sesuai untuk dicari solusinya oleh masing-masing metode komputasi numerik dapat dilihat pada Tabel 1 [26].

Tabel 1. Kategori Permasalahan yang Sesuai untuk Setiap Metode Komputasi Numerik

Metode	Kategori Permasalahan
FEM	Gelombang EM dalam domain frekuensi, medium non-homogen, objek berbentuk kompleks
FDTD	Gelombang EM dalam domain waktu, gelombang EM yang membutuhkan analisis <i>transient</i> , ruang dengan perbatasan planar, medium non-homogen, medium anisotropis
MoM	Gelombang EM dalam domain frekuensi, gelombang EM yang membutuhkan analisis <i>transient</i> , medium konduktif dengan dielektrik terbatas, medium homogen, medium isotropis.

IV. KESIMPULAN

Metode Komputasi Numerik telah banyak digunakan untuk memodelkan fenomena elektromagnetik baik dalam perangkat elektronik, perangkat komunikasi maupun untuk memodelkan fenomena alam yang berkaitan dengan gelombang elektromagnetik. Dari penjelasan di atas terlihat bahwa setiap permasalahan gelombang elektromagnetik dapat dicari solusinya menggunakan metode komputasi numerik yang sesuai dengan kasus yang akan diamati. Metode yang akan digunakan bisa dipilih berdasarkan bentuk objek, domain yang akan dianalisis dan Persamaan Maxwell yang akan terasosiasi dengan objek tersebut. Metode FEM cocok digunakan untuk mengamati gelombang elektromagnetik dalam domain frekuensi dengan objek pemodelan kompleks dan non-homogen. Metode FDTD akan memberikan hasil yang lebih baik jika digunakan untuk menganalisis gelombang elektromagnetik dalam domain waktu dengan medium homogen yang memiliki perbatasan planar. Sedangkan metode MoM sesuai untuk permasalahan gelombang elektromagnetik dalam domain frekuensi yang memiliki medium homogen dan konduktif dengan dielektrik terbatas. Dengan adanya *literature review* ini diharapkan pembaca khususnya peneliti di bidang elektromagnetik dapat memperoleh gambaran mengenai metode komputasi numerik untuk gelombang elektromagnetik dan dapat menentukan metode yang sesuai untuk objek penelitiannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M.F Iskander, *Electromagnetics Fields and Waves*, Illinois : Waveland Press Inc. 2000.
- [2] D.B. Davidson, *Computational Electromagnetik for RF and Microwave Engineering*, New York : Cambridge University Press. 2005
- [3] P. Sumithra and D. Thiripurasundari, "A Review on Computational Electromagnetics Methods," in *Advanced Electromagnetics Vol. 6. No 1*, 2017.
- [4] www.feko.info
- [5] R.C. Booton, *Computational Method for Electromagnetics and Microwaves*, Canada: John Wiley and Sons, Inc. 1992
- [6] A.C. Polycarpon, "Introduction to Finite Element Method in Electromagnetics," in *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics Lecture 4*, 2006
- [7] T.H. Kwon, *Introduction to Finite Element Method*, Pohang University of Science and Technology. 2005
- [8] U. S. Inan and R. A. Marshall, *Numerical Electromagnetics: The FDTD Method*, New York: Cambridge University Press. 2011.
- [9] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed., New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [10] Kane S. Yee and Jei S. Chen, "The Finite Difference Time-Domain (FDTD) and the Finite-Volume Time-Domain (FVTD) Methods in Solving Maxwell's Equations", *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*, vol 45, no 3, March 1997.
- [11] A. Taflove, S. C. Hagness, "Computational Electrodynamics, The Finite Difference Time Domain Method 3rd Edition", Artech House, Norwood, 2005.
- [12] D. M. Sullivan, "Electromagnetic Simulation Using The FDTD Method," IEEE Press, 2000.
- [13] W.C. Gibson, *The Method of Moment*, Florida: Taylor & Francis Group, LLC. 2008.
- [14] R.F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, New York: The Macmillan Co. 1968.
- [15] Fu-Gang Hu, *Errors in Projection of Plane Waves Using Various Basis Functions*, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 51(2): 86-98, 2009.
- [16] A. Kost and H. Igarashi, "Different Numerical Methods for Electromagnetic Field Computation with Thin Shielding Sheets", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1997.
- [17] M. Solal, M. Gallagher, and A. Tajik, "Full 3D Simulation of SAW Resonators Using Hierarchical Cascading FEM", *IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2017.
- [18] V. Plessky et al, "FEM Modelling of Entire 50IDT CRF/DMS Filter", *IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2017.
- [19] H. Santosa, Y. Hobara, and A. Munir, "Modeling and numerical analysis of seismo-electromagnetics perturbation using FDTD method," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, Vol. 6, No. 2, pp. 225–236, Jun. 2014.
- [20] N. H. Shabrina and A. Munir, "Modelling and Analyzing of Seismo-electromagnetics Disturbance on Crust of Earth Using FDTD Method" *Proceeding of International Electronic Symposium (IES)*, Denpasar, Indonesia, September 2016, pp. 516-519.
- [21] A. D. Setiawan, H. Nusantara, and A. Munir, "Resonant frequency computation of dielectric material loaded circular waveguide using cylindrical coordinate system-based FDTD method," in *Proceeding of International Conference of Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Denpasar, Indonesia, Aug. 2015, pp. 314–317.
- [22] A. Munir and Edwar, "Computational approach for resonant frequency calculation of coaxial cavity resonator using cylindrical coordinate system-based FDTD method," in *Proceeding of International Conference on Quality in Research (QiR)*, Lombok, Indonesia, Aug. 2015, pp. 73–76.
- [23] F.M. Abdussalam et al, "The Computation of Complex Resonance of Microstrip Antenna Using Method of Moment and Firefly Algorithms", *Loughborough Antenna & Propagation Conference (LAPC)*, 2016.
- [24] A. Schroder et al, "Analysis of High Intensity Radiated Field Coupling into Aircraft Using Method of Moment", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility Volume: 56, Issue: 1*, Feb. 2014.
- [25] M.E. Gruber and T.F. Eibert, "Simulation of Reverberation Chambers Using Method of Moments with Cavity Green's Function and Spectral Domain Factorization", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2013
- [26] V. Jithesh and D.C.Pande, "A Review on Computational EMI Modeling Techniques", *Proceeding of INCEMIC*, 2003.