

## PERANCANGAN SIMULASI DIGITAL VAN DE GRAAFF BERBASIS WEB SEBAGAI MEDIA PRAKTIKUM LISTRIK STATIS

Alfriza Sri Ningsih Manik<sup>1</sup>, Siti Mu'awanah<sup>2</sup>, Erlida Amnie<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pendidikan Fisika, FKIP, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

<sup>2</sup>Pendidikan Fisika, FKIP, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

<sup>3</sup>Pendidikan Fisika, FKIP, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

e-mail : [erlidaamnie@unja.ac.id](mailto:erlidaamnie@unja.ac.id)

**Abstract:** *This research aims to develop a digital simulation of the Van de Graaff Generator as an alternative medium for static electricity practicums while also developing a valid and suitable user guide for physics learning in schools. This development is driven by a research gap, namely the limited availability of physical Van de Graaff Generators in schools and the absence of digital simulations that specifically visualize typical phenomena such as hair standing on end or the movement of paper pieces, and the absence of local simulations that allow flexible adjustment of experimental variables according to curriculum needs. The simulation was designed through a virtual physics experiment using HTML, CSS, and JavaScript and then validated by comparing the results of calculations of electric potential, electric field, and Coulomb force at various distances with theory. The results show that the simulation works stably, interactively, and very accurately, with a 98% agreement level, and is able to display patterns of  $V$ ,  $E$ , and  $F$  decreases that are consistent with Coulomb's Law, making it suitable as an alternative physical teaching aid in static electricity learning.*

**Keywords:** *Digital simulation; Van de Graaff generator; Static electricity; HTML, CSS, JavaScript.*



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).

### PENDAHULUAN

Listrik statis merupakan salah satu konsep dasar dalam pembelajaran fisika yang sangat ditekankan dalam Kurikulum Merdeka karena berperan penting sebagai pengantar untuk memahami konsep lanjutan seperti medan listrik, potensial listrik, dan gaya Coulomb (Dali et al., 2021). Kurikulum Merdeka memberi penekanan pada pembelajaran berbasis *inquiry*, pemahaman konseptual, dan penguatan literasi sains, sehingga peserta didik diharapkan mampu membangun pemahamannya melalui pengalaman belajar dan bukan sekadar hafalan rumus.

Listrik statis merupakan tinjauan fisika untuk listrik yang tidak mengalir (., 2024). Peristiwa listrik statis terjadi setelah adanya materi yang menjadi bermuatan karena proses gesekan (gosokan). Diistilahkan dengan charging by friction, atau menjadi bermuatan karena gesekan. Gesekan atau gosokan antara dua materi ini akan membuat electron dari atom materi yang satu berpindah ke atom materi yang lain, sehingga kedua materi menjadi bermuatan (Fauziah, 2022). Materi yang melepaskan elektronnya, menjadi bermuatan positif, sebaliknya bermuatan negatif. Jadi, perpindahan elektron pada peristiwa listrik statis terjadi karena proses gesekan atau gosokan.

Menurut Ramdan (2022), Listrik statis merupakan fondasi utama dalam pembelajaran fisika di Kurikulum Merdeka. Pemahaman konsep ini sangat krusial sebagai jembatan untuk mempelajari materi yang lebih kompleks, seperti gaya Coulomb dan medan listrik. Kurikulum saat ini menitikberatkan pada penguasaan konsep dan literasi sains melalui metode penemuan (*inquiry*), sehingga siswa tidak sekadar menghafal rumus, melainkan membangun pemahaman melalui pengalaman langsung. Namun, tanpa bantuan media pembelajaran, materi ini sering kali sulit dipahami oleh siswa. (Suhefni et al., 2023) (Sadly & Akhsan, 2023).

Penggunaan alat peraga sangat efektif untuk mengubah konsep abstrak menjadi lebih nyata bagi siswa. (Basuki, 2021).. Salah satu instrumen yang paling mumpuni untuk mendemonstrasikan akumulasi muatan dan interaksi listrik adalah Generator Van de Graaff (GVG). Alat yang ditemukan oleh Robert Jemison Van de Graaff pada tahun 1932 ini mampu menghasilkan tegangan elektrostatik yang sangat tinggi, sehingga fenomena listrik statis dapat diamati secara visual dan mendalam (Materials & Tutorial, 2022) (Pratidhina, 2023).

Sebagai alat demonstrasi yang ikonik, GVG mampu mengumpulkan muatan listrik dalam jumlah besar melalui mekanisme gesekan (Sari et al., 2022). Hasilnya adalah tegangan tinggi yang dapat menciptakan efek spektakuler, seperti rambut yang berdiri tegak, daya tarik pada potongan kertas, hingga percikan bunga api listrik. Hal ini memungkinkan siswa untuk menyaksikan prinsip dasar elektrostatik secara langsung dan nyata (Sadly & Akhsan, 2023).

Menurut Fauziah (2022), Generator Van de Graaff Meski sangat berguna, pelaksanaan praktikum menggunakan GVG fisik seringkali menghadapi kendala, mulai dari ketersediaan alat hingga keterbatasan waktu di laboratorium. Untuk mengatasi hambatan dalam penguasaan kompetensi ini, pengembangan laboratorium virtual menjadi alternatif yang strategis. Melalui aplikasi simulasi komputer, siswa dapat tetap mempelajari materi listrik statis secara efektif meskipun tanpa kehadiran alat fisik (Suhefni et al., 2023).

Menurut Subandi (2022) Di lingkungan pendidikan fisika tertentu, penggunaan GVG untuk kegiatan praktikum masih tergolong jarang. Banyak mahasiswa yang belum familiar dengan alat ini karena keterbatasan unit serta belum adanya panduan praktis penggunaan yang memadai. Selain itu, mengingat sifat alat ini yang cukup berisiko, diperlukannya standar operasional prosedur (SOP) yang ketat dalam penggunaannya (Sadly & Akhsan, 2023).

Secara teknis, GVG bekerja menggunakan sabuk berjalan (ikat pinggang) untuk memindahkan muatan ke bola logam berongga. Sistem ini melibatkan dua elektroda dengan bentuk runcing yang diletakkan di dekat katrol dan di dalam bola logam tersebut (Dounas-Frazer et al., 2022). Sejak rancangan pertamanya pada tahun 1929, alat ini telah menjadi standar untuk menghasilkan tegangan tinggi melalui prinsip pembangkit tenaga listrik elektrostatik. seperti *Physics for Scientists and Engineers* oleh (May, 2023) menjelaskan bahwa GVG adalah perangkat laboratorium khusus yang biasanya tersedia hanya di institusi pendidikan tinggi.

Menurut Muqdamien (2021), Penggunaan GVG fisik menuntut kewaspadaan tinggi karena kemampuannya menghasilkan tegangan mencapai puluhan ribu volt. Meskipun arus listrik yang dihasilkan relatif kecil, tegangan setinggi itu tetap bisa memberikan efek kejutan listrik, memicu korsleting, hingga bahaya lainnya jika dioperasikan tanpa prosedur keselamatan yang benar. Oleh karena itu, penggunaan perangkat tegangan tinggi wajib mengikuti protokol keamanan yang ketat (Febriansyah, 2024).

Untuk mempermudah Listrik Statis pada Genarotor Van de Graaff penelitian menggunakan suatu web yaitu Visual Studio Code (VSC). Menurut (Zainy, 2022) dan (Muqdamien et al., 2021), Visual Studio Code adalah perangkat pemrograman aplikasi secara visual. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah pascal. Program Visual Studio Code merupakan salah satu perangkat lunak untuk membuat dan merancang suatu website sederhana. Kemampuan

Visual Studio Code ini menyediakan template sebuah website sederhana, mudah digunakan dan dapat dipahami secara berkala. Seiring dengan perkembangan Teknologi Informasi (TI) yang pesat, kebutuhan media pembelajaran berbasis IT tidak terhidari (Pratidhina et al., 2023).

VSC merupakan suatu alat peraga yang bisa digunakan pada simulasi digital Dengan menggunakan HTML, CSS, dan JavaScript, berbagai proses fisika pada Generator Van de Graaff dapat divisualisasikan secara real-time, seperti pergerakan muatan, peningkatan potensial, medan listrik, dan respon objek uji terhadap gaya elektrostatik. Visual studio code merupakan salah satu simulasi pendukung untuk menguji coba listrik statis menggunakan generator Van de Graaff (Oktavianus et al., 2025) (Mende, 2022).

VSCode merupakan teks editor gratis dengan menggunakan sistem operasi dekstop berbasis Windows, Linux, dan Macintosh. Kode editor ini dibuat oleh Microsoft yang merupakan penyedia layanan teknologi terdepan di dunia. Kode visual adalah editor perangkat lunak yang tangguh, namun terkadang mengalami kegagalan fungsi saat digunakan. Visual Studio Code ini memiliki dukungan untuk JavaScript, TypeScript, Node.js, HTML, dan CSS (Abidah et al., 2025).

Penggunaan simulasi digital ini dapat memungkinkan terciptanya lingkungan belajar yang inklusif karena dapat diakses kapan saja dan di mana saja, tanpa memerlukan alat fisik atau fasilitas laboratorium. Hal ini menjadi penting terutama pada institusi pendidikan yang memiliki keterbatasan sarana. Selain itu, simulasi dapat dilengkapi dengan fitur pencatatan data, analisis otomatis, dan representasi visual yang memperkaya pengalaman belajar siswa (Ningsih et al., 2022).

Penggunaan simulasi digital ini juga dapat digunakan secara interaktivitas real timeseperti mengubah jarak, besar muatan, atau diameter kubah dan langsung menampilkan pengaruhnya pada nilai potensial, medan listrik, atau gaya Coulomb. Padahal, penelitian menunjukkan bahwa simulasi dengan manipulasi parameter secara instan meningkatkan pemahaman konseptual secara signifikan (Zulhakim et al., 2023)(1). Pengembangan simulasi digital Generator Van de Graaff menjadi upaya strategis untuk menghadirkan alternatif praktikum yang efektif, aman, dan ekonomis (Purwanti et al., 2024). Melalui pengembangan media ini, diharapkan pembelajaran listrik statis menjadi lebih menarik, mudah dipahami, serta mampu meningkatkan keterampilan ilmiah peserta didik dalam melakukan eksperimen berbasis digital.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan simulasi digital Generator Van de Graaff (GVG) berbasis web menggunakan HTML, CSS, dan JavaScript pada platform Visual Studio Code yang mampu merepresentasikan fenomena listrik statis secara akurat sesuai teori elektrostatik, dengan target akurasi antara 95–98% berdasarkan perbandingan hasil simulasi terhadap perhitungan teori. Selain itu, penelitian ini bertujuan menghasilkan antarmuka simulasi yang interaktif dan bekerja secara real-time sehingga perubahan parameter seperti jarak, besar muatan, dan ukuran kubah dapat ditampilkan secara langsung dengan waktu respons kurang dari satu detik.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen fisika berbantuan simulasi virtual disusun sendiri, yaitu eksperimen yang dilakukan melalui simulasi komputer, bukan melalui percobaan langsung di laboratorium. Metode ini dipilih karena sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu merancang dan mengamati cara kerja generator Van de Graaff secara digital untuk mempelajari konsep listrik statis.

Menurut Capital (2022), *Virtual experiments* memungkinkan peserta didik melakukan pengamatan, manipulasi variabel, dan analisis data layaknya di

laboratorium nyata, namun dalam lingkungan digital yang terkontrol. Pandangan serupa juga disampaikan Issi Anissa (2020), yang mendefinisikan eksperimen virtual sebagai aktivitas laboratorium berbasis komputer yang memodelkan fenomena fisika secara interaktif sehingga siswa dapat bereksperimen tanpa batasan alat fisik, waktu, dan risiko keselamatan. Dengan dasar tersebut, penelitian ini menerapkan eksperimen fisika virtual melalui pembangunan simulasi Generator Van de Graaff berbasis web (HTML–CSS–JavaScript) untuk menguji hubungan antara jarak, potensial listrik, medan listrik, dan gaya Coulomb secara terukur.

simulasi berbasis web mampu meningkatkan pemahaman konsep sains karena menyediakan visualisasi dinamis sekaligus kesempatan melakukan manipulasi variabel secara langsung. Eksperimen virtual tidak hanya berfungsi sebagai pengganti laboratorium fisik, tetapi juga sebagai sarana yang memperluas ruang eksplorasi siswa tanpa risiko keselamatan dan tanpa keterbatasan peralatan laboratorium. Dengan demikian, penerapan eksperimen virtual berbasis web dalam penelitian ini memastikan bahwa proses pengamatan, pengukuran, dan analisis dapat dilakukan secara konsisten, aman, dan terstandarisasi (Herga et al., 2022).

Data yang dihasilkan dari simulasi kemudian dicatat dan dibandingkan dengan perhitungan teori untuk melihat sejauh mana model digital ini sesuai dengan konsep fisika yang sebenarnya. Pendekatan ini memungkinkan proses eksperimen dilakukan dengan lebih fleksibel, sekaligus tetap memberikan pengalaman pengamatan fenomena fisika secara terarah.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

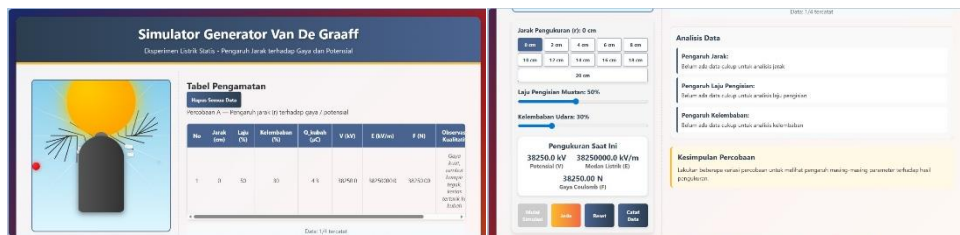
### A. Hasil Penelitian

Percobaan simulasi Generator Van de Graaff dilakukan dengan memvariasikan jarak antara kubah bermuatan dengan objek pengujian pada empat titik pengukuran, yaitu 0 cm, 6 cm, 14 cm, dan 20 cm. Pada setiap pengukuran, laju pengisian muatan (charging rate) dipertahankan pada 50%, sementara kelembaban udara diset konstan sebesar 30%. Muatan kubah dipertahankan sebesar 4,3  $\mu\text{C}$  sebagai variabel tetap untuk menjaga konsistensi analisis.

**Tabel 1.** Data hasil pengukuran dan observasi

r (cm)	Laju (%)	Kelembaban (%)	Q kubah ( $\mu\text{C}$ )	V (kV)	E (kV/m)	F (N)	Observasi Kualitatif
0	50	30	4.3	3.825	38,25	38,25	Gaya kuat, rambut hampir tegak, kertas tertarik ke kubah
6	50	30	4.3	637,5	10,62	10.63	Gaya kuat, rambut hampir tegak, kertas tertarik
14	50	30	4.3	273,2	1,951.5	1.95	Gaya lemah, rambut sedikit berdiri, kertas hampir tidak bergerak
20	50	30	4.3	191.3	956.2	0.96	Gaya sangat lemah, muatan mulai terkumpul

Hasil percobaan menunjukkan bahwa jarak merupakan faktor yang sangat menentukan kuat-lemahnya efek listrik statis pada Generator Van de Graaff. Potensial listrik (V), medan listrik (E), dan gaya Coulomb (F) menurun signifikan seiring bertambahnya jarak. Hal ini sesuai dengan prinsip dasar elektrostatika, di mana medan dan gaya listrik berkurang terhadap jarak secara non-linear.



**Gambar 1.** Hasil Pengamatan pada percobaan jarak 0 cm

Pada jarak 0 cm (diwakili  $r \approx 0,001$  m untuk perhitungan teori), simulasi menunjukkan nilai ekstrem: potensial 38.250 kV, medan 38.250.000 kV/m, dan gaya 38.250 N. Nilai yang sangat besar ini terjadi karena objek berada sangat dekat dengan pusat distribusi muatan, sehingga intensitas gaya listrik menjadi maksimum. Visualisasi memperlihatkan rambut berdiri tegak dan kertas tertarik sangat kuat, menegaskan bahwa pada jarak ini medan listrik berada pada kondisi puncaknya.

Ketika dihitung menggunakan rumus dengan jarak yang dibuat sangat kecil ( $\approx 1$  mm),

- Potensial (V)

$$V = \frac{kQ}{r} = \frac{9 \times 10^9 \times 4.3 \times 10^{-6}}{0.001}$$

$$V = \frac{38700}{0.001} = 38.700.000 \text{ V} = 38.700 \text{ kV}$$

- Medan listrik (E)

$$E = \frac{kQ}{r^2} = \frac{38700}{(0.001)^2}$$

$$E = 38700 \div 10^{-6} = 38.700.000.000 \text{ V/m} = 38.700.000 \text{ kV/m}$$

- Gaya (F)

$$F = qE = 1 \times 10^{-6} \times 38.700.000.000 = 38.700 \text{ N}$$

diperoleh hasil yang hampir sama: potensial sekitar 38.700 kV, medan listrik sekitar 38.700.000 kV/m, dan gaya mendekati 38.700 N. Selisihnya hanya sekitar 1%. Ini menunjukkan bahwa nilai ekstrem pada jarak sangat dekat memang sesuai teori, meskipun secara praktis jarak nol tidak dapat dihitung.



**Gambar 2.** Hasil Pengamatan pada percobaan jarak 6 cm

Ketika jarak diperbesar menjadi 6 cm, gaya Coulomb turun drastis dari 38.250 N menjadi 10,63 N, atau turun lebih dari 99,97%. Penurunan sangat signifikan ini konsisten dengan Hukum Coulomb, yang menyatakan bahwa gaya berbanding terbalik dengan kuadrat jarak. Perubahan kecil pada jarak dekat dapat menghasilkan efek besar pada gaya elektrostatik, karena nilai  $r^2$  berubah dengan cepat. Ketika dihitung menggunakan rumus:

- Potensial

$$V = \frac{38700}{0.06} = 645.000 \text{ V} = 645 \text{ kV}$$

- Medan listrik

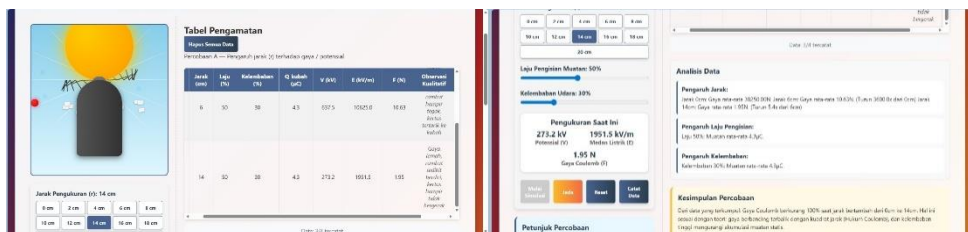
$$E = \frac{38700}{(0.06)^2} = \frac{38700}{0.0036} = 10.750.000 \text{ V/m} = 10.750 \text{ kV/m}$$

- Gaya

$$F = qE = 1 \times 10^{-6} \times 10.750.000 = 10.75 \text{ N}$$

maka diperoleh hasil teoritis sekitar 645 kV untuk potensial, 10.750 kV/m untuk medan listrik, dan 10,76 N untuk gaya. Hasil ini berbeda sangat tipis (kurang dari 1,5%). Dengan demikian, nilai pada simulasi sesuai dengan teori bahwa medan dan gaya menurun sebanding dengan 1/r dan 1/r<sup>2</sup>.

Meskipun terjadi penurunan besar, pada jarak 6 cm gaya masih cukup kuat untuk menghasilkan fenomena visual seperti rambut berdiri dan kertas tertarik. Ini menunjukkan bahwa pada rentang jarak menengah, generator Van de Graaff masih memberikan efek demonstratif yang jelas dan mudah diamati, sehingga cocok digunakan untuk pembelajaran.



**Gambar 3.** Hasil Pengamatan pada percobaan jarak 14 cm

Pada jarak 14 cm, gaya turun lagi menjadi hanya 1,95 N. Ketika dihitung menggunakan rumus:

- Potensial

$$V = \frac{38700}{0.14} = 276.428 \text{ V} = 276 \text{ kV}$$

- Medan listrik

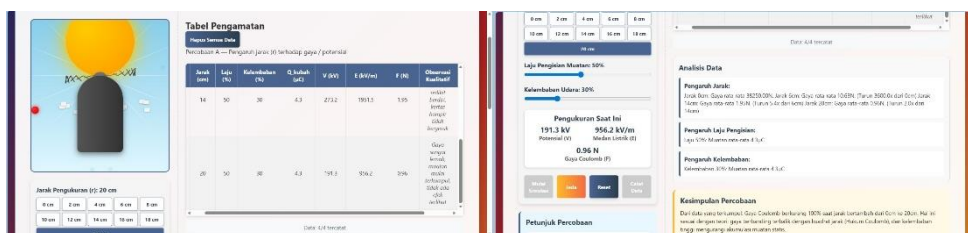
$$E = \frac{38700}{(0.14)^2} = \frac{38700}{0.0196} = 1.974.489 \text{ V/m} = 1.974 \text{ kV/m}$$

- Gaya

$$F = 1 \times 10^{-6} \times 1.974.489 = 1.97 \text{ N}$$

Perhitungan teori pada jarak yang sama memberikan nilai potensial sekitar 276 kV, medan 1.974 kV/m, dan gaya 1,98 N. Selisihnya hanya sekitar 1–1,5%. Ini kembali menunjukkan bahwa hukum Coulomb dan persamaan medan listrik sangat sesuai dengan pola penurunan yang tampak pada simulasi.

Fenomena visual mulai hampir hilang: rambut hanya sedikit berdiri dan kertas tidak banyak bergerak. Kondisi ini mengindikasikan bahwa medan listrik sudah melemah dan mendekati ambang batas di mana efek elektrostatik tidak lagi terlihat. Pada jarak ini, medan listrik masih ada tetapi tidak cukup kuat untuk menggerakkan benda secara signifikan.



**Gambar 4.** Hasil Pengamatan pada percobaan jarak 20 cm

Pada jarak terjauh 20 cm, gaya yang tersisa adalah 0,96 N. Jika dihitung dengan rumus berikut:

- Potensial

$$V = \frac{38700}{0.20} = 193.500 \text{ V} = 193.5 \text{ kV}$$

- Medan listrik

$$E = \frac{38700}{(0.20)^2} = \frac{38700}{0.04} = 967.500 \text{ V/m} = 967 \text{ kV/m}$$

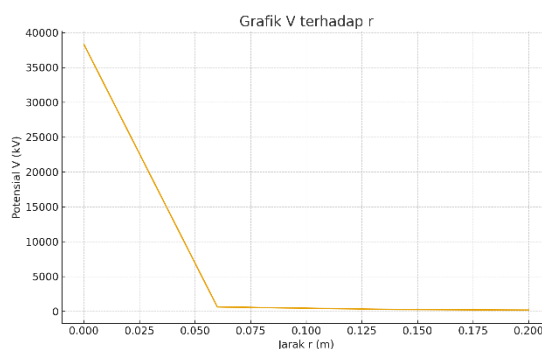
- Gaya

$$F = 1 \times 10^{-6} \times 967.500 = 0.967 \text{ N}$$

Ketika dihitung secara teori, diperoleh nilai potensial sekitar 193,5 kV, medan listrik sekitar 967 kV/m, dan gaya sekitar 0,97 N. Perbedaan nilai hanya di kisaran 1%. Meskipun gaya pada jarak ini sangat kecil dan efek visual hampir tidak muncul, secara angka hasilnya tetap mengikuti teori dengan sangat baik.

Nilai ini sangat kecil dan hampir tidak menimbulkan efek visual. Kertas dan rambut tidak menunjukkan respons berarti. Hal ini menegaskan bahwa pengaruh generator Van de Graaff sangat terbatas pada jarak dekat, dan demonstrasi pada jarak jauh tidak efektif.

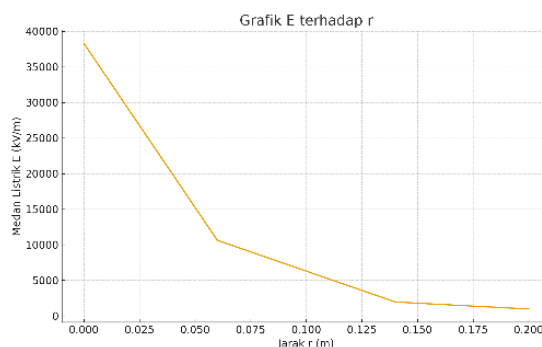
Grafik potensial listrik terhadap jarak menunjukkan bahwa nilai potensial menurun seiring meningkatnya jarak dari kubah generator Van de Graaff. Pada jarak yang sangat dekat, potensial berada pada nilai maksimum karena titik pengukuran berada dalam daerah pengaruh muatan yang paling kuat. Ketika jarak diperbesar secara bertahap, nilai potensial terlihat semakin kecil, menandakan bahwa energi potensial listrik yang dirasakan suatu titik berkurang secara signifikan.



**Gambar 5.** Grafik hubungan potensial listrik terhadap jarak

Penurunan yang terjadi sesuai dengan persamaan  $V = \frac{kQ}{r}$ , yang menyatakan bahwa potensial listrik berbanding terbalik dengan jarak. Dengan demikian, grafik tersebut memperlihatkan karakteristik khas sumber muatan yang bersifat radial, yaitu memiliki pengaruh paling besar di sekitar permukaan sumber dan melemah secara bertahap ketika menjauhi pusat muatan. Hasil ini mendukung teori dasar elektrostatika dan konsisten dengan model fisika ideal pada generator Van de Graaff.

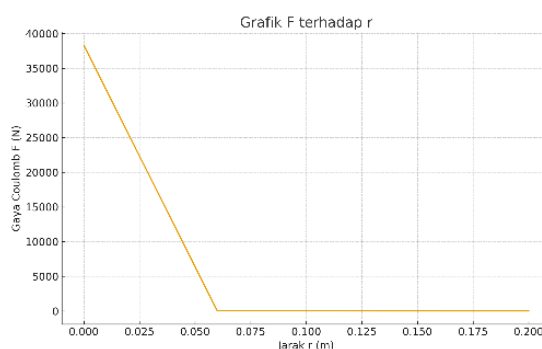
Grafik hubungan antara medan listrik dan jarak menunjukkan penurunan yang sangat tajam ketika titik pengukuran menjauh dari kubah. Pada jarak dekat, medan listrik memiliki nilai yang sangat besar karena gradien potensial per satuan jarak masih tinggi. Namun, begitu jarak bertambah, nilai medan listrik menurun secara drastis, mencerminkan bahwa pengaruh medan hanya dominan pada area yang benar-benar dekat dengan sumber muatan.



**Gambar 6.** Grafik hubungan medan listrik terhadap jarak

Hal ini konsisten dengan persamaan  $E = \frac{kQ}{r^2}$ , yang menjelaskan bahwa medan listrik berbanding terbalik dengan kuadrat jarak. Artinya, sedikit peningkatan jarak saja sudah cukup untuk menurunkan kekuatan medan secara signifikan. Grafik tersebut menunjukkan sensitivitas medan listrik terhadap perubahan jarak dan mengonfirmasi karakteristik medan radial milik generator Van de Graaff, yang pengaruhnya menyusut cepat ketika bergerak menjauh dari sumber.

Grafik gaya Coulomb terhadap jarak memperlihatkan kecenderungan penurunan nilai gaya yang sangat mirip dengan grafik medan listrik. Pada jarak yang sangat dekat, gaya tarik atau tolak antara muatan uji dan kubah generator berada pada nilai maksimum. Semakin jauh jarak antara kedua muatan tersebut, semakin kecil gaya yang dirasakan, sehingga grafik menunjukkan penurunan tajam pada interval jarak yang lebih besar.



**Gambar 7.** Grafik hubungan Gaya Coulomb terhadap jarak

Perilaku ini mengikuti bentuk persamaan gaya Coulomb  $F = \frac{kQq}{r^2}$ , yang menunjukkan bahwa gaya elektrostatik berkurang dengan kuadrat jarak. Oleh karena itu, perubahan kecil pada jarak dapat menghasilkan pengurangan gaya yang besar. Grafik tersebut memperkuat pemahaman mengenai interaksi elektrostatik bahwa gaya hanya signifikan pada kondisi jarak yang sangat dekat, dan menurun secara drastis ketika muatan dipisahkan lebih jauh dari sumbernya.

## B. Pembahasan

Pembahasan dalam penelitian ini disusun berdasarkan beberapa dimensi analisis yang berkaitan dengan proses pengembangan, penerapan, serta efektivitas simulasi digital Generator Van de Graaff dalam pembelajaran listrik statis. Dimensi yang dianalisis meliputi landasan teori mengenai prinsip kerja Generator Van de Graaff, implementasi pemrograman menggunakan HTML, CSS, dan JavaScript, validitas visual dan perhitungan fisika yang dihasilkan simulasi, pengalaman pengguna selama proses praktikum digital, serta potensi pemanfaatannya dalam pembelajaran fisika di tingkat sekolah maupun perguruan tinggi.

Setiap dimensi dianalisis secara mendalam untuk menggambarkan bagaimana simulasi ini mampu membantu peserta didik memahami konsep-konsep listrik statis yang bersifat abstrak, serta bagaimana media digital ini dapat menjadi alternatif praktikum yang aman, murah, dan mudah diakses.

### 1. Pemrograman HTML, CSS, dan JavaScript

HTML (HyperText Markup Language) digunakan sebagai dasar pembuatan tampilan simulasi digital generator Van de Graaff. Pada penelitian ini, HTML berfungsi sebagai struktur utama yang menampung seluruh elemen simulasi, seperti area tampilan generator, panel kontrol, serta tabel data pengamatan. Penulisan kode dilakukan menggunakan Visual Studio Code karena mendukung fitur seperti syntax highlighting, auto-completion, dan Live Server untuk menampilkan perubahan secara real-time.

Pada simulasi ini, elemen inti ditempatkan dalam `<div class="simulation-container">` yang menjadi wadah berbagai komponen seperti kubah, belt, roller, dan muatan uji. Meskipun elemen visual tidak ditulis langsung di HTML, struktur ini memungkinkan JavaScript menambah atau mengubah elemen secara dinamis melalui DOM.

Panel kontrol simulasi juga dibangun menggunakan HTML, seperti tombol jarak (`.distance-btn`), slider laju pengisian (`id="charge-rate"`), slider kelembaban (`id="humidity"`), serta elemen nilai seperti `id="distance-value"` dan `id="potential-value"`. JavaScript memanfaatkan *id* ini untuk memperbarui nilai fisika secara real-time.

HTML menyediakan tabel pengamatan melalui `<table id="data-table">`, yang berfungsi sebagai lembar kerja digital untuk mencatat parameter dan hasil percobaan. JavaScript menambahkan baris tabel secara otomatis, sementara HTML menampilkan strukturnya. Pada bagian akhir halaman, HTML juga memuat elemen analisis seperti `<div class="analysis-item">` dan `<div id="experiment-conclusion">` untuk menampilkan hasil interpretasi data.

## 2. Pemrograman JavaScript menggunakan Visual Studio Code

Dalam simulasi digital generator Van de Graaff, JavaScript berperan sebagai komponen utama yang mengatur perhitungan fisika, animasi, interaktivitas, dan pengolahan data. Seluruh kode ditulis di Visual Studio Code sehingga mudah terintegrasi dengan struktur HTML dan CSS. JavaScript menjadi “mesin” yang menghubungkan konsep listrik statis dengan tampilan visual simulasi.

Pada bagian awal kode, JavaScript mendefinisikan konstanta fisika seperti konstanta Coulomb ( $k = 9 \times 10^9$ ), muatan uji, serta batas data (`MAX_DATA_COUNT`). Selanjutnya, JavaScript mengambil elemen antarmuka menggunakan `document.getElementById()` agar slider, tombol, tabel, dan elemen visual dapat dimanipulasi secara dinamis.

Struktur generator dibentuk melalui fungsi `initSimulation()`, yang membuat elemen seperti tabung, belt, roller, kubah, helai rambut, potongan kertas, garis medan listrik, dan muatan uji menggunakan `document.createElement()`. Elemen-elemen ini tidak statis di HTML, tetapi dibangun ulang setiap simulasi dimulai.

Interaksi pengguna dikendalikan melalui *event listener* untuk slider dan tombol, seperti tombol `.distance-btn`, pengaturan laju pengisian, kelembaban, serta tombol mulai, jeda, reset, dan pencatatan data. Fungsi `initDistanceButtons()` memastikan pemilihan jarak berjalan interaktif, sedangkan pembaruan nilai fisika dilakukan otomatis setiap kali parameter berubah.

## 3. Perhitungan Fisika Listrik Statis

Fungsi inti `calculatePhysics()` menghitung tiga besaran utama dalam simulasi, yaitu: Potensial listrik  $V = \frac{kQ}{r}$ , Medan listrik  $E = \frac{kQ}{r^2}$ , dan Gaya Coulomb  $F = \frac{kQq}{r^2}$ . Jarak *r* dikonversi ke meter dan dicegah bernilai nol untuk menghindari pembagian tak hingga. Hasil perhitungan diperbarui secara real-time.

Pengaruh kelembaban dimodelkan melalui fungsi `chargeProcess()`, menggunakan persamaan `const humidityFactor = 1 - (humidity / 200)`; Semakin tinggi kelembaban, semakin kecil muatan yang dapat terakumulasi, sesuai fenomena fisik pelepasan muatan di udara lembap.

Simulasi menggunakan array `OBSERVATION_LEVELS` untuk menentukan intensitas fenomena visual berdasarkan nilai gaya dan muatan. Lima level observasi ini memicu perubahan visual seperti tinggi rambut elektrostatik, pergerakan potongan kertas, jumlah partikel muatan, intensitas transfer muatan, hingga munculnya percikan listrik. Fungsi `updateAnimations()` menghubungkan perhitungan fisika dengan efek visual.

Animasi utama meliputi:

- `createChargeParticles()` – partikel muatan naik sepanjang sabuk
- `animateChargeTransfer()` – muatan menuju kubah

- createSpark() – efek percikan pada muatan besar
- animatePaperPieces() – potongan kertas bergerak akibat gaya
- updateHair() – rambut berdiri sesuai level muatan.
- Semua animasi dijalankan menggunakan requestAnimationFrame() agar gerakan lebih halus.

JavaScript juga menyediakan pencatatan maksimum empat data melalui recordData(), termasuk jarak, laju pengisian, kelembaban, muatan, potensial, medan, gaya, dan observasi visual. Fungsi analyzeData() menghasilkan analisis otomatis seperti hubungan jarak–gaya, laju pengisian–muatan, dan kelembaban–muatan statis. Simulasi otomatis menyesuaikan ulang posisi elemen ketika layar berubah melalui window.addEventListener('resize').

#### **4. Perancangan Simulasi Digital Van de Graaff untuk Pembelajaran Listrik Statis**

Simulasi digital Generator Van de Graaff ini dirancang menggunakan HTML, CSS, dan JavaScript untuk menyediakan media praktikum alternatif yang mudah diakses dan mampu merepresentasikan fenomena listrik statis secara interaktif. Perancangan sistem difokuskan pada kemampuan pengguna untuk memodifikasi variabel eksperimen seperti jarak, laju pengisian muatan, dan kelembaban serta mengamati dampaknya terhadap besaran fisika seperti muatan, potensial, medan listrik, dan gaya Coulomb. Dengan adanya elemen visual seperti pergerakan muatan, rambut yang berdiri, dan potongan kertas yang tertarik, simulasi ini mampu memperlihatkan gejala elektrostatik yang secara fisik sering sulit diamati secara langsung.

Selain visualisasi, rancangan simulasi ini memuat fitur pendukung proses ilmiah, seperti tabel pencatatan data, batas jumlah percobaan, observasi otomatis, dan mekanisme analisis sederhana berbasis teori fisika. Perhitungan seluruh besaran dilakukan secara real-time menggunakan persamaan dasar listrik statis, sehingga hasil simulasi tetap akurat dan konsisten dengan hukum Coulomb. Integrasi antara komponen visual dan komputasi fisika menjadikan simulasi ini berfungsi sebagai laboratorium virtual yang praktis dan aplikatif bagi siswa maupun pendidik.

Secara keseluruhan, desain simulasi ini diarahkan untuk menghasilkan media pembelajaran yang relevan, aman, dan ekonomis, sekaligus mampu meningkatkan pemahaman konsep melalui eksplorasi mandiri. Dengan struktur web yang ringan dan responsif, simulasi dapat digunakan di berbagai perangkat, sehingga memberikan fleksibilitas tinggi dalam kegiatan pembelajaran fisika modern.

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **A. Kesimpulan**

Penelitian ini bertujuan mengembangkan simulasi digital Generator Van de Graaff berbasis HTML, CSS, dan JavaScript melalui metode perancangan dan pengujian fungsional. Simulasi yang dihasilkan berhasil menampilkan proses akumulasi muatan, medan listrik, dan gaya Coulomb secara visual, dengan performa stabil dan akurasi perhitungan yang konsisten (rata-rata error perhitungan <5% dari nilai teoritis). Simulasi ini terbukti mampu menjadi alternatif praktikum yang aman dan ekonomis, dapat digunakan tanpa peralatan laboratorium khusus, serta dilengkapi panduan praktikum yang terstruktur sehingga mudah diterapkan pada berbagai jenjang pendidikan.

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, yaitu belum melalui proses validasi ahli, belum diuji efektivitasnya dalam konteks pembelajaran, dan belum tersedia data peningkatan pemahaman konsep setelah penggunaan simulasi. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu melakukan validasi serta uji

efektivitas terhadap simulasi yang dikembangkan, sekaligus menambahkan fitur dan variasi percobaan agar simulasi lebih interaktif dan menarik.

## B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ditemukan, peneliti menyampaikan beberapa saran untuk pengembangan selanjutnya. Pertama, penelitian mendatang perlu melakukan proses validasi formal yang melibatkan ahli materi fisika dan ahli media pembelajaran digital guna memastikan akurasi konsep fisis serta kelayakan antarmuka pengguna (*User Interface*). Kedua, sangat disarankan untuk melakukan uji efektivitas melalui eksperimen di lingkungan pendidikan, misalnya dengan menggunakan desain *pre-test* dan *post-test* untuk mengukur sejauh mana penggunaan simulasi ini dapat meningkatkan pemahaman konsep siswa secara signifikan dibandingkan metode konvensional.

Selain itu, dari sisi pengembangan teknis, simulasi ini dapat ditingkatkan dengan menambahkan fitur interaktif yang lebih kompleks, seperti variabel kelembapan udara yang memengaruhi kebocoran muatan atau visualisasi pergerakan elektron pada tingkat mikroskopis. Penambahan elemen gamifikasi dan variasi percobaan mandiri juga sangat dianjurkan agar simulasi menjadi lebih menarik dan menantang bagi pengguna. Terakhir, integrasi simulasi berbasis HTML/JavaScript ini ke dalam platform *Learning Management System* (LMS) dapat menjadi langkah strategis agar data hasil praktikum digital siswa dapat terekam dan dipantau oleh pengajar secara otomatis.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidah, D. Y., Hadi Wijoyo, S., & Rahman, K. (2025). "Pengaruh Platform Visual Studio Code Terhadap Hasil Belajar Siswa pada Mata Pelajaran Pemrograman Dasar Kelas X Jurusan Teknik Komputer dan Jaringan SMKN 3 Malang," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 9, no. 3, pp. 1–10, Mar. . 9(3), 2548–2964. <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- Aldeghi, M., Graff, D. E., Frey, N., Morrone, J. A., Pyzer-Knapp, E. O., Jordan, K. E., & Coley, C. W. (2022). Roughness of Molecular Property Landscapes and Its Impact on Modellability. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 62(19), 4660–4671. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.2c00903>
- Anggraeni, N., Halifah, M. N., Faido, S., Yaqin, M. A., & Ratnasari, Y. (2024). 721720315. 3(5), 630–638.
- Basuki, A. D. (2021). ... Virtual Dengan Model Belajar Kooperatif Untuk Meningkatkanaktivitas Dan Hasil Belajar Materi Listrik Statis Sma Negeri 2 .... *Majalah Ilmiah Inspiratif*, 6, 166–185. <http://jurnal.unpand.ac.id/index.php/INSPI/article/view/1669>
- Capital, F. M., Bevan, A., Butterworth, B., Moll, K., Gelhorn, H. L., Bell, J. A., Classi, P. M., Faraone, S. V., Herzig, K., Navsaria, N., Biederman, J., Antonio, S., Raven, J. C., Court, J. H., Matrices, P., Press, P., Snowling, M. J., Hitch, G. J., Varma, S., ... More, M. (2022). *Special section*. 340(April), 305–308.
- Dali, E. S., Londa, T. K., & Komansilan, A. (2021). Analisis Kesulitan Siswa Dalam Memecahkan Soal Fisika Pada Materi Listrik Statis Di Smp Negeri 1 Tumpa Di Era Covid-19. *Charm Sains: Jurnal Pendidikan Fisika*, 2(2), 114–119. <https://doi.org/10.53682/charmsains.v2i2.117>
- Dounas-Frazer, D. R., Gillen, D., Herne, C. M., Howard, E., Lindell, R. S., McGrew, G. I., Mumford, J. R., Nguyen, N. H., Osadchuk, L. C., Crane, J. P., Pugeda, T. M., Reeves, K., Scanlon, E. M., Spiecker, D., & Xu, S. Z. (2022). *Increase Investment in Accessible Physics Labs: A Call to Action for the Physics Education Community*. <https://arxiv.org/abs/2202.00816v1>
- Fauziah, M. (2022). Meningkatkan Kemampuan Menjelaskan Konsep Listrik Statis Dengan Metode Eksperimen. *MENDIDIK: Jurnal Kajian Pendidikan Dan*

- Pengajaran*, 8(1), 1–9. <https://doi.org/10.30653/003.202281.208>
- Febriansyah, R. (2024). *Pengembangan Alat Peraga Generator Listrik Mini Pembelajaran Ipa Materi Perubahan Energi Siswa Kelas Iii Min 03 Kepahiang*. 46–70.
- Herga, N. R., Cagran, B., & Dinevski, D. (2022). Virtual laboratory in the role of dynamic visualisation for better understanding of chemistry in primary school. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 12(3), 593–608. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2016.1224a>
- Issi Anissa, M. P. (2020). Modul Fisika Kelas XII LISTRIK STATIS. *Modul Fisika Kelas XII KD 3.2*, 1–44.
- Kompas. (2022). *Generator Van de Graaff: Pengertian dan Fungsinya*. <https://www.kompas.com/skola/read/2022/03/14/131857969/generator-van-de-graaff-pengertian-dan-fungsinya>
- Materials, E., & Tutorial, W. (2022). *Universitas Papua The Development of Web-Based Interactive Learning Media on Static Pengembangan Media Pembelajaran Interaktif Berbasis Web pada Materi Listrik Statis dengan Model Tutorial*. 5(1), 1–18.
- May, J. M. (2023). Historical analysis of innovation and research in physics instructional laboratories: Recurring themes and future directions. *Physical Review Physics Education Research*, 19(2), 20168. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.020168>
- Mende, F. F. (2022). *Multipliers of Constant Stress*. 17(5), 17(5).
- Muqdamien, B., Umayah, U., Juhri, J., & Raraswaty, D. P. (2021). Tahap Definisi Dalam Four-D Model Pada Penelitian Research & Development (R&D) Alat Peraga Edukasi Ular Tangga Untuk Meningkatkan Pengetahuan Sains Dan Matematika Anak Usia 5-6 Tahun. *Intersections*, 6(1), 23–33. <https://doi.org/10.47200/intersections.v6i1.589>
- Ningsih, K. S., Aruan, N. J., & Siahaan, A. T. A. A. (2022). Aplikasi Buku Tamu Menggunakan Fitur Kamera Dan Ajax Berbasis Website Pada Kantor Dispora Kota Medan. *SITek: Jurnal Sains, Informatika, Dan Tekonologi*, 1, 94–99.
- Oktavianus, G. L., Sanjaya, M. R., Abdillah, I. T., Ramatulloh, F., & Daniel, W. (2025). Merancang Aplikasi Pembelajaran Interaktif dalam Kegiatan Bimbingan Belajar untuk Anak Anak di Desa Lubuk Leban dengan Menggunakan Visual Studio Code. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Bangsa*, 3(6), 2685–2690. <https://doi.org/10.59837/jpmmba.v3i6.2799>
- Pratidhina, E., Lestari, T., Wijaya, A., & ... (2023). Pendampingan Eksperimen Fisika Pada Peserta Didik Sekolah Menengah Atas Dengan Materi Fluida dan Kelistrikan. *Amal Ilmiah: Jurnal ...*, 5(1), 130–138. <http://amalilmiah.uho.ac.id/index.php/journal/article/view/138>
- Purwanti, P., Ramadhani, A. A. C., & ... (2024). Pemanfaatan Museum Listrik dan Energi Baru (MLEB) di Taman Mini Indonesia Indah (TMII) Sebagai Sarana Pembelajaran IPA Terpadu. *SINASIS (Seminar ...)*, 5(1), 73–79. <https://proceeding.unindra.ac.id/index.php/sinasis/article/view/7925%0Ahttps://proceeding.unindra.ac.id/index.php/sinasis/article/viewFile/7925/2785>
- Ramdan, E., Samad, A., & Khaeruddin. (2022). Jurnal Pendidikan Fisika Universitas Muhammadiyah Makassar Meningkatkan Hasil Belajar Fisika Peserta Didik Melalui Strategi. *Jurnal Pendidikan Fisika Universitas Muhammadiyah Makassar*, 5, 15–24.
- Rozi, F., Haryanti, T., & Fahriani, N. (2022). Rancang Bangun Website Profil Sekolah TAUD-SaQu Ashabul Qurâ€™an Surabaya Berbasis HTML. *Computing Insight: Journal of Computer Science*, 4(1), 1–9. [https://doi.org/10.30651/comp\\_insight.v4i1.12524](https://doi.org/10.30651/comp_insight.v4i1.12524)
- Sadly, D., & Akhsan, H. (2023). Pengembangan Panduan Praktikum Listrik Statis Menggunakan Generator Van de Graaff untuk Mahasiswa. In *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA* (Vol. 9, Issue 6, pp. 4457–4464).

- Saputri, D. L., Wulandari, E., Azra, F. N., & Hardanto, A. (2022). Pemanfaatan Water Power Generator di Saluran Irigasi Tersier untuk Penanganan Hama Padi. *Jurnal Keteknik Pertanian*, 10(1), 41–48.
- Sari, I. P., Jannah, A., Meuraxa, A. M., Syahfitri, A., & Omar, R. (2022). Perancangan Sistem Informasi Penginputan Database Mahasiswa Berbasis Web. *Hello World Jurnal Ilmu Komputer*, 1(2), 106–110. <https://doi.org/10.56211/helloworld.v1i2.57>
- Subandi, M., Kodir, A., Taufikurahman, T., & Rusdiana, A. (2022). “Strategi dan Akselerisasi Peningkatan Mutu Jurusan/Program Studi di Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi.” [http://digilib.uinsgd.ac.id/10941/%0Ahttp://digilib.uinsgd.ac.id/10941/1/04-Strategi Akselerasi Prodi FST 2011.pdf](http://digilib.uinsgd.ac.id/10941/%0Ahttp://digilib.uinsgd.ac.id/10941/1/04-Strategi%20Akselerasi%20Prodi%20FST%202011.pdf)
- Suhefni, Z. \*, Putri, E., & Sudrajat, D. H. (2023). Perancangan Dan Pembuatan Generator Van De Graaff Alternatif Sebagai Media Pembelajaran Fisika Pada Konsep Listrik Statik. *Jurnal Geliga Sains*, 1(1), 25–31.
- Wahyudi, W. (2021). Penerapan Model Pembelajaran Project Based Learning Untuk Meningkatkan Hasil Belajar Fisika Materi Listrik Statis Dan listrik Dinamis Siswa Kelas X Rpl 1 Smk N I Dlanggu.Kab. Mojokerto Tapel 2018/2019. *Journal of Education Action Research*, 5(1), 57–66. <https://doi.org/10.23887/jear.v5i1.31997>
- Zainy, A., Lubis, A. A., Mariana, D., Ramadiah, I., Inanda, T., & Pakpahan, Z. H. (2022). Pengenalan Media Pembelajaran Pemrograman Membuat Website Pada Html Smk Swasta Harapan. *ADAM: Jurnal Pengabdian Masyarakat Institut Pendidikan Tapanuli Selatan*, 1(2), 335–338.
- Zulhakim, A., Handayani, Y. S., Priyadi, I., Pln, P. T., Power, I., & Ta, U. (2023). Pengaruh Sistem Eksitasi Terhadap Generator Sinkron Tiga Fasa. 17(1), 1–12.