

# Analisis Karakteristik Elektrik Bentuk Geometri Jalur *Printed Circuit Board* Menggunakan Pendekatan *Finite Element*

Putut Son Maria<sup>1</sup> dan Elva Susianti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Elektronika, Politeknik Caltex Riau

putut.son@gmail.com<sup>1</sup>, elva@pcr.ac.id<sup>2</sup>

**Abstract**— *Some Electronics Computer Aided Design (ECAD) softwares have provided several track shapes to design a Printed Circuit Board (PCB), such as right angle, rounded and trapezoidal. However, it is quite difficult to find scientific literature that can be used as a guide which explains and compiles directly about each character of the geometry. This study aims to analyze and to observe the electrical characteristics of the geometry shape on the Printed Circuit Board (PCB) path by using the finite element method. Each PCB path shape is modeled according to its geometry and physical properties, then calculated for its electrical quantity and be observed for its performance at given current. Simulation and numerical calculations showed that the shape of trapezoidal and rounded geometry have lower resistance and planar inductance of 6.8% and 7.39% respectively than the right angle shape.*

**Keywords**— *ECAD, PCB, geometric shape, Finite Element Analysis*

**Abstrak**— *Beberapa perangkat lunak yang termasuk kategori Electronics Computer Aided Design (ECAD) telah menyediakan beberapa pilihan bentuk jalur Printed Circuit Board (PCB) seperti right angle, rounded dan trapezoidal. Tidak banyak ditemukan literatur ilmiah yang dapat dijadikan pedoman yang menjelaskan dan mengkomparasikan secara langsung tentang masing-masing karakter dari bentuk geometri tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengetahui karakter elektrik bentuk geometri pada jalur PCB dengan menggunakan metode finite element. Masing-masing bentuk jalur PCB dibuat modelnya sesuai dengan geometri dan properti fisiknya, kemudian dihitung besaran elektrikalnya, setelah itu diamati kinerjanya pada saat diberikan arus. Hasil simulasi dan kalkulasi numerik memperlihatkan bahwa bentuk jalur trapezoidal dan rounded memiliki resistansi dan induktansi planar yang lebih kecil sebesar 6,8% dan 7,39% dibandingkan bentuk jalur right angle.*

**Kata kunci**— *ECAD, PCB, bentuk geometri, Finite Element Analysis*

## I. PENDAHULUAN

Papan rangkaian tercetak atau *printed circuit board* (PCB) adalah piranti yang esensial dan penting bagi kalangan akademik, *hobbyist*, profesional, dan industri besar. Proses manufakturisasi rangkaian elektronika hingga menjadi bentuk PCB diawali dari gambar skema atau diagram rangkaian, kemudian menetapkan kemasan komponen (*packaging*) dari setiap komponen yang ada di skema tersebut, dan kemudian melakukan penyambungan jalur (*routing track*). Pekerjaan untuk mewujudkan skema rangkaian menjadi sebuah rangkaian riil yang disusun rapi pada sebuah PCB dapat dengan mudah dikerjakan menggunakan aplikasi *electronic computer aided design* (ECAD) yang banyak dirilis baik secara komersil (berbayar) ataupun tanpa bayar, seperti *DesignSpark PCB*, *Protel*, *AutoTRAX EDA*, *EDAClient*, *Orcad*, *Smartwork* dan lain sebagainya [1], [2].

Program-program ECAD tersebut menawarkan banyak fitur dan kemudahan bagi *user* dan memberikan peluang bagi setiap desainer untuk kreatif menentukan model jalur pada

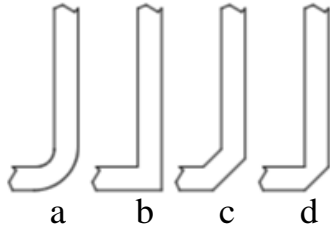
PCB menurut gaya, selera, dan fungsi yang dikehendaknya, misalnya dalam hal membentuk sudut dan memilih bentuk geometri jalur yang digunakan pada PCB. Semakin banyak komponen maka konsekuensinya semakin banyak titik (kaki komponen) yang harus disambungkan, sehingga sering terjadi bahwa jalur PCB terpaksa harus berkelok-kelok atau bahkan menggunakan *via* (sambungan tembus papan/*layer*) agar demi dapat terhubung dengan titik *target* [3].

Hasil dari kuesioner yang direspon oleh mahasiswa di salah satu perguruan tinggi penulis menunjukkan bahwa sebesar 77,4 % dari 106 responden menyatakan bahwa mahasiswa tidak tahu pengaruh dari bentuk geometri jalur PCB. Selain itu juga sangat sedikit literatur atau artikel yang menjelaskan tentang bagaimana efek bentuk geometri jalur PCB terhadap rangkaian atau potensi apa saja yang ditimbulkan oleh bentuk geometri tersebut dan bagaimana karakteristik kelistrikannya. Artikel ini bertujuan untuk memberikan penjelasan secara parametrik tentang bentuk geometri jalur PCB dengan cara memodelkan bentuk geometri dan membandingkan hasilnya. Pemodelan yang digunakan menggunakan kaidah dan pendekatan *finite element analysis*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Literature Review

Secara umum terdapat empat jenis bentuk kelokan jalur PCB yang mungkin digunakan para desainer, yaitu sudut siku kombinasi (*chamfer*), sudut miring (*trapezoidal*), siku tegak lurus (*right angle*) dan lengkung (*rounded*) [4] seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kelokan jalur PCB a. lengkung(*rounded*), b. sudut siku(*right angle*), c. sudut miring 45°(*trapezoidal*), d. siku kombinasi(*chamfer*)

Bentuk paling optimal adalah bentuk sudut miring 45° karena mudah untuk difabrikasi dan mudah digambar. Sudut siku adalah bentuk yang berisiko tinggi pada saat proses *etching* (jalur tembaga mengalami *over-etching* atau *less-etched*) dan sudut membusur dinyatakan sebagai bentuk yang tidak di-*support* oleh sebagian besar aplikasi ECAD. Referensi [4] tidak menjelaskan alasan secara analitis ataupun numerik terkait empat bentuk geometri yang diulasnya, penilaian terhadap karakteristik jalur tersebut hanya didasarkan pada pengalamannya.

Pendapat yang berbeda dinyatakan dalam [1] yang menuliskan bahwa bentuk membusur merupakan gaya *routing* PCB pada era sebelum ECAD dan tidak memberikan keunggulan apapun (*non-advantegous*), sedangkan sudut siku tidak ada pengaruhnya terhadap rangkaian dan tidak ada potensi apapun yang diakibatkannya selain karena bentuknya yang kurang estetik. Agak disayangkan karena [1] dan [4] tidak menampilkan data eksperimen, analisis, simulasi ataupun kalkulasi numerik dalam menyampaikan argumentasinya terkait dengan efek bentuk geometri jalur PCB, hal ini terkesan kontra produktif dengan teori kelistrikan elektromagnetika dan persamaan yang dipostulatkan oleh Maxwell.

B. Elektromagnetika

Maxwell melakukan penyempurnaan terhadap teori kelistrikan yang sebelumnya dinyatakan oleh Gauss, Faraday, dan Ampere menjadi persamaan yang disebut sebagai persamaan Maxwell berikut :

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \tag{1}$$

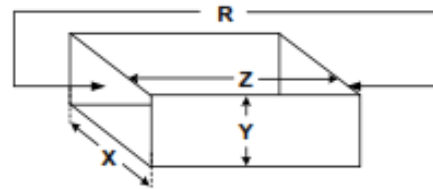
$$\nabla \cdot B = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{3}$$

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

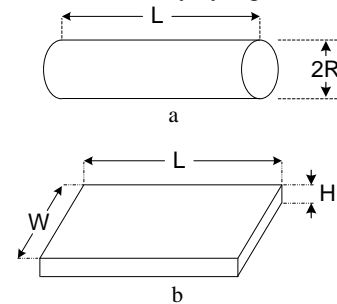
Dimana E kuat medan listrik, B kerapatan fluk magnet,  $\epsilon_0$  permitivitas ruang hampa dan  $\mu_0$  permeabilitas ruang hampa dan J kerapatan arus. Kerapatan arus dan medan listrik akan mempengaruhi besaran fluk magnet. Konduktor yang dialiri arus, memiliki sifat induktif dan kapasitif yang sifatnya imajiner. Referensi [5] dan [6] menyatakan bahwa pada suatu rangkaian, arus yang mengalir pada suatu jalur akan menghasilkan besaran yang sama pada jalur umpan balik (*loop*) atau jalur menuju *ground*. Jalur *loop* ini bertindak seolah seperti antena yang dapat menghasilkan radiasi gelombang elektromagnetik yang besarnya ditentukan oleh amplitudo arus, frekuensi sinyal dan luasan geometri dari *loop* arus, prinsip ini diimplementasikan pada perangkat telepon genggam nirkabel.

Referensi [6] didukung oleh [8] dalam tulisannya tentang formulasi untuk menghitung besaran riil dan imajiner dari sebuah konduktor. Gambar 2 dan Gambar 3 adalah ilustrasi untuk menghitung resistansi dan induktansi dari sebuah konduktor. Besaran induktansi dari sebuah konduktor secara umum berbanding lurus dengan panjang dari konduktor tersebut [8], formulasinya dituliskan seperti pada persamaan (5) hingga persamaan (7).



Gambar 2. Resistansi pada konduktor *rectangular*

Jalur pada PCB dapat dianggap sebagai konduktor planar, tetapi memiliki bentuk yang *non-uniform*. Setiap konduktor memiliki sifat resistif dan induktif, tetapi pada jalur PCB karena lebih banyak variasinya, maka perhitungannya secara manual akan membutuhkan waktu yang sangat lama. Sejauh ini belum ada *software* khusus atau fitur pada *software* ECAD yang mampu menghitung besaran elektrik atau karakteristik jalur PCB berdasarkan bentuknya yang universal.



Gambar 3. Konduktor a. silindris, b. planar

$$R = \rho \frac{Z}{xxy} \tag{5}$$

$$L_{wire} = 0,0002L \left[ \ln \left( \frac{2L}{R} \right) - 0,75 \right] \mu H \tag{6}$$

$$L_{strip} = 0,0002L \left[ \ln \left( \frac{2L}{(W+H)} \right) + 0,2235 \left( \frac{W+H}{L} \right) + 0,5 \right] \mu H \tag{7}$$

### C. Finite Element Analysis (FEA)

Sedikitnya ada tiga cara untuk menganalisis sebuah sistem fisik yaitu analisa matematik, pendekatan eksperimental, dan kalkulasi numerik. Pengukuran besaran resistansi, induktansi, dan kapasitansi pada sebuah papan PCB tidak selalu mudah untuk dilakukan, diperlukan peralatan khusus karena sifat besarannya yang imajiner (kecuali resistansi) dan *magnitudenya* sangat mungkin berorde mili atau mikron dan variabel fisik yang vektornya cukup kompleks. Secara praktis hal ini juga sulit untuk dilakukan menggunakan instrumen kelas B dimana spesifikasinya terbatas. Lebih jauh tentang efek dari adanya sifat induktif dan kapasitif pada jalur PCB adalah sulitnya mengukur atau mengobservasi pola medan listrik dan medan magnet tanpa interferensi eksternal. Pendekatan secara teoritis untuk menghitung medan listrik dapat dilakukan menggunakan persamaan Poisson walaupun membutuhkan waktu yang lama untuk mendapatkan hasilnya. Alternatif lain untuk dapat menganalisa sistem fisik adalah dengan pendekatan secara kalkulasi numerik, yang salah satunya menggunakan pendekatan FEA. FEA telah digunakan oleh banyak *engineer* sebagai metode yang cukup *feasible* dan *reliable*. FEA bekerja dengan cara melihat sebuah sistem sebagai satuan volume utuh yang dapat di-diskritisasi menjadi beberapa sub elemen. Terdapat beberapa software aplikasi yang menggunakan prinsip FEA, salah satunya adalah COMSOL Multiphysics® seperti yang digunakan pada artikel ini. Secara umum langkah analisis menggunakan FEA berurutan sebagai berikut :

- menentukan *geometric domain*
- menentukan *element type*
- menentukan *material properties*
- menentukan *geometric properties*
- proses *meshing/discretization*
- menentukan *boundary condition*
- perhitungan atau *calculation*.

### D. Poisson Equation

Perumusan medan listrik yang terkait dengan besaran kerapatan muatan dinyatakan oleh persamaan Poisson seperti ditunjukkan pada persamaan (8) hingga persamaan (10).

$$\nabla E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (8)$$

$$E = -\nabla V \quad (9)$$

Substitusi persamaan (7) ke (8) menghasilkan persamaan (9).

$$-\nabla \nabla E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (10)$$

dimana E adalah medan listrik,  $\rho$  adalah kerapatan muatan dan  $\epsilon_0$  adalah permitifitas medium. Medan listrik merupakan fungsi dari kerapatan muatan dan dipengaruhi juga oleh bahan dielektrik. Persamaan (10) adalah persamaan diferensial parsial yang merupakan fungsi variabel pada domain tiga dimensi (operator i, j dan k) *rectangular*, untuk mengefisienkan waktu maka semua persamaan diferensial tersebut dihitung menggunakan *solver* pada *software* COMSOL.

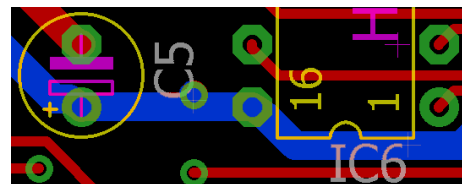
## III. METODOLOGI PENELITIAN

### A. Parameter Penelitian

Parameter pada penelitian ini meliputi nilai resistansi dan induktansi planar, distribusi medan magnet, dan profil kerapatan arus dari setiap bentuk geometri. Komputasi numerik yang dilaksanakan pada penelitian ini menggunakan program komputer COMSOL Multiphysics® versi 4.2.150. Domain sistem fisik untuk studi dalam program adalah *magnetic and electric fields*. Properti subyek penelitian yang dihitung dalam program berdasarkan pada data dan literatur antara lain material PCB menggunakan bahan FR4 dengan konstanta dielektrik 3,9 ~ 4,8, *dielectric breakdown* 39 kV/mm, *water absorption* < 1,3 %, *dissipation factor* 0,022, *thermal expansion* 16 – 19 ppm/°C, *resistivity*  $1,72 \times 10^{-8} \Omega m$ , *copper thickness* 35  $\mu m$ , dan *PCB thickness* 0,5 mm [6]. PCB yang dimodelkan dalam penelitian ini adalah *single layer* tanpa *jumper*, dengan alasan bahwa PCB jenis ini yang murah dan mudah didapatkan pada toko elektronika. Bentuk geometri jalur konduktor yang dihitung adalah geometri seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan perhitungan diasumsikan pada kondisi *temperatur ambient*.

### B. Pemodelan 2D dan 3D

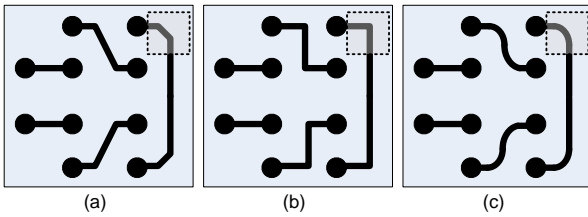
Salah satu contoh bentuk geometri jalur PCB yang dihitung pada penelitian ini adalah seperti yang dapat ditemukan pada *project hexapod.brd* yang merupakan *project* contoh pada program aplikasi Eagle® Versi 7.4.0 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Bentuk geometri jalur PCB *trapezoidal*

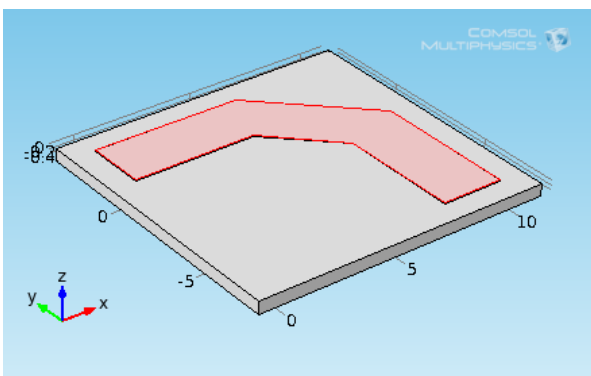
*Region of interest* pada penelitian ini difokuskan pada bagian jalur yang mengalami pembelokan arah, yaitu dihitung mulai dari *track* lurus – *track* transisi (pembelokan jalur) – *track* lurus. Seperti ditunjukkan pada Gambar 5, *region of interest* ditandai dengan kotak dengan *dashed line* (sudut kanan atas dari setiap model).

*Layout* PCB pada Gambar 5 adalah bagian kecil dari rangkaian DC *Power Supply* di bagian *rectifier*, rangkaian ini sengaja dipilih sebagai model karena sering dijadikan materi latihan untuk mahasiswa dan pelajar yang belajar elektronika. Dimensi jalur PCB yang dimodelkan dalam perhitungan menggunakan nilai-nilai sebagai berikut: arus pada *track* diasumsikan 1 A, ini disesuaikan dengan konteks rangkaian yaitu *rectifier*, material konduktor adalah tembaga (*copper*) dengan ketebalan *track* mengikuti standar fabrikasi yaitu 35  $\mu m$ , lebar jalur 100 *thou* atau 2,54 mm, dan *pad to track clearance* menggunakan nilai *default* 10 *thou* atau 0,254 mm dengan ketebalan PCB *single layer* 0,5 mm.

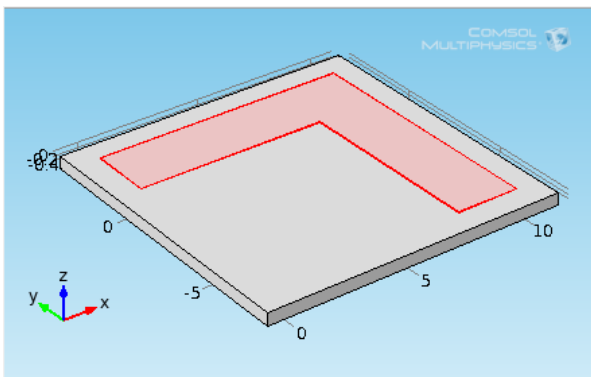


Gambar 5. Model 2D layout jalur PCB a. trapezoidal b. right angle c. rounded

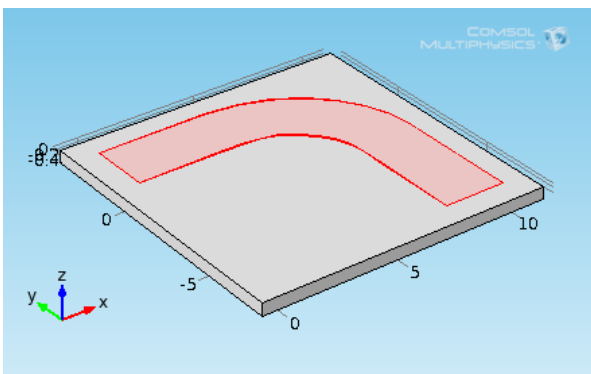
Gambar 6 hingga Gambar 8 adalah hasil pemodelan 3D yang menggunakan ukuran-ukuran yang telah disebutkan sebelumnya. Pemodelan dibuat hanya pada geometri yang menjadi *region of interest*, jadi tidak perlu menggambarkan keseluruhan geometri dari model 2D menjadi bentuk model 3D karena bentuk jalurnya simetris.



Gambar 6. Model 3D geometri track PCB trapezoidal



Gambar 7. Model 3D geometri track PCB right angle



Gambar 8. Model 3D geometri track PCB rounded

Untuk keperluan komputasi numerik di program, ada beberapa variabel yang diasumsikan memiliki nilai yang sangat kecil, yaitu *electrical conductivity* untuk udara 0,001 S/m dan *relative permeability* untuk FR4 sebesar 0,001. Nilai tersebut sengaja ditetapkan demikian untuk menghindari munculnya matrik *singular* yang berakibat pada proses komputasi tidak bisa mencapai konvergen, yang disebabkan karena nilai *default* parameter tersebut sama dengan nol.

### C. Boundary Condition

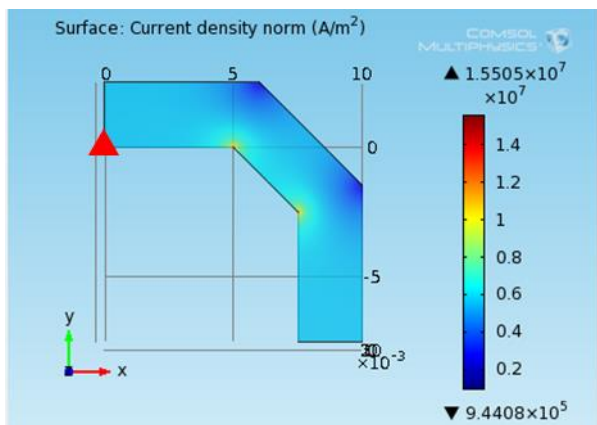
Prosedur penting dalam melakukan komputasi numerik menggunakan *finite element* adalah penetapan kondisi batas atau *boundary condition* pada sistem yang akan dikalkulasi. Pada penelitian ini formulasi yang diperlukan terdapat pada modul studi *magnetic and electric field* pada program COMSOL. Jumlah elemen pada tahap diskretisasi dipilih pada nilai di atas 100.000 elemen sesuai dengan kaidah yang berlaku dalam metode *finite element*. Rasio volume per elemen dari ketiga model sekitar 0,0077 sehingga rincian jumlah elemen untuk masing-masing geometri *trapezoidal*, *right angle* dan *rounded* berturut-turut adalah 175.963, 193.112, dan 180.881. Figur yang tidak seragam tersebut disebabkan karena luasan masing-masing bentuk geometri berbeda sehingga berefek pada jumlah elemen.

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Kerapatan Arus (*Current Density*)

Gambar 9 memperlihatkan profil *current density* pada bentuk geometri trapezoidal. Hasil kalkulasi menunjukkan range kerapatan arus bernilai antara  $1,0291 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup> sampai dengan  $1,5106 \times 10^7$  A/m<sup>2</sup>, dimana kerapatan arus terkecil berada pada *node* di koordinat planar (6, 2,5) dan (10, -1,5) sedangkan nilai terbesar berada pada *node* (5, 0) dan (7,5, -2,5). Sistem koordinat yang digunakan menggunakan *offset node origin* pada koordinat (0, 0) yang ditunjukkan oleh segitiga merah pada Gambar 9.

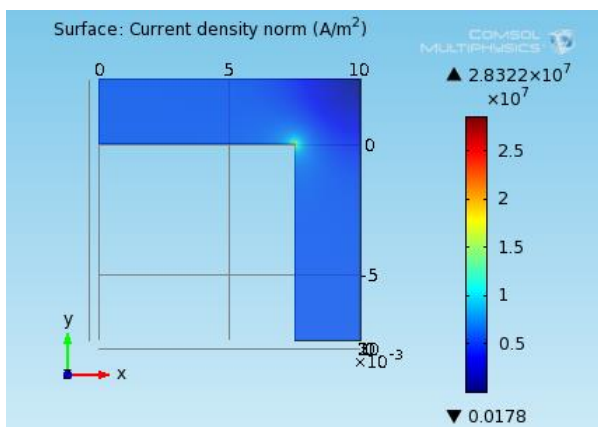
Sesuai dengan hipotesis sebelumnya, bahwa pergerakan elektron karena gaya *tangensial* mengakibatkan adanya penumpukan muatan pada titik-titik tertentu pada *track* yang mengalami transisi bentuk. Hal ini dapat dilihat pada 2 *node* di bagian sisi dalam geometri (ditunjukkan oleh *node* warna merah gradasi kuning). Karena pada geometri *trapezoidal* tersebut terdapat 2 transisi bentuk (horizontal-miring dan miring-vertikal), maka terdapat 2 posisi dimana elektron cenderung untuk merapat pada lintasan yang terpendek. Sebaliknya pada sisi bagian luar, kerapatan arus menjadi berkurang karena sebagian besar elektron telah berpindah dari alur lintasan semula, akibatnya adalah rasio jumlah elektron per satuan luas menjadi tidak *uniform* pada daerah *track* yang mengalami transisi bentuk. Dari bentuk geometri *trapezoidal* kerapatan arus rata-rata pada permukaan *track* dihitung sebesar  $5,606 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>.



Gambar 9. *Current density* pada bentuk geometri *trapezoidal*

Gambar 10 memperlihatkan profil *current density* pada bentuk geometri *right angle*. Karena pada geometri *right angle* hanya terdapat satu transisi bentuk, maka dapat diduga hanya muncul satu posisi dimana akan menjadi *node* maksimum kerapatan arus. Hasil kalkulasi menunjukkan *range* kerapatan arus geometri *right angle* bernilai antara 0,0353 A/m<sup>2</sup> sampai dengan 2,1299x10<sup>7</sup> A/m<sup>2</sup>, dimana kerapatan arus terkecil berada pada *node* di koordinat planar (10, 2,5) sedangkan nilai terbesar berada pada *node* (7,5, 0).

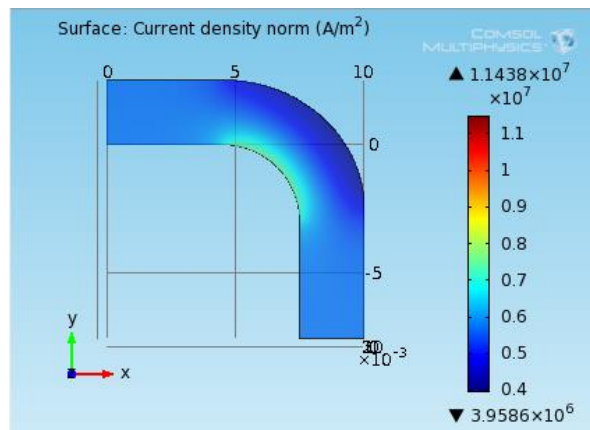
Jika *range min – max* dibandingkan dengan geometri *trapezoidal*, maka bentuk geometri *right angle* memiliki *bandwidth* kerapatan arus yang lebih lebar. Hal ini berarti ada ketimpangan nilai kerapatan arus yang terjadi pada daerah yang cukup luas. Hal ini bisa dilihat dari gradasi warna biru pada geometri *right angle* berwarna lebih gelap (biru gelap) jika dibandingkan dengan geometri lainnya. *Offset node origin* pada geometri *right angle* sama dengan geometri lainnya pada artikel ini. Dari bentuk geometri *right angle* kerapatan arus rata-rata pada permukaan *track* terhitung sebesar 5,426x10<sup>6</sup> A/m<sup>2</sup>.



Gambar 10. *Current density* pada bentuk geometri *right angle*

Gambar 11 memperlihatkan profil *current density* pada bentuk geometri *rounded*. Hasil kalkulasi menunjukkan *range* kerapatan arus bernilai antara 3,958x10<sup>6</sup> sampai 7,6532x10<sup>6</sup> A/m<sup>2</sup> dengan nilai kerapatan arus rata-rata pada permukaan *track* terhitung sebesar 5,5841x10<sup>6</sup> A/m<sup>2</sup>.

Geometri *rounded* memiliki karakteristik kerapatan arus yang mirip dengan *trapezoidal*, tetapi lebar *bandwidth*-nya sedikit lebih sempit. Pada orde *million* A/m<sup>2</sup>, lebar *bandwidth* *trapezoidal* antara 1,0 sampai 15,1, sedangkan geometri *rounded* antara 3,9 sampai 7,6. Jika dinilai dari hasil tersebut, maka bentuk geometri *rounded* memiliki karakter relatif *uniform* jika dibandingkan dengan geometri *trapezoidal* dan *right angle*.



Gambar 11. *Current density* pada bentuk geometri *rounded*

Rekap hasil kalkulasi kerapatan arus dari semua bentuk geometri di atas ditampilkan pada Tabel I. Bentuk geometri *trapezoidal* dan *rounded* memiliki karakter yang lebih bagus dalam hal kerapatan arus dibandingkan dengan geometri *right angle*. Geometri *rounded* memiliki karakter yang mirip dengan geometri *trapezoidal* tetapi lebar *bandwidth*-nya lebih sempit.

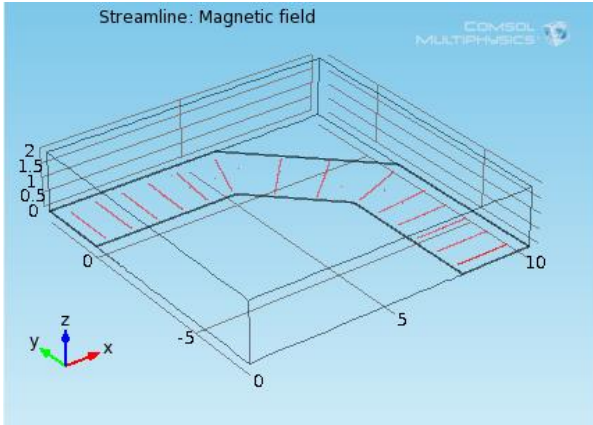
TABEL I. BESARAN KERAPATAN ARUS

Bentuk Geometri	Min (A/m <sup>2</sup> )	Max (A/m <sup>2</sup> )	Average (A/m <sup>2</sup> )
<i>Trapezoidal</i>	1,0291x10 <sup>6</sup>	1,5106x10 <sup>7</sup>	5,606x10 <sup>6</sup>
<i>Right Angle</i>	0,0353	2,1299x10 <sup>7</sup>	5,426x10 <sup>6</sup>
<i>Rounded</i>	3,958x10 <sup>6</sup>	7,6532x10 <sup>6</sup>	5,5841x10 <sup>6</sup>

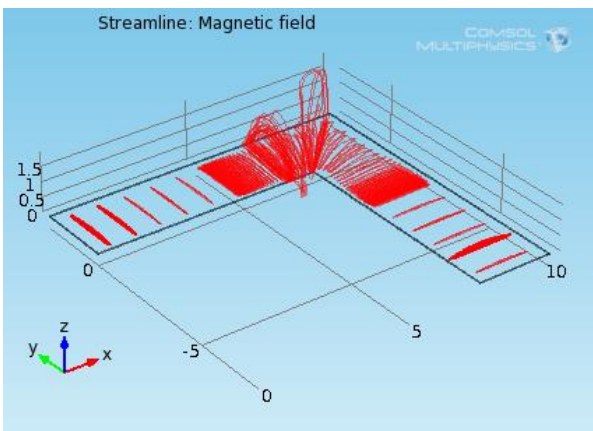
### B. *Magnetic field* dan Induktansi

Gambar 12 hingga Gambar 14 berturut-turut adalah profil *magnetic field* pada bentuk geometri *trapezoidal*, *right angle*, dan *rounded*. Selaras dengan karakteristik *uniformity* pada ulasan sebelumnya, terlihat bahwa bentuk geometri *trapezoidal* memiliki pola ketersebaran medan magnet lebih merata pada sepanjang *track*. Arah vektor medan magnet dan magnitudo dari medan magnet lebih teratur karena bentuk *track* pada transisi memiliki profil yang sama dengan sebelumnya atau gradien dari elektron hanya mengalami perubahan satu kali pada setiap transisi geometri.

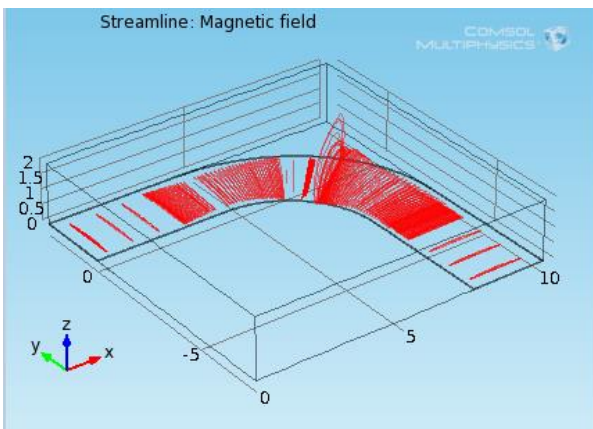
Pada bentuk geometri *right angle*, profil medan magnet terlihat tidak *uniform* dan pada daerah transisi muncul fluks magnet yang vektor dan magnitudonya relatif acak. Hal ini karena pada daerah transisi tersebut terdapat 2 *node* dengan kondisi posisi yang saling berseberangan dan besaran kerapatan arusnya sangat timpang.



Gambar 12. *Magnetic field* pada bentuk geometri *trapezoidal*



Gambar 13. *Magnetic field* pada bentuk geometri *right angle*



Gambar 14. *Magnetic field* pada bentuk geometri *rounded*

Pada bentuk geometri *rounded*, profil medan magnet lebih terkontrol jika dibandingkan dengan *right angle*. Perubahan bentuk pada geometri *rounded* lebih *smooth* yang artinya *gradien* elektron berubah secara *gradual* dan terprediksi. Hal ini ditunjukkan dengan fluk magnet yang lebih rapat pada daerah sekitar transisi, namun demikian magnitudonya tidak terlalu acak seperti halnya pada geometri *right angle*.

Tabel II menunjukkan komparasi antara nilai resistansi secara teori menggunakan persamaan (1) dengan hasil perhitungan numerik menggunakan FEA. Bentuk geometri

*trapezoidal* dan *rounded* memiliki nilai resistansi 6,8% lebih kecil dibandingkan geometri *right angle*. Hal ini terjadi karena secara fisik kedua bentuk tersebut memiliki volume area yang kecil yang berakibat pada nilai resistansinya menjadi kecil. Nilai resistansi dipengaruhi oleh *resistivity*, panjang konduktor dan luas penampangannya, berarti juga bahwa nilai resistansi dipengaruhi oleh volume fisik dari konduktor. Selisih nilai yang masih dalam toleransi kurang dari 10 % membuktikan bahwa analisis menggunakan FEA dapat diandalkan untuk kalkulasi profil geometri yang sederhana sampai kompleks.

Tabel III menunjukkan hasil kalkulasi besaran induktansi dari masing-masing bentuk geometri. Perhitungan induktansi secara teori untuk bentuk geometri kompleks tidak dapat dilakukan karena rumus yang ada hanya berlaku untuk jalur planar yang lurus. Cara lain untuk memvalidasi nilai induktansi dapat dilakukan menggunakan eksperimen, tetapi karena keterbatasan alat, maka dalam penelitian ini belum dapat menampilkan hasil pengukurannya.

TABEL II. PERBANDINGAN BESARAN RESISTANSI

Bentuk Geometri	Resistansi (mΩ)		Error
	Teori	FEA	
<i>Trapezoidal</i>	3,05	2,9	4,91%
<i>Right Angle</i>	3,4	3,1	8,82%
<i>Rounded</i>	3,08	2,9	5,84%

TABEL III. BESARAN INDUKTANSI HASIL PERHITUNGAN FEA

Bentuk Geometri	Induktansi (μH)
<i>Trapezoidal</i>	$8,79 \times 10^{-5}$
<i>Right Angle</i>	$9,44 \times 10^{-5}$
<i>Rounded</i>	$8,90 \times 10^{-5}$

Tabel IV menunjukkan komparasi antara perhitungan teori dan numerik FEA terhadap besaran *surface area* dari masing-masing geometri. *Surface area* adalah salah satu besaran yang mudah untuk dihitung secara teori sehingga dapat digunakan sebagai validasi terhadap model geometri. Hasil menunjukkan bahwa terdapat selisih yang kecil antara teori dan FEA. Tabel V menunjukkan bahwa volume fisik untuk geometri *trapezoidal* dan *rounded* relatif kecil dibandingkan *right angle*, hal ini mendukung penjelasan terhadap data yang ditampilkan pada Tabel II mengenai karakteristik nilai resistansi.

TABEL IV. SURFACE AREA

Bentuk Geometri	Surface area (mm <sup>2</sup> )		Error
	Teori	FEA	
<i>Trapezoidal</i>	80,28	79,02	1,56%
<i>Right Angle</i>	90,3	88,9	1,55%
<i>Rounded</i>	80,9	80,59	0,3%

TABEL V. VOLUME FISIK

Bentuk Geometri	Surface area (mm <sup>2</sup> ) - FEA	Volume (mm <sup>3</sup> )
<i>Trapezoidal</i>	79,02	1,361
<i>Right Angle</i>	88,9	1,531
<i>Rounded</i>	80,59	1,388

Mengacu pada Gambar 3.b, perhitungan induktansi juga tergantung pada volume fisik dari geometri model. Tabel III menunjukkan bahwa nilai induktansi geometri *right angle* lebih besar 7,39% dibandingkan *trapezoidal* dan *rounded*. Volume yang besar dan profil medan magnet yang tidak *uniform* mengakibatkan nilai induktansi bertambah secara proporsional. Jika diamati hanya satu *node*, maka nilai ini tidak signifikan, tetapi perlu diingat bahwa dalam PCB sangat mungkin terdapat banyak *node* atau belokan *track*, nilai yang kecil tersebut akan ikut terakumulasi pada PCB dan akibatnya memberikan efek yang signifikan pada rangkaian yang menggunakan frekuensi tinggi.

#### V. PENUTUP

Pemodelan dan kalkulasi numerik telah dilakukan untuk menguji karakteristik bentuk geometri jalur PCB. Dari tiga macam bentuk yang diujikan, ternyata bentuk geometri *trapezoidal* dan *rounded* memiliki karakteristik resistansi dan induktansi yang hampir sama dan bentuk geometri *right angle* memiliki nilai *resistansi* dan *induktansi* paling besar. Nilai resistansi geometri *trapezoidal* dan *rounded* relatif lebih kecil sebesar 6,8% per *node* dibandingkan geometri *right angle*, dan nilai induktansi geometri *right angle* lebih besar 7,39% per *node* dibandingkan geometri *trapezoidal* dan *rounded*. Geometri *trapezoidal* dan *rounded* lebih sesuai digunakan di rangkaian yang beroperasi pada frekuensi rendah karena memiliki nilai resistansi dan induktansi lebih kecil, namun tidak semua *software* ECAD menyediakan fitur untuk menggambar *arc* atau jalur berbentuk *rounded*. Penggunaan bentuk geometri *right angle* pada jalur PCB akan mengakibatkan semakin besarnya nilai total impedansi dari sebuah rangkaian, hal ini berarti bahwa pada tegangan kerja yang sama maka kinerja rangkaian akan kurang baik karena arus yang mengalir menjadi lebih kecil dari yang seharusnya.

#### REFERENSI

- [1] D. L. Jones, *PCB Design Tutorial*, Revision A, 29 June 2004.
- [2] M. Ocilka, O. Kravetz, dan O. Shutka, "Calculating of Inductance of Double-Layer Planar Spiral Coil Using COMSOL Multiphysics", *Proceeding SCYR*, Herl'any, Slovakia, pp. 247-249, May 15th, 2012.
- [3] J. S. N. T. Magambo, R. Bakri, X. Margueron, P. L. Moigne, A. Mahe, dan T. Bensalah, "Impact of PCB Track Shape on HF Copper Losses of Planar Magnetic Components", *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2016
- [4] D. Beeker, *Effective Printed Circuit Board Design : Techniques to Improve Performance*, Freescale, 2013.
- [5] K. Armstrong, *Advanced PCB Design and Layout for Electromagnetic Compatibility*, EMC compliance-club.com
- [6] E. Haseloff, *Printed Circuit Board Layout for Improved Electromagnetic Compatibility*, Texas Instruments INC, 1996.
- [7] H. Zumbahlen, *Basic Linear Design*, Analog Devices Inc. ISBN 0-916550-28-1, 2007.
- [8] J. Varteresian, *Fabricating Printed Circuit Boards*, Elsevier Science, 2002.
- [9] Comsol Inc, COMSOL Multi Physics Modelling Guide, Version 4.2.150.
- [10] D. Kovac, M. Ocilka, dan M. Vansac, "Calculating of Inductance of Spiral Coil Using COMSOL Multiphysics", *Proceeding ESMO*, Kremenchuk, pp. 89-90, 2012.
- [11] M. I. Montrose, *EMC and The Printed Circuit Board : design, theory and layout made simple*, IEEE Press series on electronics technology, A John Wiley & Sons INC., 1998.
- [12] "PCB Design Guidelines For Reduced EMI", Texas Instrument, November, 1999.
- [13] "PCB Layout for Improved Electromagnetic Compatibility", Texas Instrument, November, 1996.
- [14] S. Pradana, A. Susanto, dan Widyan, Pemanfaatan LTspice dan DesignSpark PCB untuk Simulasi Rangkaian dan Perancangan PCB, *Prosiding Seminar Ilmu Pengetahuan Teknik 2013*, Hal. 130 – 135.