

Optimasi Konsentrasi Bakteri *Escherichia coli* Berdasarkan Data Gabungan Spektrofotometri dan Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) Menggunakan Regresi Linier

Ajeng Ayu Priyaniti^{1, a}, Wahyu Sugianto^{1, b}, Argawi Kandito^{2, c}

¹ Program Studi Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Yogyakarta
Jl. IKIP PGRI I Sonosewu No.117, Daerah Istimewa Yogyakarta 55182

² Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas PGRI Yogyakarta
Jl. IKIP PGRI I Sonosewu No.117, Daerah Istimewa Yogyakarta 55182

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

Diajukan: 16 Juli 2026; Diterima: 13 Agustus 2026; Diterbitkan: 7 September 2026

Abstrak

Pengukuran konsentrasi bakteri yang cepat dan akurat adalah aspek penting dalam berbagai aplikasi bioteknologi. Penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan parameter listrik dalam bentuk Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) dan parameter optik dalam bentuk kerapatan optik (OD₆₀₀) untuk meningkatkan akurasi prediksi konsentrasi bakteri. Sampel *E. coli* ATCC 25922 disiapkan dalam tujuh tingkat konsentrasi (5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%), dan setiap konsentrasi diukur sebanyak tiga kali pengulangan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada 600 nm dan sistem SIL pada rentang frekuensi 1 Hz–100 kHz, dengan Total Plate Count (TPC) sebagai data acuan. Metode yang digunakan adalah fusi data melalui model Regresi Linier Berganda (MLR) untuk model gabungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa frekuensi 60 kHz adalah titik optimal karena berada dalam zona relaksasi beta (β -dispers), yang memberikan linearitas terbaik untuk populasi bakteri. Secara individu, OD₆₀₀ memiliki nilai R² sebesar 0,9452 dan impedansi memiliki nilai R² sebesar 0,8327. Integrasi kedua parameter meningkatkan nilai R² menjadi 0,9457, terdapat pengurangan signifikan dalam tingkat kesalahan prediksi. Model OD₆₀₀ memberikan R² = 0,9452 dan RMSE = 0,0982 Log CFU/mL, sedangkan model impedansi memberikan R² = 0,8327 dan RMSE = 1762,84 Ω . Integrasi kedua parameter menghasilkan R² = 0,9457 dan RMSE = 0,3094 Log CFU/mL, menunjukkan peningkatan stabilitas model dan penurunan kesalahan estimasi dibandingkan penggunaan impedansi tunggal. Penurunan RMSE membuktikan bahwa kombinasi data bio-optik (massa sel) dan data bio-elektrik (integritas membran) dapat mengurangi noise dan menutupi keterbatasan masing-masing sensor. Penelitian ini berhasil merumuskan persamaan regresi gabungan $y = (-2.21 \times 10^{-5} \times \text{Imp}) + (3.29 \times \text{OD}) + 8.28$, yang menghasilkan model estimasi konsentrasi bakteri yang lebih stabil dan menunjukkan kesesuaian yang baik terhadap nilai TPC sebagai data acuan.

Kata kunci: Bakteri; Spektroskopi impedansi listrik; Spektrofotometer; Regresi linier; Optimasi prediksi

Abstract

The rapid and accurate measurement of bacterial concentration is an important aspect in various biotechnological applications. This study aims to integrate electrical parameters in the form of Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) and optical parameters in the form of optical density (OD₆₀₀) to improve the accuracy of bacterial concentration predictions. *E. coli* ATCC 25922 samples were prepared at seven concentration levels (5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, and 100%), and each concentration was measured three times using a UV-Vis spectrophotometer at 600 nm and an SIL system in the frequency range of 1 Hz–100 kHz, with Total Plate Count (TPC) as the reference data. The method used is data fusion thru the Multiple Linear Regression (MLR) model for the combined model. The research results show that a frequency of 60 kHz is the optimal point because it falls within the beta relaxation zone (β -dispers), which provides the best linearity for the bacterial population. Individually, OD₆₀₀ has an R² value of 0.9452 and impedance has an R² value of 0.8327. The integration of both parameters increases the R² value to 0.9457, resulting in a significant reduction in prediction error. The OD₆₀₀ model provides R² = 0.9452 and RMSE = 0.0982 Log CFU/mL, while the impedance model provides R² = 0.8327 and RMSE = 1762.84 Ω . The integration of both parameters results in R² = 0.9457 and RMSE = 0.3094 Log CFU/mL, indicating improved model stability and reduced estimation error compared to the use of impedance alone. The decrease in RMSE proves that the combination of bio-optical data (cell mass) and bio-electrical data (membrane integrity) can reduce noise and cover the limitations of each sensor. This research successfully formulated a combined regression equation $y = (-2.21 \times 10^{-5} \times \text{Imp}) + (3.29 \times \text{OD}) + 8.28$, which produces a

more stable bacterial concentration estimation model and shows good agreement with TPC values as reference data.

Keywords: Bacteria; Bioimpedance spectroscopy; Spectrophotometry; Linear regression; Prediction optimization

PENDAHULUAN

Bakteri *Escherichia coli* (*E. coli*) adalah bakteri berbentuk batang Gram-negatif yang umumnya menghuni usus besar manusia dan hewan berdarah panas[1]. Sebagai bakteri gram-negatif, ia memiliki struktur sel yang terdiri dari membran sitoplasma, dinding sel peptidoglikan, dan membran luar[2]. Kehadiran *E. coli* dalam produk makanan berfungsi sebagai indikator adanya mikroorganisme enteropatogenik atau enterotoksigenik lain yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Bakteri ini dapat mencemari produk makanan melalui berbagai jalur, mulai dari lingkungan, pekerja, hingga proses produksi, pengemasan, dan penyimpanan yang tidak higienis[3]. Bakteri ini adalah penyebab utama penyakit yang ditularkan melalui makanan yang dapat memicu wabah. Gejala awal yang paling umum dari keracunan makanan yang disebabkan oleh bakteri ini adalah diare[4]. Dalam dunia penelitian dan pengajaran, *E. coli* sangat penting karena berfungsi sebagai organisme model yang telah dipelajari selama beberapa dekade karena pertumbuhannya yang sangat cepat dengan waktu penggandaan sekitar 20 menit dan kemudahan manipulasi genetik[5]. Metode tradisional untuk menghitung bakteri ini, yang dikenal sebagai *Total Plate Count* (TPC) atau Standard Plate Count, memiliki beberapa kekurangan signifikan, terutama waktu analisis yang sangat lambat karena memerlukan periode inkubasi selama 1 hingga 3 hari sebelum hasil dapat diperoleh[6]. Identifikasi manual memiliki tingkat akurasi yang rendah dan rentan terhadap kesalahan manusia[7]. Teknik analisis cepat berbasis sensor telah dikembangkan untuk mengatasi kelemahan metode konvensional. Spektrofotometri adalah salah satu metode optik yang paling umum digunakan karena kemudahannya dalam mengukur kepadatan sel berdasarkan hamburan cahaya (absorbansi)[8].

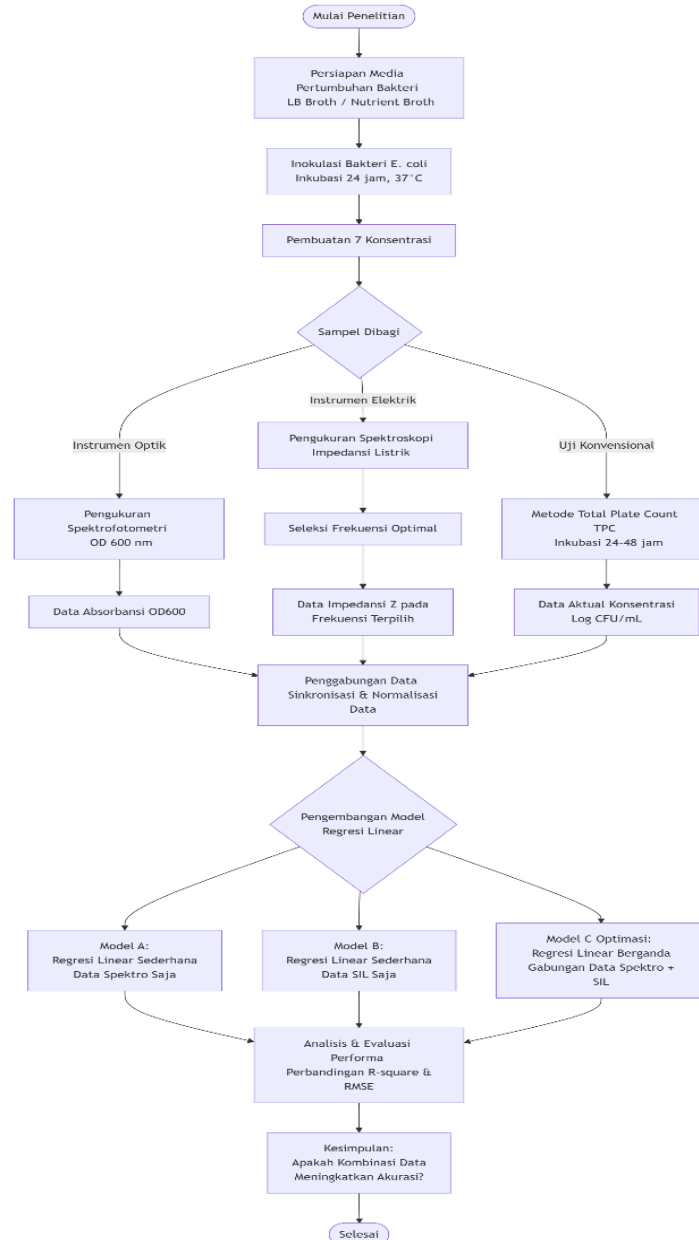
Spektroskopi Impedansi Listrik telah muncul sebagai teknik alternatif yang menjanjikan dengan memanfaatkan sifat dielektrik bakteri. *E. coli*, sebagai bakteri Gram-negatif, memiliki struktur membran sel yang kompleks yang memberikan respons listrik spesifik terhadap perubahan frekuensi. Namun, data yang dihasilkan oleh SIL memiliki dimensi tinggi dan kompleksitas yang besar, sehingga interpretasi data secara manual seringkali sulit untuk prediksi konsentrasi yang tepat[9]. Meskipun spektrofotometri OD₆₀₀ banyak digunakan untuk estimasi cepat konsentrasi bakteri, metode ini utamanya merepresentasikan kekeruhan atau massa sel sehingga kurang mampu memberikan informasi mengenai kondisi fisiologis dan integritas membran sel bakteri [8]. Di sisi lain, Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) memiliki sensitivitas terhadap sifat dielektrik dan perubahan membran sel, namun respons impedansi sangat dipengaruhi oleh frekuensi pengukuran, komposisi medium, serta kondisi elektroda sehingga interpretasi konsentrasi bakteri secara langsung masih terbatas [10]. Penelitian terdahulu umumnya mengembangkan model estimasi menggunakan satu jenis sensor saja, baik sensor optik maupun sensor impedansi, sehingga informasi biologis yang diperoleh bersifat parsial. Hingga saat ini masih terbatas penelitian yang secara khusus mengintegrasikan data SIL dan OD₆₀₀ dalam satu model regresi untuk menganalisis hubungan linear konsentrasi *Escherichia coli* dengan acuan *Total Plate Count* (TPC). Keterbatasan tersebut menjadi dasar penelitian ini untuk mengembangkan pendekatan integrasi data biooptik dan bioelektrik melalui model Regresi Linier Berganda guna memperoleh estimasi konsentrasi bakteri yang lebih stabil dan representatif.

Penelitian ini mengusulkan pendekatan optimasi melalui integrasi data multimodal yang diproses dengan desain *Machine Learning*. Studi ini menggunakan Regresi Linier untuk membangun model prediksi konsentrasi *E. coli*. Regresi linier sering kali berfungsi sebagai dasar atau komponen dasar untuk banyak alat pemodelan statistik dan pembelajaran mesin yang lebih kompleks[11], karena kemampuannya untuk memberikan pemahaman kuantitatif yang objektif, memvalidasi korelasi antara berbagai sensor (multimodal), dan berfungsi sebagai alat prediktif yang efisien di berbagai bidang ilmu pengetahuan[4]. Efektivitas model ini diukur menggunakan metrik seperti *Root Mean Square Error* (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2) untuk memastikan kesalahan prediksi minimal[12]. Model regresi diharapkan dapat memetakan hubungan linier dengan akurat ke nilai logaritmik dari konsentrasi bakteri. Melalui sinergi data optik dan elektrik, diharapkan dapat menghasilkan sistem estimasi konsentrasi *E. coli* yang lebih kuat, lebih cepat, dan lebih tepat dibandingkan dengan penggunaan sensor tunggal atau metode analisis konvensional.

METODE

Prosedur penelitian meliputi tiga tahap utama: (1) Persiapan Sampel Bakteri (2) Prosedur Pengukuran (3) Pengembangan Model Regresi Linear. Seluruh data hasil pengukuran diekspor ke format Microsoft Excel dan dianalisis menggunakan Python pada Google Colab dengan pustaka 'pandas' untuk pengolahan data, 'NumPy' untuk

komputasi numerik, 'scikit-learn' untuk analisis regresi linier sederhana dan regresi linier berganda, serta 'Matplotlib' untuk visualisasi grafik. Nilai koefisien determinasi (R^2) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) digunakan sebagai parameter evaluasi kinerja model. Hubungan antara parameter sensor dan nilai riil bakteri divalidasi menggunakan metode TPC sebagai standar acuan (*ground truth*). Alur kerja penelitian secara komprehensif disajikan pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Penelitian Optimasi Prediksi Konsentrasi *E. coli*

Persiapan sampel Bakteri

Penelitian ini menggunakan bakteri standar *Escherichia coli* ATCC 25922 yang diremajakan pada media *Nutrient Agar* (NA) selama 48 jam pada suhu 37°C. Pemanenan sel dilakukan dengan mensuspensikan koloni menggunakan 3 mL akuades steril dan batang L, yang kemudian diencerkan hingga volume 10 mL. Untuk memurnikan sel dari sisa media, suspensi menjalani proses sentrifugasi selama 15 menit. Supernatan dibuang, lalu *pellet* bakteri disuspensikan kembali ke dalam 50 mL akuades steril dan dihomogenkan menggunakan *vortex mixer*. Suspensi induk ini kemudian diencerkan menjadi tujuh variasi konsentrasi sesuai komposisi pada Tabel 1. Setiap variasi konsentrasi (5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%) dibuat dan diukur sebanyak tiga kali pengulangan

(triplo) untuk memperoleh nilai rata-rata dan mengurangi pengaruh variasi pengukuran. Nilai yang digunakan pada analisis regresi merupakan nilai rata-rata dari ketiga pengulangan tersebut.

Tabel 1. Komposisi 7 Konsentrasi Suspensi Bakteri

Konsentrasi	Volume Suspensi Bakteri (ml)	Volume Aquades (ml)	Total Volume
100%	10ml	0ml	10ml
80%	8ml	2ml	10ml
60%	6ml	4ml	10ml
40%	4ml	6ml	10ml
20%	2ml	8ml	10ml
10%	1ml	9ml	10ml
5%	0,5ml	9,5ml	10ml

Pada tiap konsentrasi tersebut kemudian dilakukan pengukuran secara langsung dan bersamaan di 2 jenis sensor yaitu Spektrofotometri dan SIL. Dilakukan juga pengujian TPC pada setiap konsentrasi sebagai data referensi (*ground truth*).

Prosedur Pengukuran Spektrofotometri

Pengukuran absorbansi atau *Optical Density* (OD) dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis *Thermo Scientific GENESYS 10S*. Instrumen tersebut pertama-tama dipanaskan selama 15 menit untuk menstabilkan sumber cahaya. Pada bakteri yang tidak memiliki pigmen signifikan seperti *E. coli*, pengurangan cahaya saat melewati suspensi sel didominasi oleh mekanisme hamburan cahaya daripada penyerapan. Penyebaran ini terjadi karena perbedaan indeks bias antara sel-sel bakteri dan media pertumbuhannya[8]. Panjang gelombang diatur pada 600 nm. Pemilihan OD₆₀₀ sebagai standar pengukuran dalam mikrobiologi didasarkan pada kemampuannya untuk mengukur kekeruhan sampel dengan cepat dan tidak merusak. Pengukuran pada panjang gelombang ini sangat penting untuk menentukan fase pertumbuhan bakteri (*fase log*, *stasioner*, atau fase kematian) guna mencapai kondisi kultur yang optimal. Nilai OD₆₀₀ sering dikorelasikan dengan metode tuang piring untuk memverifikasi bahwa populasi mikroba dalam starter memenuhi persyaratan minimum untuk aplikasi lebih lanjut[3]. Sebelum pengukuran sampel, kalibrasi nol dilakukan menggunakan aquades steril untuk menetapkan titik referensi absorbansi. Selanjutnya, sampel dari setiap pengenceran ditempatkan ke dalam kuvet dengan volume 1 mL dan diukur. Nilai absorbansi yang diperoleh dicatat sebagai variabel input pertama (X_1) dalam model regresi.

Prosedur Pengukuran Spektroskopi Impedansi Listrik

BioSMET digunakan untuk mengukur respons listrik (impedansi) suatu material terhadap frekuensi listrik tertentu. Perangkat ini dengan cepat mengidentifikasi nilai magnitudo (tegangan dan arus) serta perbedaan fase. Langkah awal adalah memilih besaran arus AC yang akan disuntikkan (5, 10, 50 μ A). Mengatur batas frekuensi bawah dan atas serta jumlah titik sampel frekuensi (1-100 kHz). Menghubungkan sampel menggunakan konektor USB digunakan untuk elektroda terinterdigitasi (IDE/IDT). Perangkat ini menghasilkan sinyal gelombang sinus murni yang diubah menjadi sumber arus stabil melalui konverter tegangan-ke-arus (V/I). Arus disuntikkan ke dalam sampel melalui resistor referensi (R_{ref}). Sistem ini secara bersamaan mengukur tegangan di seluruh resistor referensi (untuk menentukan arus sebenarnya) dan respons tegangan di seluruh sampel. Sinyal-sinyal ini dikirim ke modul *Detektor Gain-Fase* (GPD) untuk mengidentifikasi rasio tegangan (dalam dB) dan perbedaan fase antara arus dan tegangan. Hasil perhitungan segera dipetakan ke dalam dua jenis grafik utama: *Bode Plot*: Menampilkan magnitudo impedansi dan fase sebagai fungsi dari logaritma frekuensi. *Plot Nyquist*: Menampilkan bagian nyata vs bagian imajiner dari impedansi untuk mempelajari fenomena transfer ion. Semua data pengukuran biasanya diekspor secara otomatis ke format tabel (*MS-Excel*) untuk analisis lebih lanjut[13].

Uji Total Plate Count (TPC) Konvensional

Sebagai data referensi (kebenaran dasar), jumlah koloni bakteri diuji menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC). Prinsip utama dari metode ini adalah bahwa jika sel mikroba hidup ditumbuhkan pada media agar, mereka akan berkembang biak dan membentuk koloni yang dapat dilihat langsung dengan mata telanjang tanpa mikroskop. Diasumsikan bahwa setiap koloni terpisah berasal dari satu sel tunggal (atau unit pembentuk koloni/CFU). Suspensi bakteri diencerkan secara seri hingga tingkat pengenceran yang tinggi [6]. Pada penelitian ini dipilih dua tingkat pengenceran berurutan untuk setiap konsentrasi sampel. Pemilihan dua tingkat pengenceran dilakukan untuk

meningkatkan peluang diperolehnya cawan dengan jumlah koloni dalam rentang 30–300 koloni, yaitu rentang yang direkomendasikan pada metode Total Plate Count karena memberikan tingkat ketelitian perhitungan yang paling baik. Apabila hanya satu tingkat pengenceran digunakan, terdapat risiko jumlah koloni terlalu sedikit atau terlalu padat sehingga hasil perhitungan menjadi kurang representatif.

Tabel 2. Faktor Pengenceran yang ditanam (TPC)

Konsentrasi	Volume tanam (mL)	Tingkat pengenceran	
100%	0,1	10^{-8}	10^{-9}
80%	0,1	10^{-8}	10^{-9}
60%	0,1	10^{-7}	10^{-8}
40%	0,1	10^{-7}	10^{-8}
20%	0,1	10^{-6}	10^{-7}
10%	0,1	10^{-6}	10^{-7}
5%	0,1	10^{-5}	10^{-7}

0,1 mL suspensi dari faktor pengenceran yang telah ditentukan diambil dan diinokulasi ke dalam cawan petri menggunakan teknik tuang. Sampel dicampur dengan media *Nutrient Agar* (NA) cair, dihomogenkan dengan goyangan lembut, dan diinkubasi pada suhu 37°C. Selama 18–24 jam pertama inkubasi, banyak sel bakteri mungkin sudah membelah, tetapi massa sel mereka belum cukup besar untuk membentuk koloni yang terlihat jelas. Pada 48 jam, sel-sel yang membelah lebih lambat atau baru saja keluar dari fase adaptasi akan mencapai ukuran koloni yang cukup besar untuk terdeteksi pada pengamatan hari kedua[14]. Jumlah koloni yang tumbuh dihitung secara manual untuk menentukan nilai *Colony Forming Units* (CFU/mL). Untuk menghitung konsentrasi bakteri (CFU/mL), digunakan rumus standar dalam Persamaan 1.

$$cfu/mL = \frac{\text{jumlah koloni}}{\text{faktor pengenceran} \times \text{volume tanam}} \quad (1)$$

Cawan yang dapat dihitung adalah piring yang memiliki jumlah koloni antara 30 hingga 300. Jika ada kurang dari 30, tingkat kesalahan tinggi karena kontaminasi udara; jika ada lebih dari 300, kesalahan terjadi karena koloni yang tumpang tindih. Membuat piring duplikat atau replika dari tingkat pengenceran yang sama (dengan volume yang sama) memerlukan perhitungan rata-rata nilai CFU/mL[15] menggunakan rumus rata-rata aritmatika, dengan menjumlahkan semua nilai data yang ada dan kemudian membagi jumlah tersebut dengan total jumlah titik data[16]. dihitung seperti pada Persamaan 2.

$$\frac{cfu/mL_1 + cfu/mL_2}{2} = \log_{10} \quad (2)$$

Pengembangan Model Regresi Linear

Hubungan antara nilai absorbansi dan jumlah sel bersifat linier, yang berarti bahwa peningkatan nilai absorbansi secara langsung berbanding lurus dengan peningkatan jumlah sel. Hubungan linier ini didasarkan pada Hukum Beer-Lambert, seperti yang dinyatakan dalam Persamaan 3.

$$A = \epsilon Cl \quad (3)$$

A = absorbansi,

C = konsentrasi,

l = panjang lintasan cahaya (*pathlength*),

ϵ = koefisien absorbansi.

Pengembangan Model Regresi Linier Prinsip ini menunjukkan bahwa spektrofotometri mengukur konsentrasi berdasarkan kemampuan molekul untuk menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu[17]. Hubungan antara nilai impedansi dan jumlah sel umumnya menunjukkan tren invers, di mana peningkatan jumlah sel atau konsentrasi akan menurunkan impedansi listrik. Pada frekuensi tinggi, arus listrik lebih mudah menembus membran sel, yang berfungsi seperti kapasitor, menyebabkan impedansi menurun drastis seiring dengan meningkatnya jumlah sel yang berinteraksi. Hubungan ini tidak bersifat linier secara universal karena dipengaruhi oleh jenis bakteri, kepadatan optimal, dan frekuensi pengukuran. Karakteristik biologis intrinsik sel tetap menjadi faktor penentu utama dalam bioimpedansi[14].

Regresi linier adalah prosedur statistik yang digunakan untuk menghitung nilai variabel dependen berdasarkan nilai satu atau lebih variabel independen. Regresi linier menggunakan persamaan matematis untuk menggambarkan garis terbaik dari hubungan antara variabel dependen y dan variabel independen x . Dalam Persamaan 4., ini adalah yang paling umum digunakan.

$$y = mx + c \quad (4)$$

y = Variabel dependen (hasil/outcome),

x = Variabel independen (*prediktor*),

m = *Slope* (kemiringan garis) yang menunjukkan laju perubahan pada y untuk setiap unit perubahan pada x ,

c = *Konstanta* atau *intercept* [18].

Dalam penelitian ini, dua perkembangan regresi linier digunakan berdasarkan jumlah variabel prediktor, yaitu, Regresi Linier Sederhana: Melibatkan hanya satu variabel independen untuk memprediksi satu variabel dependen. Regresi Linier Berganda (MLR) menggunakan beberapa variabel penjelas untuk memprediksi hasil dari satu variabel respons. Untuk regresi linier sederhana, Persamaan 4. digunakan. Dan untuk regresi linier berganda, Persamaan 5. disajikan sebagai berikut:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \epsilon \quad (5)$$

y = nilai Log TPC (Log CFU/mL),

X_1 = nilai impedansi (Ω),

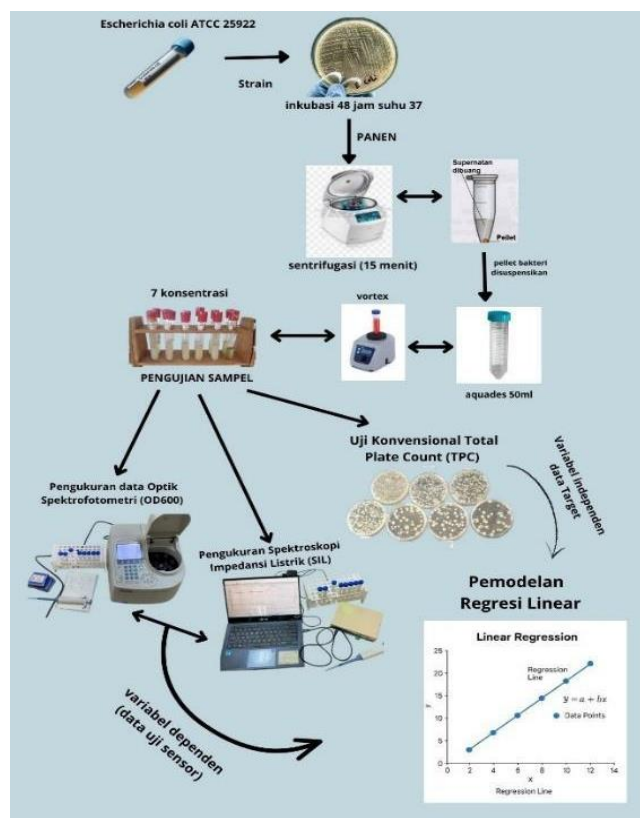
X_2 = nilai OD600,

β_0 = konstanta,

β_1 dan β_2 = koefisien regresi,

ϵ = galat model.

Salah satu metrik statistik yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja, akurasi, dan tingkat kesalahan dari model prediksi atau regresi adalah RMSE (*Root Mean Square Error*), yang digunakan untuk mengukur seberapa jauh nilai prediksi model menyimpang dari nilai aktual (data yang diamati). Semakin rendah nilai RMSE, semakin tinggi akurasi prediksi model[11]. Tahapan penelitian secara sistematis, mulai dari persiapan kultur bakteri hingga pengembangan model regresi, disajikan dalam ilustrasi Gambar 2. di bawah ini:



Gambar 2. Ilustrasi Tahapan Metodologi Penelitian

Gambar Diagram alir eksperimen dari penelitian ini mencakup persiapan kultur *Escherichia coli* ATCC 25922, ekstraksi pellet bakteri melalui sentrifugasi, pembuatan variasi konsentrasi, dan proses akuisisi data menggunakan Spektrofotometri (OD_{600}) dan Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) sebagai variabel independen, serta uji TPC sebagai kebenaran dasar untuk pemodelan regresi linier.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Populasi Bakteri Aktual

Penentuan populasi bakteri *E. coli* yang sebenarnya dilakukan menggunakan metode Total Plate Count (TPC) sebagai referensi standar (*ground truth*). Berdasarkan data inkubasi selama 48 jam, rata-rata aritmetika dari nilai cfu/mL dari dua tingkat pengenceran yang berbeda dihitung, yang kemudian dikonversi ke skala logaritmik ($\log_{10}$). Perhitungan rata-rata Log TPC untuk setiap variasi konsentrasi disajikan dalam Tabel 3.

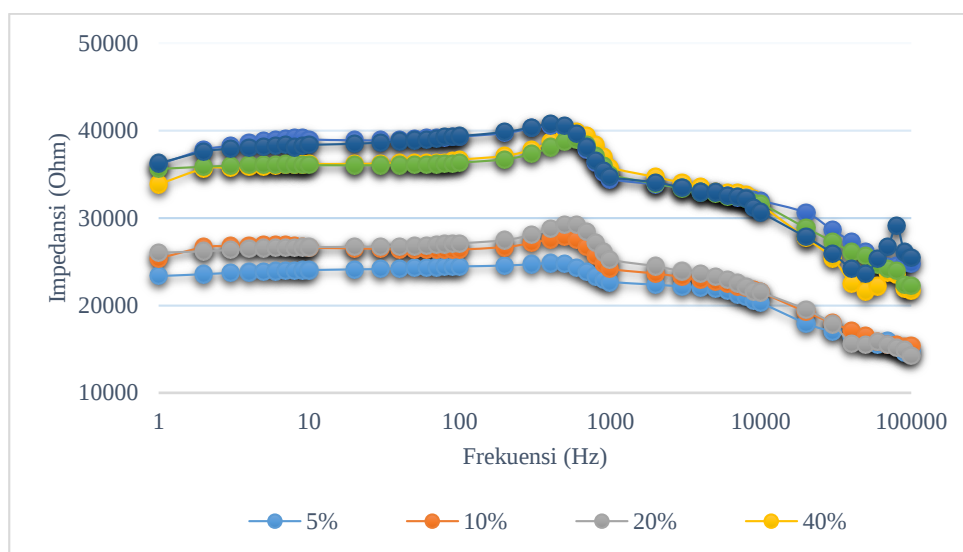
Tabel 3. Hasil Perhitungan Rata-rata Populasi *E. coli*

Konsentrasi	Hasil perhitungan pengenceran ganda (CFU/mL)	Rata-rata ($\log_{10}$) TPC
100%	$1,04 \times 10^{11}$ $1,01 \times 10^{12}$	11,75
80%	$9,7 \times 10^{10}$ $8,7 \times 10^{11}$	11,68
60%	$7,0 \times 10^9$ $5,5 \times 10^{10}$	10,49
40%	$4,1 \times 10^9$ $3,9 \times 10^{10}$	10,33
20%	$5,4 \times 10^8$ $4,4 \times 10^9$	9,39
10%	$1,8 \times 10^8$ $1,7 \times 10^9$	8,97
5%	$1,7 \times 10^7$ $1,2 \times 10^8$	7,83

Berdasarkan Tabel 3, terdapat korelasi positif yang konsisten antara persentase pengenceran sampel dan jumlah koloni bakteri yang dihitung. Rentang populasi bakteri yang diperoleh adalah antara 7,83 hingga 11,75 Log cfu/mL. Ada pola di mana perbedaan antara konsentrasi 100% (11,75) dan konsentrasi 80% (11,68) relatif kecil (0,07 log). Ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi tinggi, populasi bakteri cenderung sangat padat, sehingga perubahan volume 20% tidak menghasilkan penurunan yang signifikan. Sebaliknya, pada rentang konsentrasi yang lebih rendah (dari 20% ke 10% dan 5%), terdapat penurunan yang lebih tajam dalam nilai log.

Analisis data Spektroskopi Impedansi Listrik

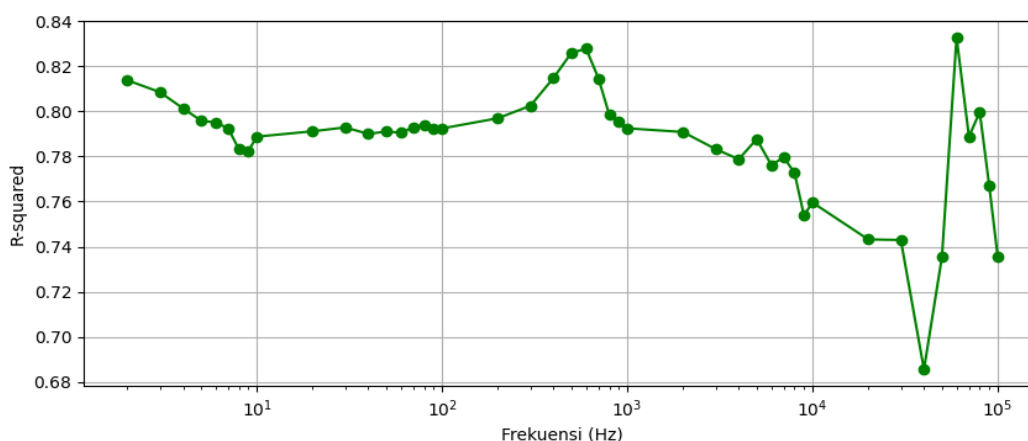
Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan instrumen BioSMET dalam rentang frekuensi 1 Hz hingga 100 kHz, diperoleh profil impedansi yang menunjukkan pengaruh signifikan konsentrasi bakteri terhadap resistansi listrik media.



Gambar 3. Grafik Nilai Impedansi vs Frekuensi dari 1-100kHz pada setiap Konsentrasi

Dari Gambar 3. Nilai impedansi cenderung stabil pada frekuensi rendah (1 Hz - 100 Hz), tetapi mengalami penurunan drastis pada frekuensi tinggi (di atas 1000 Hz atau 1 kHz). Pada frekuensi rendah, membran sel bertindak sebagai isolator yang mencegah arus listrik menembus ke dalam sel[19]. Akibatnya, arus hanya mengalir melalui jalur ekstraseluler (di sekitar sel), yang menghasilkan resistansi atau impedansi yang tinggi dan stabil. Pada frekuensi tinggi (di atas 1 kHz), reaktansi kapasitif membran menurun drastis, memungkinkan arus listrik menembus membran dengan lebih mudah. Ketika arus listrik dapat menembus membran pada frekuensi tinggi, arus tersebut akan mengalir melalui seluruh ruang intraseluler dan ekstraseluler[14]. Ini menghasilkan jalur konduksi yang lebih lebar dengan impedansi yang secara signifikan berkurang[19].

Dalam pengembangan model prediksi berdasarkan Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL), analisis regresi linier sederhana dilakukan pada semua titik frekuensi yang diukur terhadap nilai Log TPC sebagai standar referensi. Dengan menggunakan metode frekuensi *sweep*, yang melibatkan pemindaian dalam rentang yang luas, dan kemudian menguji hubungan antara nilai impedansi dan data target menggunakan regresi linier. Frekuensi terbaik adalah frekuensi yang menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang paling mendekati atau tertinggi (sangat kuat)[20]. Untuk menentukan frekuensi terbaik, dilakukan uji tren linearitas (R^2) dari nilai impedansi pada setiap frekuensi (1 Hz - 100 kHz) dengan data target (TPC), yang menghasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4. Di bawah ini:



Gambar 4. Grafik Tren Linearitas (R^2) vs Frekuensi

Grafik pada Gambar 4. di atas menunjukkan hubungan antara frekuensi pengukuran (dalam skala logaritmik) dan nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh dari regresi antara nilai impedansi dan Log TPC. Grafik

menunjukkan lonjakan tajam yang sangat tinggi pada frekuensi sekitar 60 kHz, dengan nilai R^2 tertinggi mencapai 0,83. Meskipun frekuensi tinggi biasanya memiliki sensitivitas rendah terhadap kepadatan sel, lonjakan ini menunjukkan adanya jendela frekuensi atau daerah dispersi, yang merujuk pada rentang frekuensi tertentu di mana perubahan sifat dielektrik (dispersi) terjadi pada jaringan atau sel biologis ketika terpapar medan listrik. Fenomena ini dikenal dalam biofisika sebagai β -dispersia, yaitu penurunan permitivitas dielektrik pada jaringan atau sel biologis yang terjadi dalam rentang frekuensi menengah hingga tinggi, umumnya antara kHz hingga ratusan MHz[21]. Dispersi beta disebabkan oleh polarisasi antarmuka atau polarisasi *Maxwell-Wagner*[22]. Pada frekuensi ini, medan listrik mulai menembus membran sel dielektrik, memungkinkan arus listrik mengalir masuk dan memberikan informasi tentang bagian dalam sel[21].

Analisis data spektrofotometri (OD₆₀₀)

Berdasarkan hasil pengukuran densitas optik menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 600 nm, yang disajikan dalam Tabel 4. di bawah ini:

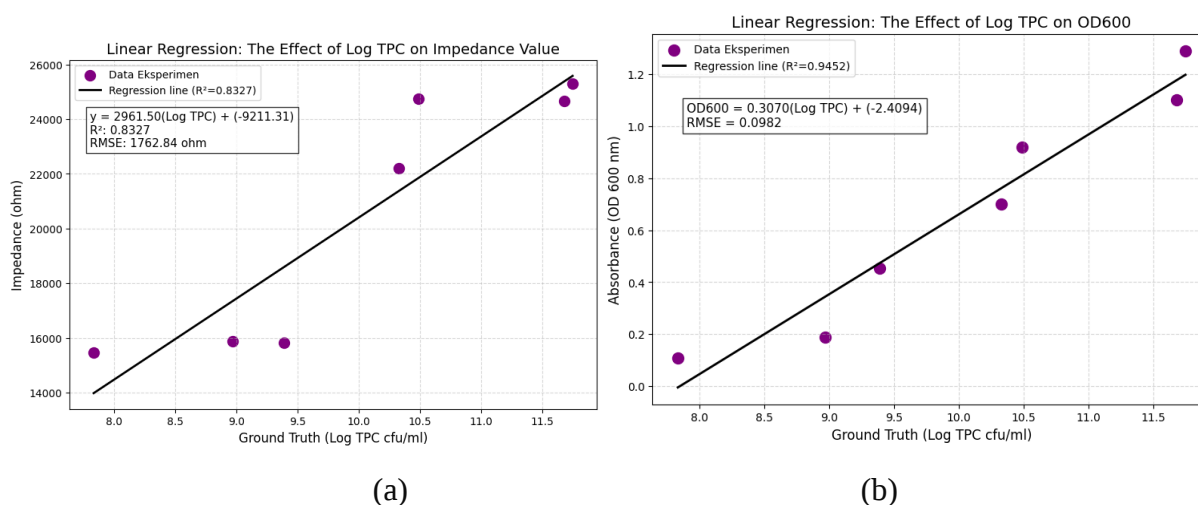
Tabel 4. Hasil Nilai Absorbansi *E. Coli* pada Berbagai Konsentrasi

Konsentrasi	Nilai Absorbansi	Keterangan
100%	1.291	Pekat
80%	1.103	Pekat
60%	0.919	Pekat
40%	0.701	sedang
20%	0.453	sedang
10%	0.187	encer
5%	0.108	encer

Tabel menunjukkan hubungan langsung antara variasi konsentrasi (5% hingga 100%) dan nilai absorbansi yang diukur. Semakin tinggi konsentrasi sampel, semakin banyak cahaya yang diserap atau tersebar oleh sel-sel bakteri, yang mengakibatkan peningkatan nilai absorbansi yang dibaca oleh instrumen. Dalam persiapan kurva pertumbuhan, kultur bakteri biasanya diencerkan untuk mencapai nilai 0,08 – 0,1, dikategorikan sebagai "encer," untuk memastikan fase adaptasi dipantau dari titik awal yang rendah[6]. Untuk kategori "sedang," yaitu 0,2-0,5, rentang ini dianggap ideal karena meminimalkan efek hamburan cahaya ganda yang dapat menyebabkan deviasi dari *Hukum Beer-Lambert*. Untuk sampel *E. coli*, deviasi dari linearitas (jenuh) mulai terjadi pada nilai > 0,8. Nilai-nilai ini diklasifikasikan sebagai "sangat terkonsentrasi" dan memerlukan pemodelan non-linear jika dihitung tanpa pengenceran[8]. Data absorbansi ini memberikan informasi tentang kepadatan fisik sel dalam media. Informasi ini akan melengkapi data dari sensor SIL, yang lebih fokus pada sifat dielektrik dan integritas membran sel. Kombinasi dari dua jenis data ini (optik dan listrik) diharapkan dapat menutupi keterbatasan masing-masing instrumen dalam memprediksi jumlah bakteri *E. coli* dengan akurat.

Analisis Data Prediksi dan Pengembangan Model Regresi Linier

Dalam metode spektrofotometri, regresi linier digunakan untuk membuat kurva standar yang menghubungkan nilai absorbansi (y) dengan logaritma jumlah sel bakteri (x)[6]. Regresi linier juga diterapkan dalam teknologi biosensor berbasis Spektroskopi Impedansi Listrik (SIL) untuk mendeteksi beban bakteri secara real-time [19]. Gambar 5. menunjukkan hasil grafik linier untuk (a) nilai impedansi terhadap Log TPC (b) nilai OD₆₀₀ terhadap Log TPC.

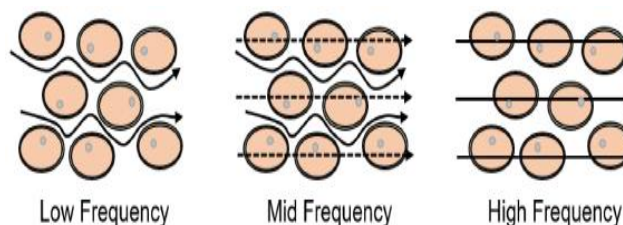


Gambar 5. Grafik Regresi Linier (a): Log TPC terhadap Impedansi (b): Log TPC terhadap OD₆₀₀

Pada grafik (a), pemilihan frekuensi operasi untuk parameter listrik dilakukan melalui penyaringan di seluruh spektrum frekuensi (1 Hz – 100 kHz). Berdasarkan tren nilai R^2 tertinggi, 60 kHz dipilih sebagai frekuensi optimal karena menunjukkan korelasi yang paling stabil dalam zona β -dispers. Pada 60 kHz, nilai yang diperoleh adalah ($R^2 = 0.8327$) dan *Root Mean Square Error* (RMSE): 1762.84. Nilai ini menunjukkan bahwa rata-rata deviasi antara nilai impedansi hasil prediksi dan nilai impedansi hasil pengukuran masih cukup besar. Besarnya RMSE pada model SIL mengindikasikan bahwa respons impedansi dipengaruhi oleh banyak faktor selain jumlah bakteri, seperti kondisi elektroda, konduktivitas medium, distribusi ion, dan variasi sifat dielektrik suspensi bakteri. Dengan demikian, meskipun SIL menunjukkan hubungan linear yang cukup baik terhadap Log TPC, ketelitian prediksi berdasarkan parameter impedansi saja masih terbatas sehingga menghasilkan kesalahan estimasi yang relatif tinggi. Ini berarti prediksi rata-rata menyimpang sekitar 1,7 kOhm dari kondisi sebenarnya (*Ground Truth*) dengan akurasi prediksi sebesar 85,6% dengan nilai persamaan.

$$y = 2961.50x + (-9211.31) \quad (1)$$

Menunjukkan hubungan linear positif antara nilai Log TPC (x) dan impedansi listrik (y). Koefisien regresi sebesar 2961,50 Ω per satuan Log CFU/mL berarti setiap kenaikan 1 satuan Log TPC diperkirakan akan meningkatkan nilai impedansi sebesar sekitar 2961,50 Ω . Secara fisik, hal ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sel bakteri dalam sistem pengukuran diikuti oleh peningkatan hambatan terhadap aliran arus listrik pada frekuensi operasi 60 kHz. Respons tersebut berkaitan dengan perubahan sifat dielektrik suspensi bakteri dan interaksi sel dengan medan listrik pada daerah β -dispersi. Adapun konstanta (-9211,31) Ω merupakan nilai impedansi teoritis ketika Log TPC bernilai nol. Nilai ini tidak memiliki makna biologis langsung karena kondisi Log TPC = 0 berada di luar rentang data pengukuran penelitian, sehingga konstanta terutama berfungsi sebagai parameter matematis untuk membentuk garis regresi terbaik.



Gambar 6. Ilustrasi Efek Frekuensi pada Jalur Arus

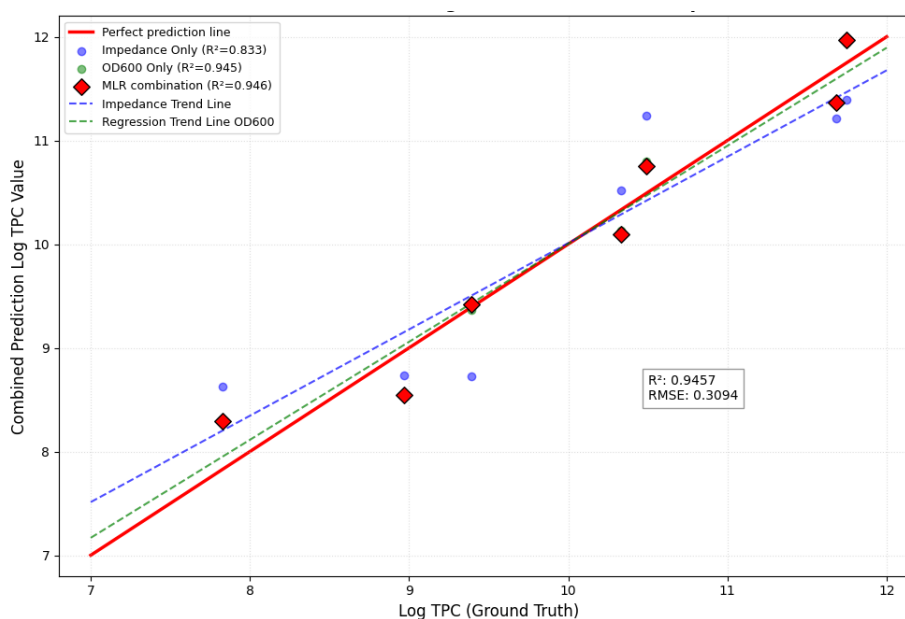
Menurut gambar 6, pada frekuensi rendah, arus mengalir di sekitar sel di ruang intraseluler. Pada frekuensi menengah, arus terus mengalir di sekitar sel tetapi mulai bekerja pada ruang di dalam membran sel. Pada frekuensi tinggi, arus mempengaruhi seluruh ruang di dalam sel. Sensor listrik memberikan kedalaman struktural yang memungkinkan identifikasi spesifik kesehatan membran dan jenis bakteri berdasarkan sifat dielektriknya[23]. Ini

membuktikan bahwa peningkatan nilai impedansi sejalan dengan peningkatan Log TPC mengonfirmasi bahwa sel-sel bakteri bertindak sebagai penghambat aliran arus listrik di media. dijelaskan Jika bakteri menempel pada permukaan elektroda, mereka bertindak sebagai penghalang fisik yang meningkatkan impedansi[20]. Oleh karena itu, peningkatan nilai impedansi sejalan dengan peningkatan Log TPC mengonfirmasi peran bakteri sebagai penghambat arus hanya jika sistem pengukuran melibatkan adhesi sel ke permukaan sensor[9].

Pada grafik (b), pengukuran absorbansi menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 600 nm menunjukkan linearitas yang sangat tinggi terhadap konsentrasi bakteri (Log TPC). Hasil analisis regresi linier sederhana menunjukkan nilai ($R^2 = 0.9452$) dan *Root Mean Square Error* (RMSE): 0.0982, Nilai ini menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan estimasi terhadap nilai Log TPC relatif rendah. Secara biologis, hasil tersebut sesuai dengan prinsip spektrofotometri bahwa peningkatan jumlah sel bakteri akan meningkatkan kekeruhan suspensi sehingga absorbansi OD₆₀₀ meningkat secara proporsional. Rendahnya RMSE menunjukkan bahwa parameter OD₆₀₀ mampu merepresentasikan perubahan kepadatan sel bakteri dengan baik pada rentang konsentrasi yang digunakan dalam penelitian ini, sehingga memberikan performa estimasi terbaik terhadap nilai TPC sebagai data acuan dengan nilai persamaan. dengan nilai persamaan:

$$y = 0.3070x + -2.4094 \quad (2)$$

Menunjukkan hubungan linear positif antara nilai Log TPC (x) dan OD₆₀₀ (y). Koefisien regresi sebesar 0,3070 berarti setiap kenaikan 1 satuan Log TPC diperkirakan akan meningkatkan nilai OD₆₀₀ sebesar sekitar 0,307 unit absorbansi. Secara fisik, hal ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sel bakteri menyebabkan suspensi menjadi lebih keruh sehingga cahaya yang melewati sampel semakin banyak dihamburkan dan nilai OD₆₀₀ meningkat. Dengan demikian, OD₆₀₀ dapat digunakan sebagai indikator tidak langsung kepadatan sel bakteri dalam medium cair. Adapun konstanta (-2,4094) merupakan nilai OD₆₀₀ teoritis ketika Log TPC bernilai nol. Nilai ini tidak memiliki makna biologis langsung karena kondisi Log TPC = 0 berada di luar rentang data pengukuran penelitian. Oleh karena itu, konstanta tersebut terutama berfungsi sebagai parameter matematis yang menentukan posisi garis regresi terbaik pada grafik hubungan antara OD₆₀₀ dan Log TPC. Ini membuktikan bahwa metode optik sangat konsisten dalam mendeteksi kepadatan massa sel. Penerapan metode optik dianggap sangat konsisten sebagai pengukuran proksi cepat untuk massa sel kering, jumlah sel, atau unit pembentuk koloni (CFU/mL) tanpa harus melalui prosedur laboratorium yang memakan waktu[8]. Nilai tinggi dari koefisien determinasi berfungsi sebagai dasar yang kuat untuk menggunakan OD₆₀₀ sebagai salah satu variabel prediktor utama. Untuk meningkatkan optimasi akurasi dan keandalan data prediksi, model Regresi Linier Berganda dikembangkan dengan menggabungkan data Impedansi (X_1) dan OD₆₀₀ (X_2) sebagai variabel dependen, dan Log TPC (y) sebagai variabel independen (data target). disajikan dalam Gambar 7. di bawah ini:



Gambar 7. Grafik Regresi Model Prediksi terhadap Jumlah Bakteri

Efektivitas kombinasi sensor dievaluasi dengan membandingkan akurasi prediksi antara parameter tunggal di Gambar 5. dengan model tren Regresi Linier Berganda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Penggunaan model gabungan ini menunjukkan tingkat presisi yang paling mendekati 'Garis Prediksi Sempurna' dibandingkan dengan menggunakan impedansi saja ($R^2=0.8327$) atau OD₆₀₀ saja ($R^2=0.9452$). Integrasi kedua parameter tersebut menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9457 dengan *Root mean squared error* (RMSE) sebesar 0,3094. Hasil ini membuktikan bahwa kombinasi data optik (massa sel) dan data listrik (integritas dielektrik) dapat menutupi keterbatasan masing-masing sensor, menghasilkan sistem deteksi bakteri yang lebih kuat dan akurat. secara statistik, peningkatannya hanya 0,0005.

Tabel 5. Rekap Data Target (Log TPC) dan Data Prediksi (impedansi & OD₆₀₀) pada Variasi Konsentrasi Bakteri yang Berbeda

Konsentrasi	Ground Truth (y) Log TPC	Data Prediksi (X ₁) impedansi (Ohm)	Data Prediksi (X ₂) OD ₆₀₀	Persamaan	Prediksi (y) Log TPC	Perbedaan (Error)	Perbedaan
100%	11,75	25314,379	1.291	$y = (-2.21 \times 10^{-5} \times \text{Imp}) + (3.29 \times \text{OD}) + 8.28$	11,97	+0,22	0,22
80%	11,68	24673,652	1.103		11,37	-0,31	0,31
60%	10,49	24761,027	0.919		10,76	+0,27	0,27
40%	10,33	22200,793	0.701		10,10	-0,23	0,23
20%	9,39	15831,913	0.453		9,42	+0,03	0,03
10%	8,97	15875,502	0.187		8,54	-0,43	0,43
5%	7,83	15471,564	0.108		8,29	+0,46	0,46

Berdasarkan Tabel 5, nilai error terbesar terjadi pada konsentrasi 5% dengan selisih sebesar 0,46 Log CFU/mL, sedangkan pada konsentrasi yang lebih tinggi error relatif lebih kecil. Kondisi ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor. Pertama, pada populasi bakteri yang rendah jumlah sel dalam volume pengukuran menjadi lebih sedikit sehingga perubahan sinyal OD₆₀₀ maupun impedansi mendekati batas sensitivitas instrumen. Pada kondisi tersebut rasio sinyal terhadap noise menurun sehingga fluktuasi kecil pada pembacaan alat memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap hasil estimasi. Kedua, pengukuran TPC pada konsentrasi rendah memiliki variabilitas yang lebih tinggi karena jumlah koloni yang tumbuh lebih sedikit, sehingga perubahan satu atau beberapa koloni dapat menyebabkan perubahan nilai Log TPC yang relatif besar. Ketiga, hubungan antara sinyal sensor dan jumlah bakteri pada konsentrasi sangat rendah cenderung tidak sekuat pada konsentrasi menengah hingga tinggi karena kontribusi medium pengencer dan ion terlarut menjadi lebih dominan dibandingkan kontribusi sel bakteri. Oleh karena itu, meningkatnya error pada konsentrasi 5% menunjukkan bahwa performa model mulai dipengaruhi oleh keterbatasan deteksi pada konsentrasi rendah, sedangkan pada konsentrasi yang lebih tinggi sinyal biologis lebih dominan sehingga estimasi model menjadi lebih stabil. Model tersebut berhasil menangkap tren penurunan jumlah bakteri dengan pengenceran. Jaringan biologis dan suspensi bakteri dipengaruhi oleh konsentrasi ion terlarut. Peningkatan konsentrasi ion akan meningkatkan konduktivitas listrik dan menurunkan nilai impedansi [24]. Ini dibuktikan dengan nilai prediksi (y) yang terus menurun secara proporsional mengikuti penurunan nilai *Ground Truth*. Dalam tabel variabel (X₁), dapat dilihat bahwa seiring dengan penurunan konsentrasi, nilai impedansi cenderung menurun juga (dari 25k menjadi 15k Ohm).

Secara teoritis, metabolisme bakteri menghasilkan ion yang mengubah konduktivitas medium. Koefisien negatif dalam rumus menunjukkan bahwa model mempertimbangkan dinamika resistansi listrik ini untuk mengoreksi nilai yang diprediksi. pada Variabel (X₂) memberikan kontribusi terbesar terhadap nilai Log TPC. Penurunan OD₆₀₀ dari 1,291 menjadi 0,108 berbanding lurus dengan penurunan Log TPC. Dalam analisis sel

tunggal, data cenderung tersebar dan tumpang tindih, sehingga sulit bagi metode statistik tradisional atau parameter tunggal untuk membedakan nuansa spesifik antara populasi sel[25]. Penggunaan dua variabel secara bersamaan (*multivariat*) membuat model lebih stabil dibandingkan dengan menggunakan hanya satu parameter. Nilai perbedaan rata-rata sebesar 0,28 menunjukkan bahwa model ini memiliki tingkat keandalan yang tinggi. Dalam perhitungan mikrobiologis, metode *Total Plate Count* (TPC) itu sendiri memiliki ketidakpastian (*variabilitas*) sekitar $\pm 0,5$ unit log. Karena kesalahan model berada di bawah angka (0,03 – 0,46), model ini secara statistik dianggap setara dengan hasil laboratorium manual. Pada konsentrasi 5%, perbedaannya meningkat menjadi 0,46. Ini dapat dijelaskan secara ilmiah bahwa pada populasi bakteri yang rendah, sensitivitas sensor (baik optik maupun impedansi) mulai mencapai batas deteksi, yang mengakibatkan fluktuasi data yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan kondisi sampel yang terkonsentrasi.

Meskipun peningkatan R^2 tidak signifikan, kombinasi ini meningkatkan stabilitas model. Dengan menambahkan parameter optik, model Machine Learning dapat belajar membedakan antara perubahan biologis yang nyata dan gangguan teknis, yang pada akhirnya meningkatkan akurasi di atas 90% [26]. Hasil ini membuktikan bahwa kombinasi data optik (massa sel) dan data listrik (integritas dielektrik) dapat menutupi keterbatasan masing-masing sensor, sehingga menghasilkan sistem deteksi bakteri yang lebih kuat dan akurat. Kombinasi ini sangat efektif untuk aplikasi yang memerlukan akurasi tinggi namun tetap non-invasif, seperti deteksi biomarker penyakit atau pemantauan perkembangan oosit ikan, di mana perubahan fisik (ukuran) dan perubahan internal (hidrasi/ion) terjadi secara bersamaan [27].

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengintegrasikan parameter listrik (impedansi) dan optik (OD600) untuk memprediksi konsentrasi bakteri secara cepat dan akurat. Frekuensi 60 kHz merupakan frekuensi optimal dengan nilai R^2 masing-masing 0,8327 (impedansi) dan 0,9452 (OD600). Fusi sensor meningkatkan R^2 menjadi 0,9457 dan menghasilkan RMSE sebesar 0,3094 Log cfu/ml, menunjukkan peningkatan akurasi prediksi. Penelitian masih terbatas pada *E. coli* ATCC 25922 dan kondisi laboratorium terkontrol. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan lebih banyak spesies, sampel, dan replikasi serta menerapkan metode *machine learning* untuk meningkatkan generalisasi model.

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

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. H. Clausen *et al.*, "Bacteria detection and differentiation using impedance flow cytometry," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 10, pp. 1–12, 2018, doi: 10.3390/s18103496.
- [2] M. S. Islam, A. Aryasomayajula, and P. R. Selvaganapathy, "A review on macroscale and microscale cell lysis methods," *Micromachines*, vol. 8, no. 3, 2017, doi: 10.3390/mi8030083.
- [3] V. of L. acidophilus D. after M. obat-obatan bagi para konsumen yang antibiotik dan gaya hidup ya James, BenniSetelah Mikroenkapsulasi Departemen Metabolic Engineering , PT . Dexa Laboratories of Biomolecular Sciences (DLBS) *et al.*, "Setelah Mikroenkapsulasi Departemen Metabolic Engineering , PT . Dexa Laboratories of Biomolecular Sciences (DLBS), Viability of Lactobacillus acidophilus DLBSD102 after Microencapsulation obat-obatan bagi para konsumen yang antibiotik dan gaya hidup ya," *J. Sains Nat. Univ. Nusa Bangsa*, vol. 10, no. 1, pp. 6–18, 2020.
- [4] Evangelista Risalia Haurissa, Melda Yunita, and S. Sulfiana, "Total Plate Count Analysis and Food-Contaminating Bacterial Identification of Smoked Tatihi (Thunnus albacares) Sold in Several Traditional Markets in Ambon, Indonesia," *Folia Medica Indones.*, vol. 60, no. 3, pp. 232–239, 2024, doi: 10.20473/fmi.v60i3.62231.
- [5] Kuschner, O'connor, and A. M. Butz, "乳鼠心肌提取 HHS Public Access," *Physiol. Behav.*, vol. 176, no. 12, pp. 139–148, 2017, doi: 10.1002/cpz1.20.Growth.
- [6] R. Rosmania and F. Yanti, "Perhitungan Bakteri," *J. Penelit. Sains*, vol. 22, no. 2, p. 76, 2020.
- [7] S. M. Moqadam, P. K. Grewal, Z. Haeri, P. A. Ingledew, K. Kohli, and F. Golnaraghi, "Cancer detection based on electrical impedance spectroscopy: A clinical study," *J. Electr. Bioimpedance*, vol. 9, no. 1, pp. 17–23, 2018, doi: 10.2478/joeb-2018-0004.

- [8] J. A. Myers, B. S. Curtis, and W. R. Curtis, "Improving accuracy of cell and chromophore concentration measurements using optical density," *BMC Biophys.*, vol. 6, no. 1, 2013, doi: 10.1186/2046-1682-6-4.
- [9] Y. Xu *et al.*, "Electrochemical Impedance Spectroscopic Detection of E.coli with Machine Learning," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 167, no. 4, p. 047508, 2020, doi: 10.1149/1945-7111/ab732f.
- [10] Y. Xu *et al.*, "Electrochemical Impedance Spectroscopic Detection of E . coli with Machine Learning Electrochemical Impedance Spectroscopic Detection of E . coli with Machine Learning," 2020, doi: 10.1149/1945-7111/ab732f.
- [11] D. Maulud and A. M. Abdulazeez, "A Review on Linear Regression Comprehensive in Machine Learning," *J. Appl. Sci. Technol. Trends*, vol. 1, no. 2, pp. 140–147, 2020, doi: 10.38094/jastt1457.
- [12] E. A. F. Elmuna, T. Chamidy, and F. Nugroho, "Optimization of the Random Forest Method Using Principal Component Analysis to Predict House Prices," *Int. J. Adv. Data Inf. Syst.*, vol. 4, no. 2, pp. 155–166, 2023, doi: 10.25008/ijadis.v4i2.1290.
- [13] 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.
- [14] E. M. C. Dasmaseila, 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.
- [15] Reynolds J., "Serial Dilution Protocols," *Am. Soc. Microbiol.*, no. September 2005, pp. 1–7, 2005.
- [16] X. Su, X. Yan, and C. L. Tsai, "Linear regression," *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.*, vol. 4, no. 3, pp. 275–294, 2012, doi: 10.1002/wics.1198.
- [17] S. D. Kusumawati *et al.*, "Edisi Khusus 2023 Novia Ayu Handayani Perbandingan Nilai Pengukuran Kuantitatif Isolat Asam Ribonukleat (RNA) Menggunakan Spektrofotometer Nanodrop dan Mikrodrops pada Sampel Hepar Ayam (Gallus gallus domesticus) ISSN 2655 4887 (Print), ISSN 2655 162," vol. 4887, pp. 62–71, 2023.
- [18] H. C. Kraemer and C. Blasey, "Linear Regression Analysis," *How Many Subj. Stat. Power Anal. Res.*, pp. 73–85, 2017, doi: 10.4135/9781483398761.n6.
- [19] E. Detrez *et al.*, "Study differentiating fish oocyte developmental stages using bioimpedance spectroscopy," *Aquaculture*, vol. 547, no. September 2021, 2022, doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.737396.
- [20] L. Yang, "Electrical impedance spectroscopy for detection of bacterial cells in suspensions using interdigitated microelectrodes," *Talanta*, vol. 74, no. 5, pp. 1621–1629, 2008, doi: 10.1016/j.talanta.2007.10.018.
- [21] M. Van Haeverbeke, B. De Baets, and M. Stock, "Plant impedance spectroscopy: a review of modeling approaches and applications," *Front. Plant Sci.*, vol. 14, no. July, 2023, doi: 10.3389/fpls.2023.1187573.
- [22] F. Dadkhah Tehrani, M. D. O'Toole, and D. J. Collins, "Tutorial on impedance and dielectric spectroscopy for single-cell characterisation on microfluidic platforms: theory, practice, and recent advances," *Lab Chip*, vol. 25, no. 5, pp. 837–855, 2025, doi: 10.1039/d4lc00882k.
- [23] S. Abasi, J. R. Aggas, G. G. Garayar-Leyva, B. K. Walther, and A. Guiseppi-Elie, "Bioelectrical Impedance Spectroscopy for Monitoring Mammalian Cells and Tissues under Different Frequency Domains: A Review," *ACS Meas. Sci. Au*, vol. 2, no. 6, pp. 495–516, 2022, doi: 10.1021/acsmeasuresciau.2c00033.
- [24] V. D. Indriyani, D. R. Santoso, and C. S. Widodo, "Hubungan antara Asal Bunga Madu Terhadap Nilai Impedansi Listrik," vol. 4, no. 4, pp. 161–165, 2018.
- [25] C. Ferguson, Y. Zhang, C. Palego, and X. Cheng, "Recent Approaches to Design and Analysis of Electrical Impedance Systems for Single Cells Using Machine Learning," *Sensors*, vol. 23, no. 13, 2023, doi: 10.3390/s23135990.
- [26] L. A. Buscaglia, O. N. Oliveira, and J. P. Carmo, "Roadmap for Electrical Impedance Spectroscopy for Sensing: A Tutorial," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 20, pp. 22246–22257, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3085237.
- [27] V. S. Teixeira, W. Krautschneider, and J. J. Montero-Rodríguez, "Bioimpedance spectroscopy for characterization of healthy and cancerous tissues," *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. Electr. Eng. Photonics, EExPolytech 2018*, pp. 147–151, 2018, doi: 10.1109/EExPolytech.2018.8564401.