

Analisis Regresi Linear dalam Mendeteksi Kematian Bakteri *Escherichia coli* Berdasarkan Spektroskopi Impedansi Listrik dan Spektrofotometri Pasca Stres Termal

Beatrix Violeta^{1, a} Wahyu Sugiyanto^{1, b} Argawi Kandito^{2, c}

¹ Program Studi Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Yogyakarta, Bantul, Yogyakarta 55182, Indonesia

² Program Studi Argoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas PGRI Yogyakarta, Bantul, Yogyakarta 55182, Indonesia

e-mail: ^{a*} beatrixvioleta@gmail.com, ^b wahyusugianto@upy.ac.id, dan ^c argawi@upy.ac.id

Diajukan: 15 Juli 2026; Diterima: 5 Agustus 2026; Diterbitkan: 7 September 2026

Abstrak

Analisis viabilitas bakteri *Escherichia coli* penting untuk memahami respons sel terhadap stres termal, khususnya terkait mekanisme kerusakan membran dan kematian sel. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik kematian bakteri *Escherichia coli* akibat paparan stres termal menggunakan pendekatan multimodal yang mengintegrasikan parameter elektrik dari Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) dan optik dari spektrofotometri OD₂₆₀ melalui model *Multiple Linear Regression* (MLR). Penelitian menggunakan satu kultur bakteri yang dibagi menjadi empat kelompok perlakuan suhu (37°C, 45°C, 55°C, dan 65°C) selama 5 menit. Pengukuran SIL dan OD₂₆₀ dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap kelompok perlakuan, sedangkan metode *Total Plate Count* (TPC) digunakan sebagai *ground truth*. Data dianalisis menggunakan Google Colaboratory (Google Colab) melalui regresi linear sederhana untuk menentukan frekuensi impedansi terbaik, kemudian dikembangkan menjadi model regresi linear berganda dan divalidasi menggunakan nilai koefisien determinasi (R^2) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu menurunkan populasi bakteri hidup yang diikuti oleh peningkatan nilai OD₂₆₀ dan penurunan nilai impedansi. Model parameter tunggal menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9784 untuk OD₂₆₀ dan 0,9180 untuk impedansi, sedangkan model multimodal meningkatkan performa menjadi $R^2 = 0,9936$ dengan RMSE = 0,1329. Peningkatan nilai R^2 dan rendahnya RMSE menunjukkan bahwa integrasi parameter elektrik dan optik melalui regresi multimodal meningkatkan akurasi prediksi dibandingkan model parameter tunggal dalam mengidentifikasi fase kematian bakteri secara presisi.

Kata Kunci: *Escherichia coli*; Impedansi; Pemanasan; Regresi Linear; OD₂₆₀

Abstract

An analysis of the viability of *Escherichia coli* is important for understanding cellular responses to thermal stress, particularly regarding the mechanisms of membrane damage and cell death. This study aims to analyze the characteristics of *Escherichia coli* bacterial death due to thermal stress exposure using a multimodal approach that integrates electrical parameters from Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) and optical parameters from OD₂₆₀ spectrophotometry through a *Multiple Linear Regression* (MLR) model. The study used a single bacterial culture divided into four temperature treatment groups (37°C, 45°C, 55°C, and 65°C) for 5 minutes. EIS and OD₂₆₀ measurements were performed three times for each treatment group, while the *Total Plate Count* (TPC) method was used as the ground truth. The data were analyzed using Google Colaboratory (Google Colab) via simple linear regression to determine the optimal impedance frequency, which was then developed into a multiple linear regression model and validated using the coefficient of determination (R^2) and *Root Mean Square Error* (RMSE). The results showed that increasing temperature reduced the population of viable bacteria, accompanied by an increase in OD₂₆₀ values and a decrease in impedance values. The single-parameter model yielded an R^2 value of 0.9784 for OD₂₆₀ and 0.9180 for impedance, while the multimodal model improved performance to $R^2 = 0.9936$ with RMSE = 0.1329. The increase in the R^2 value and the low RMSE indicate that integrating electrical and optical parameters through multimodal regression improves prediction accuracy compared to the single-parameter model in precisely identifying the phase of bacterial death.

Keywords: *Escherichia coli*; Impedance; Heating; Linear Regression; OD₂₆₀

PENDAHULUAN

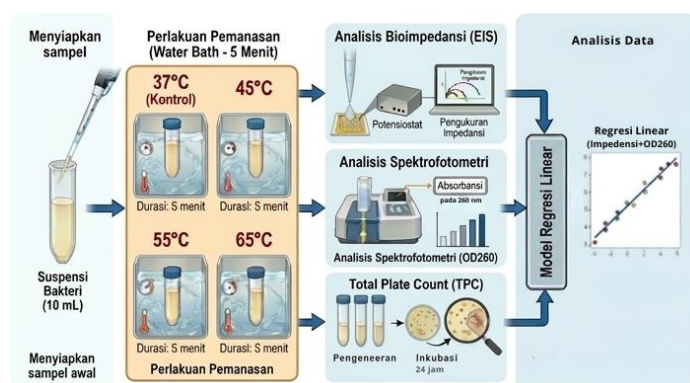
Analisis viabilitas bakteri *Escherichia coli* (*E. coli*) merupakan parameter krusial dalam memahami respon mikroorganisme terhadap cekaman termal di lingkungan. Sebagai bakteri Gram-negatif, *E. coli* memiliki struktur membran luar kompleks yang berfungsi sebagai penghalang selektif sekaligus pelindung mekanis sel. *Escherichia coli* merupakan bakteri gram negatif, berbentuk basil, panjang sekitar 2 mikrometer dan diameter 0,5 mikrometer. Bakteri ini bersifat anaerob fakultatif, biasanya dapat bergerak dan tidak membentuk spora [1]. Bakteri ini umumnya hidup pada rentang 20-40°C, optimum pada 37°C [2]. Paparan energi panas yang melebihi ambang batas fisiologis menyebabkan gangguan pada integritas lipid bilayer dan denaturasi protein membran yang bersifat sistematis. Fenomena ini memicu transisi fase seluler, di mana bakteri berpindah dari kondisi metabolisme aktif menuju fase kerusakan sub-lethal hingga inaktivasi permanen [3]. Ketidakmampuan sel dalam mempertahankan homeostasis internal akibat kerusakan membran ini menjadi titik awal terjadinya kematian seluler. Oleh karena itu, identifikasi perubahan karakteristik fisik sel selama proses transisi termal ini menjadi sangat penting untuk dipelajari secara mendalam.

Mekanisme inaktivasi termal pada *E. coli* sering kali ditandai dengan kebocoran konstituen intraseluler yang signifikan akibat pecahnya membran sitoplasma [4]. Salah satu indikator paling sensitif terhadap kerusakan ini adalah pelepasan materi genetik seperti asam nukleat yang dapat dideteksi melalui serapan cahaya pada panjang gelombang 260nm (OD₂₆₀) [5]. Secara bersamaan, hilangnya integritas membran menyebabkan perubahan pada sifat dielektrik sel yang dapat diukur melalui Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) [6]. Penelitian terdahulu umumnya memanfaatkan OD₂₆₀ maupun SIL secara terpisah untuk mengevaluasi kondisi bakteri, sehingga informasi yang diperoleh masih terbatas pada satu aspek perubahan seluler. Namun, teknik pengukuran tunggal sering kali gagal memberikan gambaran komprehensif mengenai status viabilitas sel yang sebenarnya di lapangan. Tantangan teknis muncul ketika metode standar seperti *Total Plate Count* (TPC) memerlukan waktu yang lama untuk memvalidasi apakah sel tersebut masih mampu bereplikasi atau telah mati [7]. Diperlukan sebuah pendekatan multimodal yang menggabungkan parameter optik dan elektrik untuk memetakan degradasi seluler secara *real-time*. Hingga saat ini, integrasi kedua parameter tersebut dalam satu model prediksi viabilitas bakteri masih belum banyak dilaporkan sehingga menjadi research gap dalam penelitian ini.

Dalam upaya menyatukan parameter-parameter yang kompleks tersebut, Regresi Linear digunakan sebagai instrumen statistik utama. Alasan pemilihan regresi linear adalah kemampuannya untuk menyederhanakan hubungan antara variabel elektrik (impedansi) dan variabel optik (OD₂₆₀) yang bersifat independen menjadi satu model prediksi yang koheren. Mengingat SIL mampu mendeteksi jumlah sel sekaligus perubahan konduktivitas cairan [8], dan OD₂₆₀ sensitif terhadap jumlah sel serta material organik dalam cairan, regresi linear berperan sebagai penghubung yang mengonversi respons sensorik tersebut menjadi estimasi populasi bakteri yang akurat dan mudah diinterpretasikan [9]. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya menggunakan satu parameter pengukuran, penelitian ini mengembangkan model regresi linear berganda yang mengintegrasikan parameter impedansi dan OD₂₆₀ untuk meningkatkan akurasi estimasi populasi *E. coli* selama pemanasan termal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menganalisis model regresi linear berganda berbasis parameter impedansi dan OD₂₆₀ serta mengevaluasi apakah penggabungan kedua parameter tersebut mampu memberikan akurasi prediksi populasi bakteri yang lebih tinggi dibandingkan model yang menggunakan satu parameter pengukuran. Dengan mengintegrasikan karakteristik deteksi jumlah sel dan kondisi cairan dari kedua sensor, diharapkan tercipta sebuah sistem pemantauan bakteri yang tangguh terhadap perubahan lingkungan atau perlakuan stres termal.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium dengan sistem sensor multimodal untuk menganalisis karakteristik bakteri *Escherichia coli* akibat paparan stres termal. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah suhu perlakuan (37°C, 45°C, 55°C, dan 65°C), sedangkan variabel terikat meliputi nilai impedansi elektrik, absorbansi optik (OD₂₆₀), dan *Total Plate Count* (TPC). Untuk memastikan validitas data komputasi, akuisisi data multimodal yang meliputi pengukuran Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) dan Spektrofotometri (OD₂₆₀) dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan pada setiap kelompok suhu perlakuan. Nilai yang digunakan dalam analisis merupakan nilai rata-rata dari ketiga hasil pengukuran tersebut untuk meningkatkan reliabilitas data dan meminimalkan variasi pengukuran. Sementara itu, uji viabilitas menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) dilakukan satu kali pada setiap variasi suhu dan pada setiap kelompok perlakuan menggunakan tiga cawan yang mewakili tiga tingkat pengenceran berbeda. Nilai TPC dihitung berdasarkan rata-rata nilai CFU/mL dari ketiga tingkat pengenceran tersebut dan digunakan sebagai *ground truth* dalam mengevaluasi performa model regresi yang dikembangkan. Desain penelitian dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Metodologi Penelitian

Persiapan Sample Bakteri

Tahap Persiapan dan Peremajaan Mikroorganisme Penelitian diawali dengan tahap peremajaan isolat bakteri pada media *Luria-Bertani* (LB) agar cair. Proses inokulasi dilakukan secara aseptis, yang dilanjutkan dengan inkubasi selama 24 jam pada suhu optimal untuk mencapai fase pertumbuhan logaritmik. Setelah masa inkubasi, biomassa bakteri dipanen dan disuspensikan ke dalam medium aquades steril. Sebelum perlakuan, suspensi di vortex selama 60 detik untuk memastikan homogenitas dan memecah agregat sel. Kontrol bakteri hidup menggunakan OD₂₆₀ dengan target sebesar 0,200-0,230. Penggunaan aquades bertujuan untuk meminimalkan interferensi ionik eksternal guna menjaga akurasi pembacaan pada analisis bioimpedansi. Suspensi bakteri kemudian distandarisasi dan dibagi ke dalam 4 tabung reaksi steril dengan volume masing-masing sebesar 10 mL per unit perlakuan.

Perlakuan termal dilakukan menggunakan *waterbath* untuk menjamin distribusi panas yang konstan dan stabil [10]. Sampel suspensi bakteri dipaparkan pada variasi suhu yang berbeda, yaitu 37°C sebagai kelompok kontrol, serta suhu perlakuan pada 45°C, 55°C, dan 65°C. Durasi pemanasan ditetapkan secara konstan selama 5 menit untuk seluruh variasi suhu [11]. Segera setelah proses pemanasan selesai, setiap sampel dibagi secara proporsional ke dalam tiga jalur analisis multimodal untuk karakterisasi lebih lanjut, melalui tiga parameter uji, yaitu analisis Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL), spektrofotometri, dan uji viabilitas.

Karakterisasi Elektrik (BioSMET)

Karakteristik dielektrik dari suspensi bakteri *Escherichia coli* dianalisis menggunakan BioSMET yang dimana sampel bakteri diletakkan pada permukaan sensor elektroda interdigital (IDE) [8][12]. Pengukuran dilakukan pada rentang frekuensi yang luas, mulai dari 1 Hz hingga 100 kHz. Rentang frekuensi 1 Hz–100 kHz dipilih karena mampu merepresentasikan berbagai mekanisme respon dielektrik sel bakteri terhadap medan listrik bolak-balik. Pada frekuensi rendah (1–100 Hz), respon impedansi didominasi oleh fenomena polarisasi lapisan ganda listrik (*electrical double layer*) dan perpindahan ion di sekitar membran sel. Sementara itu, pada frekuensi menengah hingga tinggi (1 kHz–100 kHz), arus listrik mulai dipengaruhi oleh karakteristik kapasitif membran dan konduktivitas medium, sehingga perubahan integritas membran akibat perlakuan termal dapat diamati secara lebih menyeluruh [13]. Oleh karena itu, pengukuran dilakukan pada rentang 1 Hz–100 kHz untuk memperoleh karakterisasi bioimpedansi yang komprehensif. Arus eksitasi yang digunakan diatur secara konstan sebesar 10 mA untuk menjaga stabilitas sinyal tanpa menginduksi kerusakan tambahan pada sampel.

Analisis Kebocoran Materi Intraseluler (Spektrofotometer UV-Vis)

Kuantifikasi kebocoran materi genetik (asam nukleat dan nukleotida) akibat kerusakan membran sel diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang spesifik 260nm [14]. Panjang gelombang 260nm dipilih karena memiliki sensitivitas tinggi terhadap absorbansi asam nukleat (DNA dan RNA) yang dilepaskan ke medium akibat kerusakan membran sel. Berbeda dengan OD₆₀₀ yang umum digunakan untuk memperkirakan kekeruhan suspensi sebagai indikator pertumbuhan bakteri, OD₂₆₀ lebih sesuai untuk mengevaluasi tingkat kebocoran materi intraseluler sebagai indikator kematian atau kerusakan sel akibat stres termal. Sebelum pemindahan ke dalam *quartz cuvette*, setiap sampel suspensi bakteri hasil perlakuan panas di vortex secara intensif selama 60 detik untuk memastikan distribusi molekul yang bocor bersifat homogen. Nilai absorbansi (OD₂₆₀) dicatat sebagai indikator tingkat degradasi integritas struktural dinding dan membran sel [15]. Peningkatan nilai absorbansi pada panjang gelombang ini diasumsikan berbanding lurus dengan pelepasan komponen sitoplasmik ke dalam medium ekstraseluler akibat stres termal.

Analisis Viabilitas Sel (Total Plate Count)

Total Plate Count (TPC) merupakan metode mikrobiologi konvensional yang digunakan untuk mengestimasi jumlah mikroorganisme hidup (*viable*) dalam suatu sampel dengan cara menumbuhkannya pada media agar padat [7]. Prinsip utama metode ini didasarkan pada asumsi bahwa setiap sel mikroba yang masih hidup dalam sampel akan tumbuh dan berkembang biak menjadi satu koloni tunggal setelah diinokulasikan pada media pertumbuhan dan diinkubasi pada suhu serta waktu yang sesuai [16]. Dalam penelitian ini, TPC ditetapkan sebagai standar acuan mutlak atau *ground truth*, karena hanya menghitung bakteri yang masih hidup dan mampu membentuk koloni, sehingga hasilnya digunakan sebagai nilai acuan untuk mengevaluasi akurasi model prediksi berbasis Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) dan spektrofotometri OD₂₆₀ pasca perlakuan termal [17].

Segera setelah perlakuan stres termal pada variasi suhu 37°C, 45°C, 55°C, dan 65°C serta proses homogenisasi melalui *vortexing*, suspensi bakteri diambil sebanyak 1 mL untuk dilakukan pengenceran bertingkat (*serial dilution*) di dalam tabung berisi 9 mL larutan akuades steril. Tingkat pengenceran yang digunakan disesuaikan dengan perkiraan jumlah bakteri hidup pada masing-masing suhu perlakuan agar diperoleh jumlah koloni dalam rentang yang dapat dihitung (30–300 koloni). Pada setiap perlakuan suhu digunakan tiga cawan petri yang masing-masing mewakili satu tingkat pengenceran yang berbeda, sesuai dengan pengenceran yang ditetapkan pada Tabel 1. Sebanyak 0,1 ml dari setiap tingkat pengenceran diinokulasikan ke dalam satu cawan petri steril, kemudian dituangkan media *Luria-Bertani* (LB) agar cair menggunakan metode *pour plate*. Seluruh cawan diinkubasi pada suhu ruang selama 24 jam dalam posisi terbalik.

Tabel 1. Pengenceran bertahap Bakteri *E-coli*

Suhu	Pengenceran	Volume Tanam	Jumlah Koloni	Perhitungan CFU/mL	Log TPC
37°	10 ⁵	0,1	96	9,6x10 ⁷	7,98
	10 ⁶	0,1	86	8,6x10 ⁸	8,93
	10 ⁷	0,1	80	8,0x10 ⁹	9,90
45°	10 ⁴	0,1	72	7,2x10 ⁶	6,86
	10 ⁵	0,1	69	6,9x10 ⁷	7,84
	10 ⁶	0,1	64	6,4x10 ⁸	8,81
55°	10 ²	0,1	60	6,0x10 ⁴	4,78
	10 ³	0,1	58	5,8x10 ⁵	5,76
	10 ⁴	0,1	54	5,4x10 ⁶	6,73
65°	10 ¹	0,1	82	8,2x10 ³	3,91
	10 ²	0,1	48	4,8x10 ⁴	4,68
	10 ³	0,1	44	4,4x10 ⁵	5,64

Konsentrasi bakteri dihitung berdasarkan persamaan yang ditunjukkan pada Persamaan (1). Nilai CFU/mL dihitung untuk masing-masing cawan, kemudian ditentukan nilai rata-rata menggunakan metode rata-rata aritmatika. Rata-rata aritmatika diperoleh dengan menjumlahkan seluruh nilai CFU/mL dari setiap cawan, kemudian dibagi dengan jumlah replikasi, sehingga diperoleh nilai yang lebih representatif terhadap jumlah mikroorganisme dalam sampel, seperti pada persamaan 2.

$$\text{CFU/mL} = \frac{\text{Jumlah Koloni}}{\text{Volume Inkulum (mL)} \times \text{Faktor Pengenceran}} \quad (1)$$

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (2)$$

Pengembangan Model Regresi Linear Multimodal

Pengembangan model prediktif dalam penelitian ini menggunakan analisis regresi linear untuk memetakan hubungan fungsional antara parameter sensor sebagai variabel independen dan populasi bakteri riil sebagai variabel dependen. Regresi linear dipilih karena kemampuannya dalam menyederhanakan interaksi kompleks antara variabel fisik yang berbeda menjadi sebuah model matematis yang koheren [18]. Dalam kerangka kerja ini, nilai Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) dan Spektrofotometri (OD₂₆₀) diintegrasikan untuk menutupi keterbatasan sensor tunggal, terutama dalam mendeteksi perubahan kondisi sel dan medium cair akibat paparan stres termal. Pengembangan model regresi linear dilakukan menggunakan platform Google Colaboratory (Google Colab) dengan bahasa pemrograman *Python*. Tahapan analisis terdiri atas tiga tahap. Tahap pertama dilakukan analisis regresi linear

sederhana antara nilai impedansi pada setiap frekuensi (1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz dan 100 kHz) dengan jumlah log sel (Log TPC) untuk mengidentifikasi frekuensi yang memiliki hubungan paling dominan terhadap populasi bakteri. Frekuensi dengan nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi dipilih sebagai variabel impedansi yang digunakan pada tahap pemodelan berikutnya. Tahap kedua dilakukan analisis regresi linear antara nilai impedansi pada frekuensi terpilih dengan nilai absorbansi OD₂₆₀ untuk mengevaluasi hubungan antara karakteristik elektrik dan optik akibat kerusakan membran sel selama perlakuan stres termal. Penentuan jumlah sel bakteri dilakukan dengan mengacu pada persamaan regresi linear [5] pada persamaan 3.

$$y = ax + b \quad (3)$$

Keterangan :

y: Nilai impedansi atau nilai *Optical Density* (OD), sesuai analisis yang dilakukan

a dan b: Konstanta yang diperoleh dari garis linear

x: Jumlah sel bakteri (CFU/mL)

Tahap ketiga dilakukan pembentukan model regresi linear berganda (*Multiple Linear Regression*) yang menggabungkan nilai impedansi pada frekuensi dominan tersebut (x_1) dan nilai absorbansi OD₂₆₀ (x_2) sebagai variabel bebas, dengan nilai Log TPC sebagai variabel terikat (Y). Seluruh analisis menggunakan nilai rata-rata hasil pengukuran SIL dan OD₂₆₀ dari tiga kali pengulangan, sedangkan nilai TPC untuk setiap perlakuan suhu diperoleh dari rata-rata nilai CFU/mL pada tiga tingkat pengenceran yang berbeda. Secara matematis, model integrasi data multimodal ini direpresentasikan melalui persamaan 4.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + e \quad (4)$$

Keterangan :

Y: log jumlah bakteri (CFU/mL)

β_0 : konstanta (intercept)

β_1 : koefisien regresi variabel impedansi

β_2 : koefisien regresi variabel OD₂₆₀

x_1 : nilai impedansi pada frekuensi 100 Hz

x_2 : nilai absorbansi OD₂₆₀

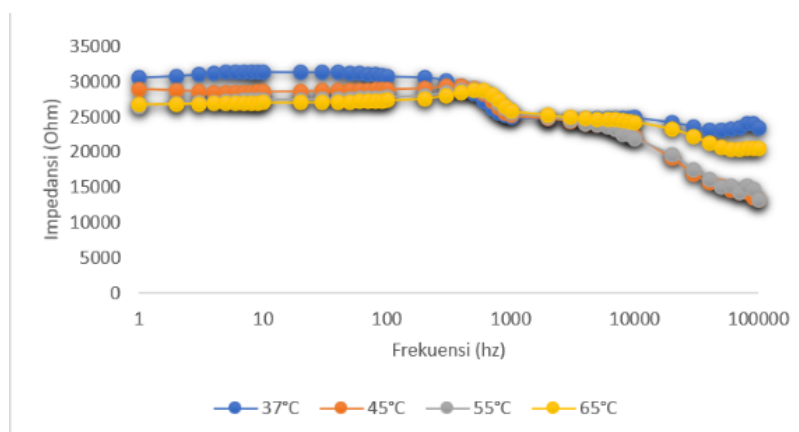
e: galat (*error*) model.

Validasi terhadap performa model dilakukan dengan membandingkan nilai prediksi model terhadap data aktual yang diperoleh dari metode *Total Plate Count* (TPC) sebagai *ground truth*. Parameter evaluasi yang digunakan meliputi koefisien determinasi (R^2) untuk mengukur sejauh mana kombinasi sensor mampu menjelaskan variasi populasi bakteri, serta *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengukur tingkat kesalahan prediksi. Model dianggap valid dan reliabel jika memiliki nilai R^2 yang mendekati 1, yang menunjukkan bahwa integrasi karakteristik dielektrik dan optik sel mampu memberikan estimasi jumlah bakteri secara presisi meskipun terjadi degradasi seluler akibat panas. Selain itu, nilai RMSE yang rendah dianggap memiliki performa prediksi yang lebih baik [19].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Spektroskopi Impedansi Pemanasan Termal

Studi ini menggunakan Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) untuk mengklasifikasikan empat jenis perlakuan termal bakteri *Escherichia coli* ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Grafik Impedansi Listrik Bakteri

Karakterisasi elektrik dilakukan pada rentang frekuensi lebar, mulai dari 1 Hz hingga 100 kHz untuk mengamati respon bioimpedansi bakteri pada berbagai mekanisme polarisasi. Rentang frekuensi tersebut memungkinkan identifikasi perubahan sifat dielektrik membran sel, mulai dari fenomena polarisasi ion pada frekuensi rendah hingga respon kapasitif membran dan konduktivitas medium pada frekuensi yang lebih tinggi. Berdasarkan pengujian terhadap 4 variasi suhu 37°, 45°, 55° dan 65° teramati adanya respon elektrik yang khas terhadap stimulasi arus bolak-balik (AC). Profil impedansi pada keempat perlakuan termal menunjukkan tren yang serupa. Impedansi menggabungkan efek hambatan dan reaktansi, yang menggambarkan bagaimana rangkaian merespons perubahan arus dan tegangan dengan frekuensi yang bervariasi. Ketika frekuensi meningkat, nilai impedansi cenderung menurun, sedangkan pada frekuensi yang lebih rendah impedansi akan meningkat. Dengan demikian, hubungan antara impedansi dan frekuensi bersifat berbanding terbalik [20].

Grafik impedansi pada sampel kontrol (37°C) menunjukkan bahwa impedansi awal pada frekuensi rendah (1 Hz - 10 Hz) berada pada nilai tertinggi, yaitu sekitar 30.000 hingga 31.000 Ohm. Grafik ini menunjukkan kondisi yang relatif stabil dengan sedikit fluktuasi pada rentang frekuensi 1 Hz hingga 100 Hz, sebelum akhirnya mulai meluruh secara bertahap. Untuk sampel dengan perlakuan suhu 45°C, impedansi awalnya berada di angka yang lebih rendah, yaitu sekitar 28.000 hingga 29.000 Ohm. Grafik ini menunjukkan penurunan yang lebih awal dibandingkan sampel kontrol, terutama setelah melewati frekuensi 100 Hz. Sementara itu, pada sampel suhu 55°C dan 65°C, nilai impedansi awal menunjukkan penurunan yang lebih signifikan, berada di kisaran 26.000 Ohm. Grafik untuk kedua suhu tinggi ini menunjukkan penurunan yang konsisten di seluruh rentang frekuensi. Pada frekuensi tinggi (100 kHz), sampel 45°C dan 55°C menunjukkan nilai impedansi terendah sekitar 13.000 Ohm, sedangkan sampel 65°C juga mengalami penurunan impedansi yang signifikan dibandingkan suhu 37°C.

Perubahan impedansi yang terjadi seiring dengan meningkatnya frekuensi dan suhu ini disebabkan oleh karakteristik membran sel yang berperilaku menyerupai kapasitor [21]. Membran sel yang masih utuh (pada suhu 37°C) memiliki kemampuan untuk menyimpan dan menahan arus listrik, sehingga menghasilkan impedansi yang tinggi pada frekuensi rendah. Namun, paparan suhu yang meningkat (45°C–65°C) menyebabkan perubahan permeabilitas membran, denaturasi protein membran, serta kerusakan struktur lipid bilayer. Kerusakan tersebut meningkatkan mobilitas ion dan konduktivitas medium, sehingga arus listrik lebih mudah melewati membran sel dan menyebabkan penurunan nilai impedansi yang lebih signifikan dibandingkan kelompok kontrol.

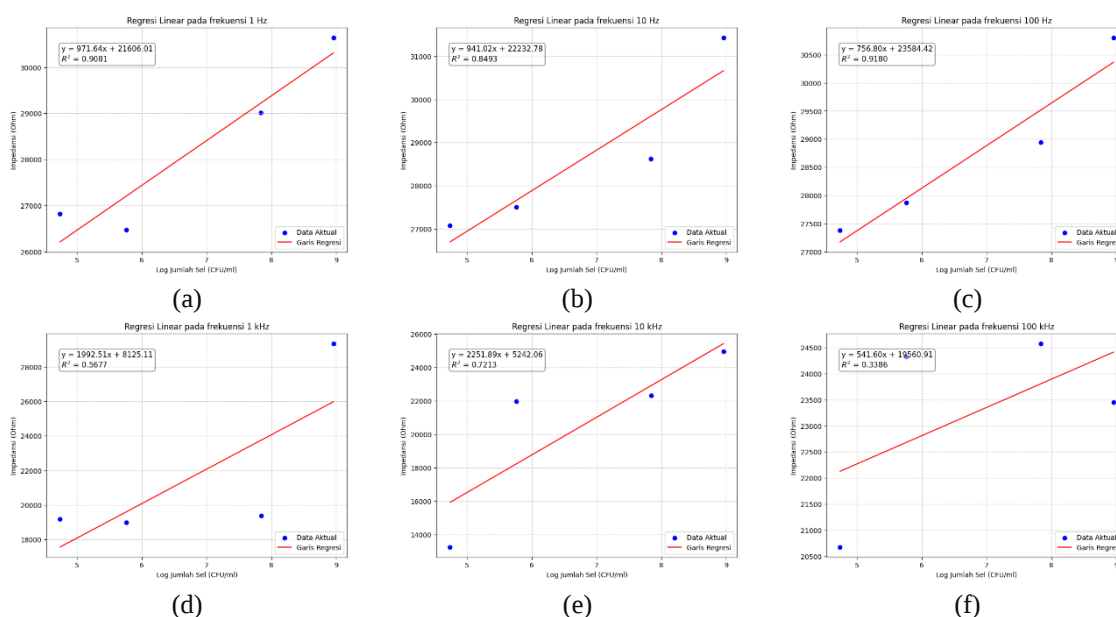
Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa peningkatan suhu menyebabkan penurunan impedansi akibat berkurangnya integritas membran sel dan meningkatnya kebocoran ion ke lingkungan. Pada bakteri Gram-negatif seperti *Escherichia coli*, kerusakan membran luar dan membran sitoplasma merupakan salah satu mekanisme utama inaktivasi termal sehingga perubahan impedansi dapat digunakan sebagai indikator awal penurunan viabilitas sel. Temuan tersebut menunjukkan bahwa Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) tidak hanya sensitif terhadap perubahan jumlah sel, tetapi juga mampu mendeteksi perubahan sifat dielektrik sel yang terjadi sebelum penurunan populasi bakteri dapat diamati melalui metode kultur konvensional. Dengan demikian, parameter impedansi dapat digunakan sebagai indikator cepat untuk memantau tingkat kerusakan sel akibat perlakuan panas.

Analisis Frekuensi Dominan dan Validasi Regresi Linear

Penentuan densitas bakteri secara tidak langsung dalam penelitian ini diawali dengan penyusunan kurva standar, yang mengorelasikan nilai absorbansi optik dengan jumlah koloni hasil metode hitung cawan. Secara teoretis, setiap frekuensi memiliki karakteristik kurva pertumbuhan yang spesifik, di mana nilai impedansi yang terbaca melalui sensor mencerminkan perubahan sifat dielektrik suspensi sel serta komposisi ionik dalam medium. Respons hambatan listrik ini akan bervariasi bergantung pada interaksi antara sinyal elektrik dengan struktur sel pada rentang frekuensi tertentu. Data tersebut kemudian diregresikan ke dalam persamaan garis linear $y = ax + b$, dengan y merepresentasikan jumlah koloni (CFU/mL) dan x sebagai besarnya nilai impedansi. Persamaan kurva standar ini berfungsi sebagai acuan validasi utama (*ground truth*) untuk mengevaluasi sejauh mana respons sensor impedansi mampu mengikuti tren perubahan populasi bakteri *Escherichia coli*. Sehingga dari data Tabel 1 menghasilkan kurva standar dengan persamaan pada Gambar 3.

Tabel 1. Data Nilai Impedansi

Temperatur	Impedansi (Ohm)					
	1 Hz	10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
37°	30641,741	31430,234	30802,819	24987,293	24955,421	23449,437
45°	29014,950	28619,076	28945,198	25244,371	22298,435	24578,030
55°	26472,213	27496,835	27873,660	25610,471	21949,767	24326,399
65°	26820,839	27074,733	27376,621	25892,197	13241,257	20675,396



Gambar 3. Validasi Regresi (a) 1 Hz, (b) 10 Hz, (c) 100 Hz, (d) 1 kHz, (e) 10 kHz, (f) 100 kHz

Berdasarkan hasil pengujian regresi linear sederhana yang dilakukan secara individual pada berbagai rentang frekuensi, yaitu 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz dan 100 kHz, ditemukan bahwa parameter impedansi pada frekuensi 100 Hz menunjukkan pengaruh yang paling dominan terhadap perubahan konsentrasi bakteri. Dominansi frekuensi rendah ini mengindikasikan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap fenomena polarisasi membran sel dan efek muatan pada antarmuka elektroda dibandingkan frekuensi tinggi. Berdasarkan hasil analisis regresi linear pada seluruh rentang frekuensi, impedansi pada frekuensi 100 Hz secara konsisten menunjukkan nilai koefisien determinasi ($R^2 = 0,9180$) yang paling tinggi dibandingkan frekuensi lainnya. Oleh karena itu, data impedansi pada frekuensi 100 Hz dipilih sebagai variabel prediktor utama untuk dikombinasikan dengan data optik dalam pengembangan model yang lebih kompleks.

Temuan ini sejalan dengan penelitian [22] yang melaporkan bahwa rentang frekuensi rendah memberikan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap perubahan sifat dielektrik sel akibat perubahan integritas membran, sehingga efektif digunakan untuk membedakan kondisi fisiologis bakteri. Sensitivitas tersebut berkaitan erat dengan fenomena dispersi alfa (*alpha-dispersion*), di mana respons impedansi didominasi oleh proses polarisasi lapisan ganda listrik (*electrical double layer*) yang terbentuk di antarmuka elektroda dan difusi ion pada permukaan membran sel bakteri [13]. Frekuensi 100 Hz memiliki kemampuan unik untuk mendeteksi fenomena kebocoran sel akibat stres termal. Saat bakteri dipaparkan pada suhu tinggi (terutama pada suhu kritis seperti 55 C dan 65 C), integritas membran sel akan rusak, yang memicu keluarnya elektrolit intraseluler (seperti ion K^+ dan protein) ke dalam medium pertumbuhan. Pelepasan ion-ion ini secara drastis meningkatkan konduktivitas medium dan menurunkan impedansi suspensi. Karena frekuensi 100 Hz beroperasi pada zona dispersi alfa yang sangat sensitif terhadap komposisi ionik di lingkungan ekstraseluler, sensor mampu menangkap sinyal penurunan hambatan ini dengan sangat presisi. Dengan demikian, nilai R^2 yang optimal pada 100 Hz bukan hanya mencerminkan deteksi jumlah sel secara fisik, tetapi juga merupakan representasi dari perubahan kimiawi medium akibat proses degradasi seluler, menjadikannya parameter yang paling reliabel untuk validasi multimodal.

Analisis Korelasi Parameter Optik dan Elektrik terhadap Populasi Bakteri

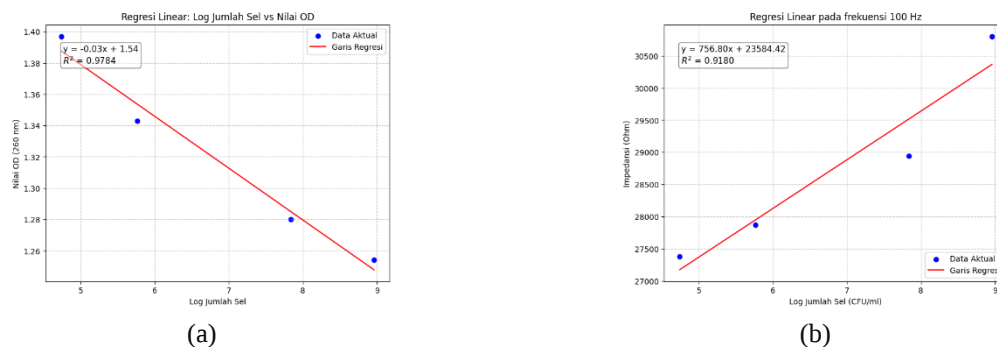
Dalam penelitian ini, estimasi jumlah sel bakteri *Escherichia coli* dikembangkan menjadi dua parameter utama, yaitu parameter optik (OD_{260}) dan parameter elektrik (impedansi pada frekuensi 100 Hz). Regresi antara nilai absorbansi terhadap logaritma jumlah sel untuk mendeteksi tingkat kebocoran materi genetik (DNA/RNA) sebagai indikator kerusakan membran sel bakteri akibat paparan suhu. Sementara itu, regresi antara nilai impedansi terhadap logaritma jumlah sel digunakan untuk menganalisis karakteristik biofisika membran sel. Berdasarkan data pada Tabel 2 dan Tabel 3 diperoleh kurva regresi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.

Tabel 2. Data Kurva Absorban dengan Jumlah Sel Bakteri *Escherichia coli*

Temperatur	Absorban (OD)	Jumlah sel (CFU/ml)	Log jumlah Sel (CFU/ml)
37°	1,256	$2,99 \times 10^9$	8,96
45°	1,275	$2,39 \times 10^8$	7,84
55°	1,343	$2,01 \times 10^6$	5,76
65°	1,395	$1,65 \times 10^5$	4,74

Tabel 3. Data Kurva Standar Impedansi 100Hz dengan Jumlah Sel Bakteri *Escherichia coli*

Temperatur	Impedansi 100 Hz	Jumlah sel (CFU/ml)	Log jumlah Sel (CFU/ml)
37°	30802,819	$2,99 \times 10^9$	8,96
45°	28945,198	$2,39 \times 10^8$	7,84
55°	27873,660	$2,01 \times 10^6$	5,76
65°	27376,621	$1,65 \times 10^5$	4,74

**Gambar 4.** (a) Absorbansi terhadap Logaritma Jumlah Sel, (b) Impedansi terhadap Logaritma Jumlah Sel

Berdasarkan integrasi data yang dilakukan, diperoleh dua persamaan regresi linear yang menunjukkan perbedaan arah tren signifikan antara kedua parameter terhadap populasi bakteri. Pada grafik (a) Hasil OD_{260} , diperoleh nilai $R^2 = 0,9784$ dengan persamaan regresi $y = -0,03x + 1,54$. Grafik ini menunjukkan korelasi negatif (tren menurun), di mana semakin rendah populasi sel hidup (y), nilai absorbansi justru meningkat tajam. Secara biofisika, fenomena ini dijelaskan melalui mekanisme stres termal yang memicu lisis sel dan pelepasan materi genetik (DNA/RNA) ke medium eksternal [23]. Karena nukleotida secara spesifik menyerap cahaya ultraviolet pada panjang gelombang 260nm, maka peningkatan nilai OD_{260} menjadi indikator biokimia yang akurat atas kerusakan membran sel dan kematian bakteri. Hasil ini sejalan dengan penelitian [24] yang melaporkan bahwa peningkatan nilai OD_{260} berkorelasi dengan meningkatnya pelepasan DNA dan RNA akibat kerusakan membran sel selama proses inaktivasi termal. Dengan demikian, OD_{260} dapat digunakan sebagai indikator kebocoran materi intraseluler sebelum penurunan viabilitas terkonfirmasi melalui metode kultur.

Sebaliknya, pada grafik (b) Hasil Impedansi, diperoleh nilai $R^2 = 0,9180$ dengan persamaan regresi $y = 756,80x + 23584,42$. Berbeda dengan parameter optik, impedansi menunjukkan korelasi positif (tren meningkat) yang selaras dengan jumlah populasi bakteri. Kondisi sel yang rendah (mati/rusak) diikuti oleh penurunan nilai impedansi yang signifikan. Hal ini berkaitan erat dengan fenomena dispersi beta (*beta-dispersion*) [25]. Dalam kondisi fisiologis normal, membran sel bakteri yang utuh bersifat semi-permeabel dan bertindak sebagai kapasitor biologis yang menghambat arus listrik (impedansi tinggi). Namun, paparan suhu tinggi (45°C hingga 65°C) menyebabkan denaturasi protein membran dan pencairan lipid, sehingga membran kehilangan integritasnya. Kerusakan ini memicu kebocoran ion-ion intraseluler (seperti K^+ dan Na^+) ke dalam medium, yang secara drastis meningkatkan

konduktivitas listrik. Karena konduktivitas berbanding terbalik dengan hambatan seluler, maka semakin banyak sel yang mati, semakin rendah pula nilai impedansi yang terukur [8].

Hubungan antara nilai OD₂₆₀, impedansi, dan log jumlah sel menunjukkan bahwa kedua parameter memiliki karakteristik yang saling melengkapi dalam menggambarkan kondisi fisiologis bakteri. Nilai OD₂₆₀ berkorelasi negatif terhadap log jumlah sel, sehingga peningkatan absorbansi mencerminkan semakin banyaknya materi genetik yang dilepaskan akibat kerusakan membran dan kematian sel. Sebaliknya, nilai impedansi berkorelasi positif terhadap log jumlah sel, di mana semakin tinggi jumlah sel yang masih hidup maka semakin besar nilai impedansi yang terukur karena membran sel masih mampu mempertahankan sifat kapasitifnya. Perbedaan arah hubungan tersebut menunjukkan bahwa OD₂₆₀ lebih merepresentasikan perubahan biokimia akibat kebocoran materi intraseluler, sedangkan impedansi merepresentasikan perubahan biofisika yang berkaitan dengan integritas membran dan konduktivitas medium. Oleh karena itu, kedua parameter memberikan informasi yang saling melengkapi dalam memprediksi jumlah sel bakteri sehingga layak digunakan sebagai variabel independen pada model regresi linear berganda.

Integrasi kedua parameter terhadap data referensi biologis (*Total Plate Count*) menunjukkan bahwa pendekatan multimodal mampu mengatasi keterbatasan penggunaan parameter tunggal dalam mendeteksi perubahan fisiologis bakteri. OD₂₆₀ memberikan informasi mengenai kebocoran biomolekul akibat kerusakan membran, sedangkan impedansi merepresentasikan perubahan sifat dielektrik sel dan konduktivitas medium. Kombinasi kedua parameter tersebut menghasilkan validasi silang (*cross-validation*) yang lebih komprehensif terhadap proses inaktivasi bakteri, sehingga estimasi jumlah sel menjadi lebih representatif dibandingkan penggunaan parameter optik maupun elektrik secara terpisah.

Validasi Model Regresi Linear Berganda Multimodal

Tahap akhir dari penelitian ini adalah melakukan sintesis data dari dua domain fisik yang berbeda untuk membangun sebuah model prediksi yang tangguh. Penggunaan model multimodal didasarkan pada hipotesis bahwa informasi gabungan dari karakteristik dielektrik sel (elektrik) dan kerapatan biomolekul (optik) dapat meminimalkan bias yang muncul akibat variasi kondisi fisiologis bakteri pasca-stres termal. Dengan mengintegrasikan kedua parameter ini, kelemahan pada sensor Tunggal seperti sensitivitas *Optical Density* (OD) terhadap debris seluler atau sensitivitas impedansi terhadap fluktuasi ionik medium dapat saling dikompensasi melalui kerangka kerja regresi linear berganda.

Untuk meningkatkan optimasi akurasi dan keandalan dari data-data prediksi tersebut, dikembangkan model *Multiple Linear Regression* (MLR) atau regresi multimodal dengan menggabungkan data Impedansi pada frekuensi 100 Hz (x_1) dan OD₂₆₀ (x_2) sebagai variabel independen terhadap Log TPC (y) sebagai variabel dependen (data target) yang disajikan pada Tabel 4 dan menghasilkan kurva standar dengan persamaan pada Gambar 5.

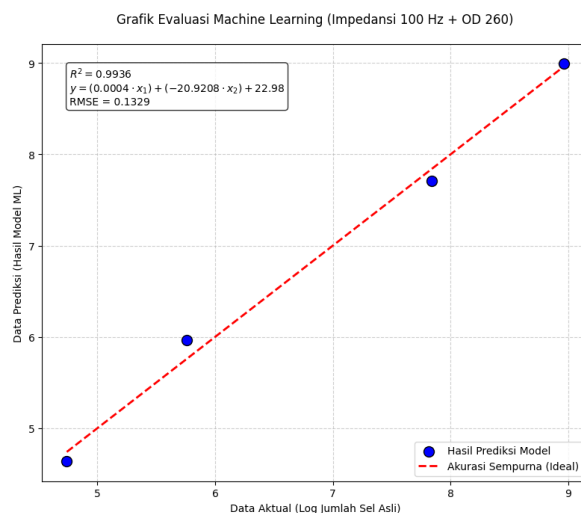
Tabel 4. Data Kurva Standar Impedansi & OD₂₆₀ dengan Jumlah Sel Bakteri *Escherichia coli*

Temperatur	Impedansi 100 Hz (x_1)	Absorban (OD) (x_2)	Log jumlah Sel (CFU/mL) (y)
37°	30802,819	1,256	8,96
45°	28945,198	1,275	7,84
55°	27873,660	1,343	5,76
65°	27376,621	1,395	4,74

Efektivitas integrasi sensor dievaluasi melalui perbandingan akurasi prediksi antara parameter tunggal dengan model *Multiple Linear Regression* (MLR). Hasil analisis menunjukkan bahwa model multimodal memiliki kemampuan terbaik dalam menjelaskan variasi jumlah bakteri dibandingkan model yang hanya menggunakan satu parameter. Model regresi berbasis absorbansi (OD₂₆₀) menghasilkan $R^2 = 0,9784$, sedangkan parameter impedansi tunggal menghasilkan $R^2 = 0,9180$. Integrasi kedua parameter tersebut meningkatkan linearitas secara superior hingga mencapai $R^2 = 0,9936$. Adapun persamaan regresi linear berganda yang dihasilkan adalah: $y = (0,0004 \cdot x_1) + (-20,9208 \cdot x_2) + 22,98$.

Secara statistik, peningkatan nilai dari model impedansi tunggal menuju model multimodal adalah sebesar 0,0152. Meskipun peningkatan angka determinasi ini terlihat kecil, penggabungan kedua domain fisik tersebut secara signifikan meningkatkan stabilitas dan kekuatan (*robustness*) model. Hal ini disebabkan oleh karakteristik sensor yang saling melengkapi; sangat efektif dalam mendeteksi kebocoran materi genetik (biokimia), namun memiliki keterbatasan dalam menganalisis kondisi fisik membran. Sebaliknya, impedansi sangat sensitif terhadap perubahan integritas dielektrik sel (biofisika). Meskipun peningkatan nilai koefisien determinasi dibandingkan model berbasis OD₂₆₀ relatif kecil, integrasi kedua parameter menghasilkan model dengan kemampuan prediksi yang lebih stabil. Hal ini menunjukkan bahwa informasi yang diperoleh dari parameter optik dan elektrik bersifat

saling melengkapi (*complementary*). Parameter OD₂₆₀ merepresentasikan kebocoran materi genetik akibat kerusakan membran sel, sedangkan impedansi merepresentasikan perubahan sifat dielektrik sel dan konduktivitas medium. Dengan menggabungkan kedua informasi tersebut, model mampu menangkap perubahan fisiologis bakteri secara lebih komprehensif dibandingkan penggunaan satu parameter saja.



Gambar 5. Data Prediksi Impedansi 100 Hz dengan OD₂₆₀

Nilai koefisien determinasi yang sangat tinggi ($R^2 = 0,9936$) menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan hampir seluruh variasi data yang diamati. Namun demikian, nilai R^2 yang sangat tinggi juga perlu diinterpretasikan secara hati-hati karena jumlah data penelitian relatif terbatas sehingga terdapat potensi *overfitting*. Oleh karena itu, evaluasi performa model juga mempertimbangkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0,1329 yang menunjukkan tingkat kesalahan prediksi yang rendah. Hasil ini sejalan dengan penelitian [26] yang menunjukkan bahwa pendekatan multimodal mampu meningkatkan akurasi prediksi dibandingkan model berbasis sensor tunggal karena setiap sensor merepresentasikan aspek fisiologis sel yang berbeda. Integrasi parameter optik dan elektrik menghasilkan model yang lebih robust terhadap variasi kondisi sampel sehingga kesalahan prediksi dapat diminimalkan. Pada penelitian ini, parameter OD₂₆₀ merepresentasikan kebocoran materi intraseluler akibat kerusakan membran, sedangkan parameter impedansi merepresentasikan perubahan karakteristik dielektrik sel. Integrasi kedua parameter tersebut menghasilkan model yang lebih robust terhadap variasi kondisi fisiologis bakteri sehingga mampu meningkatkan keandalan estimasi jumlah bakteri dibandingkan penggunaan parameter tunggal.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa paparan stres termal pada rentang suhu 37°C hingga 65°C menyebabkan penurunan viabilitas bakteri *Escherichia coli* yang ditandai dengan meningkatnya nilai absorbansi OD₂₆₀ dan menurunnya nilai impedansi listrik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kerusakan membran sel akibat stres termal memengaruhi karakteristik optik maupun elektrik bakteri secara konsisten. Pengembangan model *Multiple Linear Regression* (MLR) yang mengintegrasikan parameter impedansi 100 Hz dan OD₂₆₀ menghasilkan performa prediksi terbaik dengan nilai koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,9936$ dan RMSE sebesar 0,1329, yang menunjukkan tingkat linearitas hampir sempurna jika dibandingkan dengan model parameter tunggal impedansi ($R^2 = 0,9180$) maupun absorbansi OD₂₆₀ ($R^2 = 0,9784$). Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan multimodal mampu memberikan estimasi jumlah bakteri yang lebih akurat dan stabil dibandingkan penggunaan parameter tunggal, sehingga berpotensi menjadi metode alternatif untuk pemantauan viabilitas bakteri secara cepat. Penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan model prediksi berbasis integrasi parameter biofisika dan biokimia untuk mendeteksi viabilitas *Escherichia coli* akibat perlakuan stres termal. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan memperluas variasi suhu perlakuan, menambah jumlah sampel dan replikasi, serta melakukan validasi pada jenis bakteri lain agar kemampuan generalisasi model menjadi lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas PGRI Yogyakarta atas dukungan pendanaan yang diberikan melalui Hibah Penelitian Internal Tahun

Anggaran 2025/2026 dengan skema Kemitraan Akademik, sesuai dengan kontrak penelitian Nomor: 386/BAP-LPPM/I/2026.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. Gutsul, D. Rutherford, M. Barinkova, V. Slobodyan, and B. Rezek, "The Detection of E. coli and S. aureus on Sensors without Immobilization by Using Impedance Spectroscopy," *Eng. Proc.*, vol. 58, no. 1, pp. 1–7, 2023, doi: 10.3390/ecs-a10-16073.
- [2] A. Gant Kanegusuku, I. N. Stankovic, P. A. Cote-Hammarlof, P. H. Yong, and C. A. White-Ziegler, "A Shift to Human Body Temperature (37°C) Rapidly Reprograms Multiple Adaptive Responses in Escherichia coli That Would Facilitate Niche Survival and Colonization," *J. Bacteriol.*, vol. 203, no. 22, Oct. 2021, doi: 10.1128/JB.00363-21.
- [3] Y. Sato, K. Okano, and K. Honda, "Effects of small heat shock proteins from thermotolerant bacteria on the stress resistance of Escherichia coli to temperature, pH, and hyperosmolarity," *Extremophiles*, vol. 28, no. 1, 2024, doi: 10.1007/s00792-023-01326-y.
- [4] S. M. B. Hashemi, R. Roohi, and E. Abedi, "Thermodynamics, kinetics, and computational fluid dynamics modeling of Escherichia coli and Salmonella Typhi inactivation during the thermosonication process of celery juice," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 104, 2024, doi: 10.1016/j.ultsonch.2024.106820.
- [5] Rosmania et al, "Jurnal Penelitian Sains. Jurnal Penelitian Sains, 21(3), 163–167.,", vol. 22, no. 2, pp. 76–86, 2020.
- [6] A. Kumar, S. Mishra, R. K. Gupta, and V. Manjuladevi, "Synergistic detection of E. coli using ultrathin film of functionalized graphene with impedance spectroscopy and machine learning," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–11, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-00121-3.
- [7] N. Andayani, D. Nurhayati, and M. D. Saing, "Optimasilisasi Pertumbuhan Bakteri E. Coli dan Bacillus Subtilis pada Media Edamame Agar," *J. Pengemb. Potensi Lab.*, vol. 1, no. 1, pp. 45–53, Feb. 2022, doi: 10.25047/plp.v1i1.3095.
- [8] W. Sugianto and H. S. Wismaya, "Identifikasi Jenis Larutan Ionik Berdasarkan Data Spektroskopi Impedansi Listrik Menggunakan Unsupervised Machine learning," *Magn. Res. J. Phys. It's Appl.*, vol. 5, no. 2, pp. 2775–8583, 2025.
- [9] D. Forrest, E. A. Warman, and D. C. Grainger, "The bacterial RNA polymerase-associated CarD protein couples promoter activity to DNA supercoiling," *Nat. Commun.*, vol. 17, no. 1, 2026, doi: 10.1038/s41467-026-69038-3.
- [10] X. Wu, Y. He, J. Fu, and Y. Zhao, "Study on Electrochemical Behaviors of Heat-Treated Escherichia coli and Staphylococcus aureus," 2024, doi: 10.1021/acsomega.4c00756.
- [11] T. Milkiewicz, V. Badia, V. B. Souza, D. A. Longhi, A. C. Galvão, and W. da S. Robazza, "Modeling Salmonella spp. inactivation in chicken meat subjected to isothermal and non-isothermal temperature profiles," *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 344, 2021, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109110.
- [12] D. R. Santoso, B. Pitaloka, C. S. Widodo, and U. P. Juswono, "Low-cost, compact, and rapid bio-impedance spectrometer with real-time bode and nyquist plots," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 3, 2020, doi: 10.3390/app10030878.
- [13] J. Kastenhofer, V. Rajamanickam, J. Libiseller-Egger, and O. Spadiut, "Monitoring and control of E. coli cell integrity," *J. Biotechnol.*, vol. 329, pp. 1–12, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jbiotec.2021.01.009.
- [14] K. Naito and A. Shirai, "Disinfection mechanisms of gram-negative and gram-positive bacteria through multi-target damage under UV-C light at 222 and 254 nm," *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 275, 2026, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2026.113362.
- [15] Elisa Rinihapsari, Benaya Yamin Onesiforus, and Salsa Aten Riya, "Pengaruh Pemanasan Berulang Media Nutrient Agar terhadap Hasil Uji ALT Bakteri Staphylococcus aureus dan Escherichia coli," *Vitam. J. ilmu Kesehat. Umum*, vol. 1, no. 3, pp. 22–30, May 2024, doi: 10.61132/vitamin.v1i3.400.
- [16] L. Zhang, "Machine learning for enumeration of cell colony forming units," *Vis. Comput. Ind. Biomed. Art.*, vol. 5, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s42492-022-00122-3.
- [17] M. Simic, T. Kojic, M. Radovanovic, G. M. Stojanovic, and H. Al-Salami, "Impedance spectroscopic analysis of the interdigitated flexible sensor for bacteria detection," *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 21, pp. 12791–12798, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.3002839.
- [18] N. Roustaei, "Application and interpretation of linear-regression analysis," *Med. Hypothesis, Discov. Innov. Ophthalmol.*, vol. 13, no. 3, pp. 151–159, 2024, doi: 10.51329/mehdiophthal1506.
- [19] Y. A. Wang, Q. Huang, Z. Yao, and Y. Zhang, "On a class of linear regression methods," *J. Complex.*, vol. 82, 2024, doi: 10.1016/j.jco.2024.101826.

- [20] E. M. C. Dasmasele, W. Sugianto, and A. C. Nur'aidha, "Analysis of Bacterial Characteristics Using the Electrical Impedance Spectroscopy Method," *J. Pijar Mipa*, vol. 19, no. 5, pp. 828–832, 2024, doi: 10.29303/jpm.v19i5.7061.
- [21] T. Tang *et al.*, "Assessment of the electrical penetration of cell membranes using four-frequency impedance cytometry," *Microsystems Nanoeng.*, vol. 8, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41378-022-00405-y.
- [22] R. Gnaim, A. Golberg, J. Sheviriyov, B. Rubinsky, and C. A. González, "Detection and Differentiation of Bacteria by Electrical Bioimpedance Spectroscopy," *Biotechniques*, vol. 69, no. 1, pp. 26–36, Jul. 2020, doi: 10.2144/btn-2019-0080.
- [23] C. Ai *et al.*, "Viral and thermal lysis facilitates transmission of antibiotic resistance genes during composting," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 90, no. 8, 2024, doi: 10.1128/aem.00695-24.
- [24] S. D. Kusumawati, I. Hadiano, N. Nurlatifah, A. A. Pracoyo, and N. A. Handayani, "Perbandingan Nilai Pengukuran Kuantitatif Isolat Asam Ribonukleat (RNA) Menggunakan Spektrofotometer Nanodrop dan Mikrodrops pada Sampel Hepar Ayam (*Gallus gallus domesticus*)," *Indones. J. Lab.*, no. 3, p. 62, Nov. 2023, doi: 10.22146/ijl.v0i3.87900.
- [25] C. V. Bertelsen, J. C. Franco, G. E. Skands, M. Dimaki, and W. E. Svendsen, "Investigating the use of impedance flow cytometry for classifying the viability state of *E. Coli*," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 21, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/s20216339.
- [26] F. Zhang, S. Wang, Y. Yang, J. Jiang, and N. Tao, "Imaging Single Bacterial Cells with Electro-optical Impedance Microscopy," *ACS Sensors*, vol. 6, no. 2, pp. 348–354, Feb. 2021, doi: 10.1021/acssensors.0c00751.