Jurnal Pendidikan Kimia, Fisika dan Biologi
Volume. 1 Nomor. 4 Juli 2025
E-ISSN : 3089-2171; P-ISSN : 3089-2872, Hal. 227-241
DOI: https://doi.org/10.61132/jupenkifb.v1i4.560
Available online at: https://ejournal.aripi.or.id/index.php/jupenkifb

Konfigurasi Muatan Elementer pada Konduktor Persegi dengan Pendekatan Mekanika, Dinamika Listrik, dan Teori Elektromagnetik Matematika

Syamsudin Nur Wahid
Universitas Islam Balitar, Indonesia

Jl. Imam Bonjol no.16 Kota Blitar, Jawa Timur
Email : Snowhaatt@gmail.com

Abstract. *A conductor, as a material that allows the easy flow of electric charge, plays a crucial role in various electrical and electronic applications. Understanding how elementary charges, particularly electrons, configure and move within a conductor, especially one with a square shape, is essential for analyzing and designing efficient electrical devices. This article discusses the configuration of elementary charges in a square conductor through simulations using a mechanics and electrodynamics approach, focusing on the interactions between charges to achieve a stable configuration. The simulation is conducted by placing charges randomly around the square conductor. The electro-dynamic interactions between charges cause them to arrange themselves in the most stable positions, where each charge interacts to minimize the system's energy. Although a stable configuration is achieved, fluctuations in the total system energy are still observed, approximately* 1.33×10^{-35} *Joules. These fluctuations indicate that, despite stability, the system continues to experience dynamics that affect the overall energy. Particles at the corners of the conductor move faster than those on other sides, contributing significantly to the measured energy fluctuations. This charge configuration forms an electric field profile in the shape of a square, with the field being concentric, moving from the inside out of the conductor. This indicates that the electric field distribution is more concentrated inside and gradually decreases toward the outside. Furthermore, the distribution of particles on each side of the conductor is not uniform. There are deviations up to 4% from the expected distribution, and these fluctuations occur within a range of ±1 particle. This phenomenon provides deeper insights into the behavior of charges in a square conductor. Understanding this is important for designing electrical and electronic systems. Although the conductor reaches stability, the energy fluctuations that occur still play a role in optimizing electronic devices. The approach combining mechanics and electrodynamics is very useful for understanding the interactions between charges and electric fields, which can be applied to modern electrical technology.*

Keywords: *Charge Configuration, Computer Simulation, Electric Charge, Electrodynamics, Square Conductor*

Abstrak. Konduktor, sebagai material yang memungkinkan aliran muatan listrik dengan mudah, memiliki peran penting dalam berbagai aplikasi kelistrikan dan elektronika. Pemahaman mengenai bagaimana muatan elementer, khususnya elektron, berkonfigurasi dan bergerak di dalam konduktor, terutama yang berbentuk persegi, sangat penting untuk menganalisis dan merancang perangkat listrik yang efisien. Artikel ini membahas konfigurasi muatan elementer pada konduktor persegi melalui simulasi menggunakan pendekatan mekanika dan dinamika listrik, dengan fokus pada interaksi antar muatan untuk mencapai konfigurasi stabil. Simulasi dilakukan dengan menempatkan muatan secara acak di sekitar konduktor persegi. Interaksi elektro-dinamika antar muatan menyebabkan mereka menata diri pada posisi yang paling stabil, di mana setiap muatan saling berinteraksi untuk meminimalkan energi sistem. Meskipun konfigurasi stabil tercapai, fluktuasi energi total sistem masih teramati sekitar 1.33×10^{-35} Joule. Fluktuasi ini menunjukkan bahwa meskipun stabil, sistem tetap mengalami dinamika yang mempengaruhi energi secara keseluruhan. Partikel di pojok konduktor bergerak lebih cepat daripada partikel di sisi lainnya, yang berkontribusi besar terhadap fluktuasi energi yang terukur. Konfigurasi muatan ini membentuk profil medan listrik berbentuk kotak, dengan medan yang bersifat konsentris, bergerak dari dalam ke luar konduktor. Hal ini menunjukkan distribusi medan listrik yang lebih terpusat di dalam dan berkurang secara bertahap menuju luar. Selain itu, distribusi partikel di setiap sisi konduktor tidak merata. Terdapat penyimpangan hingga 4% dari distribusi yang diharapkan, dan fluktuasi ini terjadi dalam kisaran ±1 partikel. Fenomena ini memberikan wawasan mendalam mengenai perilaku muatan dalam konduktor persegi. Pemahaman ini penting dalam perancangan sistem kelistrikan dan elektronika. Meskipun konduktor mencapai stabilitas, fluktuasi energi yang terjadi tetap berperan dalam pengoptimalan perangkat elektronik. Pendekatan yang menggabungkan mekanika dan dinamika listrik ini sangat berguna untuk memahami interaksi antar muatan dan medan listrik yang dapat diterapkan pada teknologi kelistrikan modern.

Kata kunci: Elektrodinamika, Konduktor PersegiKonfigurasi Muatan, Muatan Listrik, Simulasi Komputer,

Received: Juni 15, 2025; Revised: Juni 30, 2025; Accepted: Juli 29, 2025; Published: Juli 31, 2025

1. LATAR BELAKANG

Konduktor, material yang memungkinkan muatan listrik dapat mengalir, memainkan peran krusial dalam berbagai aplikasi kelistrikan dan elektronika. Pemahaman tentang bagaimana muatan elementer (elektron) berkonfigurasi dan bergerak di dalam konduktor, khususnya yang berbentuk persegi, sangat penting untuk menganalisis dan merancang perangkat listrik. Pergerakan muatan dipengaruhi medan potensial listrik, sebaliknya muatan itu menghasilkan medanya sendiri. Maka distribusi medan dan potensial listrik memainkan peranan penting untuk aplikasi di dunia nyata seperti desain isolator pada saluran bertegangan tinggi (Saris, Hermawan, & Syakur, 2012) (NURHAKIM, RASYID, & WALUYO , 2021), penangkal petir (Dachlan, Dhofir, & Fernanda, 2012) (Ginting, Napitupulu, & Pane, 2021), sel surya (Herawati, 2014) dan antena (Fadlillah, Hikmaturokhman, & Goran, 2024). Untuk memperoleh pemahaman yang mendalam diperlukan simulasi dengan perhitungan numerik berlandaskan teori terkini selain pengukuran langsung di lapangan. Simulasi perlu dilakukan ketika membuat desain peralatan atau untuk evaluasi perangkat yang sudah ada dengan membandingkannya dengan teori dasar atau studi statistika (Ilmi, 2019).

Artikel ini akan membahas konfigurasi muatan elementer pada konduktor persegi dengan pendekatan mekanika dan dinamika listrik. Penelitian yang lalu tentang distribusi muatan menunjukkan hasil yang kurang memuaskan berupa distribusi yang kurang teratur dari muatan di dalam kawat (Wahid, 2024) karena hanya menggunakan pendekatan dinamika Newton dalam pergerakannya. Penelitian ini membahas penggunaan mekanika Newton dan penerapannya dalam dinamika kelistrikan agar hasilnya lebih sesuai dengan kenyataan. Penggunaan konsep dasar tersebut dituangkan dalam bentuk simulasi sederhana di google colab (Google, n.d.) berbahasa python. Dari distribusi muatan yang terjadi, akan dithitung medan potensial listrik, energi kinetik total dan jumlah muatan tiap sisi. Diharapkan pada akhir simulasi keadaan telah setimbang ditandai dengan parameter yang disorot tidak berfluktuasi terlalu banyak.

2. KAJIAN TEORITIS

Beberapa konsep dasar yang disimulasikan disini menyangkut tentang medan listrik, konduktor, muatan elementer dan arus listrik. Arus listrik dalam konduktor dihasilkan oleh pergerakan elektron bebas. Elektron-elektron ini tidak terikat pada atom tertentu dan dapat bergerak bebas di dalam material. Keberadaan muatan listrik menciptakan medan listrik di sekitarnya. Medan listrik memberikan gaya pada muatan lain, menyebabkan pergerakan muatan dalam konduktor (Griffiths, 2023). Konduktor yang digunakan adalah semi ideal,

memiliki konduktansi terbatas dalam bentuk mobilitas elektron, membatasi kelajuan muatan dalam bahan, namun permitivitasnya sama dengan di ruang hampa.

Interaksi antar muatan didalam konduktor ditinjau dengan mekanika Newton berdasarkan hukum Coulumb. Gaya Coulomb, yaitu gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara muatan listrik, merupakan gaya dominan. Elektron-elektron bebas akan cenderung bergerak sedemikian rupa sehingga mencapai kesetimbangan gaya. Pada konduktor persegi yang tidak diberi medan listrik eksternal, elektron-elektron akan terdistribusi secara merata di seluruh volume konduktor. Hal ini karena gaya tolak-menolak antar elektron saling menyeimbangkan.

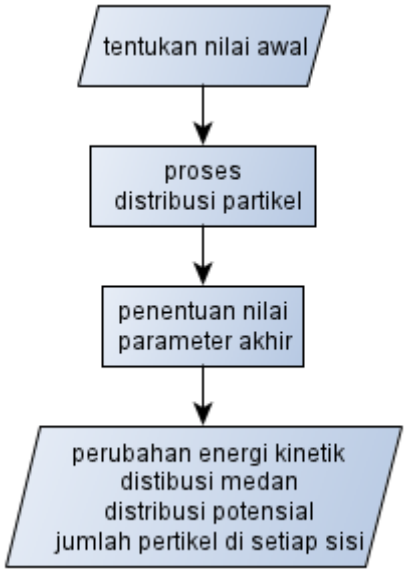
Dalam keadaan ideal, elektron dapat bergerak dalam konduktor tanpa hambatan. Namun kondisi nyatanya tidak demikian, kisi atom dalam bahan membatasi keadaan tersebut. Keadaan yang dapat dibahas dengan pendekatan dinamika kelistrikan. Pendekatan dinamika listrik meninjau pergerakan elektron-elektron bebas akibat adanya medan listrik. Jika konduktor persegi diberi medan listrik eksternal, elektron-elektron akan mengalami gaya listrik dan mulai bergerak. Gerakan elektron ini menghasilkan arus listrik. Dalam konduktor, elektron-elektron tidak bergerak secara bebas tanpa hambatan. Mereka bertumbukan dengan atom-atom kisi konduktor, yang menyebabkan hambatan listrik. Model Drude (orang.udik & sjahroel, 2015) memberikan deskripsi sederhana tentang konduksi listrik dalam logam dengan mempertimbangkan tumbukan ini.

Untuk analisis yang lebih mendalam, persamaan Maxwell dan persamaan gerak dapat digunakan untuk memodelkan perilaku elektron dalam konduktor. Namun, solusi analitis untuk konduktor berbentuk persegi seringkali sulit didapatkan, dan metode numerik seperti metode elemen hingga (FEM) sering digunakan untuk mensimulasikan distribusi muatan dan arus listrik. Dinamika muatan dihitung untuk setiap partikel dalam satuan muatan elektron. Sedangkan medan dan potensial dalam persegi ditentukan dengan FEM dimana setiap sisinya dibagi menjadi 100 titik secara merata.

3. METODE PENELITIAN

Proses simulasi keseluruhan ditunjukkan pada diagram alir Gambar 1 berikut. Dimulai dengan menentukan nilai awal jumlah muatan, konstanta, panjang sisi dan posisi setiap muatan. Kemudian proses distribusi diamati untuk beberapa waktu sampai keadaan lumayan stabil.

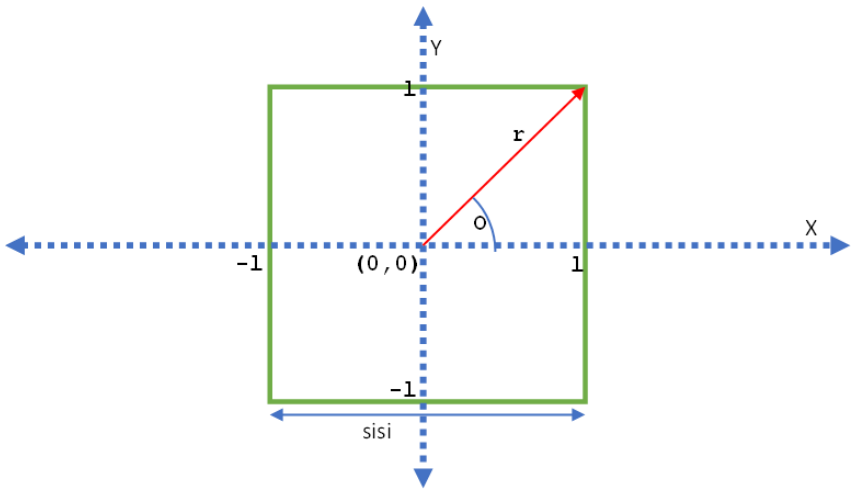
Selanjutnya ditentukan energi kinetik selama berproses, distribusi medan potensial listrik didalam kotak dan jumlah partikel di setiap sisi untuk melihat akurasi dan presisi simulasi dengan metode ini.



Gambar 1. Diagram alir proses simulasi keseluruhan

Simulasi ini dimulai dengan mendefinisikan konstanta dasar pada suatu konduktor kawat persegi dengan sisi 0,2 m. Kedalam persegi akan diberikan muatan sebanyak 200 butir dengan muatan masing-masing sebesar 1 elektron.

```
# konstanta & nilai awal
N= 200
k = 9*10**9
Q = -1.6*10**(-19)
m = 9.1*10**(-31)
sisi = 0.2 # meter
```



Gambar 2. Posisi koordinat partikel

Kawat konduktor tersebut ditempatkan pada suatu bidang koordinat yang berpusat di 0,0 dengan setiap sisi membatasi pergerakan muatan. Posisi partikel dinyatakan dalam

koordinat x, y, jarak dari pusat(r) dan sudut yang diukur dari x positif keatas berlawanan arah jarum jam. Ilustrasi di Gambar 2 menunjukkan batasan posisi partikel pada koordinat persegi dan lingkaran. Sisi x=l berada di sudut -45^o s/d 45^o. Sisi y=l berada di sudut 45^o s/d 135^o. Sisi x=-l ada di sudut 135^o s/d 225^o. Sisi y=-l di sudut 225^o s/d 315^o atau -45^o.

Penentuan keadaan awal partikel dilakukan dengan penempatan Partikel bermuatan di sekeliling sisi persegi. Posisi partikel dibuat acak secara merata di setiap sudutnya (0^o - 360^o) dan kelajuan nol. Parameter setiap partikel disimpan dalam sebuah dictionary dengan key idx(nomor muatan), t(waktu), sdt(sudut), r(jarak dari pusat), x(horizontal), y(vertikal), vx(kecapatan di arah x), vy(kecepatan di arah y) dan EK(energi kinetik). Kendala adalah keadaan yang kondisinya digambarkan di Gambar 2. Semua partikel disimpan kedalam pandas dataframe dengan sebutan partikelir.

```
# inisialisasi nilai
P = [] #properti semua partikel
for i in range(N):
  Sudut= random.uniform(0, 360)
  ptk = {'idx':i, 't':0, 'sdt':Sudut}
  r,x, y = kendala(Sudut)
  ptk['r'] = r
  ptk['x']=x
  ptk['y']=y
  ptk['vx']=0
  ptk['vy']=0
  ptk['EK']=0.
  P.append(ptk)
partikelir=pd.DataFrame(P)
```

Selanjutnya partikel akan berinteraksi dengan sesamanya berdasarkan hukum Coulumb yang dinyatakan dalam persamaan 1 (Edminister, 1984).

$$\boldsymbol{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon d^2}\boldsymbol{a}$$ .....Equation 1

Dengan F adalah gaya listrik, Q adalah muatan yang ditinjau, d adalah jarak kedua muatan dan **a** adalah vektor gaya.

Gaya listrik ini membuat partikel bergerak yang kecepatannya sesuai dengan jenis material kawat dinyatakan dengan mobilitas μ dan medan di tempat tersebut.

U=μE.....Equation 2

Dengan U adalah kecepatan hanyut, E medan listrik dan μ adalah mobilitas. Besarnya mobilitas bergantung pada suhu dan struktur hablur penghantar (Edminister, 1984). Agar simulasi berjalan tidak lama, digunakan μ = 20 m^2/Vs dan dt = 0,02 detik.

Setelah muatan-muatan ditempatkan pada kawat, mereka akan menyusun diri pada konfigurasi paling stabil. Setiap muatan akan menerima gaya dari muatan-muatan lain sehingga bergerak ke posisi tertentu. Hal ini dialami oleh semua muatan. Setiap kali pindah posisi, setiap muatan akan mengalami gaya yang berbeda dari sebelumnya akibat perubahan posisi muatan tersebut dan lainnya. Begitu terjadi seterusnya hingga gaya yang dialami setiap partikel relatif tidak berubah dari sebelumnya. Untuk keperluan ini, iterasi dilakukan hingga 5000 kali.

Berikut langkah-langkah simulasi dinamika partikel dilakukan. Pertama, ditentukan jarak partikel yang ditinjau dengan seluruh partikel.

```
# hitung medan di tkp oleh partikel sekitarnya
    dx = ptk['x'] - par['x']
    dy = ptk['y'] - par['y']
    try:
      R = math.sqrt(dx**2 + dy**2)
    except:
      R = 0
    if R == 0:
      continue
```

Perlu dilakukan penanganan untuk partikel yag berhimpitan atau punya posisi yang sama persis karena akan bermasalah untuk langkah selanjutnya. Langkah kedua yaitu menghitung gaya yang dialami partikel yang ditinjau oleh seluruh partikel. Daripada menghitung gaya satu-persatu lebih praktis untuk menghitung medan pada tempat tersebut lalu mengalikan dengan muatan yang ditinjau untuk mendapatkan gaya sesuai dengan rumus 3 (Wikipedia, 2023).

$$\vec{E}(\vec{r}) = \sum \vec{E}_i(\vec{r}) = \sum \vec{E}_i(x, y) \quad \text{.....Equation 1}$$

Semua partikel muatannya sama, persamaan tersebut dapat diuraikan menjadi

$$\vec{E}(\vec{r}) = \sum k \frac{q}{|\vec{r}|^3}\vec{r} = kq \sum \frac{x\hat{\imath}+y\hat{\jmath}}{|\vec{r}|^3} = kq \sum \frac{x\hat{\imath}}{|\vec{r}|^3} + kq \sum \frac{y\hat{\jmath}}{|\vec{r}|^3} = \vec{E}_x + \vec{E}_y \quad \text{.....Equation 2}$$

Jadi perhitungan dilakukan untuk akumulasi jarak kuadrat terbalik lebih dahulu

```
Dx += dx/(R**(3/2))
Dy += dy/(R**(3/2))
```

Kemudian baru dikalikan k dan Q untuk mendapatkan medan listrik.

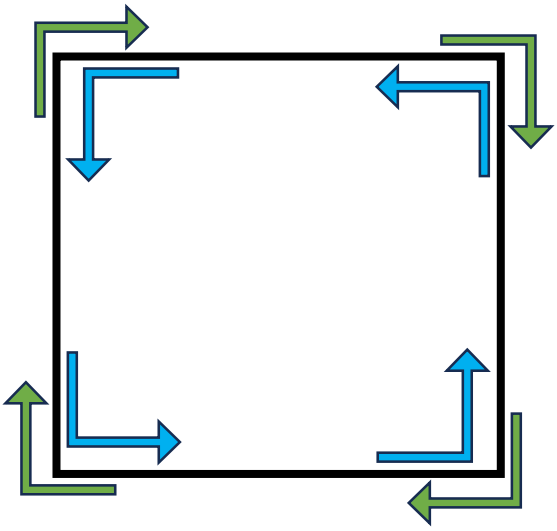
Ex = k*Q*Dx

Ey = k*Dy*Q

Peristiwa dasarnya adalah ketika medan dikalikan besar muatan menghasilkan gaya. Adanya gaya membuat partikel memiliki percepatan. Percepatan menghasilkan kecepatan. Namun ada hubungan langsung antara kecepatan dengan medan listrik berdasarkan *Equation* 2. Muatan berada di kawat persegi, maka pergerakannya dibatasi pada arah mendatar atau vertikal berdasarkan posisinya.

```
if ptk['x'] == l or ptk['x'] == -l:
  # posisi
  P_baru[ptk['idx']]['y'] += ptk['vy']*dt
  # kecepatan
  P_baru[ptk['idx']]['vy'] = mu*Ey
 if ptk['y'] == l or ptk['y'] == -l:
  #posisi
  P_baru[ptk['idx']]['x'] += ptk['vx']*dt
  #kecepatan
  P_baru[ptk['idx']]['vx'] = mu*Ex
```

Perlu dibatasi juga ketika partikel bergerak mencapai sudut, maka akan berbelok sesuai jalur di kawat. Saat muatan bergerak ke atas membentur sudut di kanan atas, maka ia akan berbelok ke kiri. Jika muatan bergerak ke kiri membentur sudut kiri bawah, maka ia berbelok ke kanan, dan lain sebagainya seperti di Gambar 3.



Gambar 3. pergerakan partikel ketika kepentok sudut

Implementasi dari ilustrasi tersebut adalah algoritma yang digambarkan pada diagram alir Gambar 4 berikut.

Gambar 4. Diagram alir saat partikel menabrak sudut

Kondisi sistem diamati dengan melihat energi kinetik seluruh partikel. Energi kinetik sistem juga menunjukkan kestabilan posisi setiap partikel. Energi kinetik dapat dihitung dengan prinsip ekipartisi gas (Halliday, Resnick, & Walker, 2011).

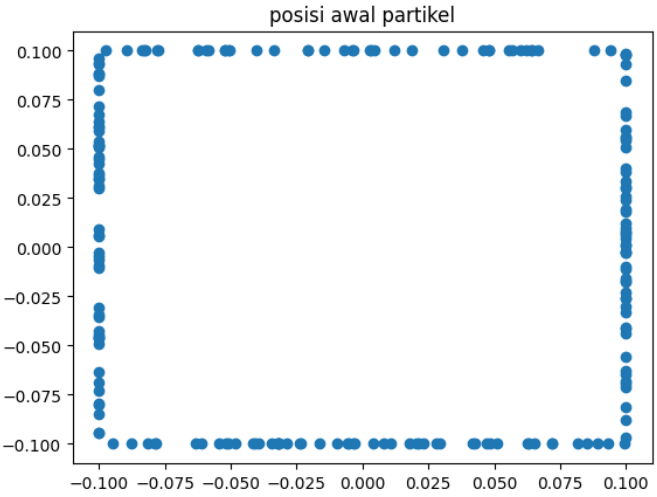
$$K_{avg} = \left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{avg} = \frac{1}{2}m(v^2)_{avg} = \frac{1}{2}mv_{rms}^2 \qquad \text{.....Equation 3}$$

```
P_baru[ptk['idx']]['EK'] = 0.5 * m * (ptk['vx']**2 + ptk['vy']**2)
EK +=P_baru[ptk['idx']]['EK']
```

Seluruh proses dari awal sampai akhir disimpan dalam dalam dataframe partikelir. Pada sistem yang telah stabil akan dihitung pola medan dan potensial listrik di dalam persegi. Distribusi potensial juga menandakan sistem sudah stabil atau bukan. Sistem yang stabil pasti membentuk pola tertentu atau merata di sepanjang penghantar (Martin, Neary, Rinaldo, & Woodman, n.d.). Metode perhitungan di simulasi ini dapat dihitung kesalahannya dengam membandingkan jumlah partikel di setiap sisi persegi yang seharusnya sama, atau kalaupun berbeda selisihnya sedikit.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

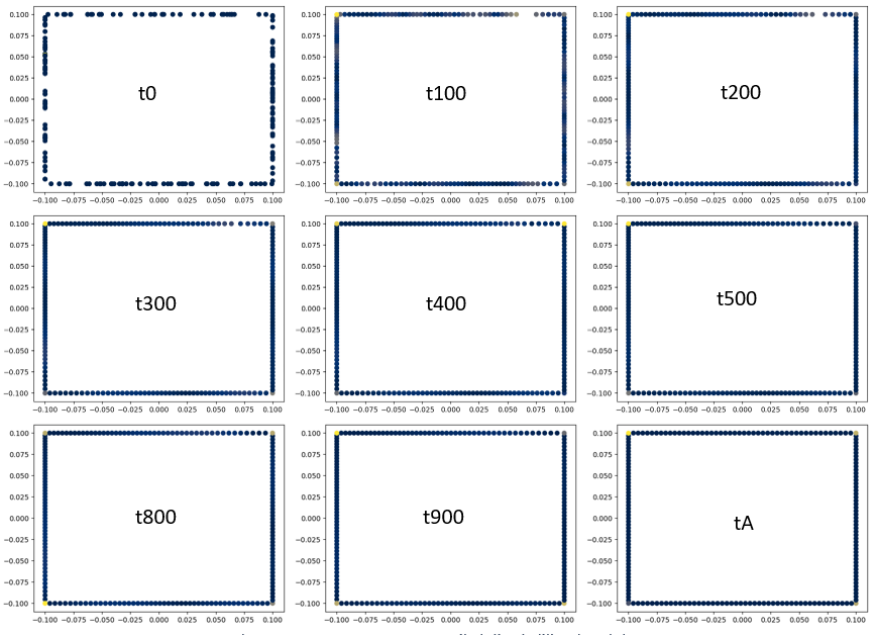
Penempatan 200 muatan di sepanjang sisi persegi secara acak diperlihatkan pada Gambar 5. Posisi partikel menyebar di seluruh sisi dengan distribusi yang tidak merata.



Gambar 5. Penempatan awal partikel bermuatan di sekeliling konduktor persegi

Muatan saling berinteraksi secara elektrostatik berdasarkan hukun Coulumb sehingga menysun diri mereka sendiri di sekeliling persegi. Proses penyusunan partikel direkam setiap 100 iterasi atau 2 detik waktu simulasi. Didapatkan Gambar 6 urutan beberapa gambar proses awal dan 1 gambar akhir simulasi.

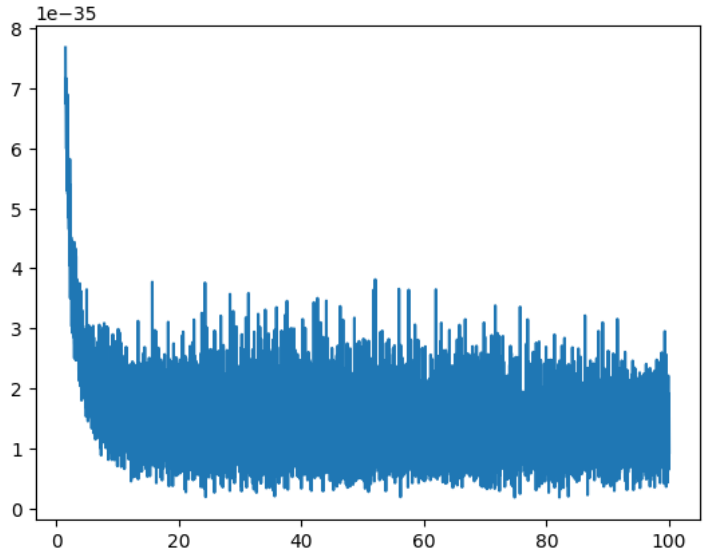
Titik-titik menunjukkan posisi partikel di sisi persegi dan warna menunjukkan kelajuannya. Semakin kuning semakin cepat, semakin biru tua semakin lambat. Simulasi berjalan cepat dengan waktu terlama saat penyusunan posisi partikel yaitu 335 detik.



Gambar 6. Proses penyusunan partikel di sekeliling konduktor

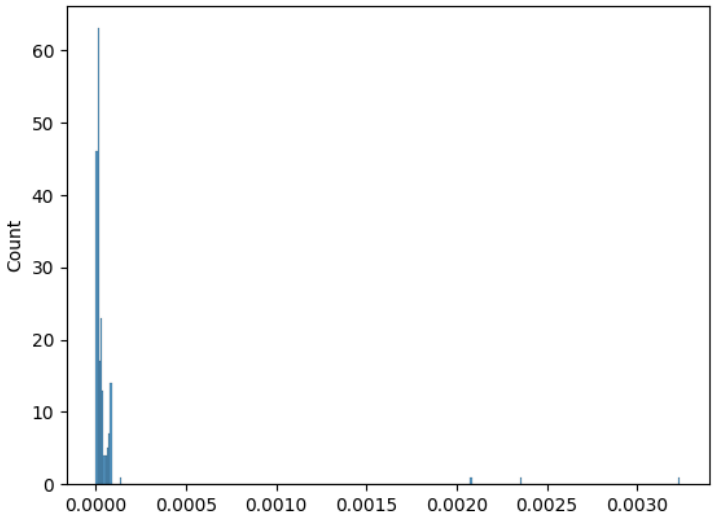
Tampak di akhir simulasi partikel tersusun secara merata dan teratur si detiap sisi. Partikel kuning dengan kelajuan terbesar selalu berada di sudut persegi. Hal ini dimungkinkan sebab ia mendapat gaya tolak terbesar dari satu sisi dan tidak ada yg melawan dari sisi berlawanan. Bisa saja muatan terlempar keluar kotak saat tiba di sudut bila tidak kita batasi pergerakannya.

Energi kinetik sebagai indikator kestabilan sistem ditunjukkan pada Gambar 7. Energi kinetik menurun dengan cepat hingga pada suatu waktu stabil dan berfluktuasi di sekitar nilai 1.33×10^{-35} Joule dengan deviasi 6.23×10^{-36} J. Energi kinetik rendah menandakan partikel tidak terlalu banyak bergerak dan posisinya lumayan tetap. Sebaliknya energi kinetik yang tinggi menunjukkan partikel aktiv bergerak pindah posisi.



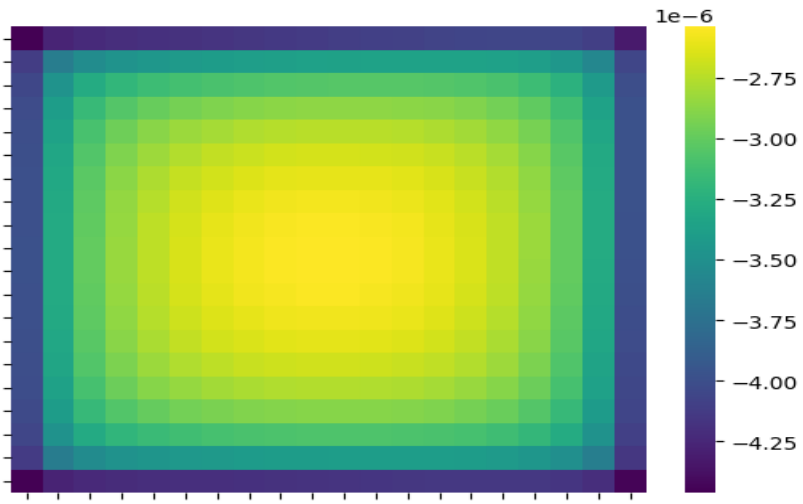
Gambar 7. Fluktuasi energi kinetik setiap waktu

Selain energi kinetik gerakan partikel juga diketahui dari kecepatannya. Distribusi kecepatan partikel di setiap rentang ditunjukkan pada histogram di Gambar 8 berikut. Mayoritas partikel berada di sekitar kelajuan nol dan hanya ada beberapa yang kelajuannya ekstrim yang maksimalnya 0,0048 m/s. Kita bisa pastikan entitas ekstrim tersebut berada di sudut-sudut persegi.



Gambar 8. Histogram distribusi kelajuan partikel

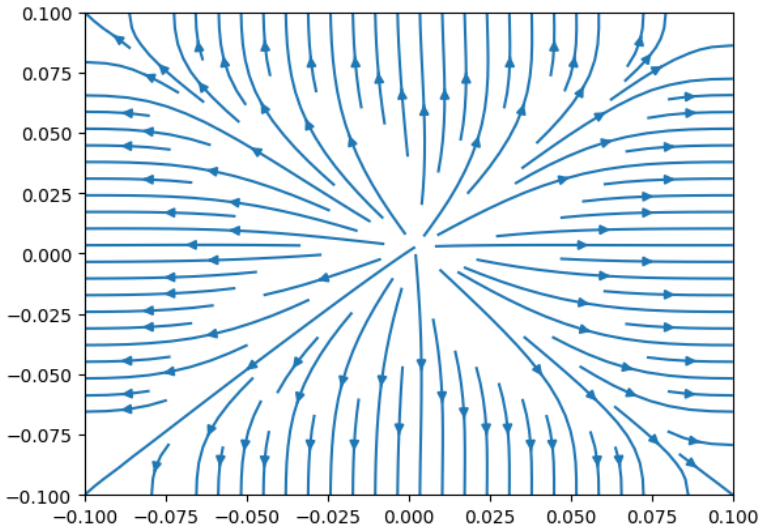
Ungkapan keteraturan susunan partikel terlihat juga daripada distribusi medan dan potensial di sekitar kawat, dari tepi hingga ke tengah persegi. Gambar 9 Berikut menunjukkan potensial listrik yang dibentuk oleh partikel elektron di dalam kawat persegi. Potensial yang terbentuk adalah negatif, karena ditimbulkan oleh kumpulan elektron dengan pola persegi yang semakin tengah nilainya semakin besar dan terkecil berada di pinggir terutama di sudutnya. Di posisi sudut punya potensial terkecil karena dipengaruhi oleh pertemuan 2 sisi yang berdekatan, sisi tegak dan mendatar. Hasil ini berbeda dengan penelitian sebelumnya (Wahid, 2024), yang membentuk pola melingkar, sebab mengambil pendekatan yang berbeda, walaupun perhitungan numeriknya hampir sama. Dari tengah sampai pinggir didapatkan potensial maksimal -2.54x10^{-6} V, minimal -4.52x10^{-6} V dan reratanya -3.16x10^{-6} V. Potensial didalam bidang persegi bisa dianggap homogen sebab selisih antara potensial minimal, maksimal dan reratanya lebih kecil daripada reratanya.



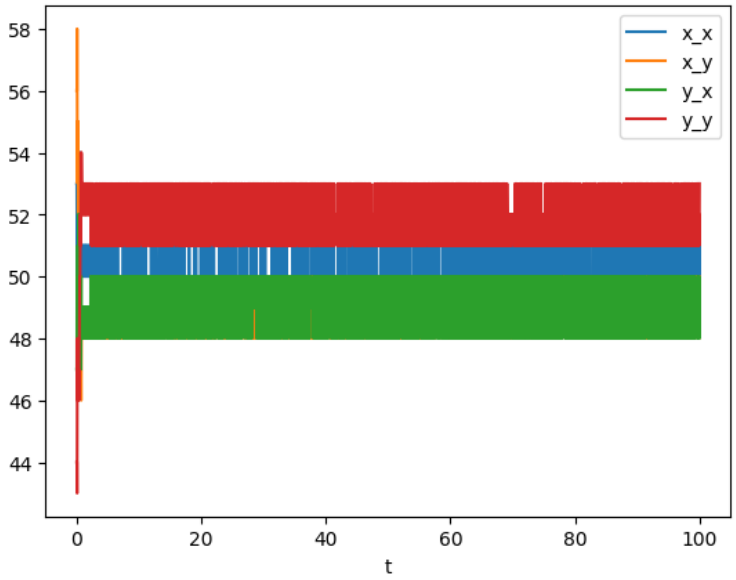
Gambar 9. Distribusi potensial listrik statik pada daerah yang dilingkupi muatan

Penggambaran peta potensial menggunakan model heatmap dari Seaborn dengan colormap ‘viridis’. Sedangkan medan listrik dapat dibentuk menggunakan streamplot dari matplotlib. Profil distribusi medan listrik dapat dilihat di Gambar 10 berikut. Medan listrik mengarah dari dalam ke luar kotak. Dari tengah yang renggang ke pinggir semakin rapat. Semakin rapat, medannya semakin kuat. Medan di sisi persegi cemderung berarah tegak lurus sisinya, hal ini sesuai dengan perhitungan distribusi potensial dimana yang tengah lebih besar daripada yang pinggir.

Medan potensial tampaknya belum cukup menggambarkan kesetimbangan distribusi sebelum ditentukan secara tepat berapa jumlah partikel di setiap sisi. Gambar 11 menunjukkan di awal simulasi terdapat perbedaan yang mencolok antara jumlah partikel di setiap sisi. kemudian muatan-muatan itu tersusun dengan sendirinya secara cepat dan jumlah partikel di setiap sisi mencapai kestabilan bahkan sebelum detik kedua, walaupun masih berfluktuasi di nilai tertentu. Partikel di sisi kanan stabil dengan nilai sejumlah 50±1 butir, di sisi kiri dan atas sekitar 49 butir dan di sisi bawah sejumlah 52±1 butir. Seluruh partikel yang diberikan sebanyak 200, seharusnya setiap sisi mendapatkan jumlah partikel yang sama, yaitu 50 butir untuk menjadikan keadaan yang setimbang secara statika kelistrikan. Maka didapatkan penyimpangan simulasi ini dari keadaan yang seharusnya yaitu 2/50 atau 4% maksimal, ditempati oleh partikel di sisi bawah. Hingga simulasi berakhir jumlah partikel berfluktuasi 1 butir di setiap sisi dan akan terus terjadi sampai waktu yang tak terhingga. Muatan mondar-mandir ini bisa dipastikan berada di sudut. Saat ia beradi di ujung sisi vertikal, ia terdorong ke sisi horisontal, pun sebaliknya saat ia berada di sisi horisontal, ia terdorong ke sisi vertikal. Hasil selengkapnya dapat di repositori :
https://colab.research.google.com/drive/1VPgGSMlph3kqErfy76eNXGq0ukk6MsqV?usp=sharing



Gambar 10. Medan listrik di dalam bidang kawat persegi



Gambar 11. Fluktuasi jumlah partikel di setiap sisi. x_x=sisi kanan, x_y=sisi kiri, y_x=sisi atas, y_y=sisi bawah

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Pendekatan yang digunakan untuk simulasi saat ini terlihat lebih baik daripada penelitian sebelumnya. Energi kinetik akhir lebih stabil walau masih berfluktuasi sebesar $1.33\times10^{-35} \pm 6.23\times10^{-36}$ Joule, distribusi medan dan potensial lebih teratur dan seragam sesuai dengan konsep potensial di sepanjang konduktor adalah sama bagaimanapun bentuknya dengan potensial reratanya $-3.16\text{x}10^{-6}$ V. Dilihat dari banyaknya partikel di setiap sisi, model simulasi ini terdapat penyimpangan hingga 4% dengan fluktuasi 1 partikel di setiap sisi.

DAFTAR REFERENSI

Dachlan, H. S., Dhofir, M., & Fernanda, V. (2012). Pengaruh sudut keruncingan dan diameter finial Franklin terhadap distribusi medan listrik dan tingkat tegangan tembus. *Jurnal EECCIS (Electrics, Electronics, Communications, Controls, Informatics, Systems), 2*(1), 1-10.

Edminister, J. A. (1984). *Theory and problems of electromagnetics* (Schaum Series). (Murjono, Trans.) Jakarta: Penerbit Erlangga.

Fadlillah, E. F., Hikmaturokhman, A., & Goran, P. K. (2024). Desain antena microstrip MIMO 2x2 dengan defected ground structure (DGS) untuk implementasi teknologi 5G pada frekuensi 26 GHz. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro, 6*(2), 133-144.

Ginting, Y. T., Napitupulu, J., & Pane, A. G. (2021). Simulasi tegangan induksi kabel akibat arus petir pada kawat penangkal petir. *Jurnal Teknologi Energi UDA: Jurnal Teknik Elektro, 9*(2), 115-122.

Google. (n.d.). Overview of Colaboratory features. *colab.research.google*. Retrieved October 27, 2023, from https://colab.research.google.com/notebooks/basic_features_overview.ipynb?hl=id

Griffiths, D. (2023). *Introduction to electrodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2011). *Fundamentals of physics*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.

Herawati, Y. (2014). Pengaruh ketebalan lapisan I pada perhitungan karakteristik arus-tegangan sel surya tipe PIN menggunakan metode elemen hingga. Jember: Skripsi tidak diterbitkan.

Ilmi, U. (2019). Studi persamaan regresi linear untuk penyelesaian persoalan daya listrik. *Jurnal Teknika, 11*(1), 1083-1087.

Martin, R. D., Neary, E., Rinaldo, J., & Woodman, O. (n.d.). Electric field and potential at the surface of a conductor. *Libretexts Physics*. Retrieved December 28, 2024, from https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_Introductory_Physics_-_Building_Models_to_Describe_Our_World_(Martin_Neary_Rinaldo_and_Woodman)/18%3A_Electric_potential/18.04%3A_Electric_field_and_potential_at_the_surface_of_a_conductor

Nurhakim, A. A., Rasyid, R. I., & Waluya, W. (2021). Simulasi berbasis MEH untuk pemodelan distribusi potensial listrik dan medan listrik pada isolator porselen 20 kV. *MIND (Multimedia Artificial Intelligent Networking Database) Journal, 6*(2), 132-143.

orang.udik, & sjahroel. (2015, Mei). Model Drude pada logam. (orang.udik & sjahroel, Eds.) Retrieved Januari 6, 2025, from *Material Science: Explore the world with science*: https://material-sciences.blogspot.com/2015/05/model-drude-pada-logam.html

Saris, H. B., Hermawan, H., & Syakur, A. (2012, December). Simulasi distribusi tegangan dan medan listrik pada isolator suspensi 20 kV 3 sirip dengan 4 tipe ukuran sirip. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, 1*(4), 218-225.

Wahid, S. N. (2024, March). Simulasi distribusi muatan diskrit pada kawat konduktor persegi. *Jurnal Qua Teknika*, *14*(1), 107-115.

Wikipedia. (2023, April 27). Medan listrik. *MediaWiki*. Retrieved Desember 13, 2024, from https://id.wikipedia.org/wiki/Medan_listrik#