

SIMULASI DISTRIBUSI MUATAN DISKRIT PADA KAWAT KONDUKTOR PERSEGI

Syamsudin Nur Wahid
Fakultas Teknik, Universitas Islam Balitar
Jl. Majapahit No.02-04 Sananwetan, Kota Blitar
email: snowhaatt@gmail.com

ABSTRAK

Distribusi muatan pada konduktor memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi teknik dan fisika. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi muatan pada kawat persegi dengan menggunakan simulasi komputer berbahasa python menggunakan perangkat google colab dengan script python. Penelitian menggunakan pendekatan muatan yang berada di sisi-sisi persegi tanpa ada yang berada di tengah atau di luarnya. Tidak ada potensial atau gaya luar yang mempengaruhi sistem ini. Interaksi hanya terjadi antara partikel muatan dalam kawat melalui medan gaya Coulumb dan partikel tidak ada yang keluar atau masuk sistem. Hasil simulasi menunjukkan partikel terkonsentrasi di sudut-sudut persegi dan meregang di bagian sisi tengah persegi. Distribusi potensial pun demikian. Potensial paling rendah berada di tengah dan tertinggi di sudut persegi. Hal ini disebabkan oleh efek ujung (edge effect) yang mengakibatkan penumpukan muatan di area sudut jadi lebih besar.

Kata kunci: Simulasi, distribusi muatan, konduktor persegi, potensial, sistem diskrit

PENDAHULUAN

Distribusi muatan pada konduktor memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi teknik dan fisika. Dalam dunia teknologi dan rekayasa listrik, pemahaman yang mendalam tentang distribusi muatan listrik pada berbagai bentuk konduktor merupakan aspek penting yang dapat mempengaruhi desain dan kinerja berbagai perangkat. Distribusi ini mempengaruhi sifat kelistrikan, medan gaya, potensial dan interaksi dengan lingkungan sekitar. Meskipun distribusi muatan pada kawat melingkar telah banyak dipelajari, penelitian tentang distribusi muatan pada kawat persegi masih relatif kurang.

Distribusi muatan pada kawat persegi dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk bentuk geometris konduktor dan kondisi lingkungan eksternal seperti medan listrik dan magnet. Distribusi muatan yang tidak seragam dapat menyebabkan ketidakseimbangan medan listrik, yang berpotensi mengurangi efisiensi dan keandalan perangkat. Oleh karena itu, memahami bagaimana muatan listrik terdistribusi di sepanjang kawat persegi menjadi sangat penting untuk meningkatkan desain dan kinerja perangkat tersebut.

Pemahaman yang mendalam tentang distribusi muatan pada kawat persegi dapat membantu dalam desain sirkuit elektronik yang lebih efisien. Dengan mengetahui daerah dengan konsentrasi muatan tinggi, desain dapat dioptimalkan untuk mengurangi titik panas dan meningkatkan kestabilan medan listrik, yang penting untuk kinerja dan umur panjang komponen elektronik. Dalam pengembangan sensor dan aktuator listrik, distribusi muatan yang tepat dapat meningkatkan akurasi dan respons perangkat. Misalnya, dalam sensor kapasitif, distribusi muatan yang seragam pada permukaan sensor dapat meningkatkan sensitivitas dan presisi pengukuran. Dalam sistem transmisi daya, pemahaman tentang distribusi muatan dapat membantu dalam mengoptimalkan desain kawat dan konduktor untuk mengurangi kerugian energi dan meningkatkan efisiensi transmisi.

Di sisi lain, kemajuan dalam teknologi simulasi komputer memungkinkan analisis yang lebih mendetail dan akurat tentang distribusi muatan pada konduktor dengan bentuk geometris kompleks. Metode elemen hingga (FEM) dan perangkat lunak seperti Python atau Google Colab dapat digunakan untuk memodelkan distribusi muatan secara sederhana dengan mempertimbangkan berbagai kondisi batas.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi muatan pada kawat persegi dengan menggunakan simulasi komputer berbahasa python menggunakan perangkat google colab. Dengan memahami distribusi muatan secara lebih mendalam, diharapkan dapat diperoleh panduan yang lebih baik untuk desain dan optimalisasi perangkat listrik dan elektronik yang menggunakan kawat persegi.

Kawat persegi adalah struktur geometris yang sering dijumpai dalam berbagai komponen elektronik dan perangkat listrik. Kawat persegi, dengan geometri sudut dan permukaan datarnya, sering digunakan dalam berbagai aplikasi teknik, mulai dari komponen elektronik hingga sistem transmisi daya. Memahami bagaimana muatan listrik terdistribusi di sepanjang kawat ini sangat penting untuk meningkatkan desain dan kinerja perangkat tersebut. Distribusi muatan pada konduktor dipengaruhi oleh

bentuk dan ukuran konduktor, serta kondisi eksternal seperti medan listrik dan magnet. Pada kawat persegi, geometri sudut dan bidang sisi permukaan menimbulkan tantangan khusus dalam analisis distribusi muatan. Penelitian menggunakan pendekatan muatan yang berada di sisi-sisi persegi tanpa ada yang berada di tengah atau di luarnya. Tidak ada potensial atau gaya luar yang mempengaruhi sistem ini. Interaksi hanya terjadi antara partikel muatan dalam kawat melalui medan gaya Coulomb dan partikel tidak ada yang keluar atau masuk sistem. Gerakan partikel dianalisa secara mekanika klasik. Mula-mula muatan berada di sisi persegi secara acak. Interaksi yang terjadi antar partikel menyebabkannya tertata pada persegi dengan formasi tertentu. Setelah distribusinya stabil akan dihitung distribusi muatan yang terjadi dan potensial yang terbentuk dalam kawat persegi.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam bidang elektrostatik dan desain perangkat listrik, serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan distribusi muatan pada konduktor dengan bentuk geometris kompleks.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi untuk menganalisis distribusi muatan pada kawat persegi berdasarkan prinsip-prinsip statika kelistrikan.

Pendekatan Analitis

Pendekatan analitis digunakan untuk panduan model distribusi muatan pada kawat persegi menggunakan persamaan matematika dasar elektrostatik. Prinsip-prinsip dalam pendekatan analitis meliputi Hukum Coulomb, Mekanika Newtonian dan konsep dasar potensial listrik.

- Hukum Coulomb

Menggunakan hukum Coulomb untuk menghitung gaya interaksi antar muatan satu dengan lainnya. Secara matematis, Hukum Coulomb dirumuskan sebagai berikut:

$$F = k \left(\frac{q_1 q_2}{r^2} \right)$$

Dengan F itu adalah gaya elektrostatik antara dua benda. k adalah konstanta Coulomb yang nilainya tergantung pada medium di mana benda-benda itu berada. q_1 dan q_2 adalah besarnya muatan kedua benda yang berinteraksi. r adalah jarak antara kedua benda yang bermuatan [1] [2] [3]. Rumus tersebut berlaku untuk interaksi antara 2 muatan. Sedangkan gaya yang ditimbulkan oleh beberapa muatan merupakan resultan vektor gaya dari masing-masing muatan.

- Mekanika Newtonian

Gaya yang diperoleh dari Hukum Coulomb membuat partikel bergerak dengan suatu percepatan dan kecepatan tertentu yang membuat posisinya bergeser. Keadaan posisi, kecepatan dan percepatan partikel diperbarui tiap selang waktu tertentu dan diiterasikan hingga keadannya stabil. Hukum II Newton menyatakan

$$F = ma$$

Dengan :

F = gaya yang bekerja pada benda (N)

m = massa benda yang diberi gaya (kg)

a = percepatan benda yang diberi gaya [4]

setiap percepatan menghasilkan kecepatan dan kecepatan menghasilkan perubahan posisi sesuai dengan rumus berikut.

$$v = a \cdot \Delta t$$

$$s = v \cdot \Delta t$$

- Konsep Dasar Potensial Listrik

Setelah diperoleh keadaan yang stabil, maka ditentukan pula distribusi potensial di sekitar kawat bermuatan tersebut. Potensial yang ditimbulkan oleh satu muatan pada suatu tempat dirumuskan sebagai

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Dengan Q adalah besarnya muatan, V adalah potensial, ϵ_0 adalah permitivitas vakum [5].

Simulasi Komputer

Simulasi komputer dilakukan menggunakan aplikasi Google Colab[6] dengan script Python. Simulasi komputer digunakan untuk memodelkan dan memvisualisasikan distribusi muatan pada kawat persegi dalam berbagai kondisi.

Langkah-langkah dalam simulasi meliputi: Pembuatan Model Geometri, Penetapan Kondisi Batas, Pemrosesan Simulasi dan Analisis Hasil.

- Pembuatan Model Geometri

Membuat model kawat persegi dengan ukuran dan spesifikasi tertentu menggunakan colab. Ukuran dan model disimpan kedalam variabel bebas. Material konduktor yang digunakan adalah super konduktor ideal dengan hambatan nol kecuali di sudut-sudutnya terdapat redaman saat arah kecepatan partikel berubah.

Untuk mendefinisikan konduktor persegi kita gunakan faktor kendala berikut:

```
def kendala(o): #o=sudut
    if o <= 45:
        x= 1.1
        r = x / math.cos(math.radians(o))
        y = r * math.sin(math.radians(o))
    elif o <= 135:
        y =1.
        r = y / math.sin(math.radians(o))
        x = r * math.cos(math.radians(o))
    elif o <=225:
        x = -1.
        r = x / math.cos(math.radians(o))
        y = r * math.sin(math.radians(o))
    elif o <= 315:
        y = -1.
        r = y / math.sin(math.radians(o))
        x = r * math.cos(math.radians(o))
    else:
        x= 1.
        r = x / math.cos(math.radians(o))
        y = r * math.sin(math.radians(o))
    return r,x,y
```

untuk posisi awal, dan

```
if P_baru[ptk['idx']]['x'] < -1:
    if P_baru[ptk['idx']]['y'] == 1:
        selisih = P_baru[ptk['idx']]['x'] + 1.
        P_baru[ptk['idx']]['x'] = -1.
        P_baru[ptk['idx']]['y'] = P_baru[ptk['idx']]['y'] + selisih/2
        P_baru[ptk['idx']]['vy'] = P_baru[ptk['idx']]['vx']/rdm
        P_baru[ptk['idx']]['vx'] = 0.
    if P_baru[ptk['idx']]['y'] == -1:
        selisih = P_baru[ptk['idx']]['x'] + 1.
        P_baru[ptk['idx']]['x'] = -1.
        P_baru[ptk['idx']]['y'] = P_baru[ptk['idx']]['y'] - selisih/2
        P_baru[ptk['idx']]['vy'] = -P_baru[ptk['idx']]['vx']/rdm
        P_baru[ptk['idx']]['vx'] = 0.

if P_baru[ptk['idx']]['y'] > 1:
    if P_baru[ptk['idx']]['x'] == 1:
        selisih = P_baru[ptk['idx']]['y'] - 1.
        P_baru[ptk['idx']]['y'] = 1.
        P_baru[ptk['idx']]['x'] = P_baru[ptk['idx']]['x'] - selisih/2
```

```
P_baru[ptk['idx']]['vx'] = -P_baru[ptk['idx']]['vy']/rdm
P_baru[ptk['idx']]['vy'] = 0.
if P_baru[ptk['idx']]['x'] == -1:
    selisih = P_baru[ptk['idx']]['y'] - 1.
    P_baru[ptk['idx']]['y'] = 1.
    P_baru[ptk['idx']]['x'] = P_baru[ptk['idx']]['x'] + selisih/2
    P_baru[ptk['idx']]['vx'] = P_baru[ptk['idx']]['vy']/rdm
    P_baru[ptk['idx']]['vy'] = 0.

if P_baru[ptk['idx']]['y'] < -1:
    if P_baru[ptk['idx']]['x'] == 1:
        selisih = P_baru[ptk['idx']]['y'] + 1.
        P_baru[ptk['idx']]['y'] = -1.
        P_baru[ptk['idx']]['x'] = P_baru[ptk['idx']]['x'] + selisih/2
        P_baru[ptk['idx']]['vx'] = P_baru[ptk['idx']]['vy']/rdm
        P_baru[ptk['idx']]['vy'] = 0.
    if P_baru[ptk['idx']]['x'] == -1:
        selisih = P_baru[ptk['idx']]['y'] + 1.
        P_baru[ptk['idx']]['y'] = -1.
        P_baru[ptk['idx']]['x'] = P_baru[ptk['idx']]['x'] - selisih/2
        P_baru[ptk['idx']]['vx'] = -P_baru[ptk['idx']]['vy']/rdm
        P_baru[ptk['idx']]['vy'] = 0.
```

Untuk batasan baru di setiap kali iterasi.

- Penetapan Kondisi Batas

Menetapkan kondisi batas seperti potensial listrik di permukaan kawat dan medan listrik eksternal. Simulasi ini membatasi keadaan pada suatu kondisi tanpa medan listrik eksternal, potensial listrik di permukaan kawat hanya dibentuk oleh muatan satu dan lainnya. Kondisi batas yang merupakan pernyataan model geometri telah dijelaskan di awal. Untuk kondisi awal muatan ditentukan sebagai berikut:

```
N= 500 #jumlah partikel bermuatan
k = 9*10**9 #konstanta listrik di ruang hampa
Q = 1.6*10**(-19) #besar muatan
m = 9.1*10**(-31) #massa partikel
```

posisi dan kecepatan awal partikel dibuat acak.

- Pemrosesan Simulasi

Menggunakan metode elemen hingga (FEM) untuk menyelesaikan persamaan gaya dalam hukum Coulumb yang relevan. Melakukan simulasi sederhana dengan jumlah partikel terbatas dalam selang waktu tertentu. Selama proses simulasi selang waktu antar proses 0.001 dan redaman 1.5 setiap bertemu tikungan.

```
dt = 0.001
b = 0 #10**(-28)
rdm = 1.5
```

- Analisis Hasil

Memvisualisasikan distribusi muatan di sepanjang permukaan kawat persegi dan menganalisis pola yang muncul, terutama di daerah dengan konsentrasi muatan tinggi. Analisis pembuatan grafik menggunakan Matplotlib sedangkan untuk perhitungannya menggunakan Numpy.

HASIL DAN PEMBAHASAN

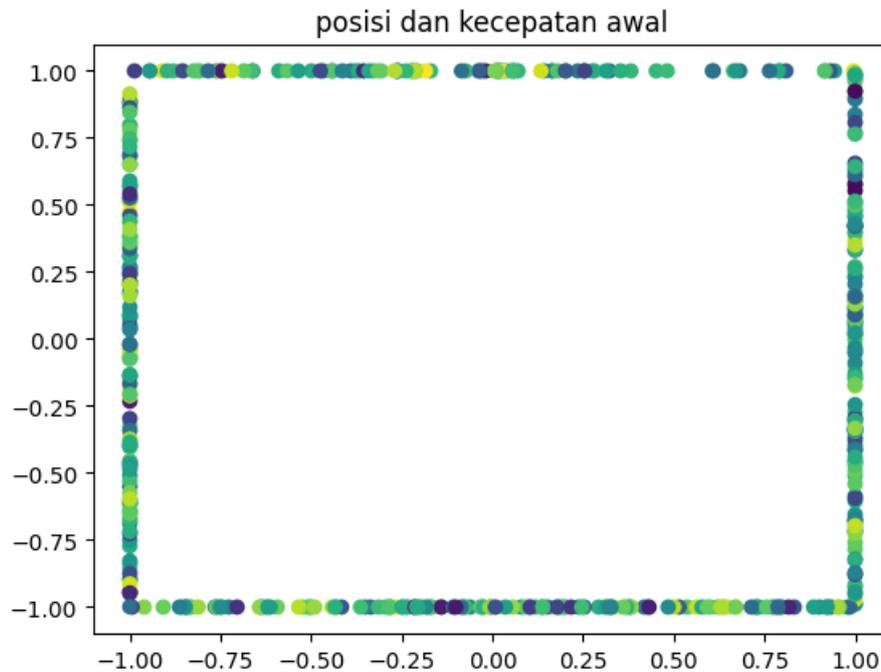
Penelitian ini menghasilkan pemahaman yang mendalam mengenai distribusi muatan pada kawat persegi melalui penggunaan metode simulasi komputer. Hasil-hasil berikut didapatkan dari metode tersebut dan dianalisis untuk memberikan gambaran yang komprehensif mengenai pola distribusi muatan.

Hasil Simulasi Komputer

Simulasi komputer dilakukan menggunakan perangkat lunak Google Colab dengan metode elemen hingga (FEM). Beberapa hasil utama dari simulasi ini yaitu:

- Posisi dan kecepatan awal partikel

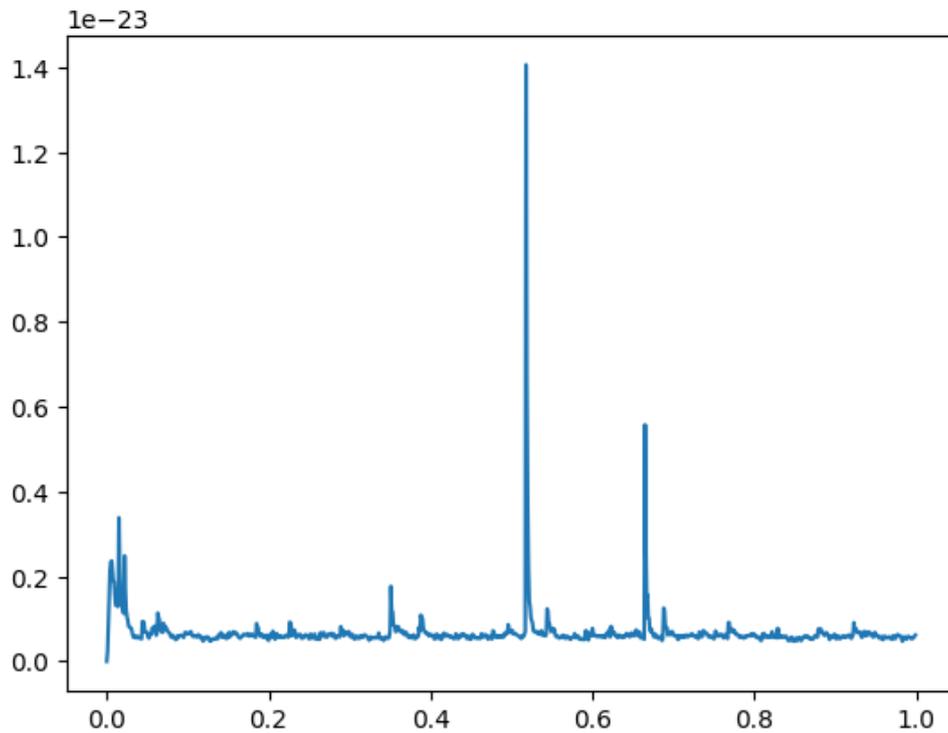
Posisi dan kelajuan awal partikel ditunjukkan pada Gambar 1. Tampak muatan tersebar secara acak pada sisi-sisi persegi baik posisi dan kecepatannya. Kecepatan partikel ditunjukkan oleh warna. Semakin terang, semakin cepat.



Gambar 1 posisi dan kecepatan awal muatan di kawat persegi

- Kestabilan sistem

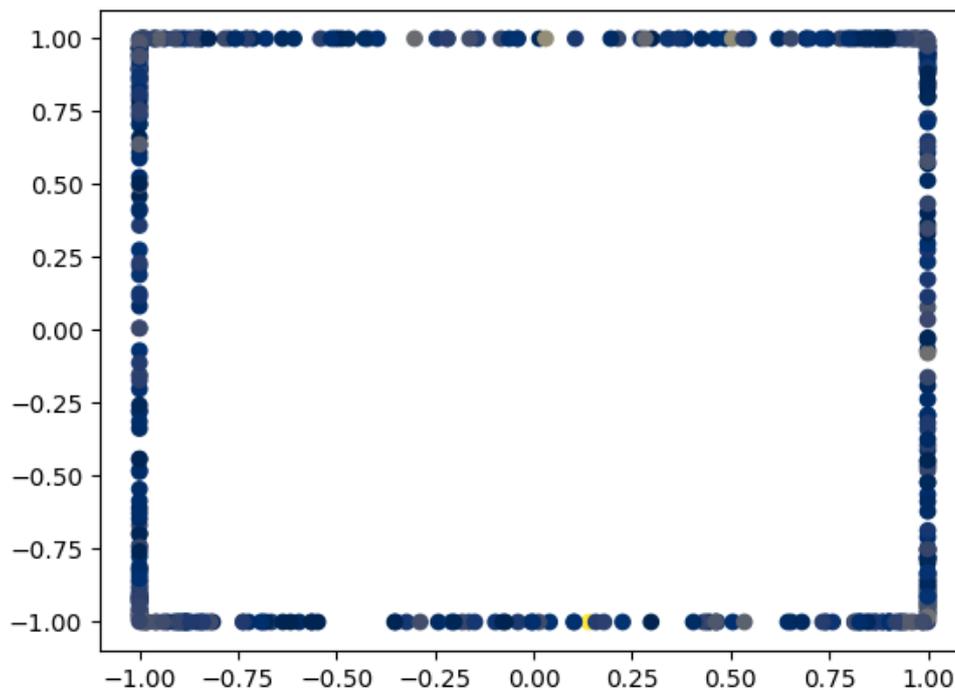
Simulasi dilakukan secara iteratif setiap selang waktu 0,001 detik sebanyak 1000 kali. Grafik perubahan energi kinetik sistem *Gambar 2* berikut menunjukkan sistem tidak akan diam dalam waktu dekat menuju kestabilan posisi yang mantap. Namun dilihat dari fluktuasi akhirnya yang cukup kecil dibandingkan fluktuasi energi awal, maka dapat diperkirakan distribusi partikel akhir tidak akan jauh berbeda dengan kondisi saat ini.



Gambar 2 Energi kinetik sistem setiap waktu

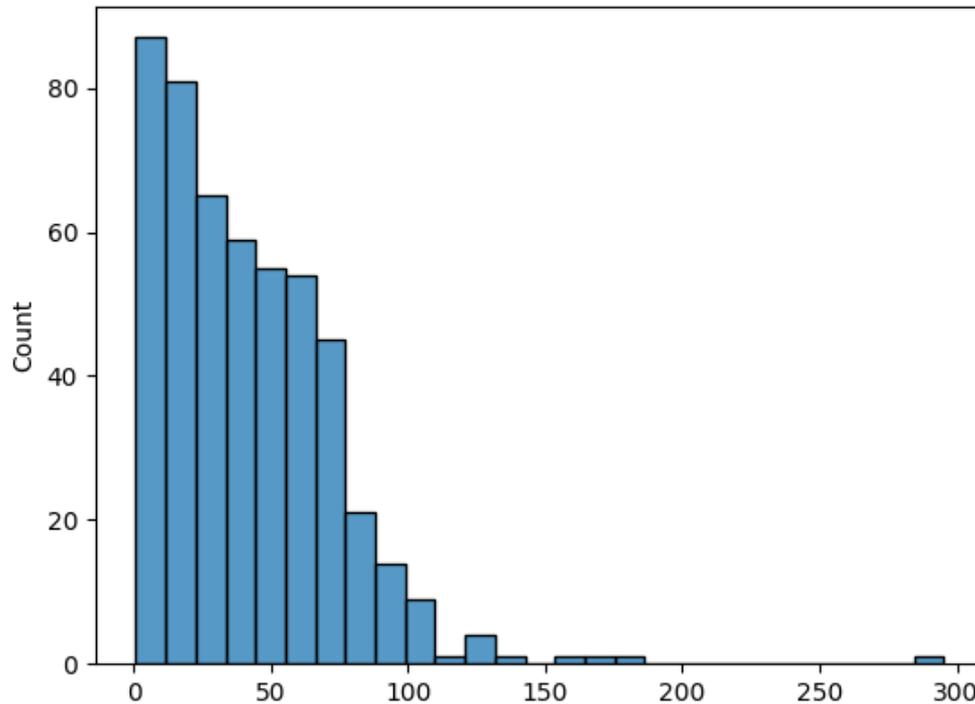
- Kondisi akhir sistem

Kondisi akhir muatan dalam kawat ditunjukkan oleh Gambar 3 berikut. Tampak partikel terkonsentrasi di sudut-sudut persegi dan renggang di tengah-tengah sisi. Ditinjau dari warna titik, tidak ada perbedaan mencolok dalam hal kelajuan antar partikel-partikel dalam sistem.



Gambar 3 Distribusi muatan akhir partikel bermuatan

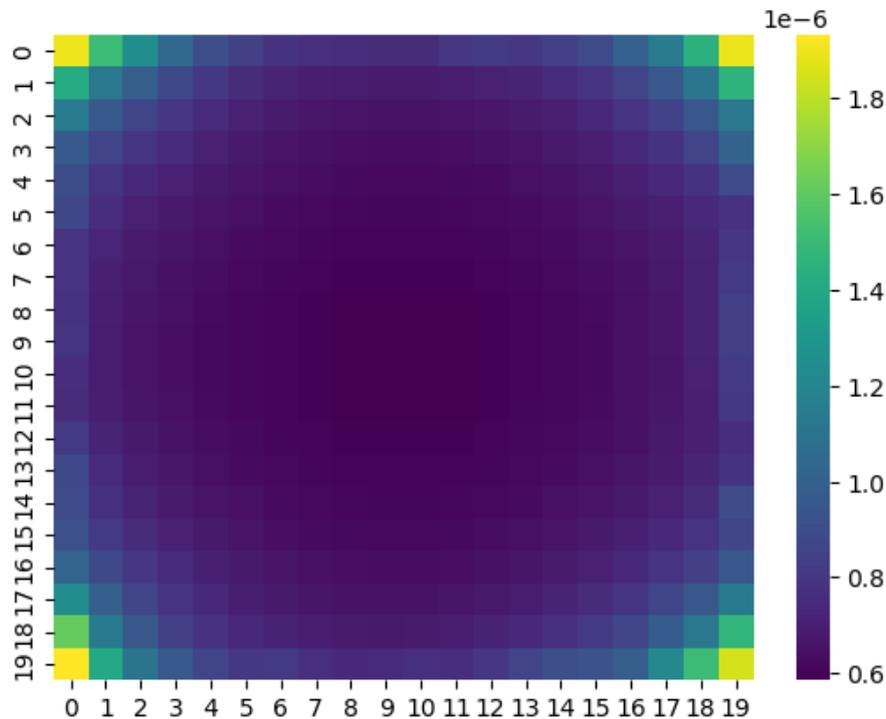
Distribusi kecepatan partikel dapat dilihat dengan lebih jelas dari Gambar 4 berikut. Mayoritas partikel berkelajuan kurang dari 100 m/s dan sangat jarang yang berkelajuan diatas 250 m/s. Bisa dibilang muatan yang kelajuannya melebihi 150 m/s adalah anomali.



Gambar 4 distribusi frekuensi kelajuan partikel

- Distribusi Potensial

Potensial dalam kawat terdistribusi secara konsentris secara melingkar dari tengah ke pinggir hingga sudut. Potensial listrik yang dihasilkan dari distribusi muatan menunjukkan intensitas yang tinggi di sekitar sudut-sudut kawat. Hal ini menunjukkan bahwa potensial listrik yang kuat terbentuk di area dengan konsentrasi muatan tinggi. Pada jarak yang lebih jauh dari permukaan kawat, medan listrik menunjukkan penurunan intensitas, namun tetap memperlihatkan pola yang konsisten dengan distribusi muatan di permukaan kawat. Variasi dalam kondisi potensial listrik menunjukkan bahwa meskipun nilai absolut distribusi muatan dapat bervariasi, pola dasar distribusi tetap sama, dengan konsentrasi di sudut-sudut kawat. Ini menunjukkan bahwa bentuk geometris kawat memiliki pengaruh dominan terhadap distribusi muatan. Distribusi potensial macam Gambar 5 ini tidak bisa disebut homogen karena reratanya $0,739 \mu\text{V}$ lebih kecil daripada selisih maksimum dan minimumnya $1,35 \mu\text{V}$. Mungkin potensialnya bisa jadi lebih homogen dengan menambahkan jumlah partikel, menaikkan muatan setiap partikel atau memperkecil dimensi persegi.



Gambar 5 distribusi potensial di dalam persegi

Pembahasan Teoritis

Pembahasan secara teoritis mengkonfirmasi hasil simulasi, dengan distribusi muatan yang juga menunjukkan konsentrasi muatan di sudut-sudut kawat persegi. Simulasi komputer menunjukkan distribusi muatan yang lebih tinggi di sudut-sudut kawat persegi dibandingkan dengan bagian tengah permukaan. Hal ini disebabkan oleh efek ujung (edge effect) yang mengakibatkan penumpukan muatan di area dengan tikungan lebih besar. Pada permukaan datar kawat, distribusi muatan cenderung lebih merata, namun masih terdapat variasi kecil yang disebabkan oleh interaksi antar muatan dan kondisi batas. Muatan yang ditempatkan pada persegi itu sejenis, sehingga terjadi tolakan antar sesamanya. Jika pada garis lurus tolakan ini menyebabkan partikel terkumpul di ujung-ujung garis, maka pada kawat persegi tolakan antar partikel menyebabkan muatan terkonsentrasi di sudut-sudutnya.

Pola distribusi muatan yang ditemukan menunjukkan bahwa sudut-sudut kawat persegi merupakan area dengan konsentrasi muatan yang tinggi, yang dapat mempengaruhi sifat listrik dan magnet di sekitar kawat. Hasil ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang pola distribusi muatan dan dapat digunakan untuk meningkatkan desain dan kinerja perangkat listrik dan elektronik.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi pola distribusi muatan pada kawat persegi menggunakan metode simulasi komputer. Pembahasan ini menunjukkan bahwa distribusi muatan pada kawat persegi dipengaruhi secara signifikan oleh geometri kawat. Pendekatan tersebut menunjukkan muatan terkonsentrasi di sudut-sudut kawat. Pemahaman ini dapat digunakan untuk meningkatkan desain dan kinerja perangkat listrik dan elektronik yang menggunakan kawat persegi. Pemahaman tentang pola distribusi muatan ini dapat digunakan untuk meningkatkan desain dan kinerja berbagai perangkat listrik dan elektronik, memberikan kontribusi yang signifikan dalam bidang teknik dan teknologi listrik.

REFERENSI

- [1] D. J. Griffiths, Introduction to electrodynamics, Cambridge: Cambridge University Press, 2023.

- [2] J. D. Jackson, *Classical electrodynamics*, 13 penyunt., New York: john wiley & sons. Inc., 1999.
- [3] L. Wu, "Hukum Coulomb: Pengertian, Sejarah, dan Penerapannya!," [Online]. Available: <https://www.gramedia.com/literasi/hukum-coulomb-pengertian/>. [Diakses 5 January 2024].
- [4] anugrahdwi, "Rumus Lengkap dan Penerapan Tentang Hukum Newton 1 2 3," pascasarjana umsu, 29 May 2023. [Online]. Available: <https://pascasarjana.umsu.ac.id/rumus-lengkap-dan-penerapan-tentang-hukum-newton-1-2-3/#:~:text=BUNYI%20HUKUM%20NEWTON%20II,terbalik%20dengan%20massa%20benda%20tersebut..> [Diakses 5 December 2023].
- [5] StudySmarter Editorial Team, "Electric Potential," StudySmarter, [Online]. Available: <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/physics/fields-in-physics/electric-potential/>. [Diakses 5 February 2024].
- [6] Google, "Overview of Colaboratory Features," colab.research.google, [Online]. Available: https://colab.research.google.com/notebooks/basic_features_overview.ipynb?hl=id. [Diakses 27 October 2023].