



## Reduksi Biomassa dan Viabilitas Biofilm *Enterococcus faecalis* melalui Paparan Medan Elektromagnetik

Shafa Noer<sup>1\*</sup>, Ahmad Jahrudin<sup>2</sup>, Zakiah Fithah 'Aini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prodi Pendidikan Biologi, FMIPA, Universitas Indraprasta PGRI

<sup>2</sup>Prodi Pendidikan Fisika, FMIPA, Universitas Indraprasta PGRI

\* E-mail: shafa\_noer@yahoo.co.id

### Abstract

*Biofilm of Enterococcus faecalis is known for its high resistance to various antimicrobial agents and is a major contributor to the failure of chronic infection therapies, thus requiring alternative approaches to inhibit its formation. Electromagnetic fields (EMFs) have been reported to modulate microbial cellular activity, but the use of simple and controlled EMF circuits to suppress biofilm formation remains rarely investigated. This study aimed to evaluate the effect of an assembled EMF exposure on the biomass and viability of E. faecalis biofilms. Bacterial cultures were exposed to EMF under fixed parameters during incubation, while the control group received no treatment. Biofilm biomass was quantified using the Crystal Violet (CV) method, and cellular metabolic activity was analyzed using the MTT assay. The results showed that the control group exhibited higher CV and MTT absorbance values than the treatment group, indicating a reduction in biofilm formation and cell viability due to EMF exposure. These findings suggest that electromagnetic fields have potential as a non-chemical method for modulating E. faecalis biofilms.*

**Keywords:** electromagnetic field, *Enterococcus faecalis*, biofilm, CV, MTT.

### Abstrak

Biofilm *Enterococcus faecalis* dikenal memiliki ketahanan tinggi terhadap berbagai agen antimikroba dan menjadi salah satu penyebab utama kegagalan terapi infeksi kronis, sehingga diperlukan pendekatan alternatif untuk menghambat pembentukannya. Medan elektromagnetik (EMF) dilaporkan mampu memodulasi aktivitas sel mikroba, tetapi penggunaan rangkaian EMF sederhana dan terkontrol untuk menekan biofilm masih jarang diteliti. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh paparan EMF rakitan terhadap biomassa dan viabilitas biofilm *E. faecalis*. Kultur bakteri dipaparkan EMF dengan parameter tetap selama inkubasi, sedangkan kontrol tidak menerima perlakuan. Biomassa biofilm diukur menggunakan metode *Crystal Violet* (CV), sementara aktivitas metabolik sel dianalisis menggunakan uji MTT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai absorbansi CV dan MTT pada kelompok kontrol lebih tinggi dibandingkan perlakuan, menandakan penurunan pembentukan biofilm dan viabilitas sel akibat paparan EMF. Temuan ini mengindikasikan bahwa medan elektromagnetik berpotensi menjadi metode non-kimia untuk modulasi biofilm *E. faecalis*.

**Kata kunci:** medan elektromagnetik, *Enterococcus faecalis*, biofilm, CV, MTT.

## PENDAHULUAN

Biofilm merupakan bentuk kehidupan mikroorganisme yang terorganisasi dalam komunitas sel yang melekat pada suatu permukaan dan terbungkus oleh matriks polimer ekstraseluler (*extracellular polymeric substances*/EPS). Struktur ini memberikan perlindungan fisik dan fisiologis

bagi mikroorganisme terhadap berbagai tekanan lingkungan, termasuk respons imun inang dan paparan agen antimikroba. Akibatnya, biofilm sering dikaitkan dengan infeksi kronis dan persisten yang sulit diatasi secara klinis. Berbagai laporan menyebutkan bahwa mikroorganisme dalam biofilm dapat menunjukkan toleransi antimikroba hingga ratusan kali lebih tinggi dibandingkan sel planktonik, sehingga menjadi tantangan serius dalam penanganan infeksi modern (Hall & Mah, 2017; Lebeaux et al., 2014).

Salah satu bakteri yang dikenal memiliki kemampuan tinggi dalam membentuk biofilm adalah *Enterococcus faecalis*, bakteri Gram-positif oportunistik yang banyak ditemukan pada infeksi nosokomial dan infeksi kronis. *E. faecalis* sering dilaporkan sebagai patogen dominan pada infeksi endodontik persisten, infeksi saluran kemih, serta infeksi yang berkaitan dengan alat medis. Kemampuan bakteri ini untuk bertahan pada kondisi ekstrem, termasuk paparan antimikroba dan keterbatasan nutrisi, menjadikannya patogen yang sulit dieliminasi. Studi epidemiologis terbaru menunjukkan prevalensi global yang tinggi dari isolat klinis *E. faecalis* pembentuk biofilm, yang berkorelasi dengan meningkatnya kegagalan terapi dan kekambuhan infeksi (Tamrat et al., 2025).

Pendekatan konvensional dalam pengendalian biofilm, seperti penggunaan antibiotik dan agen kimia antimikroba, masih memiliki berbagai keterbatasan. Matriks EPS pada biofilm menghambat penetrasi antibiotik, sementara heterogenitas fisiologis sel di dalam biofilm menyebabkan sebagian sel berada dalam kondisi metabolik rendah yang kurang responsif terhadap obat. Selain itu, penggunaan antimikroba kimia secara intensif dapat memicu efek samping dan mempercepat munculnya resistensi antimikroba. Kondisi ini mendorong perlunya pengembangan strategi alternatif yang tidak bergantung sepenuhnya pada senyawa kimia, tetapi tetap efektif dalam menekan pembentukan dan viabilitas biofilm (Hall & Mah, 2017; Jiang et al., 2020).

Medan elektromagnetik (EMF) telah menarik perhatian sebagai pendekatan non-kimia yang berpotensi memodulasi aktivitas biologis mikroorganisme. Sejumlah penelitian melaporkan bahwa paparan EMF, termasuk *radiofrequency electromagnetic fields* (RF-EMF), dapat memengaruhi pertumbuhan, aktivitas metabolik, permeabilitas membran, serta sensitivitas mikroba terhadap antibiotik. Keunggulan pendekatan berbasis EMF terletak pada sifatnya yang non-invasif, relatif mudah dikontrol, dan berpotensi diaplikasikan sebagai metode alternatif atau pendukung dalam pengendalian mikroba, khususnya pada sistem biofilm yang resisten terhadap perlakuan konvensional (Beretta et al., 2019; Mohammad et al., 2022).

Meskipun demikian, penelitian mengenai pengaruh paparan EMF terhadap biofilm *Enterococcus faecalis* masih terbatas, terutama yang menggunakan sistem EMF sederhana dan terkontrol. Beberapa studi *in vitro* menunjukkan bahwa stimulasi elektromagnetik mampu menurunkan viabilitas dan jumlah sel pada biofilm *E. faecalis*, namun pendekatan tersebut umumnya menggunakan perangkat kompleks dan belum banyak mengevaluasi biomassa biofilm secara kuantitatif menggunakan metode standar. Selain itu, kajian yang menggabungkan analisis biomassa biofilm dan viabilitas sel secara simultan masih jarang dilaporkan, sehingga mekanisme dan efektivitas EMF dalam modulasi biofilm belum sepenuhnya dipahami (Aoyama et al., 2023; Panariello et al., 2021).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh paparan medan elektromagnetik rakitan terhadap biomassa dan viabilitas biofilm *Enterococcus faecalis*. Biomassa biofilm dianalisis menggunakan metode *Crystal Violet*, sedangkan viabilitas sel dievaluasi melalui uji MTT. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan pendekatan non-kimia berbasis medan elektromagnetik sebagai alternatif strategi pengendalian biofilm mikroba.

## METODE PENELITIAN

### Kultur Mikroba dan Persiapan Biofilm

Mikroorganisme yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Enterococcus faecalis*. Kultur bakteri ditumbuhkan dari stok pada media CHROMagar dan diinkubasi selama 24 jam pada suhu 37°C. Beberapa koloni kemudian *diinokulasikan* ke dalam media BHI cair dan diinkubasi kembali selama 24 jam. Kepadatan sel bakteri disesuaikan hingga mencapai konsentrasi sekitar 10<sup>8</sup> CFU/mL berdasarkan pengukuran absorbansi menggunakan spektrofotometer.

Untuk mendukung proses adhesi awal, sumur microplate 96-well dilapisi saliva steril. Saliva dikumpulkan dari donor sehat, disentrifugasi pada 8.000 rpm selama 15 menit pada suhu 4°C, kemudian disaring menggunakan membran filter 0,22 µm. Sebanyak 100 µL saliva steril dimasukkan ke setiap sumur dan diinkubasi *selama* 1 jam pada suhu 37°C. Setelah itu, saliva dibuang dan sumur dibilas dengan Phosphate Buffered Saline (PBS) sehingga tersisa lapisan tipis komponen protein saliva.

### **Paparan Medan Elektromagnetik**

Paparan medan elektromagnetik dilakukan menggunakan arus listrik dengan tegangan 12 V yang menghasilkan intensitas medan magnet sekitar 105 mG. Suspensi bakteri yang telah diinokulasikan ke dalam microplate dipaparkan medan elektromagnetik selama 30 menit. Kelompok kontrol diperlakukan dalam kondisi yang sama tanpa paparan medan elektromagnetik.

### **Pengukuran Biomassa Biofilm**

Biomassa total biofilm dianalisis menggunakan metode *Crystal Violet* (CV). Suspensi *E. faecalis* sebanyak 100 µL diinokulasikan ke dalam setiap sumur microplate yang telah dilapisi saliva, kemudian diinkubasi pada suhu 37°C untuk fase adhesi awal. Setelah perlakuan medan elektromagnetik, plate diinkubasi kembali selama 24 jam. Media kultur kemudian dibuang dan sumur dibilas dengan PBS untuk menghilangkan sel yang tidak melekat. Biofilm yang terbentuk difiksasi dengan pengeringan udara, kemudian diwarnai menggunakan larutan CV 0,5% selama 15 menit. Pewarna berlebih dibuang dan biofilm yang terikat CV dilarutkan menggunakan etanol 95%. Nilai absorbansi diukur pada panjang gelombang 600 nm menggunakan *microplate reader*. Seluruh perlakuan dilakukan dalam lima ulangan.

### **Uji Viabilitas Sel Biofilm**

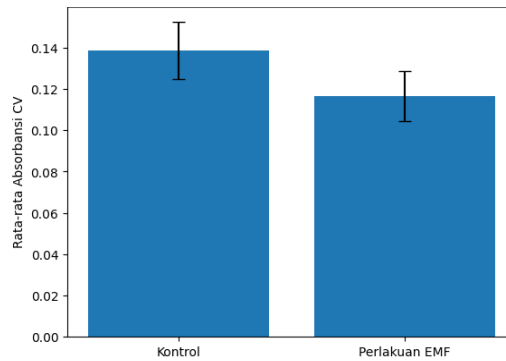
Viabilitas sel dalam biofilm dianalisis menggunakan uji MTT (3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-difeniltetrazolium bromida). Setelah pembentukan biofilm dan perlakuan medan elektromagnetik, media kultur dibuang dan sumur dibilas dengan PBS steril. Sebanyak 50 µL larutan MTT (0,5 mg/mL) ditambahkan ke setiap sumur dan diinkubasi selama 3 jam pada suhu 37°C. Reaksi dihentikan dengan penambahan 100 µL isopropanol terasamkan untuk melarutkan kristal formazan yang terbentuk. Intensitas warna diukur menggunakan *microplate reader* pada panjang gelombang 655 nm sebagai indikator aktivitas metabolik sel. Seluruh pengujian dilakukan dalam lima kali ulangan.

### **Analisis Statistik**

Data absorbansi hasil uji *Crystal Violet* dan MTT dianalisis secara statistik menggunakan perangkat lunak statistik. Nilai absorbansi dari kelompok kontrol dan kelompok perlakuan medan elektromagnetik terlebih dahulu disajikan dalam bentuk nilai rata-rata dan simpangan baku (mean ± SD). Perbedaan antara kedua kelompok dianalisis menggunakan uji *t* tidak berpasangan (*independent t-test*), dengan tingkat signifikansi ditetapkan pada nilai  $p < 0,05$ .

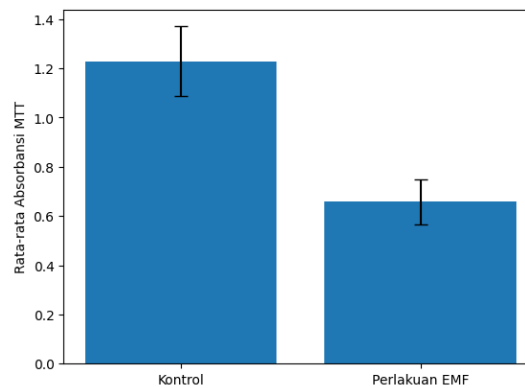
## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil pengukuran biomassa biofilm *Enterococcus faecalis* menggunakan metode *Crystal Violet* menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kelompok kontrol dan kelompok perlakuan medan elektromagnetik. Kelompok kontrol memiliki nilai rata-rata absorbansi sebesar  $0,1386 \pm 0,0138$ , sedangkan kelompok perlakuan EMF menunjukkan nilai yang lebih rendah, yaitu  $0,1166 \pm 0,0121$  (Gambar 1). Analisis statistik menggunakan uji *t* tidak berpasangan menunjukkan bahwa perbedaan tersebut signifikan secara statistik ( $p = 0,0279$ ). Penurunan nilai absorbansi CV pada kelompok perlakuan mengindikasikan berkurangnya biomassa biofilm akibat paparan medan elektromagnetik.



**Gambar 1.** Perbandingan biomassa biofilm *Enterococcus faecalis* berdasarkan uji Crystal Violet antara kelompok kontrol dan kelompok perlakuan medan elektromagnetik. Data ditampilkan sebagai rata-rata  $\pm$  simpangan baku (SD) dari lima ulangan. Tanda perbedaan signifikan ditunjukkan oleh  $p < 0,05$  (uji t tidak berpasangan).

Hasil uji MTT menunjukkan bahwa paparan medan elektromagnetik menyebabkan penurunan signifikan pada viabilitas sel biofilm *Enterococcus faecalis*. Kelompok kontrol memiliki nilai rata-rata absorbansi MTT sebesar  $1,2282 \pm 0,1420$ , sedangkan kelompok perlakuan EMF menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah, yaitu  $0,6574 \pm 0,0926$  (Gambar 2). Analisis statistik menggunakan uji t tidak berpasangan menunjukkan bahwa perbedaan tersebut sangat signifikan secara statistik ( $p < 0,001$ ). Penurunan absorbansi MTT mengindikasikan berkurangnya aktivitas metabolik sel biofilm akibat paparan medan elektromagnetik.



**Gambar 2.** Perbandingan viabilitas biofilm *Enterococcus faecalis* berdasarkan uji MTT antara kelompok kontrol dan kelompok perlakuan medan elektromagnetik. Data ditampilkan sebagai rata-rata  $\pm$  simpangan baku (SD) dari lima ulangan. Perbedaan yang sangat signifikan ditunjukkan oleh  $p < 0,001$  (uji t tidak berpasangan).

Biofilm *E. faecalis* diketahui sebagai salah satu bentuk adaptasi mikroba yang paling resisten terhadap tekanan lingkungan, termasuk antibiotik dan respons imun inang. Biofilm memungkinkan sel bakteri berada dalam kondisi metabolik heterogen, dengan perlindungan matriks ekstraseluler yang menghambat penetrasi agen antimikroba. Studi epidemiologis dan molekuler terkini menunjukkan bahwa sebagian besar isolat klinis *E. faecalis* memiliki kemampuan membentuk biofilm yang kuat dan berasosiasi dengan kegagalan terapi serta persistensi infeksi kronis, khususnya pada infeksi endodontik dan nosokomial (Tamrat et al., 2025).

Penurunan biomassa biofilm setelah paparan EMF dalam penelitian ini mengindikasikan adanya gangguan terhadap proses adhesi, maturasi, atau stabilitas matriks biofilm. Beberapa penelitian eksperimental menunjukkan bahwa medan elektromagnetik dapat memengaruhi ikatan elektrostatik antar komponen EPS, sehingga melemahkan kohesi struktur biofilm dan menurunkan densitasnya. Efek ini bersifat non-kimia dan tidak bergantung pada interaksi langsung dengan target molekuler tertentu, menjadikannya pendekatan yang menarik untuk mengatasi biofilm resisten (Aoyama et al., 2023).

Selain menghambat pembentukan biofilm, paparan EMF juga menurunkan viabilitas sel *E. faecalis* dalam biofilm sebagaimana ditunjukkan oleh penurunan signifikan absorbansi MTT. Uji MTT mencerminkan aktivitas enzim mitokondria dan metabolisme sel, sehingga penurunan nilai absorbansi menunjukkan terganggunya fungsi fisiologis sel. Beberapa laporan menyatakan bahwa EMF dapat menginduksi stres oksidatif ringan, mengubah gradien ion membran, serta memengaruhi sistem transpor elektron mikroba, yang pada akhirnya menurunkan aktivitas metabolik sel (Brunetti et al., 2023).

Temuan ini sejalan dengan penelitian lain yang melaporkan bahwa medan elektromagnetik frekuensi rendah hingga menengah mampu menghambat pertumbuhan dan metabolisme bakteri dalam bentuk biofilm tanpa harus membunuh sel secara langsung. Mekanisme ini dianggap menguntungkan karena dapat mengurangi tekanan selektif yang sering memicu munculnya resistensi baru. Oleh karena itu, EMF dipandang sebagai pendekatan modulatif, bukan bakterisidal konvensional (Haagensen et al., 2021).

Pendekatan berbasis medan elektromagnetik juga telah dikembangkan dalam konsep *electroceutical*, yaitu pemanfaatan energi listrik atau magnetik untuk mengendalikan infeksi mikroba. Beberapa studi menunjukkan bahwa EMF dapat meningkatkan sensitivitas biofilm terhadap agen antimikroba lain ketika digunakan secara kombinasi, membuka peluang aplikasi sebagai terapi adjuvan pada infeksi yang sulit diobati (Sen et al., 2020).

Beberapa studi menunjukkan bahwa efek medan elektromagnetik pada biofilm tidak hanya dipengaruhi oleh intensitasnya, tetapi juga oleh frekuensi dan durasi paparan, yang dapat menghasilkan respons berbeda pada pembentukan biofilm. Misalnya, penelitian pada *Escherichia coli*, *Klebsiella oxytoca*, dan *Pseudomonas aeruginosa* menunjukkan bahwa medan elektromagnetik non-ionik pada frekuensi yang lebih rendah (1–2,4 GHz) dapat meningkatkan pembentukan biofilm, sedangkan pada frekuensi tertentu lainnya justru menghambat perkembangan biofilm. Temuan ini menekankan bahwa medan elektromagnetik dapat bertindak sebagai stressor lingkungan yang memicu mekanisme protektif seluler, seperti peningkatan produksi matriks biofilm, atau sebaliknya menyebabkan kerusakan struktural tergantung parameter medan yang digunakan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut tentang pengaturan frekuensi dan durasi paparan sangat penting untuk mencapai efek antibiofilm yang konsisten (Bujňáková et al., 2023).

Penelitian lain juga menunjukkan bahwa medan elektromagnetik dapat mendestabilisasi komunitas mikroba dan memengaruhi komposisi serta struktur molekuler biofilm. Sebuah studi terkini terkait mitigasi mikroba dalam konteks biofouling lingkungan menunjukkan bahwa paparan medan magnetik dapat menurunkan jumlah mikroba dan kandungan EPS (*extracellular polymeric substances*) secara signifikan, sekaligus mengganggu jaringan komunitas mikroba yang berperan dalam stabilitas biofilm. Temuan ini memberikan penguatan bahwa pengaruh medan elektromagnetik tidak hanya sekadar menimbulkan gangguan mekanis, tetapi juga dapat mengubah aspek fisiologi dan interaksi antar mikroba dalam biofilm. Hal ini memperkuat potensi EMF sebagai strategi non-kimia untuk mengendalikan pembentukan biofilm (Chen et al., 2025).

Penelitian terbaru pada biofilm *Staphylococcus epidermidis* menunjukkan bahwa paparan medan elektromagnetik dapat mengganggu arsitektur biofilm dan meningkatkan penetrasi antibiotik. Meskipun spesies bakteri berbeda, prinsip dasar gangguan struktur biofilm oleh EMF mendukung temuan dalam penelitian ini dan menunjukkan potensi generalisasi pendekatan ini pada berbagai patogen pembentuk biofilm (Juncker et al., 2022). Selain itu, efek medan magnetik terhadap viabilitas mikroba juga telah dilaporkan dalam konteks pengolahan air dan lingkungan, di mana paparan medan magnet menurunkan kepadatan dan aktivitas mikroba biofilm. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh EMF terhadap mikroorganisme bersifat lintas bidang dan konsisten pada berbagai sistem biologis (Foster et al., 2025).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa medan elektromagnetik rakitan dengan parameter tertentu mampu menurunkan biomassa dan viabilitas biofilm *E. faecalis* secara signifikan. Pendekatan ini menawarkan alternatif non-kimia yang menjanjikan dalam pengendalian biofilm patogen, khususnya untuk infeksi kronis yang sulit ditangani dengan terapi konvensional. Studi lanjutan diperlukan untuk mengeksplorasi parameter EMF yang optimal serta potensi aplikasinya secara kombinatorial dengan agen antimikroba.

## PENUTUP

Penelitian ini menyimpulkan bahwa paparan medan elektromagnetik mampu menurunkan biomassa dan viabilitas biofilm *Enterococcus faecalis* secara signifikan dibandingkan dengan kelompok kontrol. Penurunan biomassa yang terdeteksi melalui uji *Crystal Violet* menunjukkan bahwa medan elektromagnetik berperan dalam menghambat pembentukan dan stabilitas struktur biofilm. Sementara itu, penurunan viabilitas sel berdasarkan uji MTT mengindikasikan adanya gangguan terhadap aktivitas metabolik sel dalam biofilm. Dengan demikian, hasil penelitian ini menjawab pertanyaan penelitian bahwa medan elektromagnetik rakitan memiliki potensi sebagai pendekatan fisik non-kimia untuk memodulasi biofilm *E. faecalis*.

Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini memberikan beberapa implikasi praktis. Bagi peneliti di bidang mikrobiologi dan biomedis, hasil ini dapat menjadi dasar untuk pengembangan studi lanjutan yang mengeksplorasi mekanisme molekuler pengaruh medan elektromagnetik terhadap sel biofilm serta optimasi parameter paparan yang lebih efektif dan aman. Bagi praktisi kesehatan, khususnya di bidang kedokteran gigi dan pengendalian infeksi, temuan ini membuka peluang pemanfaatan medan elektromagnetik sebagai terapi pendukung untuk mengendalikan biofilm patogen yang resisten terhadap agen antimikroba konvensional. Selain itu, bagi pengembang teknologi dan rekayasa biomedis, hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai referensi awal dalam perancangan perangkat berbasis medan elektromagnetik yang aplikatif dan terstandar untuk pengendalian biofilm. Penelitian lebih lanjut dengan pendekatan *in vivo* dan kombinasi dengan agen antimikroba diperlukan guna memperkuat potensi aplikatif temuan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aoyama, N., Kanematsu, H., Barry, D. M., Miura, H., Ogawa, A., Kogo, T., Kawai, R., Hagio, T., Hirai, N., Kato, T., Yoshitake, M., & Ichino, R. (2023). AC Electromagnetic Field Controls the Biofilms on the Glass Surface by *Escherichia coli* & *Staphylococcus epidermidis* Inhibition Effect. *Materials*, 16(21). <https://doi.org/10.3390/ma16217051>
- Beretta, G., Filippo, A., Lisa, M., Sabrina, P., & Bioremediation, E. Á. (2019). The effects of electric , magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation. In *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* (Vol. 18, Issue 1). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-09491-9>
- Brunetti, G., Valentini, E., Berlutti, F., Calvani, P., Raponi, F., Antonelli, G., Romeo, U., & Raponi, G. (2023). The effect of the electromagnetic field on metabolic-active bacterial biofilm experimentally- induced on titanium dental implants. *New Microbiologica*, 46(2): 202-206.
- Bujňáková D, Bucko S, Češkovič M, Kmeť V, Karahutová L. (2023). The effect of exposure to non-ionising radiofrequency field on *Escherichia coli*, *Klebsiella oxytoca* and *Pseudomonas aeruginosa* biofilms. *Environ Technol*, 44(25) : 3813-3819. doi: 10.1080/09593330.2022.2074317.
- Chen, W., Wang, J., & Xiao, Y. (2025). Magnetic field mitigation of composite fouling through microbial and interfacial disruption. *NPJ Clean Water*, 8(104) : 1–12.
- Foster, A. R., Stark, E. R., Ikner, L. A., & Pepper, I. L. (2025). Effects of magnetically treated water on the survival of bacteria in biofilms. *Biofouling*, 41(1), 79-91. <https://doi.org/10.1080/08927014.2024.2444379>
- Haagensen, J. A. J., Bache, M., Giuliani, L., & Blom, N. S. (2021). Effects of resonant electromagnetic fields on biofilm formation in *pseudomonas aeruginosa*. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/app11167760>
- Hall, C. W., & Mah, T. (2017). Molecular mechanisms of biofilm-based antibiotic resistance and tolerance in pathogenic bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*, 41, 276–301. <https://doi.org/10.1093/femsre/fux010>
- Jiang, Y., Geng, M., & Bai, L. (2020). Targeting Biofilms Therapy : Current Research Strategies and Development Hurdles. *Microorganisms*, 8, 1222. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8081222>

- Juncker, R. B., Lazazzera, B. A., & Billi, F. (2022). Pulsed Electromagnetic Fields Disrupt *Staphylococcus epidermidis* Biofilms and Enhance the Antibiofilm Efficacy of Antibiotics. *Microbiology Spectrum*, 6(10) : 1–10.
- Lebeaux, D., Ghigo, J., & Beloin, C. (2014). Biofilm-Related Infections : Bridging the Gap between Clinical. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 78(3), 510–543. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00013-14>
- Mohammad, S., Mortazavi, J., Paknahad, M., & Khandadash, S. (2022). Effects of Radiofrequency Electromagnetic Fields Emitted from Mobile Phones and Wi-Fi Router on the Growth Rate and Susceptibility of *Enterococcus faecalis* to Antibiotics. *Journal of Biomedical Physics and Engineering*, 12(4), 387–394. <https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.1268>.
- Panariello, B. H. D., Kindler, J. K., Spolnik, K. J., Ehrlich, Y., Eckert, G. J., & Duarte, S. (2021). Use of electromagnetic stimulation on an *Enterococcus faecalis* biofilm on root canal treated teeth in vitro. *Scientific Reports*, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87922-4>
- Sen, C. K., Mathew-steiner, S. S., Das, A., Sundaresan, V. B., & Roy, S. (2020). Electroceutical Management of Bacterial Biofilms and Surgical Infection. *Antioxidants & Redox Signaling*, 33(10), 713–724. <https://doi.org/10.1089/ars.2020.8086>
- Tamrat, E., Asmare, Z., Geteneh, A., Sisay, A., Getachew, E., & Kassanew, B. (2025). The global prevalence of biofilm-forming *Enterococcus faecalis* in clinical isolates : a systematic review and meta-analysis. *BMC Infectious Diseases*, 25:981. <https://doi.org/10.1186/s12879-025-11399-z>