

MEDAN LISTRIK STATIS OLEH MUATAN DISKRIT, MUATAN KONTINU DALAM TEKNOLOGI (SEBUAH TINJAUAN)

Mega Kurnia¹, Kiki Ayu Winarni¹, Hamdi Akhsan¹

¹Magister Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sriwijaya, Jl. Sriwijaya Negara Ilir Barat I, Palembang, 30139, Indonesia

*email: hamdiakhsan@fkip.unsri.ac.id

ABSTRAK

Medan listrik statis memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi teknologi modern. Muatan diskrit dan kontinu sama-sama berkontribusi pada fenomena elektrostatis yang dimanfaatkan dalam beragam bidang. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan medan listrik statis yang dihasilkan oleh kedua jenis muatan tersebut dalam teknologi modern. Metode penelitian yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) berdasarkan pedoman PRISMA, dengan fokus pada artikel ilmiah terindeks Scopus. Dari total 35 artikel yang relevan, 21 artikel berkualitas dipilih untuk analisis mendalam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa medan listrik statis memiliki aplikasi luas, seperti fotocopy forensik, layar sentuh, Electrostatic Powder Spreading (ESPS), elektroforesis, dan Finite Element Method Magnetics (FEMM) untuk muatan diskrit. Sementara itu, aplikasi untuk muatan kontinu mencakup Presipitator Elektrostatis (ESP), Microelectromechanical Systems (MEMS), kapasitor, dan Pulsed Field Ablation (PFA). Temuan ini diharapkan dapat mendukung pengembangan teknologi yang lebih efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan. Selain itu, penelitian ini merekomendasikan pengembangan model simulasi yang lebih kompleks serta integrasi teknologi medan listrik statis dengan teknologi lain untuk menciptakan solusi inovatif di masa depan.

Kata Kunci: Medan listrik statis; Muatan diskrit; Muatan kontinu; Aplikasi teknologi

ABSTRACT

Static electric fields play a crucial role in various applications of modern technology. Both discrete and continuous charges contribute to electrostatic phenomena that are utilized in diverse fields. This study aims to explore the application of static electric fields generated by these two types of charges in modern technology. The research method used is a Systematic Literature Review (SLR) based on PRISMA guidelines, focusing on Scopus-indexed scientific articles. Out of 35 relevant articles, 21 high-quality articles were selected for in-depth analysis. The results show that static electric fields have wide-ranging applications, such as forensic photocopying, touchscreens, Electrostatic Powder Spreading (ESPS), electrophoresis, and Finite Element Method Magnetics (FEMM) for discrete charges. Meanwhile, applications for continuous charges include Electrostatic Precipitators (ESP), Microelectromechanical Systems (MEMS), capacitors, and Pulsed Field Ablation (PFA). These findings are expected to support the development of more efficient, energy-saving, and environmentally friendly technologies. Additionally, this study recommends the development of more complex simulation models and the integration of static electric field technology with other technologies to create innovative solutions for the future.

Keywords: Static electric field; Discrete charge; Continuous charge; Technology applications,

PENDAHULUAN

Elektrostatika merupakan cabang ilmu fisika yang mempelajari tentang muatan listrik statis (dalam keadaan diam). Prinsip dasar elektrostatika diatur oleh hukum Coulomb, yang menjelaskan dua benda bermuatan listrik akan menimbulkan gaya di antara keduanya. Medan listrik statis mempunyai peranan mendalam berbagai aplikasi teknologi. Medan listrik statis mempunyai karakteristik dan implikasi berbeda dari distribusi muatan diskrit dan kontinu. Aplikasi muatan diskrit melibatkan partikel

atau objek bermuatan individual yang terdistribusi secara tidak merata. Sedangkan aplikasi muatan kontinu melibatkan distribusi muatan yang tersebar secara merata di atas permukaan atau volume.

Prinsip elektrostatis telah dimanfaatkan untuk mengembangkan teknologi yang bergantung pada kontrol medan listrik yang tepat. Penerapan medan listrik statis oleh muatan diskrit dan kontinu saat ini telah menciptakan berbagai kemajuan yang signifikan pada berbagai bidang seperti elektronika (Ramesh, 2021), ilmu material (Liu, 2021), teknik lingkungan

(Liu, 2024), sistem pemurnian udara (Stepkina, 2020), (Li, 2022) hingga perangkat elektronik canggih (sankaran, 2020). Memahami perbedaan antara aplikasi pengisian daya diskrit dan kontinu sangat penting untuk mengoptimalkan teknologi ini dan mendorong batasan inovasi.

Aplikasi pengisian daya diskrit melibatkan partikel atau objek terdistribusi secara diskrit atau individual. Sering kali aplikasi ini diterapkan pada penggunaan perangkat seperti mesin fotokopi (Tomar, 2021), printer laser (Hai, 2020), dan layar sentuh (Mason, 2020). Dalam mesin fotokopi dan printer laser, muatan diskrit digunakan untuk mentransfer partikel toner ke kertas (Takuma, 2020), menciptakan gambar dan teks. Layar sentuh khususnya layar sentuh kapasitif berfungsi untuk mendeteksi sentuhan dengan mengukur perubahan medan elektrostatis yang disebabkan oleh keberadaan objek konduktif, seperti jari tangan.

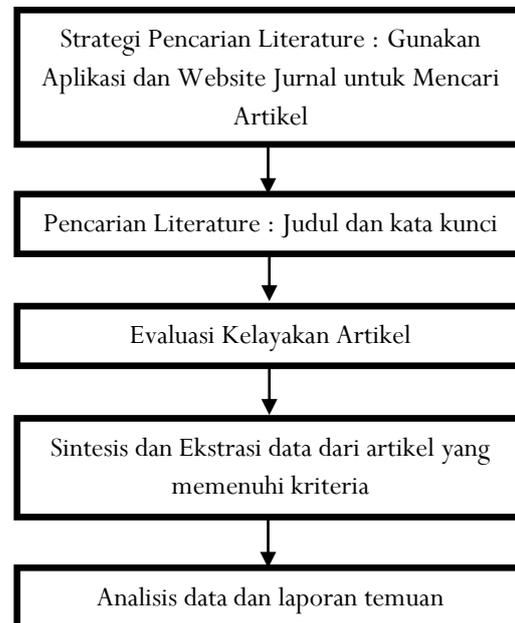
Aplikasi pengisian daya kontinu melibatkan distribusi muatan yang tersebar secara merata pada permukaan atau volume. Aplikasi ini dapat ditemukan pada proses pelapisan elektrostatis dan presipitator elektrostatis (Afshari, 2020). Pelapisan elektrostatis digunakan dalam industri untuk memberikan lapisan cat atau bubuk secara merata di permukaan, memastikan hasil akhir yang konsisten dan berkualitas tinggi. Presipitator elektrostatis digunakan dalam pembangkit listrik untuk menghilangkan partikel dari gas buang, berkontribusi pada udara yang lebih bersih dan perlindungan lingkungan.

Membandingkan aplikasi pengisian daya diskrit dan kontinu mengungkap berbagai keuntungan dan tantangan yang berbeda terkait dengan setiap pendekatan. Penelitian yang sedang berlangsung dalam elektrostatis terus mengungkap aplikasi baru dan peningkatan dalam teknologi yang ada. Inovasi dalam ilmu material, nanoteknologi, dan rekayasa lingkungan diharapkan dapat mendorong kemajuan lebih lanjut di bidang ini.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji dan memahami aplikasi medan listrik statis yang dihasilkan oleh muatan diskrit dan muatan kontinu dalam berbagai teknologi modern. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi prinsip-prinsip dasar elektrostatis, mekanisme interaksi antara muatan dan medan listrik, serta implikasinya pada desain dan operasi beberapa perangkat. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran awal dan informasi yang valid tentang pengaplikasian medan listrik statis oleh muatan diskrit dan muatan kontinu dalam berbagai bidang teknologi.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) yaitu sebuah studi literatur yang sistematis bertujuan mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menginterpretasikan semua penelitian yang menginterpretasikan yang relevan dengan pertanyaan penelitian atau fenomena yang diinvestigasi (Pellegrino, 2024).



Gambar 1. Diagram alir metode penelitian

Dalam penelitian ini, langkah pertama yang dilakukan adalah mencari sumber informasi dengan menggunakan aplikasi Publish Or Perish (PoP), website jurnal Science Direct, Google Scholar dan Scopus. Pencarian berdasarkan kata judul “Application of Electrostatics” dan kata kunci “Review Article Physics” (Smith, 2020). Tahap ini bertujuan untuk mengumpulkan artikel-artikel yang relevan dan terindeks dalam basis data ilmiah terpercaya. Tahap berikutnya melibatkan penerapan kriteria kelayakan. Kriteria kelayakan dalam penelitian ini ditentukan dengan menggunakan kriteria inklusi. Adapun kriteria inklusi yang digunakan dalam pencarian artikel meliputi: (1) artikel yang membahas Application of Electrostatics (2) rentang tahun terbit antara 2019 hingga 2024; (3) publikasi pada jurnal yang terindeks Scopus; (4) teks lengkap dan akses terbuka; serta (5) publikasi tidak berupa makalah seminar atau konferensi.

Tinjauan literatur sistematis ini mengadopsi metode PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-analysis*) sebagaimana dijelaskan oleh (Mathew, 2021). Berdasarkan

metode PRISMA, pencarian komprehensif menghasilkan 35 artikel kemudian dianalisis dan disaring sehingga menghasilkan 21 artikel yang berkualitas dan terindeks scopus dari kata judul “Application Electrostatics” dan kata kunci “Physics”.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Medan Listrik Statis

Daerah yang masih dipengaruhi sifat kelistrikan dari muatan tertentu disebut medan listrik. Medan listrik adalah efek yang ditimbulkan oleh muatan listrik (seperti elektron, ion, atau proton) di ruang sekitarnya (Herawan, 2020). Medan listrik merupakan medan vektor yang ditimbulkan oleh partikel bermuatan. Rumus matematika untuk medan listrik dapat diturunkan melalui Hukum Coulomb, yaitu gaya diantara dua muatan :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1q_2}{r^2} \tag{1}$$

Medan listrik E dihasilkan oleh sebuah muatan titik Q pada jarak r dari muatan tersebut dan diberikan oleh :

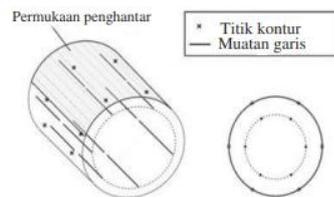
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{r^2} \tag{2}$$

Distribusi Muatan Diskrit

Distribusi muatan diskrit merupakan konsep penting dalam fisika yang berhubungan dengan bagaimana muatan atau nilai tertentu terdistribusi dalam sistem yang terpisah. Distribusi muatan diskrit sering kali digunakan untuk memodelkan medan listrik yang dihasilkan oleh muatan yang terdistribusi secara tidak merata. Distribusi muatan

diskrit mengacu pada situasi di mana muatan listrik terletak pada titik tertentu dalam ruang. Dalam analisis ini, medan listrik dihasilkan oleh muatan yang terpisah, dan dapat dihitung menggunakan hukum Coulomb.

Besaran muatan diskrit fiktif setara dengan nilai potensial konduktor dan digunakan sebagai referensi untuk menghitung medan listrik di sekitar kontur permukaan konduktor yang dipilih. Setelah nilai dan posisi muatan simulasi diketahui, potensi dan distribusi medan di wilayah tersebut dapat dihitung dengan mudah. Besar muatan diskrit fiktif ekuivalen dengan nilai potensial penghantar yang selanjutnya menjadi acuan untuk menghitung medan listrik di sekitar kontur permukaan penghantar yang dipilih (Herawan, 2020).



Gambar 2. Diskritisasi muatan pada batang penghantar (Herawan, 2020)

Medan listrik yang dihasilkan oleh muatan titik dapat dihitung dengan persamaan vektor:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} a_R \tag{3}$$

Jika ada banyak muatan pada kedudukan yang berbeda-beda, medan yang disebabkan oleh n muatan titik adalah :

$$E(r) = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 [r-r_1]^2} a_1 + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 [r-r_2]^2} a_2 + \dots + \frac{Q_n}{4\pi\epsilon_0 [r-r_n]^2} a_n \tag{4}$$

Tabel 1. Aplikasi muatan diskrit pada teknologi

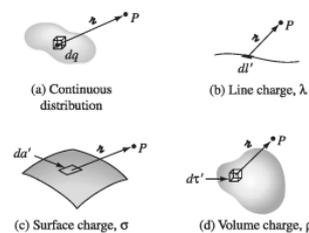
No	Aplikasi	Penulis dan Tahun	Judul	Hasil
1	Mesin Fotocopy	Anjali Tomar, Reeta R. Gupta, S.K. Mehta, Shilpee Sachar, Shweta Sharma (2021)	A chronological overview of analytical techniques in forensic identification of printing toners	Penelitian ini membahas pemeriksaan forensik dokumen fotokopi, dengan fokus pada tren dan kemajuan dalam teknik analisis selama empat dekade terakhir. Teknik yang digunakan meliputi metode spektroskopi, mikroskopis, dan kromatografi, serta pemeriksaan fisik dan optik
2	Layar Sentuh (<i>touch screen</i>)	Taylor Mason, Jeong-Hoi Koo, Young-Min Kim dan Tae-Heon Yang (2020)	Experimental Evaluation on the Effect of Electrode Configuration in Electrostatic Actuators for Increasing	Studi ini menyajikan <i>Electrostatic Resonant Actuator</i> (ERA) baru dengan dua elektroda untuk meningkatkan intensitas umpan balik getaran. Konfigurasi dua elektroda dapat secara signifikan meningkatkan intensitas getaran, yang menunjukkan potensinya

			Vibrotactile Feedback Intensity	untuk digunakan dalam aplikasi layar sentuh berukuran besar.
3	Pelapisan Elektrostatis	Eric S. Elton, Ziheng Wu, Michael Troksa, Gabe Guss (2023)	Electrostatic powder spreading for metal powder bed fusion applications	Penelitian ini menunjukkan metode <i>Electrostatic powder spreading</i> (ESPS) yang memungkinkan serbuk diendapkan tanpa kontak mekanis dengan lapisan sebelumnya. Metode ini menggunakan medan listrik antara wadah serbuk dan elektroda lawan untuk memindahkan partikel serbuk dari wadah ke lapisan serbuk. Laju pengendapan serbuk dan ketebalan lapisan dapat dikontrol oleh kekuatan medan listrik dan kecepatan pelapisan ulang. ESPS dapat menghasilkan lapisan serbuk multi-material berpola acak tanpa langkah pelepasan yang rumit dan menawarkan peluang untuk membuat komponen dengan gradien 3D pada sifat material.
4	Elektroforesis	Elena Besley (2023)	Recent Developments in the Methods and Applications of Electrostatic Theory	Analisis penerapan medan listrik menyebabkan partikel-partikel bermuatan seperti DNA, RNA, dan protein bermigrasi melalui gel atau media lain, sehingga memungkinkan pemisahan.
5	<i>Finite Element Method Magnetics</i> (FEMM)	Mihaela Osaci, Corina Daniela Cuntan dan Ioan Baciu (2022)	Solution for Using FEMM in Electrostatic Problems with Discrete Distribution Electric Charge	Penelitian ini mengembangkan model FEMM untuk mensimulasikan muatan listrik diskrit yang terbukti akurat dalam pemecahan masalah elektrostatis dengan membandingkan hasil numerik dengan solusi analitik.

Distribusi Muatan Kontinu

Distribusi muatan kontinu merujuk pada cara muatan listrik terdistribusi secara merata atau tidak merata dalam suatu volume atau area tertentu. Distribusi ini sering digunakan untuk menghitung medan listrik yang dihasilkan oleh muatan yang tidak terpisah secara diskrit, melainkan tersebar secara merata dalam suatu volume. Contoh umum dari distribusi muatan kontinu termasuk distribusi muatan pada kawat, permukaan, atau volume. Dalam hal ini, medan listrik dihitung dengan menggunakan integral untuk menjumlahkan kontribusi dari setiap elemen muatan.

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int \frac{1}{r^2} \hat{r} dq \tag{5}$$



Gambar 2. Distribusi muatan kontinu (Griffith, 2023)

Jika muatan tersebar sepanjang garis, dengan muatan per satuan panjang λ , maka $dq = \lambda dl'$ (di mana dl' adalah elemen panjang garis). Jika muatan tersebar pada permukaan, dengan muatan per satuan luas σ , maka $dq = \sigma da'$ (dimana da' adalah elemen luas pada permukaan); dan jika muatan mengisi suatu volume, dengan muatan per satuan volume ρ maka $dq = \rho dv'$ (dimana dv' adalah elemen volume).

Medan listrik garis:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda(r')}{r^2} \hat{r} dl' \quad (6)$$

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(r')}{r^2} \hat{r} d\tau' \quad (8)$$

Medan listrikluaspermukaan:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma(r')}{r^2} \hat{r} da' \quad (7)$$

Medan listrik volume:

Tabel 2. Aplikasi muatan kontinu pada teknologi

No	Aplikasi	Penulis dan Tahun	Judul	Hasil
1		Alireza Afshari, Lars Ekberg, Luboš Forejt, Jinhan Mau, Siamak Rahimi, Jeffrey Siegel, Wenhao Chen, Pawel Wargocki, Sultan Zurami and Jianshun Zhang (2020)	Electrostatic Precipitators as an Indoor Air Cleaner - A Literature Review	Penelitian ini memberikan gambaran umum tentang penggunaan Presipitator elektrostatik (ESP), metode pengujian produk, kinerja ESP yang ada dalam hal penghilangan polutan dan produk sampingannya, serta pasar ESP yang ada. ESP efektif dalam menghilangkan polutan udara dalam ruangan dengan penurunan tekanan rendah. ESP dapat digunakan sebagai unit in-duct dan standalone, sehingga menjadikannya serbaguna untuk berbagai lingkungan dalam ruangan.
2		Yen-Tang Chen, Cheng-Lung Lu, Shang-Jung Lu and Da-Sheng Lee (2023)	Electrostatic Precipitator Design Optimization for the Removal of Aerosol and Airborne Viruses	Penelitian ini mendesain ESP yang diusulkan dapat secara efektif menyaring partikel di udara seefisien respirator N95, menghilangkan kebutuhan untuk memakai masker di dalam gedung dan mencegah penyebaran penyakit menular droplet seperti COVID-19 (0,08 μm–0,16 μm).
3	Presipitator Elektrostatik (ESP) atau penyaringan udara	M. Yu. Stepkina, O. B. Kudryashova, A. A. Antonnikova & A. A. Zhirnov (2020)	Application of Electrostatic Effect for Cleansing Finely Divided Aerosol from Air	Penelitian ini menjelaskan penyelidikan eksperimental koagulasi dan pengendapan partikel aerosol dengan menginduksi medan eksternal dalam volume tertutup dengan memperhitungkan parameter teknis yang berbeda dari perangkat untuk menjebak berbagai jenis partikel yang terbagi halus. Untuk memperoleh karakteristik aerosol yang terdispersi dan konsentrasi, digunakan metode pencarian solusi dalam bentuk fungsi multiparameter dari distribusi ukuran partikel yang direalisasikan sebagai bagian dari kompleks pengukuran laser.
4		Jian Li, Qingyun Sun, Zhongxin Ping, Yihong Gao, Peiyu Chen and Fangzhi Huang (2022)	Electric Field-Driven Air Purification Filter for High Efficiency Removal of PM _{2.5} and SO ₂ : Local Electric Field Induction	Penelitian ini membahas tingkat penghilangan PM _{2.5} oleh filter dengan dan tanpa medan listrik eksternal dapat mencapai 98,72% dan 44,41%, masing-masing, dan kapasitas penyerapan SO ₂ dapat mencapai 4,87 mol/m ² . Setelah penyaringan dan pembersihan berulang selama 10 siklus, efisiensi penghilangan polusi udara dapat dipertahankan hampir

			and External Electric Field Enhancement	stabil.
5	Microelectromechanical System (MEMS)	Abdullah Saleh Algamili , Mohd Haris Md. Khir, John Ojur Dennis, Abdelaziz Yousif Ahmed , Sami Sultan Alabsi , Saeed Salem Ba Hashwan dan Mohammed M. Junaid (2021)	A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices	Penelitian ini membahas berbagai mekanisme aktuasi dan pendeteksian yang digunakan dalam sensor MEMS. Juga membahas keunggulan dan berbagai aplikasi yang bisa digunakan sebagai penerapan sensor berbasis MEMS.
6		Ahmad Athif Mohd Faudzi, Yaser Sabzehmeidani, dan Koichi Suzumori (2020)	Application of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) as Sensors: A Review	Sebuah review jurnal yang menyajikan tinjauan atas aplikasi MEMS dalam robotika dan aplikasi industry.
7	Kapasitor	Wenting Liu, Xianzhong Sun, Xinyu Yan, Yinghui Gao, Xiong Zhang, Kai Wang dan Yanwei Ma (2024)	Review of Energy Storage Capacitor Technology	Penelitian ini menyelidiki struktur, prinsip kerja, dan karakteristik unik dari kapasitor, yang bertujuan untuk mengklarifikasi perbedaan antara kapasitor dielektrik, superkapasitor, dan kapasitor lithium-ion. Hal ini digunakan untuk membuat keputusan yang tepat dalam memilih kapasitor untuk aplikasi praktis, pengetahuan yang komprehensif tentang struktur dan prinsip operasionalnya yang sangat penting.
8	Medis (Defibrilator)	Vetta, G., Della Rocca, D. G., Parlavacchio, A., Magnocavallo, M., Sorgente, A., Pannone, L., Del Monte, A., Almorad, A., Sieira, J., Marcon, L., Doundoulakis, I., Mohanty, S., Audiat, C., Nakasone, K., Bala, G., Ströker, E., Combes, S., Overeinder, I., Bianchi, S., Palmisano, P., Rossi, P., Boveda, S., La Meir, M., Natale, A., Sarkozy, A., de Asmundis, C., Chierchia, G.-	Multielectrode Catheter-Based Pulsed Electric Field Versus Cryoballoon For Atrial Fibrillation Ablation: A Systematic Review And Meta-Analysis	Pulsed Field Ablation (PFA) adalah teknologi inovatif yang baru-baru ini diadopsi untuk pengobatan fibrilasi atrium (AF). PFA menawarkan tingkat keberhasilan prosedur akut yang lebih tinggi dan profil keamanan yang lebih baik dibandingkan dengan Cryoballoon Ablation (CRYO).

B., & HRMC
Investigators.
(2024).

PEMBAHASAN

Berdasarkan temuan pada Tabel 1, penelitian difokuskan pada interaksi medan listrik dengan material bermuatan diskrit. Lima studi mengeksplorasi aplikasi medan listrik di berbagai bidang seperti fotocopy forensik, layar sentuh, manufaktur, dan bioteknologi. Tomar dkk. (2021) mengembangkan metode forensik dokumen fotokopi menggunakan spektroskopi dan mikroskopis untuk analisis material secara akurat. Mason dkk. (2020) meningkatkan teknologi layar sentuh dengan memperkuat umpan balik getaran melalui medan listrik, menciptakan pengalaman pengguna yang lebih baik pada perangkat besar. Penelitian ini menunjukkan potensi besar medan listrik dalam inovasi teknologi modern.

Elton, dkk (2023), meneliti tentang pelapisan elektrostatis yang berfokus pada pengembangan metode pelapisan serbuk tanpa kontak mekanis. Metode *Electrostatic Powder Spreading* (EPS) menawarkan fleksibilitas yang tinggi dalam pembuatan komponen dengan sifat material yang kompleks dan terkontrol. Penggunaan medan listrik untuk memindahkan partikel serbuk menunjukkan bagaimana interaksi listrik dapat dimanfaatkan untuk mengontrol sifat material secara presisi.

Osaci, dkk (2022), meneliti tentang FEMM yang berfokus pada pengembangan model simulasi untuk masalah elektrostatis. Model FEMM dapat digunakan untuk merancang dan mengoptimalkan perangkat dan system yang melibatkan medan listrik. Penelitian ini memberikan alat yang berguna untuk memahami dan memprediksi perilaku medan listrik dalam berbagai situasi.

Pada tabel 2. tentang berbagai penelitian yang berfokus pada penggunaan medan listrik untuk membersihkan udara dan mengendalikan partikel pada distribusi muatan kontinu. Semua penelitian ini berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana teknologi ini dapat diterapkan dalam berbagai bidang, mulai dari pemurnian udara dalam ruangan hingga aplikasi medis.

Salah satu teknologi yang menggunakan kekuatan elektrostatis adalah *Electrostatic Precipitator* (ESP). ESP merupakan alat penghilang partikel debu dari aliran gas/udara. ESP telah digunakan sebagai teknologi pembersih udara dalam

sistem ventilasi mekanis di bangunan tempat tinggal, karena dapat menghilangkan partikel dengan hanya menyebabkan penurunan tekanan yang rendah. *Precipitator* elektrostatis dapat berupa unit yang terpasang di dalam saluran atau berdiri sendiri. Penelitian Afshari, dkk (2020), memberikan gambaran umum yang komprehensif tentang penggunaan ESP, metode pengujian produk, kinerja ESP yang ada dalam hal penghilangan polutan dan produk sampingannya, serta pasar ESP yang ada.

Penelitian Chen, dkk (2023), ini lebih spesifik pada desain ESP yang dapat menandingi efisiensi masker N95, menunjukkan potensi besar ESP dalam mengatasi masalah polusi udara dalam ruangan, terutama selama pandemi. Lalu penelitian Stepkina, dkk (2020), ini mendalami mekanisme koagulasi dan pengendapan partikel dalam ESP, memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang proses fisik yang terjadi di dalam perangkat. Sedangkan penelitian Li, dkk (2022), menunjukkan kinerja yang sangat baik dari ESP dalam menghilangkan partikel PM2.5 dan gas SO₂, serta stabilitas performanya dalam jangka panjang.

Dari berbagai penelitian yang telah ditelaah pada tabel 2, terlihat jelas bahwa *Presipitator Elektrostatis* (ESP) memiliki potensi yang sangat besar dalam meningkatkan kualitas udara. Teknologi ini telah terbukti efektif dalam menghilangkan berbagai jenis partikulat dan gas polutan, baik dalam skala industri maupun domestik. Efisiensi yang tinggi pada ESP mampu menangkap partikel sangat halus, termasuk PM2.5, dengan efisiensi yang tinggi. Tekanan yang rendah pada operasi ESP tidak memerlukan tekanan udara yang tinggi, sehingga memerlukan tekanan udara yang tinggi, sehingga lebih hemat energi. ESP sangat fleksibel karena dapat disesuaikan untuk berbagai jenis polutan dan kondisi operasi. ESP juga ramah lingkungan karena tidak menghasilkan limbah berbahaya.

Secara sederhana, ESP bekerja dengan cara memberi muatan listrik pada partikel polutan, sehingga partikel tersebut tertarik pada elektroda yang bermuatan berlawanan dan kemudian diendapkan. Proses ini melibatkan beberapa tahap, yaitu: (1) Udara di dalam ESP diionisasi dengan menggunakan tegangan tinggi. (2) Pengisian partikel polutan yang melewati daerah ionisasi akan menangkap ion dan menjadi bermuatan. (3) Pengendapan yaitupartikel yang bermuatan akan tertarik ke elektroda kolektor yang bermuatan

berlawanan dan menempel di sana. (4) Elektroda kolektor dibersihkan secara berkala untuk mengumpulkan partikel yang telah diendapkan. Berdasarkan penelitian-penelitian di atas, dapat disimpulkan bahwa ESP merupakan teknologi yang menjanjikan untuk mengatasi masalah polusi udara karena tingkat efisiensi yang tinggi namun bertekanan rendah dan fleksibilitas dapat digunakan dalam berbagai aplikasi.

Pada bidang lainnya, penerapan medan listrik statis muatan kontinu terdapat pada sensor berbasis MEMS (*Microelectromechanical System*). MEMS adalah teknologi perangkat yang sangat kecil, yang berkisar sekitar beberapa micrometer sampai millimeter. MEMS telah menjadi substitusi yang paling dicari dan terbaik untuk aktuator dan sensor tradisional, mengingat biaya produksinya yang rendah, ukurannya yang kecil, dan kinerja yang tinggi. Dalam penelitian A Faudzi, dkk (2020), menyajikan tinjauan atas aplikasi MEMS dalam robotika dan aplikasi industri. Penelitian Algamili, dkk (2021), penelitian ini memberikan konteks yang lebih luas tentang sensor MEMS. Juga membahas keunggulan dan berbagai aplikasi yang bisa digunakan sebagai penerapan sensor berbasis MEMS.

Penerapan muatan kontinu juga terdapat pada kapasitor. Penelitian Liu, dkk (2024), menyoroti pentingnya kapasitor sebagai penyimpanan energi. Penelitian ini menyelidiki struktur, prinsip kerja, dan karakteristik unik dari tiga jenis kapasitor Hal ini digunakan untuk membuat keputusan yang tepat dalam memilih kapasitor untuk aplikasi praktis.

Penelitian G. Vetta, dkk (2024), menunjukkan aplikasi lain dari medan listrik dalam bidang medis, yaitu untuk pengobatan fibrilasi atrium. Pulsed Field Ablation (PFA) adalah teknologi inovatif yang baru-baru ini diadopsi untuk pengobatan fibrilasi atrium (AF). PFA menawarkan tingkat keberhasilan prosedur akut yang lebih tinggi dan profil keamanan yang lebih baik dibandingkan dengan Cryoballoon Ablation (CRYO).

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mengkaji aplikasi medan listrik statis oleh muatan diskrit dan kontinu dalam teknologi modern. Hasilnya menunjukkan bahwa medan listrik statis memiliki peran penting dalam berbagai bidang, seperti fotocopy forensik, layar sentuh, elektroforesis, dan pengendapan partikel. Teknologi ini menawarkan efisiensi tinggi dan akurasi signifikan, dengan potensi pengembangan lebih lanjut dalam material baru, desain inovatif, dan integrasi teknologi.

Berdasarkan hasil penelitian ini, disarankan untuk peneliti selanjutnya adalah mengembangkan model simulasi yang lebih kompleks untuk memprediksi perilaku medan listrik. Eksplorasi material baru dengan sifat dielektrik unggul dan integrasikan teknologi medan listrik statis dengan AI/IoT.. Pada bidang industrial, meningkatkan investasi dalam penelitian dan adopsi teknologi medan listrik statis untuk meningkatkan efisiensi produksi dan kualitas produk.

Peneliti juga menyarankan kepada pemerintahan untuk memberikan dukungan kebijakan untuk mendorong inovasi teknologi medan listrik statis serta tetapkan regulasi yang menjamin keamanan dan keberlanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Pascasarjana Pendidikan Fisika FKIP Universitas Sriwijaya atas fasilitas bahan review jurnal, serta rekan peneliti yang telah berkontribusi. Penelitian tentang aplikasi medan listrik statis ini tidak akan terselesaikan tanpa dukungan semua pihak

DAFTAR PUSTAKA

- Afshari, A., Ekberg, L., Forejt, L., Mo, J., Rahimi, S., Siegel, J., ... & Zhang, J. (2020). Electrostatic precipitators as an indoor air cleaner - a literature review. *Sustainability*. <https://doi.org/doi:10.3390/su12218774>
- Algamili, A.S., Khir, M.H.M., Dennis, J.O. et al. (2021). A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices. *Nanoscale Res Lett*. <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03481-7>
- A. Faudzi, Y. Sabzehmeidani, and K. Suzumori. (2020). Application of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) as Sensors: A Review. *Journal of Robotics and Mechatronics*. <https://doi.org/10.20965/jrm.2020.p0281>
- Besley, E. (2023). Recent developments in the methods and applications of electrostatic theory. *Accounts of Chemical Research*. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00068>
- Chen Y-T, Lu C-L, Lu S-J, Lee D-S. (2023). Electrostatic Precipitator Design Optimization for the Removal of Aerosol and Airborne Viruses. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15108432>
- Elton Eric, Wu Ziheng, Troksa Michael, Guss Gabe. (2023). Electrostatic powder spreading

- for metal powder bed fusion applications. Additive Manufacturing. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103330>
- Griffiths, D. J. (2013). Introduction to Electrodynamics (4th ed.). Pearson.
- Hai, J., & Lin, L. (2020). Measurement of the surface charge of ultrafine particles from laser printers and analysis of their electrostatic force. Atmospheric Environment. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.025>
- Herawan, M. R. F., Hamdani, D., & Hariyanto, N. (2020). Pemodelan dan simulasi medan listrik pada jaringan distribusi 20 kv double feeder konstruksi 3b. Jurnal Rekayasa Hijau. <https://doi.org/10.26760/jrh.v4i3.109-132>
- Liu, J., Laguta, V.V., Inzani, K., Huang, W., Das, S., Chatterjee, R., Sheridan, E., Griffin, S.M., Ardavan, & Ramesh, R. (2021). Coherent electric field manipulation of Fe³⁺ spins in PbTiO₃. Jakarta: Universitas Indonesia. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf8103>
- Li J, Sun Q, Ping Z, Gao Y, Chen P, Huang F. (2022). Electric Field-Driven Air Purification Filter for High Efficiency Removal of PM_{2.5} and SO₂: Local Electric Field Induction and External Electric Field Enhancement. Atmosphere. <https://doi.org/10.3390/atmos13081260>
- Liu, Q., Lan, Z., Guo, W., Deng, J., Peng, X., Chi, M., & Li, S. (2024). The Status of Environmental Electric Field Detection Technologies: Progress and Perspectives. Sensors. <https://doi.org/10.3390/s24175532>
- Liu, W., Sun, X., Yan, X., Gao, Y., Zhang, X., Wang, K., & Ma, Y. (2024). Review of Energy Storage Capacitor Technology. Batteries. <https://doi.org/10.3390/batteries10080271>
- Mason, T., Koo, J-H., Kim, Y-M., & Yang, T-H. (2020). Experimental Evaluation on the Effect of Electrode Configuration in Electrostatic Actuators for Increasing Vibrotactile Feedback Intensity. Applied Sciences. <https://doi.org/10.3390/app10155375>
- Mathew, P. J., et al. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. The BMJ. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Osaci, M., Cunțan, C. D., & Baci, I. (2022). Solution for using FEMM in electrostatic problems with discrete distribution electric charge. International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS). <https://doi.org/10.5815/ijmeecs.2022.04.05>
- Pellegrino, G., Gervasi, M., Angelelli, M., & Corallo, A. (2024). A Conceptual Framework for Digital Twin in Healthcare: Evidence from a Systematic Meta-Review. Information Systems Frontiers. <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10536-4>
- Ramesh, R., & Martin, L.W. (2021). Electric field control of magnetism: multiferroics and magnetoelectrics. Riv. Nuovo Cim. <https://doi.org/10.1007/s40766-021-00019-6>
- Sankaran, K. (2020). Introductory Chapter: Modern Applications of Electrostatics and Dielectrics. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92886>
- Smith, J. D., & Hasan, M. (2020). Quantitative approaches for the evaluation of implementation research studies. Psychiatry Research. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2019.112521>
- Stepkina, M.Y., Kudryashova, O.B., Antonnikova, A.A., et al. (2020). Application of Electrostatic Effect for Cleansing Finely Divided Aerosol from Air. J Eng Phys Thermophy. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02181-w>
- Takuma, T., & Techaumnat, B. (2010). Electric Field and Force on Toners in Electrophotography. In: Electric Fields in Composite Dielectrics and their Applications. Power Systems. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9392-9_7
- Tomar, A., Gupta, R. R., Mehta, S.K., Sachar, S., & Sharma, S. (2021). A chronological overview of analytical techniques in forensic identification of printing toners. Trends in Analytical Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116450>
- Vetta, G., Rocca, D.G.D., Parlavocchio, A., Magnocavallo, M., Sorgente, A., Pannone, L., Del Monte, A., Almorad, A., Sieira, J., Marcon, L., Doundoulakis, I., Mohanty, S., Audiat, C., Nakasone, K., Bala, G., Ströker, E., Combes, S., Overeinder, I., Bianchi, S., Palmisano, P., Rossi, P., Boveda, S., La Meir, M., Natale, A., Sarkozy, A., de Asmundis, C.,

& Chierchia, G.-B., HRMC Investigators.
(2024). Multielectrode catheter-based pulsed
electric field versus cryoballoon for atrial

fibrillation ablation: A systematic review and
meta-analysis. EP Europace.
<https://doi.org/10.1093/europace/euae293>