

## **CORONA DISCHARGE SEBAGAI TEKNOLOGI STERILISASI RAMAH LINGKUNGAN UNTUK PENGENDALIAN BAKTERI**

**Ahmad Faruq Abdurrahman<sup>1</sup>, Posman Manurung<sup>1</sup>, Sumardi<sup>2</sup>, Iqbal Firdaus<sup>1</sup> dan Dwi Asmi<sup>1</sup>**

1. Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brodjonegoro no. 1, Bandar Lampung, 35144, Indonesia

2. Jurusan Biologi, Fakultas MIPA, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brodjonegoro no. 1, Bandar Lampung, 35144, Indonesia

E-mail: faruqabe@fmipa.unila.ac.id

### **Abstrak**

Lucutan corona merupakan salah satu bentuk teknologi plasma dingin yang menjanjikan dalam aplikasi sterilisasi karena kemampuannya menghasilkan radikal oksigen reaktif (ROS) yang efektif dalam menonaktifkan mikroorganisme. Penelitian ini mengkaji karakteristik geometri, konfigurasi elektroda, serta parameter operasi lucutan corona dalam berbagai studi yang telah dipublikasikan. Hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi pin-to-plate lebih banyak digunakan dibandingkan surface discharge karena kemampuannya menghasilkan medan listrik terfokus dengan intensitas tinggi. Tegangan operasi berkisar antara 10–30 kV dengan frekuensi 0.5–20 kHz, tergantung pada lingkungan bakteri uji. Beberapa jenis bakteri patogen, seperti *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Serratia liquefaciens*, *Salmonella typhimurium*, *Listeria monocytogene*, dan *Escherichia coli*, terbukti dapat dinonaktifkan secara efektif oleh plasma corona. Namun, tantangan dalam optimasi parameter, efisiensi energi, dan penerapan dalam skala industri masih menjadi hambatan yang perlu diselesaikan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi teknologi ini dalam berbagai aplikasi, termasuk di bidang medis, pangan, dan pengolahan limbah.

**Kata kunci:** Plasma corona; sterilisasi; radikal oksigen reaktif, parameter operasi; inaktivasi bakteri

### **Abstract**

**[Title: Corona Discharge as an Environmentally Friendly Sterilization Technology for Bacterial Control]** Corona discharge is a promising cold plasma technology for sterilization applications due to its ability to generate reactive oxygen species (ROS) that effectively inactivate microorganisms. This study examines the geometry characteristics, electrode configurations, and operational parameters of corona discharge based on published research. The analysis shows that the pin-to-plate configuration is more commonly used than surface discharge due to its ability to generate a highly focused electric field. Operating voltages range from 10–30 kV with frequencies between 0.5–20 kHz, depending on the bacterial testing environment. Several pathogenic bacteria, including *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Serratia liquefaciens*, *Salmonella typhimurium*, *Listeria monocytogene*, and *Escherichia coli*, have been effectively inactivated by corona plasma. However, challenges remain in parameter optimization, energy efficiency, and industrial-scale implementation. Further research is needed to enhance the effectiveness and efficiency of this technology for various applications, including medical, food processing, and wastewater treatment.

**Keywords:** Corona plasma; sterilization; reactive oxygen species; operational parameters; bacterial inactivation

### **PENDAHULUAN**

Sterilisasi menjadi aspek penting dalam berbagai sektor, terutama dalam industri pangan, di mana kebersihan bahan baku sangat menentukan keamanan konsumen. Tantangan utama yang dihadapi adalah tingginya biaya

sterilisasi dan kebutuhan untuk menciptakan sistem yang mendukung *circularity* guna mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan [1].

Selain itu, dalam industri medis, sterilisasi memegang peran sentral dalam

menjaga kualitas material dan perangkat medis, mulai dari bahan yang digunakan hingga metode sterilisasi yang diterapkan. Namun, proses ini sering kali melibatkan konsumsi energi yang besar dan bahan kimia berbahaya, yang pada akhirnya berdampak pada ekonomi dan lingkungan [2].

Dalam dunia penelitian, sterilisasi tidak kalah penting, terutama dalam preparasi sampel untuk eksperimen yang membutuhkan kondisi steril guna memastikan validitas hasil [3]. Pada saat Pandemi COVID-19 melanda seluruh dunia juga menjadi pelajaran bagi kita tentang pentingnya sterilisasi sebagai langkah pencegahan dalam menjaga kesehatan global yang ramah lingkungan, tidak boros energi dan berkelanjutan [4,5].

Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk sterilisasi adalah teknologi plasma dingin, yang menawarkan keunikan tersendiri dalam aplikasinya. Pada sebuah penelitian, ditemukan bahwa dengan konfigurasi tertentu, teknologi ini tidak membunuh bakteri, namun penelitian lain menunjukkan bahwa dengan pengaturan berbeda, plasma dingin sangat efektif dalam membasmi bakteri, bahkan mampu menghilangkan kontaminasi bakteri dalam limbah cair [6,7].

Selain itu, teknologi plasma dingin juga memiliki keunggulan dalam efisiensi energi. Sebuah studi menunjukkan bahwa teknologi ini lebih hemat energi dibandingkan teknik pemanasan konvensional, seperti pada produksi isoamil asetat [8]. Keunggulan ini, yang menggabungkan sifat antibakteri dan hemat energi, menjadikan plasma dingin sangat potensial untuk aplikasi pada pengolahan bahan baku seperti buah-buahan, tanpa merusak struktur permukaan sampel [9,10]. Sifat unik ini memberikan peluang besar bagi plasma dingin untuk menjadi solusi ramah lingkungan dalam berbagai sektor.

Salah satu bentuk teknologi plasma dingin yang banyak dikembangkan adalah lucutan corona. Plasma corona dihasilkan pada tekanan atmosfer dengan menerapkan perbedaan potensial tinggi antara dua elektroda, di mana salah satunya memiliki ujung yang tajam. Akibat dari pelepasan muatan listrik, gas buang di sekitar elektroda tertipis mengalami ionisasi [11]. Dalam sebuah penelitian, uji antibakteri menggunakan lucutan corona dilakukan pada berbagai jenis bakteri secara

bersamaan. Hasilnya menunjukkan bahwa lucutan corona sangat efektif membunuh bakteri dengan tegangan sebesar 10 kV [12]. Tidak hanya terbatas pada bakteri yang dikondisikan di permukaan, studi lain menunjukkan bahwa teknologi ini juga mampu membasmi bakteri di udara hingga mencapai tingkat efikasi 100% setelah 4 jam perlakuan plasma [13]. Keberhasilan ini semakin memperkuat potensi lucutan corona sebagai teknologi sterilisasi yang inovatif dan efektif untuk berbagai aplikasi.

Dengan berbagai keunggulan yang ditawarkan, teknologi plasma dingin, khususnya lucutan corona, telah membuktikan potensinya sebagai solusi sterilisasi yang efektif, hemat energi, dan ramah lingkungan. Kemampuannya untuk membunuh bakteri pada berbagai media, mulai dari permukaan, udara, hingga limbah cair, menjadikannya teknologi yang relevan untuk diterapkan di berbagai sektor, seperti industri pangan, medis, dan pengolahan limbah. Namun, pengembangan lebih lanjut masih diperlukan untuk memahami mekanisme kerjanya secara mendalam dan mengoptimalkan efektivitasnya dalam kondisi operasional yang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan tinjauan komprehensif mengenai aplikasi lucutan corona dalam sterilisasi, dengan menyoroti efektivitasnya terhadap berbagai jenis bakteri, potensi penggunaannya, serta kontribusinya dalam mendukung teknologi sterilisasi yang berkelanjutan.

## **METODE**

Data yang digunakan dalam penelitian ini dikumpulkan melalui penelusuran literatur dari berbagai basis data ilmiah seperti Scopus dan ScienceDirect. Kata kunci yang digunakan meliputi "corona discharge," "cold plasma sterilization," "antibacterial plasma," dan istilah lain yang relevan untuk memastikan cakupan referensi yang komprehensif. Penelusuran difokuskan pada artikel yang dipublikasikan dalam kurun waktu 4 tahun terakhir untuk menjamin relevansi data dengan perkembangan teknologi terbaru.

Sumber data utama yang digunakan dalam penelitian ini mencakup artikel ilmiah berupa jurnal internasional terindeks, dan ulasan sistematis terkait aplikasi lucutan corona untuk sterilisasi. Hanya sumber yang melewati

proses peer-review yang disertakan untuk memastikan validitas dan keandalan informasi.

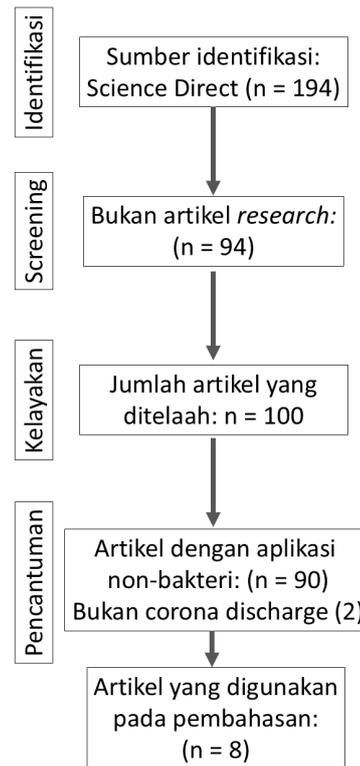
Data yang dikumpulkan dianalisis menggunakan metode analisis deskriptif. Setiap artikel yang diperoleh dikategorikan berdasarkan aspek teknologinya, seperti efektivitas antibakteri, efisiensi energi, dan potensi aplikasinya. Selanjutnya, hasil analisis disintesis untuk mengidentifikasi tren, keunggulan, dan tantangan utama dalam penerapan teknologi lucutan corona untuk sterilisasi. Hasil analisis ini akan dijadikan dasar dalam merumuskan kesimpulan dan rekomendasi penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Bibliometrik

Karakteristik bibliometrik pada artikel ini memaparkan distribusi kategori artikel berdasarkan kuartil dan negara [14]. Artikel review ini terdiri dari 21 artikel dengan 100% dari publikasi jurnal. Seluruh artikel terindeks scopus dengan rincian 19 artikel Q1 dan 2 artikel Q2 yang mengikuti kategori SJR. Artikel yang digunakan terbit antara 2022-2025 yang terdiri dari 15 negara seperti Kanada, China, Amerika Serikat, Britania Raya, Jerman dan negara-negara lainnya yang menandakan lingkup riset ini berskala internasional.

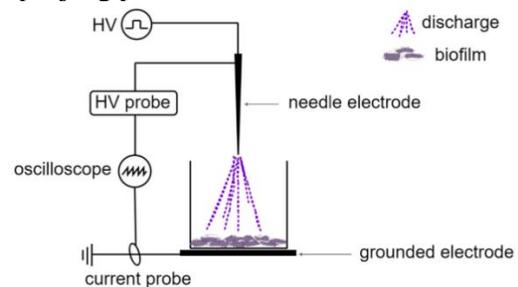
Pada hasil dan pembahasan digunakan 8 artikel dengan hasil telaah dari 194 artikel yang direduksi melalui tahapan tertentu sebagaimana Gambar 1. Dari 194 artikel direduksi menjadi 100 artikel dimana 94 artikel bukan artikel *research*. Kemudian 100 artikel tersisa dibaca dan ditelaah didapati hanya 8 artikel yang memenuhi kriteria untuk menjadi pembahasan dengan 7 artikel Q1 dan 1 artikel Q2.



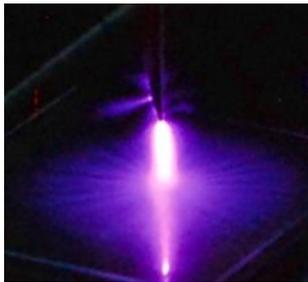
Gambar 1. Identifikasi Studi berbasis database

### Geometri dan Konfigurasi Lucutan Corona

Lucutan corona dapat dikonfigurasi dalam berbagai geometri untuk meningkatkan efektivitas sterilisasi. Berdasarkan literatur yang dikaji, mayoritas penelitian menggunakan konfigurasi pin-to-plate seperti ditunjukkan Gambar 2, sebagaimana disebutkan dalam lima dari enam sumber yang dikutip. Geometri ini terdiri dari elektroda berbentuk pin yang menghasilkan medan listrik terlokalisasi dengan intensitas tinggi, memungkinkan pembentukan plasma yang lebih terfokus dan efektif dalam menonaktifkan mikroorganisme sebagaimana Gambar 3. Sementara itu, satu studi lain menggunakan konfigurasi *surface discharge*, di mana plasma terbentuk di sepanjang permukaan dielektrik.



Gambar 2. Konfigurasi Lucutan Korona [12]



Gambar 3. Lucutan Corona [12]

Meskipun geometri ini menawarkan area perlakuan yang lebih luas, intensitas medan listriknya cenderung lebih rendah dibandingkan konfigurasi pin-to-plate. Perbedaan ini menunjukkan bahwa pemilihan geometri dalam aplikasi sterilisasi sangat bergantung pada kebutuhan spesifik, seperti cakupan area perlakuan dan intensitas medan listrik yang dihasilkan. Selain itu, variasi parameter operasi juga memainkan peran penting dalam efektivitas plasma corona, di mana besaran tegangan yang umum digunakan berkisar antara 10-30 kV dengan frekuensi 0.5-20 kHz. Faktor lain seperti suhu, kelembapan, dan kondisi lingkungan juga bervariasi tergantung pada kebutuhan spesifik serta karakteristik bakteri uji yang ditargetkan dalam penelitian.

### Jenis Material Elektroda

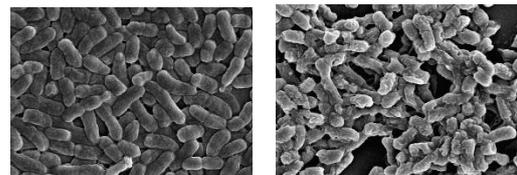
Material elektroda dalam sistem lucutan corona memiliki peran penting dalam menentukan efisiensi pembentukan plasma dan efektivitas sterilisasi. Berdasarkan literatur yang dikaji, elektroda berbentuk jarum pada konfigurasi *pin-to-plate* umumnya dibuat dari stainless steel, yang digunakan dalam beberapa penelitian. Stainless steel dipilih karena sifatnya yang tahan korosi, konduktivitas listrik yang baik, serta daya tahannya terhadap tegangan tinggi yang diperlukan untuk menghasilkan plasma. Selain itu, salah satu studi mencatat penggunaan aluminium sebagai alternatif material elektroda. Aluminium menawarkan keunggulan berupa berat yang lebih ringan dan harga yang lebih ekonomis dibandingkan stainless steel, namun cenderung memiliki ketahanan korosi yang lebih rendah.

Pemilihan material elektroda ini menunjukkan adanya pertimbangan antara ketahanan material, efisiensi plasma, serta

biaya produksi dalam pengembangan sistem lucutan corona untuk aplikasi sterilisasi.

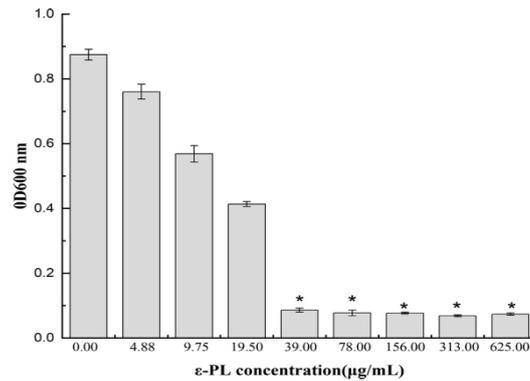
### Efek Perlakuan Corona Plasma terhadap Bakteri

Plasma corona telah terbukti efektif dalam menonaktifkan berbagai jenis bakteri patogen melalui mekanisme kompleks yang melibatkan spesies reaktif oksigen (ROS) dan efek langsung medan listrik tinggi. Berdasarkan literatur yang dikaji, bakteri seperti *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Serratia liquefaciens*, *Salmonella typhimurium*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas syringae pv. lachryman*, *Pseudomonas syringae pv. tomato*, dan *Clavibacter michiganensis subsp. michiganensis* menunjukkan tingkat inaktivasi yang tinggi setelah diberi perlakuan plasma corona seperti pada contoh bakteri *S. liquefaciens* seperti ditunjukkan Gambar 5. [12,15–19] Penurunan aktivasi bakteri terhadap waktu dapat dilihat pada Tabel 1. Dengan berbagai variasi perlakuan. Efektivitas ini disebabkan oleh peran ROS yang dihasilkan selama proses plasma, seperti *superoksida* ( $O_2^-$ ), *hidroksil* ( $OH^\bullet$ ), dan *hidrogen peroksida* ( $H_2O_2$ ), yang mampu merusak struktur dinding sel bakteri secara langsung.



Gambar 4. SEM dari bakteri *S. liquefaciens* sebelum (a) dan sesudah (b) perlakuan plasma corona [15]

Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa kebocoran molekul protein dan asam nukleat dari dalam sel turut menyertai proses inaktivasi, yang menandakan gangguan fatal pada membran sel seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Kombinasi dari efek fisik dan kimia ini menjadikan plasma corona sebagai metode sterilisasi yang menjanjikan untuk berbagai aplikasi, mulai dari industri pangan hingga pengendalian infeksi di bidang medis.



Gambar 5. Minimal inhibitory concentration (MIC) dari ε-PL terhadap aktivasi bakteri *Serratia liquefaciens* [15].

Tabel 1. Inaktivasi sel planktonik *S. liquefaciens* (rata-rata ± standar deviasi; log CFU/mL) oleh berbagai perlakuan [15].

	0 h	1.5 h	3 h	4.5 h	6 h
Control	8.96 ± 0.05 <sup>a</sup>	8.96 ± 0.06 <sup>a</sup>	8.91 ± 0.10 <sup>a</sup>	8.89 ± 0.13 <sup>a</sup>	8.86 ± 0.22 <sup>a</sup>
CDP	8.47 ± 0.11 <sup>a</sup>	8.42 ± 0.03 <sup>a</sup>	8.40 ± 0.08 <sup>a</sup>	8.36 ± 0.06 <sup>b</sup>	8.34 ± 0.07 <sup>b</sup>
MIC	8.99 ± 0.04 <sup>a</sup>	9.00 ± 0.11 <sup>b</sup>	8.81 ± 0.06 <sup>b</sup>	8.53 ± 0.05 <sup>d</sup>	8.29 ± 0.02 <sup>c</sup>
2MIC	8.95 ± 0.18 <sup>a</sup>	8.83 ± 0.04 <sup>c</sup>	8.34 ± 0.03 <sup>c</sup>	7.97 ± 0.13 <sup>e</sup>	7.41 ± 0.02 <sup>d</sup>
4MIC	9.00 ± 0.28 <sup>b</sup>	8.71 ± 0.04 <sup>d</sup>	8.23 ± 0.04 <sup>b</sup>	7.74 ± 0.05 <sup>c</sup>	6.89 ± 0.03 <sup>e</sup>
CDP plus MIC	8.50 ± 0.07 <sup>b</sup>	8.12 ± 0.04 <sup>e</sup>	7.48 ± 0.04 <sup>d</sup>	7.08 ± 0.08 <sup>f</sup>	6.46 ± 0.04 <sup>f</sup>
CDP plus 2MIC	8.52 ± 0.10 <sup>b</sup>	7.65 ± 0.06 <sup>f</sup>	6.52 ± 0.03 <sup>e</sup>	5.28 ± 0.04 <sup>g</sup>	4.09 ± 0.02 <sup>g</sup>
CDP plus 4MIC	8.48 ± 0.15 <sup>b</sup>	6.78 ± 0.04 <sup>g</sup>	5.03 ± 0.04 <sup>f</sup>	3.44 ± 0.05 <sup>h</sup>	1.71 ± 0.05 <sup>h</sup>

### Aplikasi dan Tantangan Implementasi Lucutan Corona

Lucutan corona memiliki potensi besar dalam aplikasi sterilisasi di berbagai bidang, termasuk industri pangan, medis, dan pengolahan limbah. Dalam industri pangan, teknologi ini digunakan untuk menonaktifkan mikroorganisme patogen pada permukaan bahan makanan tanpa merusak kualitas produk. Di sektor medis, plasma corona telah diterapkan untuk sterilisasi alat kesehatan, menggantikan metode konvensional yang memerlukan suhu tinggi atau bahan kimia berbahaya. Pada skala riset, sterilisasi memanfaatkan ion *negative* efektif pada pembuatan fiber karbon [20] dan bersifat tidak merusak permukaan [21]. Selain itu, dalam pengolahan limbah, teknologi ini berkontribusi terhadap degradasi mikroorganisme patogen di air dan udara, sehingga berperan dalam peningkatan sanitasi lingkungan.

Namun, implementasi luas teknologi ini masih menghadapi beberapa tantangan, termasuk optimasi parameter operasi untuk berbagai jenis bakteri, serta kebutuhan akan

standar regulasi yang jelas agar dapat diterapkan secara luas. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas teknologi ini, terutama dalam skala industri dan aplikasi komersial.

### SIMPULAN DAN SARAN

Teknologi lucutan corona telah terbukti menjadi metode sterilisasi yang efektif dalam menonaktifkan berbagai jenis bakteri patogen, termasuk *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Serratia liquefaciens*, *Salmonella typhimurium*, *Listeria monocytogene*, dan *Escherichia coli*. Keberhasilan teknologi ini bergantung pada konfigurasi geometri plasma, material elektroda, serta parameter operasi seperti tegangan (10–30 kV) dan frekuensi (0.5–20 kHz). Studi yang dianalisis menunjukkan bahwa konfigurasi *pin-to-plate* lebih umum digunakan karena kemampuannya menghasilkan medan listrik dengan intensitas tinggi, sementara konfigurasi *surface discharge* menawarkan cakupan yang lebih luas. Radikal

oksigen reaktif (ROS) yang dihasilkan oleh plasma corona berperan krusial dalam merusak dinding sel bakteri, menyebabkan kebocoran protein dan asam nukleat, yang pada akhirnya menyebabkan kematian sel.

Meskipun teknologi ini menjanjikan, tantangan dalam penerapannya masih perlu diperhatikan, seperti optimasi parameter untuk berbagai lingkungan bakteri, efisiensi energi, serta kebutuhan akan standarisasi dalam aplikasi industri. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengembangkan metode yang lebih hemat energi, meningkatkan stabilitas plasma, serta memperluas cakupan sterilisasi tanpa merusak permukaan bahan yang dirawat. Selain itu, pengembangan sistem plasma corona yang dapat diterapkan dalam skala industri, baik di bidang medis, pangan, maupun pengolahan limbah, perlu mendapat perhatian lebih lanjut agar teknologi ini dapat diimplementasikan secara luas dan berkontribusi pada solusi sterilisasi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- 1 Ingham B, Wongsirichot P, Ets K, Winterburn J. 2023. A comprehensive screening platform of wood-derived sugars for sophorolipid production: Predictive modelling, sterilization methods and analysis of feedstock composition. *Biochem. Eng. J.* **197**(May 2023): 1.
- 2 Hossain R, Ghose A, Sahajwalla V. 2025. Circular economy of the materials in the healthcare industry: Opportunities and challenges. *Resour. Conserv. Recycl.* **215**(November 2024): 1.
- 3 Bento CSA, de Sousa HC, Braga MEM, Leite Lopes D, Flora Villarreal C, Empadinhas N, Alarico S, Empadinhas N, Alarico S. 2024. Integrated processes (HPSE+scCO<sub>2</sub>) to prepare sterilized alginate-gelatine-based aerogel. *Int. J. Pharm.* **662**(July 2024): 1.
- 4 Santos-Rosales V, López-Iglesias C, Sampedro-Viana A, Alvarez-Lorenzo C, Ghazanfari S, Magariños B, García-González CA. 2022. Supercritical CO<sub>2</sub> sterilization: An effective treatment to reprocess FFP3 face masks and to reduce waste during COVID-19 pandemic. *Sci. Total Environ.* **826**(February 2022): 1.
- 5 Pokson C, Chaiyat N. 2024. Energy, economic, and environmental analysis of a novel combined cooling, heating, and power (CCHP) from infectious medical waste. *Clean. Waste Syst.* **8**(July 2024): 1.
- 6 Tahsiri Z, Hedayati S, Niakousari M. 2025. Improving the techno-functionality of wild almond protein isolate-based films by its hydrolysates and cold plasma treatment. *Food Hydrocoll. Heal.* **7**(January 2025): 1.
- 7 Panchal D, Lu Q, Saedi Z, Luk H, Yu T, Zhang X. 2025. Integrate bubble flotation and intermittent microbubble-enhanced cold plasma activation for scalable disinfection of food processing wastewater. *Sep. Purif. Technol.* **362**(January 2025): 1.
- 8 Jafari S, Keramat M, Niakousari M. 2024. Cold plasma as a Novel Technique for Production of Isoamyl Acetate at Room Temperature: Optimization and Kinetic Study. *LWT.* **215**(8): .
- 9 Gao X, Shang J, Zhang M, Yan H, Yang K, Wang Y. 2025. Mechanisms underlying the antimicrobial effects of cold plasma on *Kazachstania bulderi* in bayberry juice through transcriptomic analysis. *LWT. Journal Pr:* 117336.
- 10 Hossein pour A, Fazaeli M, Hedayati S, Hosseini SMH, Niakousari M. 2024. Effect of cold plasma on the physicochemical characteristics of granular cold water swelling maize starch. *Lwt.* **213**(November 2024): 1.
- 11 Kreft D, Marszałkowski K, Szczodrowski K. 2024. Nitrogen oxides removal from hydrogen flue gas using corona discharge in marine boilers: Application perspective. *Int. J. Hydrogen Energy.* **78**(June 2024): 984.
- 12 Lavrikova A, Janda M, Bujdakova H, Hensel K. 2025. Eradication of single- and mixed-species biofilms of *P. aeruginosa* and *S. aureus* by pulsed streamer corona discharge cold atmospheric plasma. *Sci. Total Environ.* **959**(December 2024): .
- 13 Li W, Alagumalai A, Li Z, Song H. 2024. Non-thermal plasma technology for air pollution control and bacterial deactivation Non-thermal plasma

- technology for air pollution control. *Cell Reports Phys. Sci.* **5**(7): 1.
- 14 Aboagye SO, Hunt JA, Ball G, Wei Y, Technologies M, Facility I. 2024. Portable noninvasive technologies for early breast cancer detection: A systematic review. *Comput. Biol. Med.* **182**(October): 1.
- 15 Hu S, Li X, Xiong Q. 2023. The Combination of Corona Discharge Plasma and  $\epsilon$ -Polylysine for the Inactivation of *Serratia liquefaciens*. *J. Food Prot.* **86**(7): .
- 16 Yang X, Cheng J, Sun D. 2024. Enhancing microorganism inactivation performance through optimization of plate-to-plate dielectric barrier discharge cold plasma reactors. *Food Control.* **157**(July 2023): 1.
- 17 Stancu EC, Ionita MD, Quade A, Ionita ER. 2024. Surface properties and antibacterial characteristics of polyurethane modified by corona discharge for food processing industry. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **95**(June 2024): 1.
- 18 Çetinkaya N, Pazarlar S, Paylan CI. 2022. Ozone treatment inactivates common bacteria and fungi associated with selected crop seeds and ornamental bulbs. *Saudi J. Biol. Sci.* **29**(October 2022): 1.
- 19 Sobhan A, Sher M, Muthukumarappan K, Zhou R, Wei L. 2024. Cold plasma treatment for *E. coli* inactivation and characterization for fresh food safety. *J. Agric. Food Res.* **18**(September): 1.
- 20 Hou T et al. 2025. Hygroscopic sterilization synergistic effect of UiO-66-NH<sub>2</sub> @ Potassium polyacrylate / carbon fiber negative ions electrode. *Mater. Today Sustain.* **29**(December 2024): 1.
- 21 Poulain C, Brachais C-H, Krystianiak A, Heintz O, Leonard M-L, Benbettaieb N, Debeaufort F. 2025. Changes in the structure and barrier properties induced by corona atmospheric plasma process applied on wet gelatin layers for packaging film applications. *Food Hydrocoll.* **160**(November 2024): 1.