

Riset Antena – State of the Art

Mudrik Alaydrus

Teknik Elektro, Universitas Mercu Buana, Jakarta

mudrikalaydrus@yahoo.com

Abstrak

Riset antenna telah mengalami perjalanan panjang, seiring dengan perkembangan teknologi wireless dan aplikasi sensor serta radar. Secara garis besar, jenis antenna bisa dikategorikan menjadi antenna kawat (dipole, yagi), antenna waveguide (aperture, horn, slot), antenna reflector dan antenna mikrostrip. Dalam perancangan antenna para insiyur selalu merujuk pada katalog antenna yang telah ada dan melakukan modifikasi (menambahkan atau mengurangi sesuatu, atau memvariasikan parameter) untuk memenuhi spesifikasi yang diminta. Tulisan ini memberikan ulasan riset terkini antenna, dengan lebih menekankan pada lima bidang: metoda komputasi elektromagnetika, modifikasi antenna, material penyusun, aplikasi yang baru dan pengukuran antenna. Sampai dengan awal 2015 ditemukan sangat banyak riset tentang antenna di pelbagai publikasi yang ada.

Keywords: antenna, computational electromagnetics, material, antenna measurement, multiband

Received May 2015

Accepted for Publication July 2015

1. PENDAHULUAN

Tuntutan akan sistim telekomunikasi yang handal dan bisa digunakan di mana dan kapan saja, telah mendorong perkembangan teknologi telekomunikasi nirkabel (*wireless*) secara masif [1]. Sistim komunikasi seluler, yang merupakan salah satu teknologi terpenting saat ini telah berkembang sampai ke generasi keempat (4G/*Long Term Evolution* LTE) yang sampai menawarkan 36 pita frekuensi berbeda [2, 3], untuk memperbesar kapasitas sistim. Sistim LTE dan LTE-Advanced menjadi suatu aplikasi yang sangat memanfaatkan kondisi interval frekuensi yang banyak (*Multiband*). Dalam perkembangannya LTE dan LTE-A menawarkan sistim *Multiple Input Multiple Output* (MIMO), yang mampu memanfaatkan fenomena jalur banyak (*Multipath*) sehingga dengan suatu kondisi yang mendukung, bisa memperbesar kecepatan transmisi data (*data rate*) secara signifikan [4, 5, 6].

Jalur nirkabel (*wireless channel*) yang harus dilewatkan oleh gelombang elektromagnetika untuk sampai ke penerima merupakan media transmisi yang diluar kendali para perancang. Berbasis pada pengetahuan tentang sifat dari

jalur nirkabel ini, sinyal elektromagnetika harus dikondisikan untuk menghadapinya. Beberapa teknik pengkondisian seperti filter, coding, modulasi, MIMO dan melalui komponen antenna.

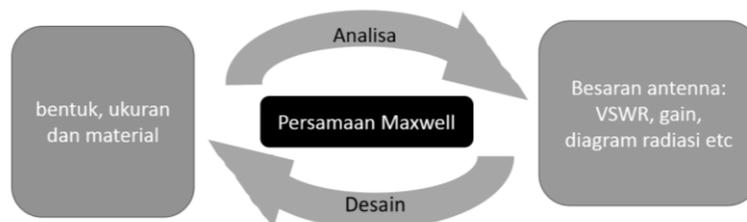
J.D. Kraus [7] mendefinisikan antenna sebagai suatu struktur yang berada di wilayah transisi antara gelombang tertuntun dan gelombang bebas, atau kebalikannya. Alaydrus [8] mendefinisikan antenna sebagai komponen yang bertanggung jawab untuk mengubah gelombang tertuntun menjadi gelombang ruang bebas pada kasus pemancaran, dan pada kasus penerimaan, antenna bertanggung jawab untuk mengubah gelombang ruang bebas yang mendatangnya menjadi gelombang tertuntun.

Dalam perancangan antenna, ada beberapa besaran yang penting yang harus diperhatikan seperti rentang frekuensi kerja (frequency range), faktor refleksi atau return loss ataupun VSWR (voltage standing wave ratio), diagram radiasi, gain (faktor pemfokusan), beamwidth, polarisasi, dan lainnya.

Ada banyak literature dalam bentuk buku seperti contohnya di [7-17], dan banyak publikasi dalam bentuk jurnal ataupun prosiding konferensi tentang hal-hal yang berkaitan dengan antenna. Di tulisan ini dipaparkan kondisi saat ini tentang riset dalam bidang antenna, khususnya tentang metoda komputasi elektromagnetika, jenis-jenis antenna, material penyusun antenna, aplikasi-aplikasi yang menggunakan antenna dan pengukuran antenna.

2. METODA KOMPUTASI ELEKTROMAGNETIKA

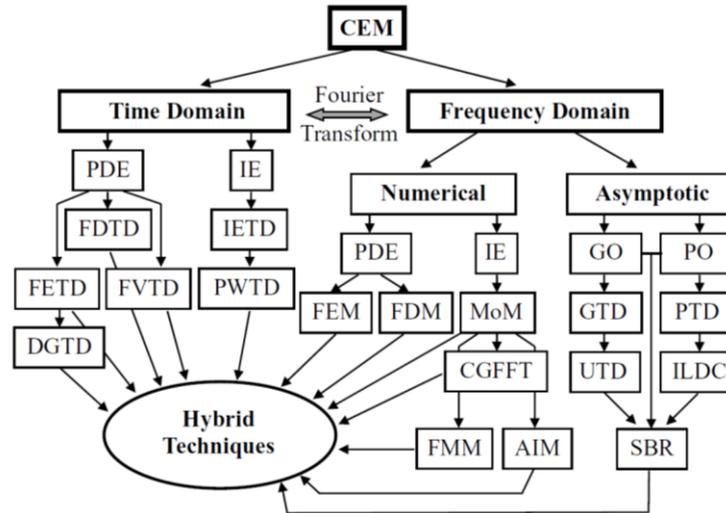
Analisa dan perancangan antena bisa dilakukan dengan pendekatan aproksimasi atau dengan pendekatan eksak. Tabel atau rumusan tertentu didapatkan dari suatu pengamatan teoretis ataupun data empiris (pengukuran), yang dimodifikasi atau diformat dengan pendekatan dan aproksimasi sehingga dianggap bisa dipakai pada rentang aplikasi yang diinginkan. Pendekatan ini memiliki batasan dan hasil yang didapat sering kali tidak akurat. Sedangkan pendekatan eksak (gambar 1) dipercaya bisa memberikan hasil yang lebih akurat, karena melibatkan secara langsung solusi persamaan Maxwell [18].



Gambar 1. Analisa dan perancangan antena melalui persamaan Maxwell

Solusi persamaan Maxwell pada awalnya dilakukan secara analitis [19, 20] menggunakan metoda pemisahan variabel dan ekspansi barisan, yang kemudian juga menggunakan metoda pemetaan konformal, transformasi Fourier dan

Laplace. Metoda analitis ini sangat berguna dan bisa memberikan jawaban secara eksak. Kekurangannya adalah batasan problem yang bisa disolusikan dengan metoda ini harus memiliki bentuk yang sesuai dengan satu dari sebelas sistim kordinat ortogonal [21].



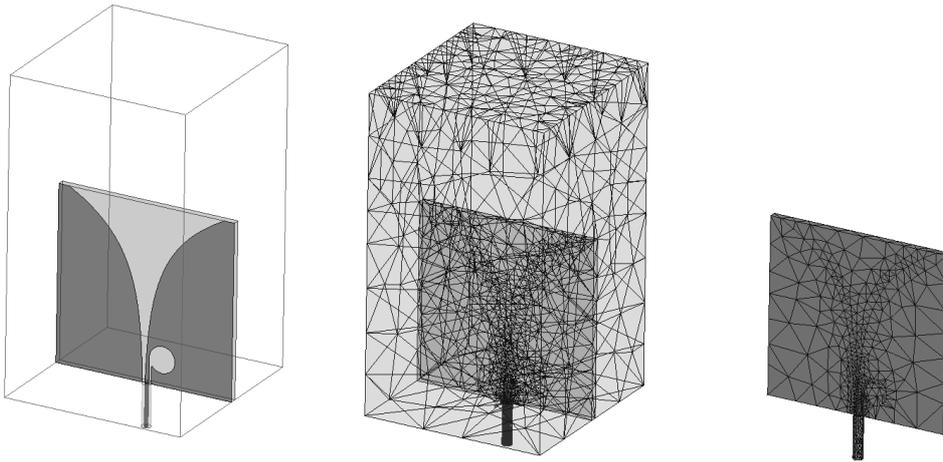
Gambar 2 Taksonomi metoda komputasi elektromagnetika [22].

Seiring dengan berkembangnya teknologi komputer, persamaan Maxwell atau turunannya, misalnya persamaan gelombang, disolusikan secara numeris. Gambar 2 menunjukkan taksonomi dari metoda komputasi elektromagnetika. Ada dua kategori besar, yaitu solusi di wilayah waktu, yang bisa mengamati kondisi transien dari masalah, dan solusi di wilayah frekuensi, yang mensyaratkan kondisi terayun, atau kondisi harmonis dengan bantuan sinyal sinus.

Masing-masing wilayah solusi ini dibagi lagi menjadi pendekatan numeris secara persamaan diferensial (*Partial differential equation/PDE*) yang terbagi dalam metoda elemen hingga, baik wilayah frekuensi *finite element method* (FEM) atau wilayah waktu *finite element time domain* (FETD) [23, 24, 25, 26] dan metoda diferensi hingga (wilayah frekuensi *finite difference domain* /FDM dan wilayah waktu *finite difference time domain* /FDTD) [27, 28, 29, 30]. Kedua metoda ini melakukan diskretisasi terhadap bentuk diferensial dari persamaan Maxwell dan diskretisasi volume dari problem yang diamati. Konsekuensi dari hal ini adalah: (1) didapatkan suatu sistim persamaan / matriks yang berukuran besar tetapi bersifat *sparse* (berpopulasi jarang), (2) diperlukan suatu batasan fisik tertentu dari volume yang diamati, jika tidak ada, maka harus didefinisikan suatu bidang batas radiasi. Gambar 3 kiri menggambarkan model antenna Vivaldi yang memiliki sifat *ultrawideband*. Model FEM ditampilkan di gambar 3 tengah. Diskretisasi seluruh volume yang diamati sekaligus menjadi kelebihan dari FEM. Metoda ini bisa memodelkan volume yang mengandung ketidakhomogenen yang tinggi dengan membaginya menjadi tetrahedral yang kecil-kecil yang di dalamnya material bersifat konstan.

Sedangkan pembagian lain dari grup numeris adalah dengan menggunakan persamaan integral (*Integral Equation/IE*) yang diimplementasikan dalam metoda

momen (*Method of Moment/MoM*) [31, 32, 33, 34]. MoM mendiskretisasi model hanya pada permukaannya saja (gambar 3 sebelah kanan) dengan asumsi bagian dalam dari model yang didiskretisasi memiliki distribusi material yang homogen. Metoda ini juga tidak mengharuskan adanya batasan fisik yang membungkus volume pengamatan, karena metoda momen menggunakan fungsi Green, yang secara otomatis akan memenuhi syarat radiasi yang disyaratkan. Sehingga MoM adalah metoda yang secara historis dianggap sebagai metoda komputasi yang paling efektif untuk membahas karakter antenna.



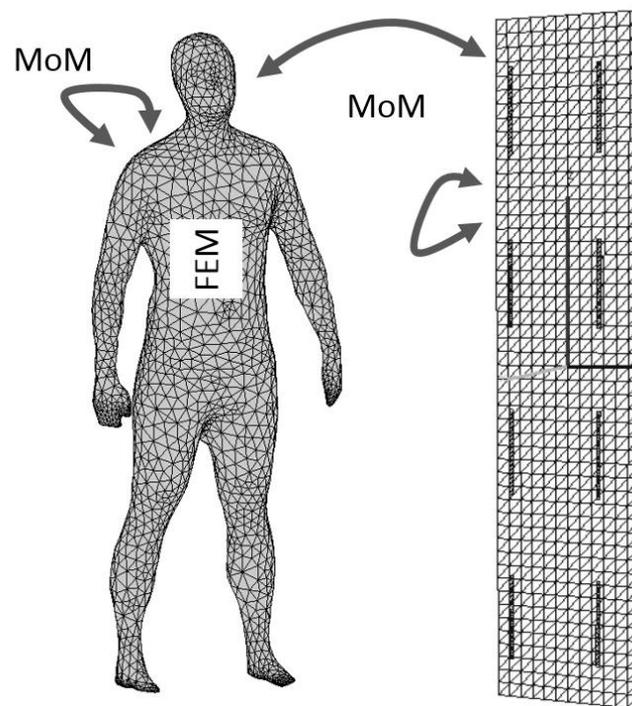
Gambar 3 kiri: model antenna Vivaldi, tengah: diskretisasi FEM, kanan: diskretisasi MoM (software Ansys Electromagnetics Suites)

Dalam penggunaannya sering kali matriks dense (matriks yang berpopulasi padat) yang dihasilkannya berukuran besar, sehingga diperlukan suatu teknik khusus untuk tetap bisa mensolusikan masalah antenna ini dengan bantuan MoM. Salah satunya adalah dipergunakannya teknik dekomposisi yang dikelompokkan dalam *Multilevel Fast Multipole Algorithm* (MLFMA) [35], yang berbasis pada dekomposisi struktur menjadi bagian yang kecil-kecil (groups). Berbeda dengan MoM yang menghitung gandengan (coupling) antar elemen secara individual masing-masing fungsi basis-nya, pada MLFMA dilakukan secara berkelompok. Hal ini akan mereduksi kebutuhan memory computer secara signifikan, seperti yang dibandingkan pada table 1.

Tabel 1 Perbandingan kebutuhan memory RAM MoM dan MLFMA (www.feko.info)

Aplikasi dan frekuensi	Jumlah variabel	Memory (MoM)	Memory (MLFMA)
Military aircraft at 690 MHz	100 000	150 GByte	1 GByte
Ship (115 m x 14 m) at 107 MHz			
Reflector antenna (19 λ)			
Military aircraft at 1.37 GHz	400 000	2.4T GByte	4.5 GByte
Ship (115 m x 14 m) at 214 MHz			
Reflector antenna (38 λ)			
Military aircraft at 2.65 GHz	1 500 000	33.5 TByte	18 GByte
Ship (115 m x 14 m) at 414 MHz			
Reflector antenna (73 λ)			

Problem elektromagnetika yang melibatkan struktur yang inhomogen, yang terpisah cukup jauh (beberapa panjang gelombang) dan harus memenuhi syarat radiasi (karena problem yang terbuka), tidak bisa secara efisien dibahas dengan FEM atau MoM sendirian. Problem elektromagnetika yang diilustrasikan di gambar 4 adalah contoh untuk kasus ini, gambar ini menunjukkan contoh asesmen pengaruh radiasi gelombang elektromagnetika dari sebuah antenna stasiun basis terhadap manusia (teknisi yang bekerja di dekat antenna). Meyer et al [36] menggunakan metoda hibrida yang mengkombinasikan FEM dan MoM untuk mensolusikan masalah ini, yaitu menghitung besaran daya yang diresap oleh manusia (*Specific Absorption Rate/SAR*). FEM digunakan untuk memodelkan tubuh manusia yang bersifat tidak homogeny, sedangkan MoM digunakan untuk memodelkan antenna yang terbuat dari metal (baik berupa kawat ataupun permukaan) dan permukaan tubuh manusia, sehingga interaksi antara antenna dan manusia otomatis dimodelkan dengan MoM.

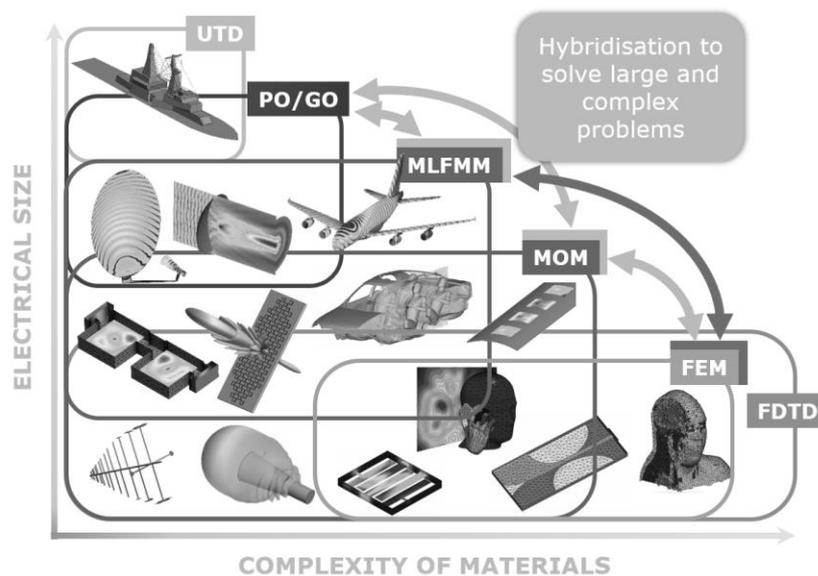


Gambar 4 Metoda hibrida: FEM + MoM

Selain dari itu ada juga metoda frekuensi tinggi yang masuk kategori metoda asimptotis, yaitu *geometrical optics* dan pengembangannya *Uniform Theory of Diffraction* (UTD) dan *Physical Optics* dan pengembangannya *Physical Theory of Diffraction* (PTD) [37, 38, 39, 40]. Metoda asimptotik memiliki karakter tidak diperlukannya diskretisasi seperti halnya kedua kelompok metoda numeris. Sehingga metoda asimptotik ini cocok untuk aplikasi yang memiliki dimensi yang besar terhadap panjang gelombang. Pada metoda UTD, interaksi gelombang elektromagnetika terhadap struktur diilustrasikan melalui fenomena refleksi, difraksi. Kekurangan dari metoda ini adalah, metoda ini hanyalah pendekatan

untuk frekuensi tinggi dan tidak mampu atau tidak efisien jika memiliki inhomogenitas pada strukturnya. Metoda asimptotik sering dipakai pada analisa scattering yang melibatkan pesawat terbang, kapal laut ataupun antenna parabola. Pada aplikasi seluler, metoda UTD dipakai untuk mempelajari model-model saluran yang melibatkan pengaruh bangunan-bangunan, baik indoor ataupun outdoor. Dalam penggunaannya, metoda asimptotik juga sering dikombinasikan dengan metoda lainnya untuk mendapatkan keuntungan dari metoda-metoda ini, misalnya kombinasi UTD+MoM, PTD+MoM, ataupun kombinasi tiga metoda UTD+MoM+FEM [41].

Metoda hybrid yang mengkombinasikan MoM dengan PO dan MoM dengan UTD juga secara sukses bisa diimplementasikan untuk merancang antenna fraktal yang menggunakan prinsip Sierpinski gasket [42].



Gambar 5 Perbandingan metoda elektromagnetika numeric menurut kompleksitas material yang digunakan dan ukuran volume yang disimulasi (www.feko.info).

Gambar 5 menampilkan perbandingan metoda-metoda perhitungan ini dan penempatannya pada kasus-kasus dengan kompleksitas material yang berbeda-beda dan ukuran yang kecil atau besar.

Tabel 2 Jumlah publikasi metoda komputasi elektromagnetika (May 2015)

Kata kunci pencarian	Scholar.Google.com All / 2015
Finite Element Method antenna	290 000 / 2430
Method of Moment Antenna	257 000 / 2080
Finite Difference Time Domain Antenna	146 000 / 2200
Integral Equation Method Antenna	215 000 / 1870
Uniform Theory of Diffraction Antenna	40 100 / 1150
Physical Theory of Diffraction Antenna	65 900 / 1650
Hybrid method antenna	313 000 / 3160

Tabel 2 memberikan hasil pencarian yang dilakukan pada mesin pencari scholar.google.com dengan memasukkan kata kunci metoda komputasi elektromagnetika yang dibahas di bagian ini. Dalam lima bulan pertama di tahun 2015 didapatkan lebih dari 2000 hasil masing-masing untuk pencarian FEM, MoM dan FDTD, sedangkan metoda asimptotik menyusul juga dengan jumlah yang tidak sedikit > 1000. Metoda hybrid yang menghimpun banyak variasinya memberikan hasil yang terbanyak > 3000 hasil.

Metoda-metoda ini telah mengalami masa kematangan, telah dikembangkan oleh kelompok-kelompok riset di seluruh dunia. Ada juga perusahaan-perusahaan yang telah mengembangkan metoda-metoda komputasi ini dan merilisnya dalam suatu paket software komersial. Perusahaan CST (www.cst.com) mengeluarkan paket software Microwave Studio yang menggunakan metoda Finite Integration Technique (FIT), yang merupakan versi integral dari FDTD. CST juga mengembangkan fungsi lanjutnya dengan memiliki bagian FEM dan metoda frekuensi tinggi. Ansys (www.ansys.com) mengeluarkan HFSS (High Frequency Structure Simulator), yang menghitung problem antenna dan gelombang mikro dengan FEM, belakangan HFSS juga dikembangkan memiliki kemampuan radiasi dengan bantuan IEM. FEKO dikembangkan oleh perusahaan EMSS (www.emss.com) yang didasari terutama oleh MoM, kemudian dikembangkan dengan PO, UTD dan FEM. Perusahaan Sonnet (www.sonnetsoftware.com) mengembangkan software Sonnet yang dikonsepkan untuk aplikasi rangkaian planar (mikrostrip etc). Software ini secara efisien bisa menganalisa problem dua dimensi. WIPL-D adalah software yang dikembangkan oleh perusahaan .., yang menggunakan metoda moment yang bisa juga menganalisa struktur dengan dielektrika.

Dalam perancangan antenna, seperti ditunjukkan di gambar 1, diberikan suatu target tertentu, misalnya VSWR pada suatu rentang frekuensi atau gain pada suatu nilai frekuensi atau lainnya. Target ini diharapkan bisa dicapai oleh suatu jenis antenna yang dianggap potensial untuk mendapatkannya, dengan suatu ukuran, bentuk dan distribusi material tertentu. Jika suatu bentuk dan ukuran antenna yang diberikan tidak bisa memenuhi target yang diberikan, dicoba dengan bentuk dan ukuran lainnya, sampai target tercapai. Variasi ukuran dan/atau bentuk ini berikutan perhitungan elektromagnetikanya merupakan tugas yang berat dalam perancangan antenna. Metoda optimasi diperkenalkan untuk mencari bentuk dan ukuran antenna secara lebih terarah/terstruktur, sehingga didapatkan antenna lebih cepat (gambar 6). Dalam metoda optimasi dikenalkan suatu fungsi harga tertentu (cost function), yang dalam proses perhitungan elektromagnetika didapatkan nilainya. Seringkali fungsi harga didefinisikan sebagai seberapa dekat nilai yang didapat terhadap target, maka fungsi ini akan diminimalisir selama proses perhitungan dengan optimasi. Secara umum metoda optimasi bisa dikategorikan sebagai metoda optimasi local dan metoda optimasi global.

Di tulisan ini hanya akan dibahas lebih dalam metoda optimasi global yang memiliki sifat, dalam proses pencarian solusi, metoda ini bisa mendapatkan nilai yang terbaik secara global, karena metoda optimasi ini bisa melepaskan diri dari minimum local. Contoh metoda optimasi global: algoritma genetic, particle swarm optimization (PSO) dan simulated annealing.

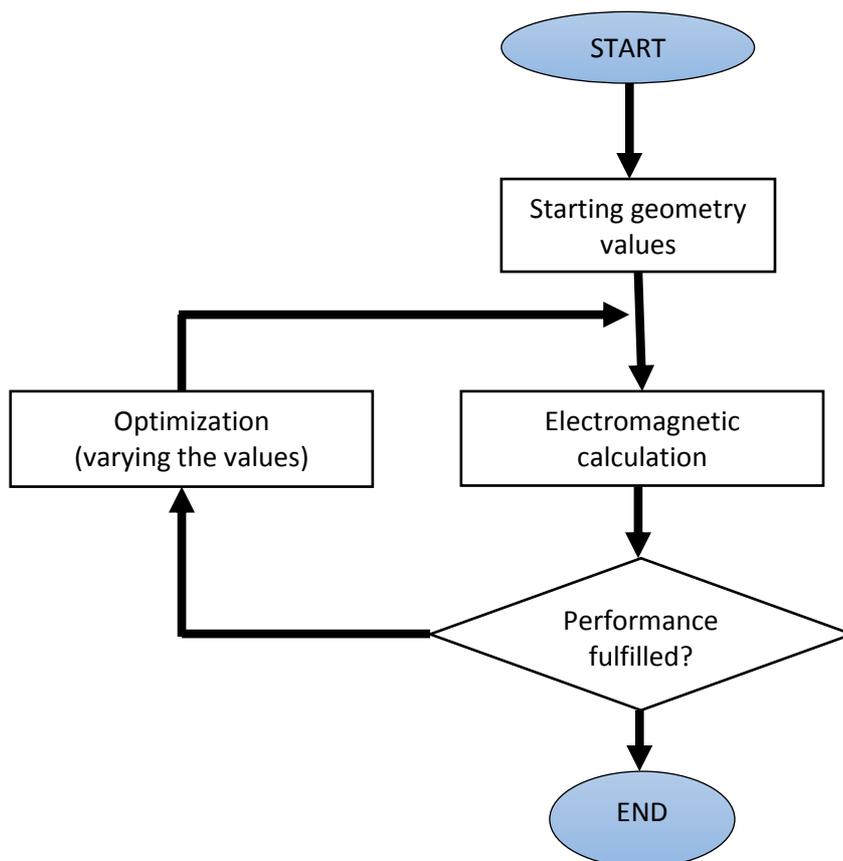
Algoritma genetik adalah suatu metoda memvariasikan ukuran antenna dengan bantuan metoda dari rekayasa genetic, yaitu inheritance (penurunan sifat),

mutation, selection dan cross-over (persilangan) [43].

Particle Swarm Optimization (PSO) adalah metoda yang mengoptimasi suatu problem secara iterative untuk mendapatkan suatu solusi yang mendekati suatu nilai kualitas tertentu melalui modifikasi nilai setiap 'particle' di dalam ruang pencariannya. Dalam proses pencarian posisi terbaik di dalam ruang pencarian, didefinisikan posisi dan kecepatan dari setiap particle. Gerakan particle ini ditentukan juga oleh posisi dan gerakan dari particle yang saat itu yang terbaik. [44].

Di penelitian [45] dibandingkan metoda perancangan antenna horn corrugated dengan metoda optimasi genetic dan metoda PSO.

Di [46] dirancang antenna planar yang bisa bekerja secara multiband dengan menggunakan MoM yang dikontrol dengan metoda optimasi Simulated Annealing (SA). SA adalah metoda optimasi yang berbasiskan pada kejadian peleburan material menjadi kondisi cair (annealing), sehingga atom-atom akan berada dalam kondisi bebas, atau dalam sudut pandang optimasi segala nilai bisa diambil sebagai solusi. Dengan berjalannya waktu, temperature akan diperkecil (cooling), sehingga secara perlahan akan terbentuk kondisi yang stabil dan terbaik.



Gambar 6 Flowchart perhitungan elektromagnetika dibantu metoda optimisasi

Jenis metoda lainnya yang bisa mempercepat proses perancangan antenna

adalah metoda space mapping. Konsep dasar space mapping adalah membagi dua ruang, yaitu ruang perhitungan fine yang bersifat akurat dan waktu perhitungan yang lama, dan ruang perhitungan coarse yang bersifat aproksimasi dan waktu perhitungan yang cepat. Langkah kunci dari metoda space mapping adalah kemampuan untuk mengaitkan (mapping) kedua ruang ini, sehingga bisa digunakan informasi dari ruang coarse untuk mendapatkan hasil yang optimal [47].

Tabel 3 memberikan jumlah publikasi yang didapatkan melalui mesin pencari scholar.google.com dengan kata-kata kunci antenna dan metoda optimasi. Terlihat publikasi terbanyak pada kata kunci space mapping antenna.

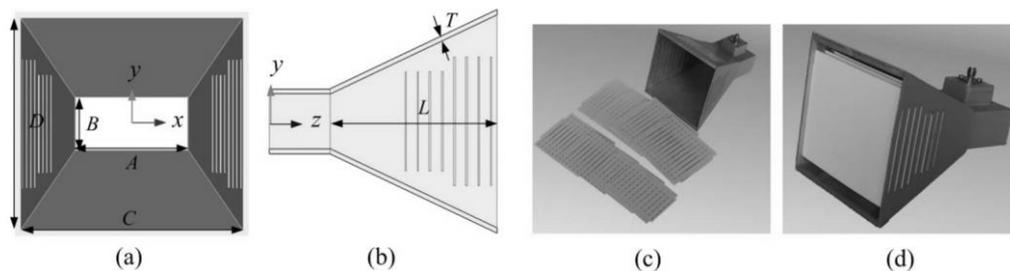
Tabel 3 Jumlah publikasi metoda optimasi (May 2015)

Kata kunci pencarian	Scholar.Google.com All / 2015
Optimization method antenna	388 000 / 3790
Genetic Algorithm antenna	47 600 / 1700
Simulated Annealing antenna	19 900 / 722
Particle Swarm Optimization antenna	13 600 / 645
Space Mapping Antenna	162 000 / 2340

3. PERANCANGAN ANTENA BARU

Berbagai jenis antena telah diperkenalkan dan dirancang. Masing-masing antena ini memiliki keunikan, kelebihan dan kekurangan dibandingkan satu dengan lainnya, seperti yang dibahas di buku-buku standard tentang antena [7-17]. Dalam perancangannya, setiap spesifikasi yang diberikan, hampir selalu, kembali merujuk pada katalog antena yang telah ada, seperti yang diberikan di table 4, dan melakukan modifikasi yang diperlukan untuk mencapai tuntutan yang diberikan pada setiap aplikasinya.

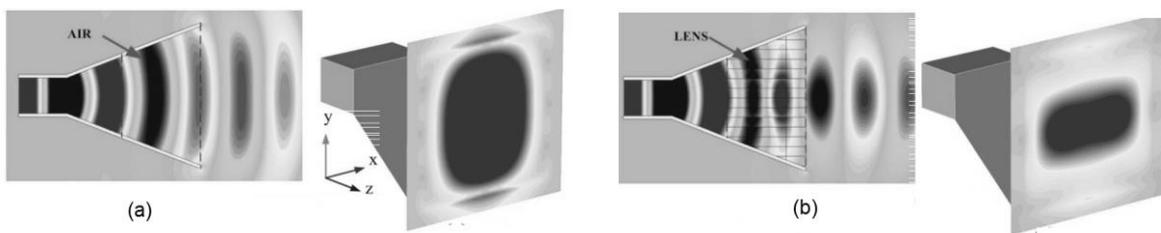
Antena horn salah satu jenis antena yang memegang peranan penting sebagai feed yang dipakai sebagai pengumpan antena parabola. Antena horn memiliki kelemahan berupa side-lobe yang dimilikinya memiliki nilai yang masih cukup tinggi, sehingga bisa berpotensi menyebabkan interferensi.



Gambar 7 (a), (b) geometri antenna horn, (c) antenna horn kosong dan lembar metamaterial, (d) foto antenna horn dengan metamaterial, satuan $A=47,55$ mm, $B=22,15$ mm, $C=90$ mm, $D=86$ mm, $L=82$ mm, $T=4$ mm. [48]

Ada berbagai cara yang dilakukan untuk mereduksi ketinggian side-lobe yang dihasilkan oleh antenna horn konvensional, yaitu dengan menambahkan struktur konduktif, atau dielektrik. Di [48] digunakan lembaran yang bersifat metamaterial untuk menekan side-lobe ini. Metamaterial adalah material yang dihasilkan dari suatu kombinasi struktur tertentu, sehingga didapatkan permittivitas dan permeabilitas relative yang efektif memiliki nilai negative. Gambar 7 menunjukkan geometri dari antenna horn dengan dan tanpa lembaran metamaterial.

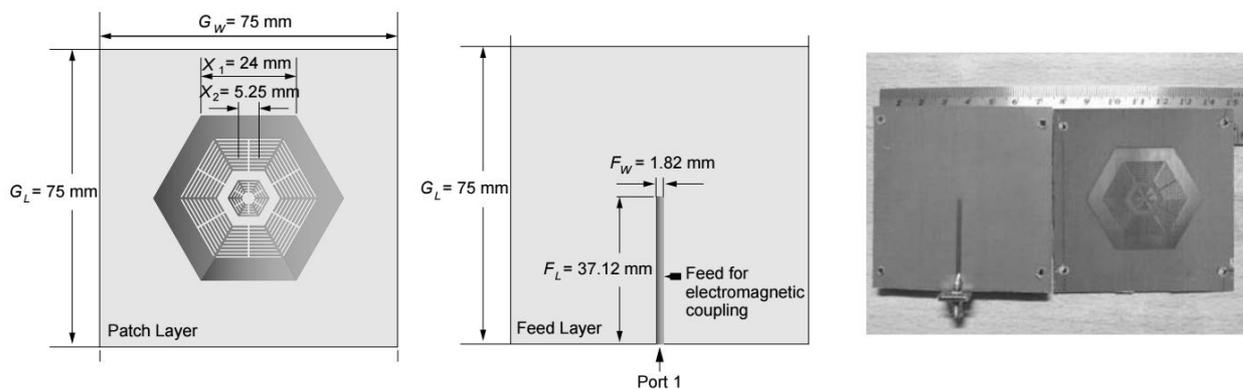
Gambar 8 menunjukkan perbandingan pemancaran antenna horn konvensional dengan antenna horn yang telah ditambahkan lembaran metamaterial. Terlihat adanya reduksi side-lobe secara signifikan.



Gambar 8 (a) Pemancaran antenna horn konvensional, (b) pemancaran antenna horn dengan lembaran metamaterial [48]

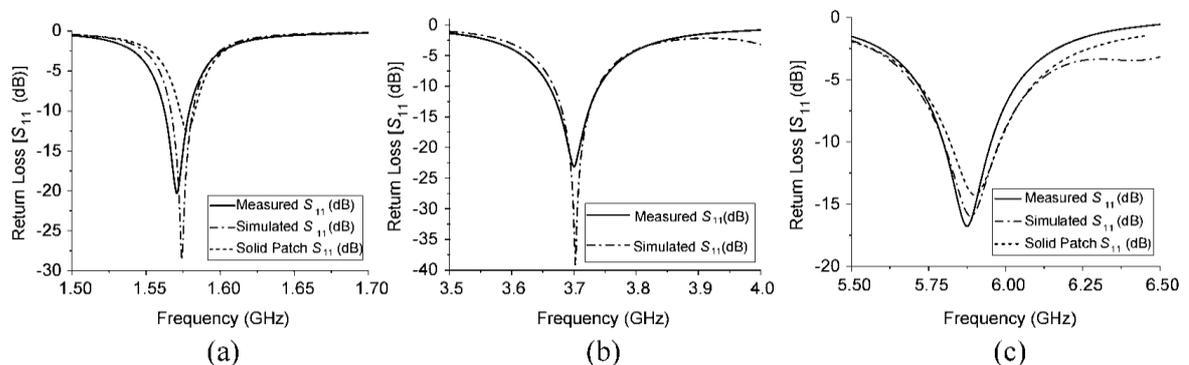
Dalam suatu kasus perancangan antenna yang akan dipakai pada aplikasi Intelligent transport system (ITS), diinginkan suatu antenna yang bisa bekerja pada frekuensi 1,575 GHz untuk GPS L1 band, pada frekuensi 3,71 GHz - mobile WiMax band (IEEE 802.16e-2005) untuk komunikasi kendaraan dan sistem di sisi jalan, dan frekuensi 5,9 GHz – DSRC band (IEEE 802.11p) untuk komunikasi antar kendaraan. Tuntutan lainnya adalah dimensi antenna sekecil mungkin. Publikasi [49] mengusulkan antenna fractal yang dibuat dalam teknologi mikrostrip, seperti yang ditampilkan di gambar 9.

Secara prinsip, bentuk hexagonal ini merupakan aproksimasi dari bentuk lingkaran, yang dari literature menentukan langsung frekuensi resonansi dari struktur tersebut. Bagian dalam struktur yang berukuran lebih kecil akan menentukan resonansi pada frekuensi yang lebih tinggi.



Gambar 9 layout geometrid dan foto antenna mikrostrip fractal [49]

Gambar 10 menampilkan faktor refleksi yang didapatkan dari hasil perhitungan dan pengukuran. Perhitungan dilakukan dengan bantuan software HFSS, sedangkan pengukuran dengan Vector Network Analyzer model N5320A.



Gambar 10 Faktor refleksi untuk (a) $f = 1,575$ GHz, (b) $3,71$ GHz dan (c) $5,9$ GHz [49]

Tabel 4 memberikan data jumlah publikasi dengan pencarian kata kunci jenis antenna, yang ditampilkan dengan jumlah total publikasi selama ini dan publikasi di tahun 2015 sampai dengan bulan May 2015.

Tabel 4 Jumlah publikasi jenis antenna (May 2015)

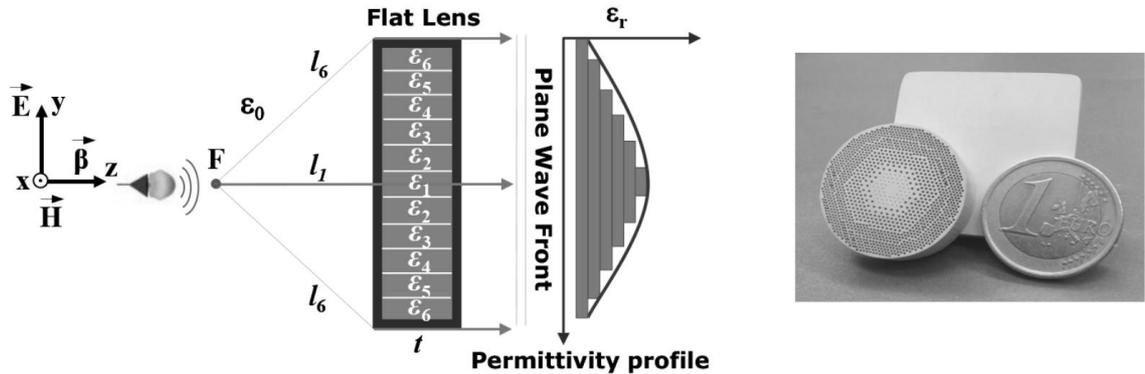
Kata kunci pencarian	Scholar.Google.com All / 2015
Wire antenna	857 000/ 7310
Yagi antenna	32 400 / 1030
Aperture antenna	415 000/ 4990
Slot antenna	481 000/ 6890
Horn antenna	93 700/ 2160
Parabolic antenna	50 800/ 1190
Microstrip antenna	183 000/ 3760
Helical antenna	47 800/ 1690
Log periodic antenna	55 300/ 1780
Lens antenna	152 000/ 3200
Fractal antenna	21 100/ 951
Leaky wave antenna	24 100/ 963

4. MATERIAL

Pada dasarnya, material penyusun antenna adalah struktur konduktif (metal, aluminium, kuningan, tembaga). Antena mikrostrip secara inherent memiliki kandungan dielektrika, karena teknologi ini menggunakan bahan printed circuit board (PCB). Material dielektrika sering digunakan pada aplikasi antenna. Antena lensa (lens antenna) menggunakan dielektrika untuk lebih memfokuskan pancarannya, sehingga terjadi kenaikan nilai gain.

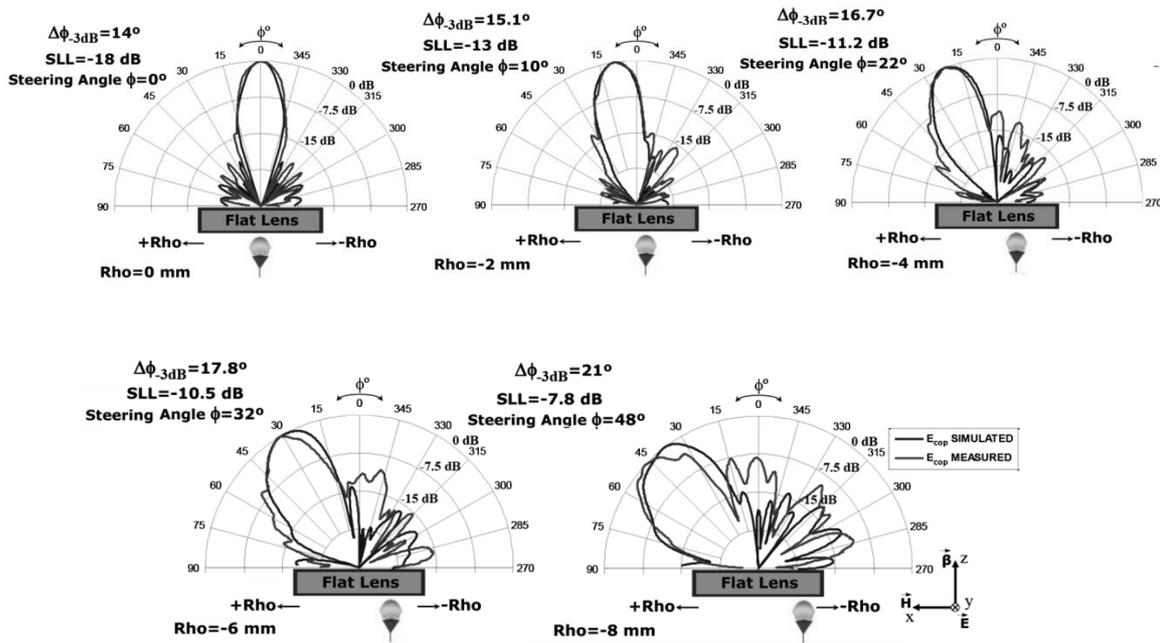
Sebuah struktur lensa yang terbuat dari dielektrika dengan indeks gradient dirancang untuk aplikasi gelombang millimeter [51]. Gambar 11 menunjukkan

prinsip kerja dari antenna dengan lensa datar ini dan prototypenya.



Gambar 11 Prinsip antenna dengan lensa datar berindeks gradient dan prototype [51]

Gambar 12 menampilkan perbandingan hasil perhitungan (software CST) dan pengukuran diagram radiasi dari antenna dengan lensa datar berindeks gradient ini. Tergantung dari posisi feeding, bisa didapatkan beamforming dari arah pancaran utama antenna tersebut. Gain terbesar didapatkan pada posisi feeding di tengah, yaitu 18,3 dB, sedangkan pada posisi feeding ke kanan atau ke kiri sejauh 8 mm, menurunkan gain ke nilai 13,7 dB.

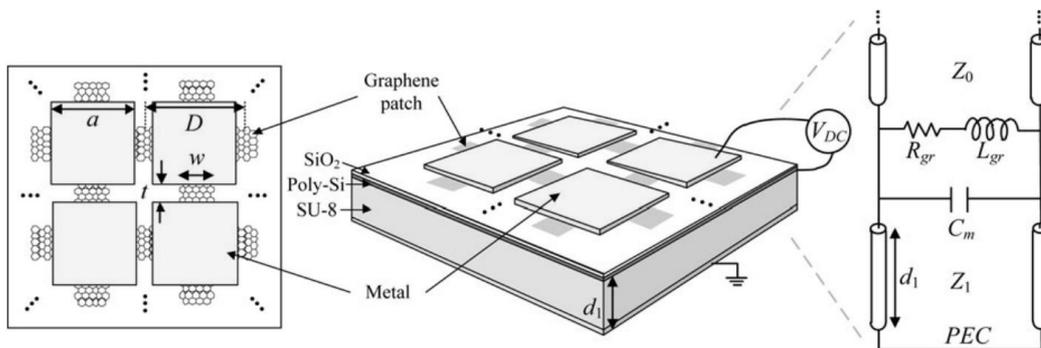


Gambar 12 Perbandingan hasil perhitungan dan pengukuran pada frekuensi 60 GHz untuk beberapa posisi feeding [51]

Antena yang “dipasangkan” lapisan metamaterial memainkan peranan yang juga penting untuk menaikkan gain, seperti yang dibahas di bagian 3.

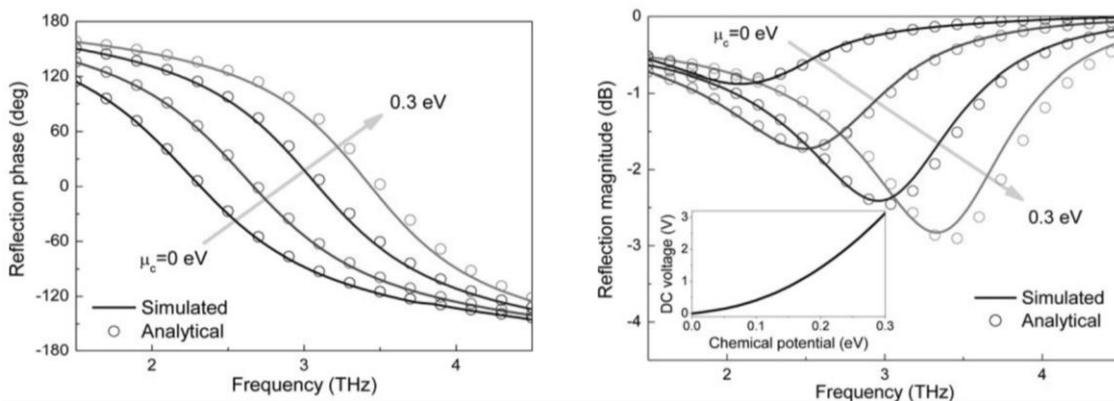
Selain dari itu material graphene juga dewasa ini memainkan peranan penting di teknik gelombang mikro. Graphene adalah material yang memiliki karakteristik elektris, termis dan mekanis yang unik. Spektrum energy dari graphene yang tidak memiliki celah, menjadikannya sebagai kandidat yang potensial untuk dikembangkan dalam berbagai piranti nanoelektronik dan nanofotonik. Selain dari itu konduktivitas permukaan graphene bisa dikendalikan dengan tegangan yang dikenai di atasnya.

Publikasi [52] mengusulkan suatu konsep antenna leaky-wave dua dimensi dengan bahan graphene. Antena ini bisa di-tune di frequency dan melakukan beamforming (mengarahkan main beam ke arah tertentu) pada band interval terahertz. Dengan mengubah konduktivitas dari graphene, fasa faktor refleksi dari permukaan high-impedance dari bidang ini bisa diubah, sehingga mengubah frekuensi resonansi struktur itu dalam wilayah sspektrum yang lebar.



Gambar 13 Permukaan High-impedance berbasiskan graphene dan model rangkainannya [52]

Gambar 13 menunjukkan struktur geometri dari permukaan high-impedance (HIS) yang dirancang. Dengan memvariasikan tegangan V_{DC} , nilai R_{gr} dan L_{gr} bisa diubah, sehingga bisa mengubah fasa dan besar dari faktor refleksi antenna yang dirancang di atas. Gambar 14 memberikan hasil fasa dan besar faktor refleksi yang berubah berdasarkan nilai tegangan yang dipasangkan. Antena ini bekerja pada frekuensi terahertz.



Gambar 14 Fasa dan besar faktor refleksi dengan potensial kimia berbeda-beda [52].

Tabel 5 memberikan hasil pencarian pada scholar.google.com dengan kata-kata kunci material penyusun antenna. Terlihat antenna yang menggunakan material dielektrika mendominasi hasil pencarian. Metamaterial dewasa ini juga sering menjadi tema riset antenna dan belakangan material yang berbasis graphene juga mulai banyak.

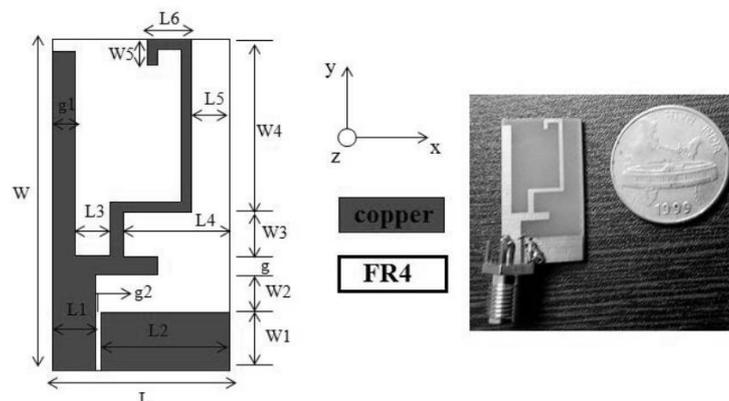
Tabel 5 Jumlah publikasi material antenna (May 2015)

Kata kunci pencarian	Scholar.Google.com All / 2015
Metamaterial antenna	26 500/ 2440
Graphene antenna	7 400/ 1010
Superconducting antenna	24 200/ 619
Dielectric antenna	621 000/ 7780
Anisotropic antenna	45 000/ 1810
Ferrite antenna	33 500/ 803

5. APLIKASI

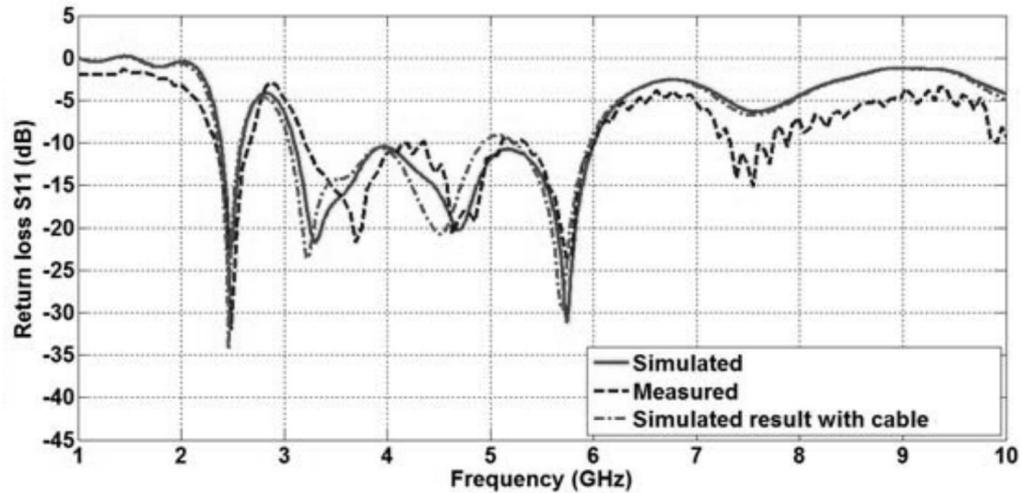
Kebutuhan akan sistim komunikasi nirkabel yang handal mendorong berkembangnya teknologi komunikasi secara signifikan, dengan dibukanya frekuensi-frekuensi yang baru dan aplikasi yang lebih menjanjikan.

Sistim radio seluler merupakan aplikasi komunikasi wireless yang paling populer saat ini. Perancangan antenna dilakukan untuk stasiun basis, baik untuk indoor maupun outdoor, antenna-antenna yang memiliki kapabilitas tertentu untuk dipakai pada makrosel, mikrosel ataupun pikosel. Ataupun antenna yang dipakai pada stasiun mobil-nya. Di [53] dirangkumkan berbagai macam hasil riset antenna yang dipakai pada aplikasi celuer CDMA, GSM dan WCDMA. Pada dasarnya antenna yang menggunakan prinsip dan teknologi yang sama juga bisa dipakai untuk generasi ke-4 (LTE) dan 5G (generasi ke-5).



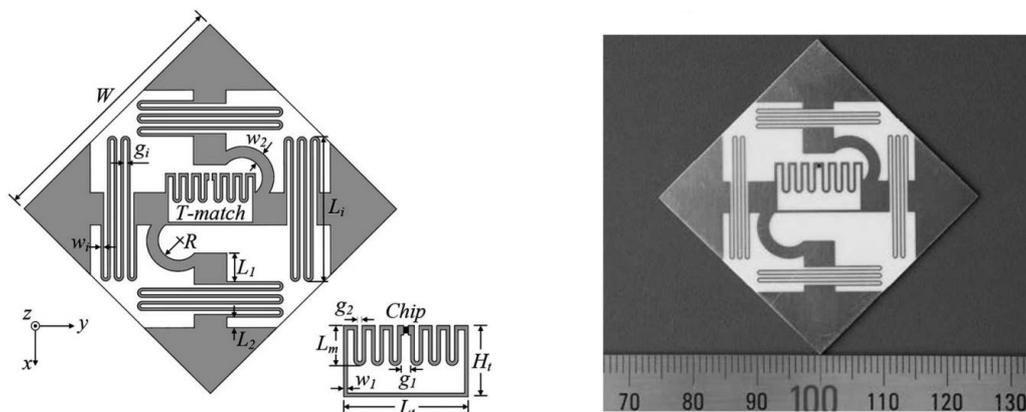
Gambar 15 Geometri dan Photo antenna coplanar untuk WLAN dan WiMax [54].

Riset antenna terbaru, banyak didominasi oleh antenna yang bisa bekerja pada frekuensi yang berbeda-beda (multiband antennas), seperti yang dilaporkan di [54], sebuah antenna yang bekerja secara multiband untuk aplikasi Bluetooth, WLAN dan WiMAX. Antena ini dirancang dengan teknik coplanar dengan ukuran $13,75 \times 26 \text{ mm}^2$. Gambar 15 menunjukkan geometri dan foto antenna yang dirancang tersebut. Perbandingan hasil simulasi computer (dengan software CST) dan pengukuran ditampilkan di gambar 16, terlihat nilai refleksi minimum pada 2.5 GHz, 3.3 GHz dan 5.7 GHz, juga tambahan minimum pada 4.7 GHz.



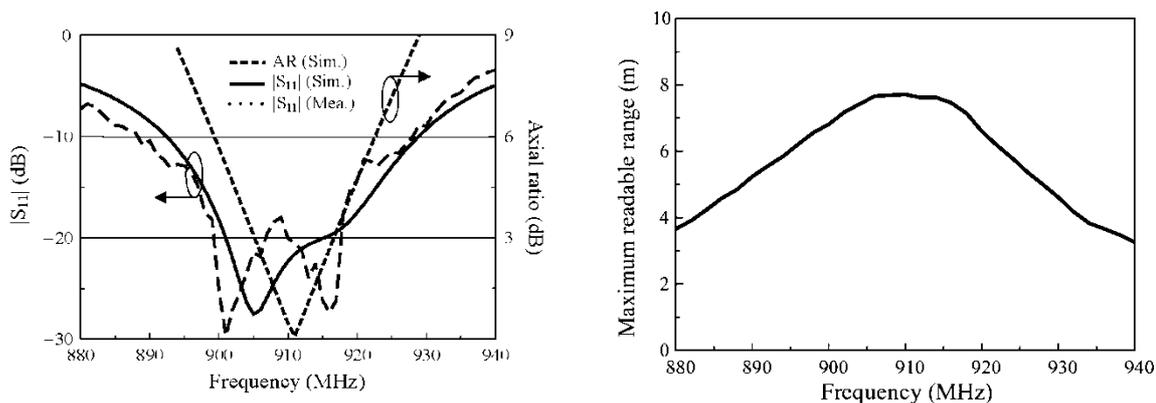
Gambar 16 Perbandingan hasil simulasi (CST) dan pengukuran [54].

Radio frequency identification (RFID) memainkan peranan penting dalam aplikasi logistic, inventarisasi ataupun otomatisasi dalam pengidentifikasian, misalnya di pusat perbelanjaan, pintu tol, dsb. Publikasi [55] merancang sebuah antenna dipole bersilang yang diimplementasikan dalam teknologi mikrostrip. Salah satu tuntutan dalam aplikasi RFID adalah antenna yang bekerja secara berpolarisasi sirkular. Gambar 17 menunjukkan geometri dan foto antenna yang dirancang.



Gambar 17 Geometri dan foto antenna RFID [55].

Gambar 18 kiri menunjukkan perbandingan hasil simulasi (dengan HFSS) dan pengukuran dari faktor refleksi. Dengan acuan -10 dB, hasil simulasi memberikan bandwidth sebesar 37 MHz (892-929 MHz), sedangkan pengukuran sekitar 39 MHz (890-929MHz). Gambar 18 kiri juga menunjukkan hasil simulasi axial ratio (AR), yaitu maksimal 3 dB AR yang menghasilkan bandwidth sebesar 11,4 MHz (905,2-916,6 MHz) dengan AR 0.3 dB terkecil pada frekuensi 911 MHz.



Gambar 18 kiri: hasil simulasi/pengukuran faktor refleksi (S_{11}) dan axial ratio, Kanan: jangkauan pembacaan sistim RFID [55].

Gambar 18 kanan menunjukkan jangkauan maksimal sistim RFID yang dirancang. Terlihat jangkauan terjauh pada interval frekuensi 905 MHz – 915 MHz.

Tabel 6 menunjukkan jumlah publikasi yang didapatkan dengan bantuan mesin pencari scholar.google.com. Hasil yang terbanyak didapatkan dengan kata kunci radar antenna, tetapi di tahun 2015 justru hasilnya lebih kecil dibandingkan dengan pencarian dengan kata kunci cellular antenna ataupun LTE antenna dan satellite antenna.

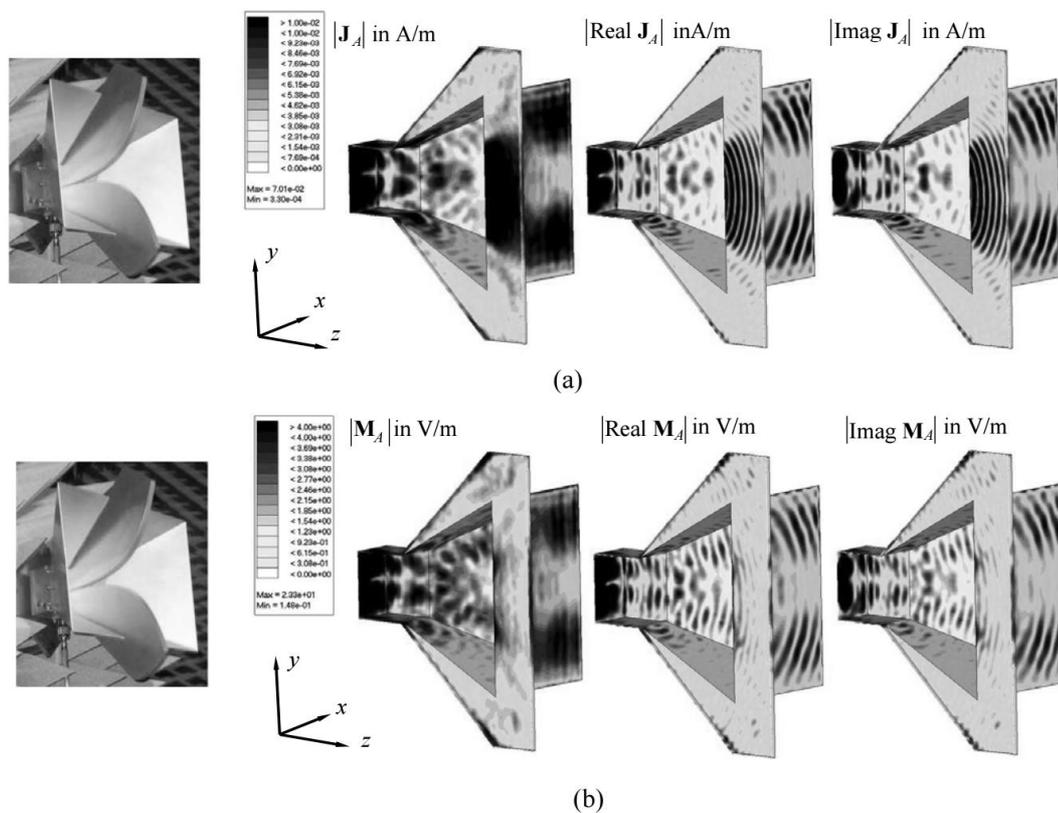
Tabel 6 Jumlah publikasi aplikasi antenna (May 2015)

Kata kunci pencarian	Scholar.Google.com All / 2015
Cellular antenna	163 000/ 6190
LTE antenna	37 300/ 3260
5G antenna	11 900/ 1420
Multiband antenna	51 500 / 1580
Ultra wideband antenna	88 400 / 2070
Millimeter wave antenna	175 000 / 1930
WLAN antenna	86 500 / 2020
WiMAX antenna	33 000/ 1970
RFID antenna	164 000 / 1990
Radar antenna	612 000 / 2950
Satellite antenna	762 000 / 3350

6. PENGUKURAN

Perancangan antenna untuk dipakai pada suatu aplikasi tertentu dimulai dengan memenuhi suatu spesifikasi yang diberikan, sehingga simulasi computer bisa melakukan proses optimasi yang akan menghasilkan suatu bentuk antenna. Pembuatan prototype antenna merupakan langkah selanjutnya yang diverifikasi dengan pengukuran besaran-besaran penting antenna. Teknik pengukuran besaran-besaran antenna merupakan langkah yang sulit. Telah dikembangkan berbagai teknik pengukuran, yang di-standarisasi oleh IEEE [56] dan didokumentasikan dalam beberapa buku [57–60].

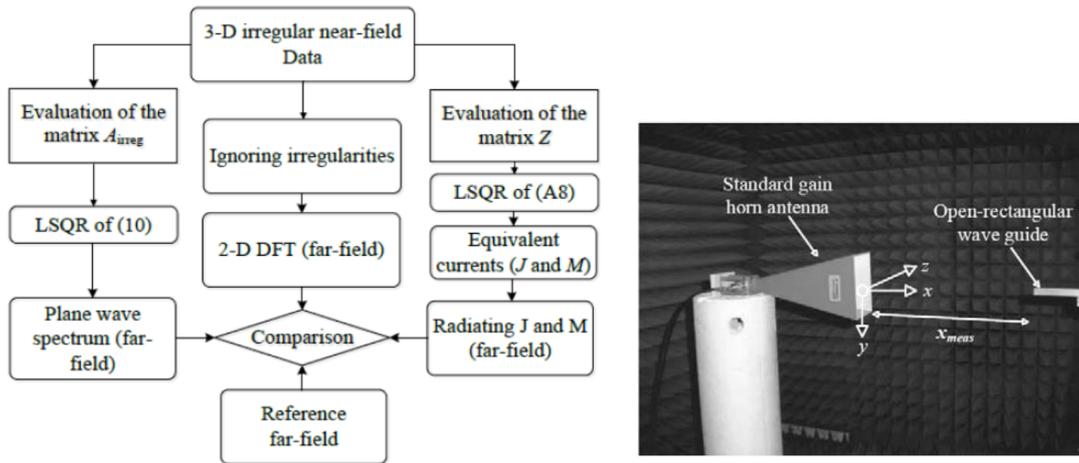
Penelitian terbaru dalam pengukuran antenna banyak berkisar pada transformasi medan dekat ke medan jauh, seperti yang dipublikasikan di [61]. Dalam pengukuran medan dekat, sering kali probe yang dipakai dalam pengukuran memberikan pengaruh terhadap hasil ukur, sehingga diperlukan adanya langkah pengkoreksian. Dalam banyak sekali publikasi hal ini dilakukan dengan transformasi medan terbeban (weighted field transformation). Dalam proses pengkoreksian hasil pengukuran secara numeris ini, digunakan pengintegralan dengan MLFMM. Target dari algoritma ini adalah melakukan rekonstruksi arus listrik dan arus magnetis di atas probe yang digunakan, sehingga darinya bisa dihitung kembali medan pancar, yang akan mengkoreksi medan pancar yang diukur.



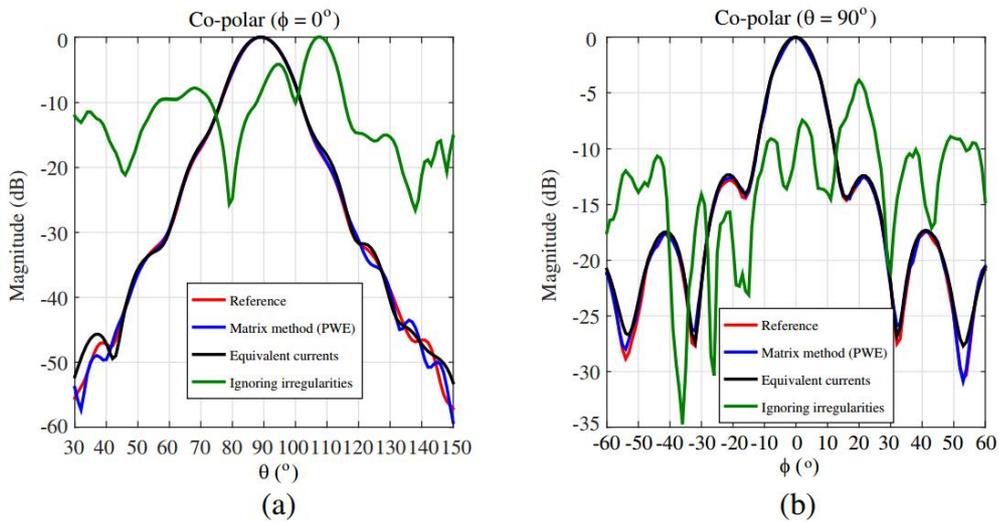
Gambar 19 (a) rekonstruksi kerapatan arus listrik (b) rekonstruksi kerapatan arus magnetis. [61]

Di gambar 19, permukaan antenna direpresentasikan dengan bantuan 188 090 segitiga yang memberikan jumlah besaran yang tak dikenal sebanyak 564 270 kerapatan arus listrik dan magnetis. Jumlah data pengukuran 45 051, yang mana pada setiap titik ini diukur dua polarisasi saling orthogonal. Problem inversi ini menghasilkan data kerapatan arus listrik dan magnetis.

Publikasi [62] memberikan algoritma transformasi medan dekat ke medan jauh, seperti diberikan di gambar 20. Hasil yang didapat dari algoritma ditampilkan di gambar 21.



Gambar 20 kiri:Validasi prosedur metoda matriks yang dikenalkan di [62], Kanan: struktur set-up pengukuran



Gambar 21 rekonstruksi diagram radiasi) (a) sudut phi =0, (b) sudut theta= 90° [62]

Tabel 7 memberikan hasil pencarian dengan scholar.google.com dengan kata kunci pengukuran antenna. Riset mengenai compact range antenna measurement dominan di tahun 2015.

Tabel 7 Jumlah publikasi pengukuran (May 2015)

Kata kunci pencarian	Scholar.Google.com All / 2015
Antenna measurement	1 400 000/ 15 700
Compact range antenna measurement	195 000/ 6560
Outdoor antenna measurement	46 500/ 2160
Near-field antenna measurement	72 200/ 3360

7. PENUTUP

Perkembangan teknologi komunikasi wireless, sensor dan radar terus memicu riset tentang antenna. Pencarian dengan kata kunci di mesin pencari scholar.google.com memberikan data banyaknya jumlah publikasi yang ada, baik di jurnal ataupun konferensi.

REFERENCES

- [1] T.S. Rappaport, *Wireless Communication*, Prentice Hall, New Jersey, 2nd. Ed., 2002
- [2] S. Ahmadi, *LTE-Advanced*, Academic Press, 2015.
- [3] H. Zarrinkoub, *Understanding LTE with Matlab*, Wiley, 2014.
- [4] T. Brown, P. Kyritsi, *Practical Guide to MIMO Radio Channel*, Wiley, 2012.
- [5] J.R. Hampton, *Introduction to MIMO Communications*, Cambridge University Press, 2013.
- [6] H. Huang, C. B. Papadias, *MIMO Communication for Cellular Networks*, Springer, 2012.
- [7] J.D. Kraus, R.J. Marhefka, *Antennas for all applications*, 3rd ed., Mc-Graw Hill 2002.
- [8] M. Alaydrus, *Antena, Prinsip dan Aplikasi*, Graha Ilmu, Jogjakarta, 2011.
- [9] C. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed., Wiley, 2005
- [10] W.L. Stutzman, G.A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. Wiley, 2013.
- [11] J.L. Volakis, *Antenna Engineering Handbook*, 4th ed., McGraw Hill, 2007.
- [12] C. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, Wiley, 2008.
- [13] Y.T. Lo, S.W. Lee (ed.), *Antenna Handbook*, 4 volumes, Chapman and Hall, 1993.
- [14] J.R. James, P.S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*, 2 vol., IEE, Peregrinus, 1989
- [15] J. Thornton, K.C. Huang, *Modern Lens Antennas for Communications Engineering*, IEEE, 2013.
- [16] S. Silver, *Microwave Antenna Theory and Design*, McGraw-Hill, 1949.
- [17] D. Pozar, D.H. Schaubert, *Microstrip Antennas*, IEEE, 1995
- [18] M. Alaydrus, *Medan Elektromagnetika*, Penerbit Andi, Jogjakarta, 2014.
- [19] M.N.O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, CRC Press, 2009.
- [20] A. Kirsch, F. Hettlich, *The Mathematical Theory of Time-Harmonic Maxwell's Equations*, Springer, 2015.
- [21] P. Moon, D.E. Spencer, *Field Theory Handbook*, Springer, 1961.
- [22] J.-M. Jin, *Theory and Computation of Electromagnetic Fields*, Wiley, 2010.
- [23] J.-M. Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, 3rd ed., Wiley, 2014.
- [24] J.L. Volakis, A. Chatterjee, L.C. Kempel, *Finite Element Method for Electromagnetics*, IEEE Press, 1998.
- [25] G. Pelosi, R. Coccioli, S. Selleri, *Quick Finite Elements for Electromagnetic Waves*, 2nd ed., Artech House, 2009.
- [26] P.P. Silvester, G. Pelosi, *Finite Elements for Wave Electromagnetics*, IEEE Press, 1994.
- [27] A. Taflove, S.C. Hagness, *Computational Electrodynamics*, 3rd ed., Artech House, 2005.
- [28] U.S. Inan, R.A. Marshall, *Numerical Electromagnetics: The FDTD Method*, Cambridge University Press, 2011.
- [29] D. M. Sullivan, *Electromagnetic Simulation using the FDTD Method*, 2nd ed., Wiley-IEEE, 2013.
- [30] S.D. Gedney, *Introduction to the Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, Morgan & Claypool, 2011.
- [31] R.F. Harrington, *Field Computation by Moment Method*, IEEE Press, 1993.
- [32] W.C. Gibson, *The Method of Moments in Electromagnetics*, 2nd ed., CRC Press, 2015.
- [33] R.C. Hansen, *Moment Methods in Antennas and Scattering*, Artech, 1990.
- [34] E.K. Miller, L. Medgyesi-Mitschang, E.H. Newman, *Computational Electromagnetics*, IEEE Press, 1992.
- [35] O. Erguel, and L. Guerel, *The Multilevel Fast Multipole Algorithm for Solving Large-Scale Computational Electromagnetics Problems*, IEEE Press, 2014
- [36] F.J.C. Meyer, D.B. Davidson, U. Jakobus, M.A. Stuchly, Human exposure assessment in the near field of GSM base-station antennas using a hybrid finite element/method of moments technique, *IEEE Trans. On Biomedical Engineering*, vol. 50, no.2, 2003.
- [37] D.A. McNamara, C.W.I. Pistotius, *Introduction to Uniform Geometrical Theory of*

- Diffraction*, Artech, 1990.
- [38] V.A. Borovikov, B. Ye Kinber, *Geometrical Theory of Diffraction*, IEE Press, 1994.
- [39] P. Y. Ufimtsev, *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*, Wiley, 2007.
- [40] P.Y. Ufimtsev, *Theory of Edge Diffraction in Electromagnetics*, Tech Science Press, 2003.
- [41] M. Alaydrus, V. Hansen, T.F. Eibert, Hybrid2: Combination the three-dimensional hybrid finite element –boundary integral technique for planar multilayered media with the Uniform Geometrical Theory of Diffraction, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 1, pp. 67-74, 2002.
- [42] M. Alaydrus, Hybrid Methods in Designing Sierpinski Gasket Antenna, *Telkomnika*, Vol. 8, no. 3, 2010, pp.225-234.
- [43] D.S. Weile, E. Michielssen, Genetic algorithm optimization applied to electromagnetics: a review, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol. 45, No. 3, pp. 343-353, 1997.
- [44] J. Robinson, Y. Rahmat-Samii, Particle swarm optimization in electromagnetics, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol. 52, No. 2, pp. 397-407, 2004.
- [45] J. Robinson, S. Sinton, and Y. Rahmat-Samii, Particle swarm, genetic algorithm, and their hybrids: optimization of a profiled corrugated horn antenna, *International Symposium Antennas and Propagation Society*, vol. 1, pp. 314-317, 2002.
- [46] M. Alaydrus, Planar Antenna Design Controlled by Simulated Annealing, *Frequenz, Journal of RF-Engineering and Telecommunications*, vol. 63, July/August, pp. 139-143, 2009.
- [47] J.W. Bandler, R.M. Biernacki, S.H. Chen, P.A. Grobelny and R.H. Hemmers, Space Mapping Technique for Electromagnetic Optimization, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 42, no. 12, pp. 2536-2544, 1994.
- [48] M.Q. Qi, WX Tang, HF Ma, BC, Pan, Z. Tao, YZ Sun, Suppressing Side-Lobe Radiations of Horn Antenna by Loading Metamaterial Lens, *Nature-Scientific Reports* vol. 5, 2015
<http://www.nature.com/srep/2015/150313/srep09113/pdf/srep09113.pdf>
- [49] T. Mondal, S. Samanta, R. Ghatak, and S.R. Bhadra Chaudhuri, A Novel Tri-band Hexagonal Microstrip Patch Antenna using Modified Sierpinski Fractal for Vehicular Communication, *PIER C*, vol. 57, pp.25-34, 2015.
- [50] X. Quan, S. Zhang, H. Li, High Directivity Horn Antenna of Metamaterial in Terahertz, *International Power, Electronics and Material Engineering Conference (IPEMEC) 2015*, pp.991-995.
- [51] M. Imbert, A. Papiro, F. De Flaviis, L. Jofre and J. Romeu, Design and Performance Evaluation of a Dielectric Flat Lens Antenna for Millimeter-Wave Applications, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vo. 14, 2015, pp. 342-345.
- [52] X.-C. Wang, W.-S. Zhao, J. Hu and W.-Y. Yin, Reconfigurable Terahertz Leaky-Wave Antenna Using Graphene-Based High-Impedance Surface, *IEEE Trans. On Nanotechnology*, Vol. 14, No. 1, January 2015, pp62-69.
- [53] Z. N. Chen, K.-M. Luk, *Antennas for Base Stations*, McGraw Hill, 2009.
- [54] P.V. Naidu, and A. Malhotra, Design and Analysis of Miniaturized Asymmetric Coplanar Strip Fed Antenna for Multi-Band WLAN/WiMAX Applications, *Progress in Electromagnetic Research C*, Vol. 57, 159-171, 2015.
- [55] H. H. Tran, S. X. Ta, and I. Park, A Compact Circularly Polarized Crossed-Dipole Antenna for an RFID Tag, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 14, 2015, pp.674-677.
- [56] *IEEE Standard Test Procedures for Antennas*, IEEE Std 149-1979, published by IEEE Inc., 1979.
- [57] G.E. Evans. *Antenna Measurement Techniques*. Artech House, Inc. 1990.
- [58] J.E. Hansen (Ed.). *Spherical Near-Field Antenna Measurements*, Peter Peregrinus Ltd., London, 1988.
- [59] D. Slater, *Near-Field Antenna Measurements*, Artech House, Boston, 1991.

- [60] S. Gregson, J. McCormick, C. Parini, Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements, John Wiley & Sons, NY, 2007.
- [61] T.F. Eibert, E. Kilic, C. Lopez, R.A.M. Mauermayer, O. Neitz, and G. Schnattinger, Electromagnetic Field Transformations for Measurements and Simulations, Progress in Electromagnetics Research, Vol. 151, 2015, pp. 127-150.
- [62] M. Farouq, M. Serhir, and D. Picard, Matrix Method for Antenna Plane Wave Spectrum Calculation Using Irregularly Distributed Near-Field Data: Application to Far-Field Assessment, Progress in Electromagnetics Research M, Vol. 42, 2015, pp.71-83.