Journal of Innovative and Creativity
Journal Homepage: https://joecy.org/index.php/joecy
e-mail: journaljoecy@gmail.com

Faculty of Education
University of Pahlawan Tuanku Tambusai
ISSN 2776-771X (Online)
ISSN 2962-570X (Printed)
6 (2) 2026, Page: 43411-43422

Pengaruh Fermentasi dan Penambahan $MgSO_4$ terhadap Karakteristik Elektrolit dan Kinerja Bio-Baterai Sari Jeruk Nipis (Citrus aurantiifolia)

Devi Anggraini[1], Anerasari Meidinariasty[2], Lety Trisnaliani[3]
[1],[2],[3] Program Studi D-IV Teknologi Kimia Industri, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia
Surel korespondensi: anerasari@polsri.ac.id

Published: August , 2026

ABSTRAK
Bio-baterai berbasis bahan alami menawarkan pendekatan sederhana untuk mengubah energi kimia menjadi energi listrik dengan dampak limbah yang lebih rendah dibandingkan baterai konvensional. Penelitian ini menganalisis pengaruh waktu fermentasi dan penambahan magnesium sulfat ($MgSO_4$) terhadap karakteristik elektrolit serta kinerja bio-baterai berbasis sari jeruk nipis (Citrus aurantiifolia). Penelitian eksperimental dilakukan menggunakan 200 mL sari jeruk nipis pada setiap perlakuan, variasi fermentasi 0, 3, 4, 5, 6, dan 7 hari, serta penambahan larutan $MgSO_4$ 0,3 M sebanyak 25, 50, dan 75 mL. Elektroda yang digunakan adalah seng (Zn) dan tembaga (Cu) pada rangkaian biochamber. Parameter pengujian meliputi pH, konduktivitas, tegangan terminal, arus, daya, dan durasi nyala LED biru. Data dianalisis secara deskriptif berdasarkan pola perubahan setiap kombinasi perlakuan. Fermentasi menurunkan pH sari jeruk nipis dari 3 menjadi 2, sedangkan setelah penambahan $MgSO_4$ pH terukur sebesar 3 pada seluruh perlakuan. Nilai konduktivitas, tegangan, arus, daya, dan durasi nyala LED meningkat sampai fermentasi hari ke-6, kemudian umumnya menurun pada hari ke-7. Kondisi optimum diperoleh pada fermentasi 6 hari dan penambahan $MgSO_4$ 75 mL, dengan konduktivitas 12,28 mS/cm, tegangan 12,17 V, arus 20,17 mA, daya 245,67 mW, dan durasi LED 410 menit. Dibandingkan perlakuan tanpa fermentasi dengan $MgSO_4$ 25 mL, kondisi optimum meningkatkan konduktivitas 79,27%, tegangan 181,71%, arus 57,09%, daya 342,89%, dan durasi nyala 241,67%. Hasil ini menunjukkan bahwa fermentasi dan penambahan $MgSO_4$ dapat meningkatkan ketersediaan pembawa muatan dalam elektrolit, tetapi waktu fermentasi perlu dikendalikan agar tidak melewati kondisi optimum.
Kata kunci: bio-baterai; fermentasi; jeruk nipis; konduktivitas; magnesium sulfat

ABSTRACT
Natural-material bio-batteries offer a simple route for converting chemical energy into electricity while potentially producing less hazardous waste than conventional batteries. This study evaluated the effects of fermentation time and magnesium sulfate ($MgSO_4$) addition on the electrolyte characteristics and performance of a lime juice (Citrus aurantiifolia) bio-battery. The experiment used 200 mL of lime juice per treatment, fermentation periods of 0, 3, 4, 5, 6, and 7 days, and additions of 0.3 M $MgSO_4$ solution at 25, 50, and 75 mL. Zinc (Zn) and copper (Cu) electrodes were installed in a biochamber assembly. The measured parameters were pH, conductivity, terminal voltage, current, power, and blue-LED illumination duration. The data were analyzed descriptively by examining the response patterns across treatment combinations. Fermentation decreased the lime juice pH from 3 to 2, whereas the measured pH after $MgSO_4$ addition was 3 for all treatments. Conductivity, voltage, current, power, and LED illumination duration increased up to day 6 and generally declined on day 7. The optimum condition was obtained after 6 days of fermentation with 75 mL $MgSO_4$, yielding a conductivity of 12.28 mS/cm, voltage of 12.17 V, current of 20.17 mA, power of 245.67 mW, and LED illumination duration of 410 min. Relative to the non-fermented treatment containing 25 mL $MgSO_4$, the optimum treatment increased conductivity by 79.27%, voltage by 181.71%, current by 57.09%, power by 342.89%, and illumination duration by 241.67%. These findings indicate that fermentation and $MgSO_4$ addition can improve charge-carrier availability in the electrolyte; however, fermentation time must be controlled to avoid exceeding the optimum condition.
Keywords: bio-battery; conductivity; fermentation; lime juice; magnesium sulfate

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Atibution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

PENDAHULUAN
Kebutuhan perangkat elektronik portabel, sensor sederhana, dan media pembelajaran energi menyebabkan penggunaan baterai terus meluas. Di sisi lain, baterai konvensional umumnya tersusun atas bahan kimia sintetis dan logam yang dapat menimbulkan persoalan lingkungan ketika limbahnya

tidak dipilah dan dikelola dengan benar. Kondisi tersebut mendorong pencarian sistem elektrokimia alternatif yang memanfaatkan bahan terbarukan, mudah diperoleh, dan berpotensi menghasilkan residu yang lebih aman. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah bio-baterai berbasis sari buah atau limbah organik. Dalam sistem ini, bahan biologis tidak bertindak sebagai sumber elektron tunggal, tetapi terutama sebagai medium elektrolit yang menyediakan ion untuk menjaga perpindahan muatan antara dua elektroda berbeda. Kajian mengenai limbah buah menunjukkan bahwa kandungan air, asam organik, dan mineral dapat menghasilkan beda potensial ketika dipadukan dengan pasangan logam yang sesuai (Sigalingging dan Sitorus, 2024; Suriana et al., 2025).

Secara elektrokimia, bio-baterai bekerja mengikuti prinsip sel galvanik. Oksidasi berlangsung pada elektroda yang lebih mudah melepaskan elektron, sedangkan reduksi berlangsung pada elektroda dengan kecenderungan reduksi lebih tinggi. Pasangan Zn-Cu sering digunakan karena seng memiliki potensial reduksi lebih negatif daripada tembaga, sehingga Zn berperan sebagai anoda dan mengalami oksidasi menjadi Zn^{2+}. Elektron kemudian mengalir melalui rangkaian luar menuju elektroda Cu. Dalam elektrolit buah yang tidak memiliki sumber Cu^{2+} terdefinisi, Cu terutama berfungsi sebagai permukaan katodik dan reaksi reduksi dapat melibatkan ion H^+ atau spesies terlarut lain. Oleh karena komposisi spesies katodik tidak dianalisis dalam penelitian ini, uraian mekanisme tersebut diperlakukan sebagai interpretasi elektrokimia, bukan identifikasi reaksi yang telah dibuktikan secara langsung. Besar keluaran listrik dipengaruhi oleh perbedaan potensial elektroda, luas kontak, hambatan internal, konsentrasi dan mobilitas ion, serta konfigurasi rangkaian sel (Bard dan Faulkner, 2001; Brown et al., 2018).

Jeruk nipis (Citrus aurantiifolia) berpotensi digunakan sebagai elektrolit alami karena sari buahnya mengandung asam organik, terutama asam sitrat dan asam askorbat. Asam-asam tersebut terionisasi sebagian dan menyediakan ion H^+ serta anion organik yang dapat membawa muatan di dalam larutan. Meskipun demikian, asam organik termasuk elektrolit lemah, sehingga derajat ionisasi dan jumlah ion bebasnya dapat membatasi konduktivitas. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa elektrolit berbasis jeruk nipis mampu menghasilkan tegangan dan arus pada pasangan elektroda berbeda, tetapi performanya dipengaruhi oleh komposisi elektrolit, volume bahan, konfigurasi elektroda, dan penguat ionik yang ditambahkan (Yudha, 2023; Mita et al., 2025). Artinya, potensi bahan tidak hanya ditentukan oleh tingkat keasamannya, tetapi juga oleh kemampuan seluruh sistem dalam mempertahankan perpindahan ion dan elektron.

Fermentasi dapat digunakan untuk mengubah karakteristik kimia bahan organik. Pada fermentasi spontan, mikroorganisme indigenous memanfaatkan gula dan senyawa organik sebagai substrat serta menghasilkan metabolit, termasuk asam organik. Perubahan komposisi tersebut dapat memengaruhi pH, jumlah spesies ionik, viskositas, dan konduktivitas larutan. Namun, pengaruh fermentasi tidak selalu meningkat secara linear. Pada awal proses, pembentukan metabolit dapat memperkaya ion terlarut, sedangkan fermentasi yang terlalu lama dapat menyebabkan substrat menipis, aktivitas mikroorganisme menurun, atau produk metabolisme terakumulasi. Oleh sebab itu, pencarian waktu optimum lebih relevan daripada sekadar memperpanjang fermentasi. Penelitian pada limbah buah dan ekstrak buah lain juga memperlihatkan adanya respons kelistrikan yang berubah menurut lama fermentasi dan jenis bahan (Mauliza dan Afrida, 2024; Sigalingging dan Sitorus, 2024; Pinem et al., 2025).

Selain fermentasi, konduktivitas dapat ditingkatkan melalui penambahan garam elektrolit. Magnesium sulfat larut dalam air dan menghasilkan ion Mg^{2+} serta SO_4^{2-}. Penambahan ion tersebut diperkirakan meningkatkan jumlah pembawa muatan dan menurunkan bagian hambatan internal yang berasal dari elektrolit. Pada sistem berbasis jeruk nipis, Mita et al. (2025) melaporkan bahwa kombinasi sari jeruk nipis dan $MgSO_4$ dapat digunakan sebagai bahan elektrolit bio-baterai. Akan tetapi, peningkatan volume garam tidak otomatis menjamin performa tanpa batas karena interaksi antarion, perubahan aktivitas ionik, polarisasi elektroda, dan perubahan sifat fisik larutan dapat mengurangi keuntungan pada konsentrasi tertentu (Bockris dan Reddy, 2000; Kalikin dan Budkov, 2024). Karena itu, pengaruh penambahan $MgSO_4$ perlu dibaca bersama dengan perubahan akibat fermentasi.

Sebagian penelitian terdahulu mengevaluasi bahan buah tanpa fermentasi, menilai fermentasi tanpa penguat ionik, atau menggunakan garam elektrolit pada matriks yang berbeda. Masih terbatas penelitian yang secara bersamaan membandingkan beberapa waktu fermentasi sari jeruk nipis dan

beberapa volume $MgSO_4$ dalam satu konfigurasi biochamber Zn-Cu, lalu menautkan karakteristik elektrolit dengan tegangan, arus, daya, dan durasi beban nyata berupa LED. Kesenjangan tersebut penting karena parameter elektrolit dan keluaran listrik tidak selalu berubah secara identik. pH yang lebih rendah, misalnya, belum tentu menghasilkan daya tertinggi apabila mobilitas ion, hambatan internal, kondisi permukaan elektroda, dan konfigurasi multisel berbeda.

Pengembangan bio-baterai perlu menempatkan istilah ramah lingkungan secara proporsional. Elektrolit berbasis buah memang mengurangi ketergantungan pada larutan sintetis tertentu dan memanfaatkan bahan terbarukan, tetapi pasangan elektroda Zn-Cu tetap mengalami korosi serta menghasilkan ion logam selama pengoperasian. Keunggulan lingkungan baru dapat dinilai secara menyeluruh apabila tersedia informasi umur pakai elektroda, kebutuhan bahan baku, pengolahan sisa elektrolit, dan kemungkinan daur ulang logam. Karena itu, penelitian bio-baterai pada tahap laboratorium lebih tepat dipandang sebagai upaya mengembangkan elektrolit alternatif dan memahami mekanisme konversi energi, bukan langsung sebagai bukti bahwa seluruh sistem bebas dampak lingkungan. Kerangka ini penting agar klaim manfaat tetap sebanding dengan data yang tersedia.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh fermentasi terhadap pH dan konduktivitas sari jeruk nipis, mengevaluasi pengaruh penambahan $MgSO_4$ terhadap tegangan, arus, daya, dan durasi nyala LED, serta menentukan kombinasi waktu fermentasi dan volume $MgSO_4$ yang memberikan kinerja terbaik. Kebaruan praktis penelitian terletak pada pengujian faktorial deskriptif enam waktu fermentasi dan tiga volume larutan $MgSO_4$ pada biochamber Zn-Cu dengan evaluasi karakteristik elektrolit dan unjuk kerja beban. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar untuk optimasi bio-baterai skala kecil dan rancangan eksperimen lanjutan yang menggunakan replikasi, pengukuran pH presisi, serta evaluasi kestabilan selama pengosongan.

METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan metode eksperimen laboratorium dan dilaksanakan pada April sampai Juni 2026 di Laboratorium Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang. Bahan utama berupa sekitar 20 kg jeruk nipis, magnesium sulfat, dan akuades. Peralatan utama meliputi biochamber, pasangan elektroda Zn-Cu, multimeter, konduktometer, indikator pH, LED biru, stopwatch, alat pemeras, saringan, hot plate, dan magnetic stirrer. Sari jeruk nipis sebanyak 200 mL digunakan pada setiap kombinasi perlakuan. Faktor pertama adalah waktu fermentasi, yaitu 0, 3, 4, 5, 6, dan 7 hari. Faktor kedua adalah volume larutan $MgSO_4$ 0,3 M, yaitu 25, 50, dan 75 mL. Jenis elektroda dan volume sari jeruk dipertahankan tetap. Ukuran elektroda yang dicantumkan pada rancangan penelitian adalah 4,5 × 6 cm, sedangkan deskripsi biochamber pada naskah sumber juga menyebutkan pelat 6 × 12 cm. Karena terdapat perbedaan pencatatan ukuran dalam dokumen sumber, artikel ini tidak menggunakan luas elektroda sebagai dasar perhitungan densitas arus.

Pembuatan elektrolit dimulai dengan mencuci jeruk nipis, membelah buah, memeras sari, dan menyaring ampas serta biji. Sari yang telah homogen dibagi menjadi aliquot 200 mL dan ditempatkan dalam wadah fermentasi. Fermentasi berlangsung spontan tanpa penambahan starter. Keberhasilan proses diamati secara organoleptik melalui perubahan aroma menjadi lebih asam dan munculnya gelembung kecil, dengan syarat tidak ditemukan jamur atau bau busuk. Sampel dikeluarkan sesuai waktu fermentasi yang telah ditentukan. Sampel hari ke-0 digunakan sebagai kontrol tanpa fermentasi, sedangkan sari jeruk nipis murni juga diuji secara terpisah untuk memperoleh data awal sebelum penambahan $MgSO_4$.

Larutan $MgSO_4$ dibuat pada konsentrasi 0,3 M. Massa $MgSO_4$ ditimbang sesuai kebutuhan, dilarutkan dalam akuades, dan volumenya ditetapkan menjadi 25, 50, atau 75 mL. Setiap larutan kemudian dicampurkan dengan 200 mL sari jeruk nipis pada masing-masing waktu fermentasi dan diaduk sampai homogen. Dengan rancangan ini diperoleh 18 kombinasi perlakuan. Tabel 1 merangkum faktor, taraf, dan variabel yang dipertahankan selama percobaan.

Bio-baterai dirakit menggunakan elektroda Zn sebagai anoda dan Cu sebagai katoda pada biochamber multisel. Jarak antarsekat dalam biochamber sekitar 2 cm. Elektrolit dimasukkan ke ruang sel, elektroda dipasang, dan terminal rangkaian dihubungkan dengan multimeter. Nilai yang dilaporkan merupakan tegangan terminal keseluruhan rangkaian biochamber, bukan potensial satu pasangan elektroda tunggal. Konduktivitas diukur menggunakan konduktometer dan dinyatakan dalam mS/cm.

pH diukur menggunakan indikator pH. Tegangan diukur dalam volt, arus dalam miliampere, dan daya dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$P = V \times I \quad (1)$$

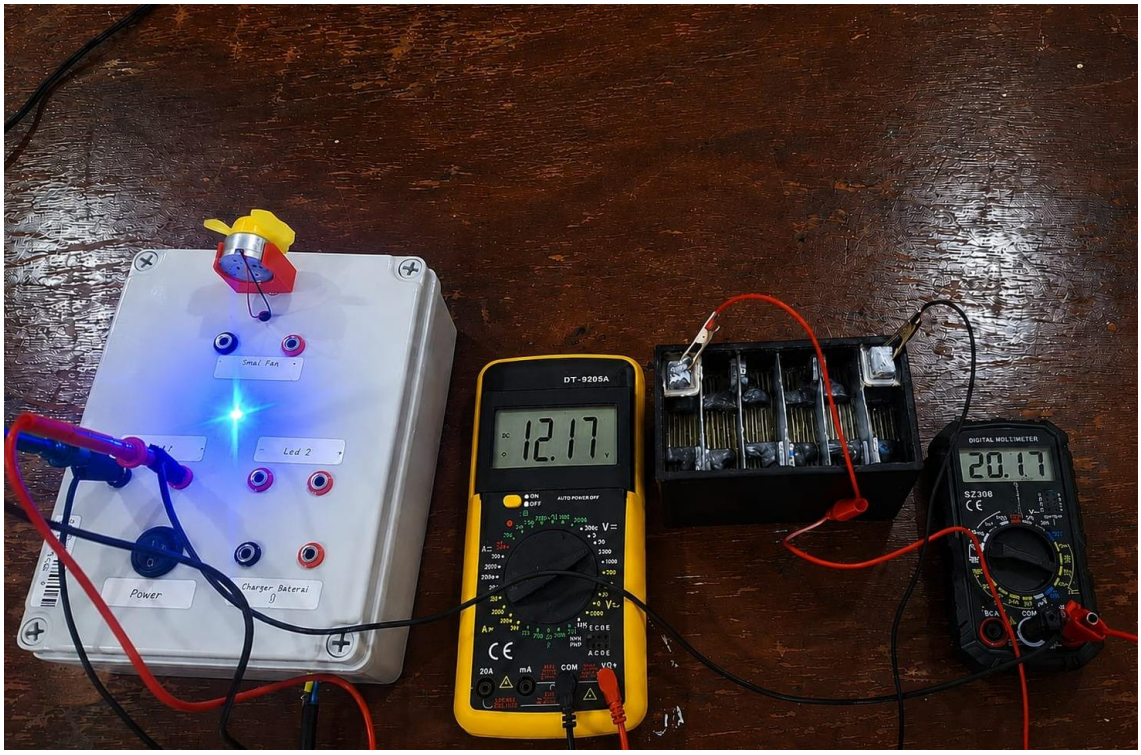
dengan P adalah daya listrik, V adalah tegangan, dan I adalah arus. Karena arus dinyatakan dalam mA, hasil perkalian V dan mA dilaporkan dalam mW. Pengujian beban dilakukan dengan LED biru. Durasi nyala dihitung sejak LED mulai menyala sampai lampu padam atau arus tidak lagi terdeteksi. Foto rangkaian pengujian pada kondisi optimum ditampilkan pada Gambar 1.

Analisis dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan pola respons antarwaktu fermentasi dan volume $MgSO_4$. Kondisi optimum ditentukan berdasarkan kombinasi yang menghasilkan konduktivitas, tegangan, arus, daya, dan durasi nyala tertinggi secara konsisten. Persentase peningkatan dihitung relatif terhadap perlakuan hari ke-0 dengan $MgSO_4$ 25 mL menggunakan selisih nilai dibagi nilai awal kemudian dikalikan 100%. Naskah sumber tidak melaporkan jumlah ulangan, simpangan baku, maupun uji statistik inferensial. Oleh karena itu, istilah "berpengaruh" dalam artikel ini digunakan dalam makna adanya perubahan pola pengukuran, bukan bukti signifikansi statistik.Sebagai analisis tambahan, koefisien korelasi Pearson dihitung dari 18 kombinasi perlakuan untuk menggambarkan keselarasan perubahan konduktivitas dengan tegangan, arus, daya, dan durasi LED. Korelasi tersebut digunakan semata-mata sebagai ukuran hubungan deskriptif antarnilai perlakuan. Nilai korelasi tidak disertai pengujian hipotesis dan tidak dipakai untuk mengklaim hubungan kausal, karena setiap kombinasi tidak memiliki data ulangan yang dilaporkan. Pendekatan ini membantu merangkum apakah parameter listrik bergerak searah dengan perubahan konduktivitas, sekaligus menjaga interpretasi tetap sesuai dengan keterbatasan rancangan.

Konsistensi perhitungan daya diperiksa dengan mengalikan kembali setiap nilai tegangan dan arus. Perbedaan pembulatan dipertahankan mengikuti data sumber. Nilai desimal pada naskah diseragamkan menggunakan koma untuk teks berbahasa Indonesia, sedangkan grafik menggunakan titik sesuai konvensi perangkat lunak. Data sari murni diperlakukan sebagai karakterisasi awal dan tidak dimasukkan ke dalam korelasi 18 kombinasi, karena sampel tersebut belum menerima penambahan $MgSO_4$ dan tidak berada dalam matriks perlakuan yang sama. Pemisahan ini mencegah pencampuran kontrol awal dengan rancangan dua faktor.

Tabel 1. Rancangan variabel penelitian

Komponen	Kondisi/variasi	Keterangan
Bahan elektrolit	Sari jeruk nipis 200 mL	Tetap pada setiap kombinasi
Waktu fermentasi	0, 3, 4, 5, 6, dan 7 hari	Fermentasi spontan
Larutan $MgSO_4$	0,3 M; volume 25, 50, dan 75 mL	Dicampurkan setelah fermentasi
Elektroda	Zn-Cu	Zn sebagai anoda; Cu sebagai katoda
Parameter	pH, konduktivitas, tegangan, arus, daya, durasi LED	Analisis deskriptif



Gambar 1. Rangkaian biochamber dan pengujian pada perlakuan optimum (dokumentasi penelitian)

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Awal dan Perubahan pH Elektrolit

Sari jeruk nipis murni memiliki pH 3, konduktivitas 4,685 mS/cm, tegangan terminal 2,91 V, dan arus 4,75 mA. Setelah fermentasi, pH sari sebelum penambahan $MgSO_4$ tercatat menurun menjadi 2. Penurunan pH menunjukkan bertambahnya konsentrasi ion H^+ atau terbentuknya senyawa asam selama fermentasi spontan. Mikroorganisme indigenous pada bahan dapat menguraikan gula dan senyawa organik menjadi metabolit asam, sehingga keseimbangan asam-basa larutan bergeser. Interpretasi ini sejalan dengan prinsip fermentasi bahan pangan, yaitu bahwa perubahan komposisi metabolit sangat bergantung pada jenis mikroorganisme, ketersediaan substrat, suhu, dan lama proses (Madigan et al., 2018; Yuan et al., 2024). Namun, penelitian ini tidak mengidentifikasi mikroorganisme atau jenis asam yang terbentuk, sehingga penyebab kimia spesifik penurunan pH belum dapat dipastikan.

Setelah $MgSO_4$ ditambahkan, pH seluruh kombinasi perlakuan terukur sebesar 3. Hasil yang seragam tidak berarti bahwa konsentrasi ion seluruh sampel identik. pH hanya menggambarkan aktivitas ion hidrogen, sedangkan konduktivitas dipengaruhi oleh seluruh spesies bermuatan dan mobilitasnya. Ion Mg^{2+} dan SO_4^{2-} dapat meningkatkan kemampuan hantar listrik tanpa harus menurunkan pH. Selain itu, penggunaan kertas indikator memiliki resolusi terbatas sehingga perubahan pH kecil antarsampel mungkin tidak tertangkap. Dengan demikian, pH pada penelitian ini lebih tepat digunakan sebagai indikator kasar perubahan keasaman daripada parameter tunggal untuk memprediksi kinerja listrik.

Temuan ini menegaskan bahwa keasaman dan konduktivitas perlu dipisahkan secara konseptual. Larutan dengan pH sama dapat memiliki konduktivitas berbeda apabila konsentrasi garam, derajat disosiasi, dan mobilitas ionnya berbeda. Dalam sistem bio-baterai, reaksi pada antarmuka elektroda memerlukan medium yang mampu menjaga keseimbangan muatan. Oleh karena itu, perubahan pH dari 2 menjadi 3 setelah penambahan $MgSO_4$ tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai penurunan kemampuan elektrolit. Data konduktivitas justru menunjukkan bahwa penambahan $MgSO_4$ meningkatkan daya hantar dibandingkan sari murni.

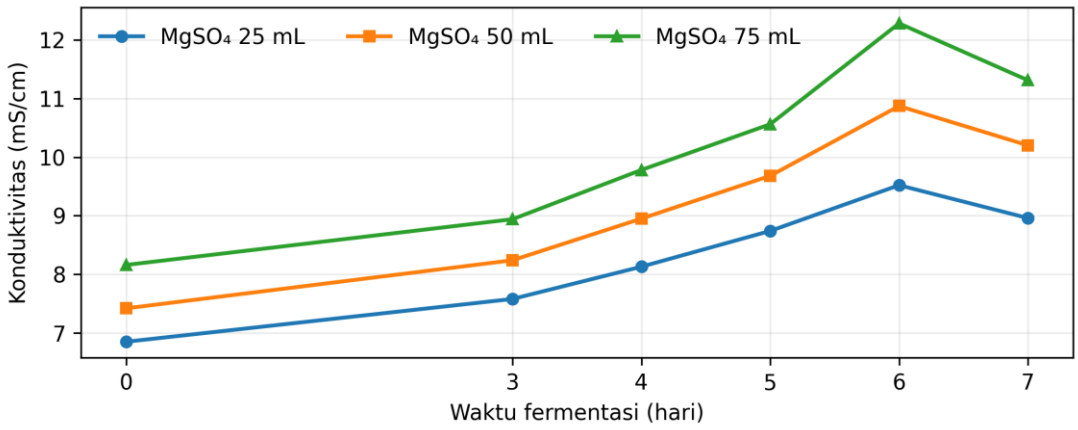
3.2 Pengaruh Fermentasi dan $MgSO_4$ terhadap Konduktivitas

Konduktivitas meningkat pada seluruh variasi volume $MgSO_4$ dari hari ke-0 sampai hari ke-6. Pada volume 25 mL, konduktivitas berubah dari 6,850 menjadi 9,520 mS/cm. Pada volume 50 mL, nilainya meningkat dari 7,420 menjadi 10,87 mS/cm. Pada volume 75 mL, peningkatan berlangsung dari 8,160 menjadi 12,28 mS/cm. Pola tersebut menunjukkan dua kecenderungan yang saling memperkuat. Pertama, semakin lama fermentasi sampai hari ke-6, semakin tinggi kemampuan larutan menghantarkan ion. Kedua, pada waktu fermentasi yang sama, volume $MgSO_4$ lebih besar umumnya menghasilkan konduktivitas lebih tinggi. Kurva lengkap ditampilkan pada Gambar 2.

Kenaikan konduktivitas selama fermentasi dapat dikaitkan dengan terbentuknya komponen terlarut baru dan perubahan derajat ionisasi senyawa organik. Fermentasi dapat memecah molekul kompleks menjadi molekul lebih sederhana, mengubah pH, dan meningkatkan fraksi spesies yang bergerak dalam larutan. Penambahan $MgSO_4$ kemudian menyediakan ion anorganik yang terdisosiasi lebih kuat dibandingkan asam organik lemah. Kombinasi kedua mekanisme tersebut meningkatkan jumlah pembawa muatan. Secara teoritis, konduktivitas ditentukan bukan hanya oleh jumlah ion, tetapi juga muatan, ukuran terhidrasi, mobilitas, suhu, serta interaksi antarion (Bockris dan Reddy, 2000; Kalikin dan Budkov, 2024). Karena suhu dan viskositas tidak diukur, kontribusi relatif setiap faktor belum dapat dipisahkan.

Nilai tertinggi 12,28 mS/cm diperoleh pada fermentasi 6 hari dengan $MgSO_4$ 75 mL. Dibandingkan kontrol hari ke-0 dengan $MgSO_4$ 25 mL, peningkatan konduktivitas mencapai 79,27%. Dibandingkan sari jeruk murni, peningkatannya mencapai 162,11%. Angka tersebut memperlihatkan bahwa perlakuan gabungan menghasilkan perubahan lebih besar daripada penggunaan sari murni saja. Penelitian pada limbah buah lain juga melaporkan bahwa fermentasi dapat mengubah pH dan parameter listrik, meskipun arah dan waktu optimumnya berbeda menurut bahan (Mauliza dan Afrida, 2024; Sigalingging dan Sitorus, 2024). Perbedaan ini masuk akal karena kandungan gula, asam, mineral, mikroflora awal, serta kondisi fermentasi setiap bahan tidak sama.

Pada hari ke-7, konduktivitas menurun menjadi 8,960; 10,20; dan 11,31 mS/cm untuk $MgSO_4$ 25, 50, dan 75 mL. Pada volume 75 mL, penurunan dari hari ke-6 sebesar 7,90%. Penurunan serentak pada ketiga volume menunjukkan bahwa faktor waktu fermentasi kemungkinan lebih dominan daripada variasi garam pada fase tersebut. Salah satu penjelasan yang mungkin adalah fermentasi telah melewati kondisi optimum, sehingga substrat yang mudah dimanfaatkan berkurang dan pembentukan spesies ionik baru melambat. Produk metabolisme juga dapat berinteraksi atau membentuk pasangan ion yang mobilitasnya lebih rendah. Akan tetapi, karena total padatan terlarut, komposisi asam, populasi mikroba, dan viskositas tidak diukur, penjelasan ini tetap bersifat dugaan yang perlu diuji pada penelitian lanjutan.



Gambar 2. Perubahan konduktivitas berdasarkan waktu fermentasi dan volume $MgSO_4$

3.3 Tegangan, Arus, dan Daya Bio-Baterai

Pola tegangan, arus, dan daya mengikuti kecenderungan konduktivitas. Pada semua volume $MgSO_4$, keluaran listrik meningkat dari hari ke-0 sampai hari ke-6. Tegangan tertinggi 12,17 V, arus tertinggi 20,17 mA, dan daya tertinggi 245,67 mW diperoleh pada fermentasi 6 hari dengan $MgSO_4$ 75

mL. Nilai tersebut adalah tegangan terminal dan arus rangkaian biochamber secara keseluruhan. Karena perangkat terdiri atas lebih dari satu ruang sel, hasilnya tidak boleh dibandingkan langsung dengan potensial standar satu sel Zn-Cu tanpa mempertimbangkan jumlah sel, konfigurasi seri-paralel, dan hambatan internal. Gambar 3 menampilkan perubahan ketiga parameter untuk setiap kombinasi perlakuan.

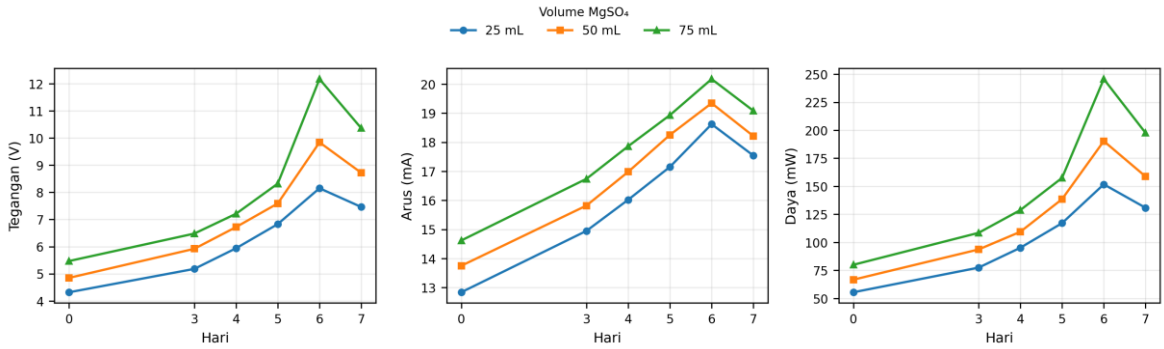
Peningkatan tegangan dapat dijelaskan melalui perbaikan kondisi elektrolit yang mendukung pemisahan muatan dan mengurangi rugi potensial akibat hambatan internal. Dalam kondisi terbuka atau beban sangat kecil, tegangan terminal terutama dipengaruhi oleh potensial elektrokimia dan polarisasi. Ketika jumlah pembawa muatan meningkat, penurunan tegangan internal dapat berkurang sehingga tegangan yang terukur pada terminal menjadi lebih tinggi. Namun, peningkatan tegangan dari 4,32 V menjadi 12,17 V juga dapat dipengaruhi oleh cara penyambungan multisel. Artikel sumber tidak menyajikan potensial tiap sel, sehingga kontribusi masing-masing kompartemen tidak dapat dianalisis secara terpisah.

Arus meningkat lebih moderat daripada tegangan. Dari kontrol hari ke-0 dengan $MgSO_4$ 25 mL menuju kondisi optimum, arus bertambah 57,09%, sedangkan tegangan bertambah 181,71%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa peningkatan tegangan terminal tidak sepenuhnya diterjemahkan menjadi kenaikan arus dengan proporsi sama. Arus dibatasi oleh hambatan internal elektrolit, resistansi kontak, luas aktif elektroda, polarisasi, dan beban pengukuran. Permukaan Zn juga dapat mengalami pembentukan lapisan produk korosi yang menghambat transfer elektron, sedangkan gelembung gas pada katoda dapat menurunkan luas kontak efektif. Faktor-faktor tersebut tidak diukur, tetapi penting untuk menjelaskan mengapa respons arus lebih landai daripada respons tegangan.

Daya merupakan hasil perkalian tegangan dan arus, sehingga peningkatan kedua parameter menghasilkan amplifikasi yang lebih besar. Daya naik dari 55,47 mW pada kontrol hari ke-0 dengan $MgSO_4$ 25 mL menjadi 245,67 mW pada kondisi optimum, atau meningkat 342,89%. Peningkatan daya yang lebih tajam menunjukkan bahwa optimasi elektrolit memberikan manfaat simultan pada beda potensial dan kemampuan mengalirkan muatan. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian bio-baterai berbasis bahan organik yang menunjukkan hubungan antara karakteristik elektrolit, tegangan, arus, dan daya (Jumiati et al., 2024; Mita et al., 2025; Christwardana et al., 2025). Meskipun demikian, perbandingan numerik lintas penelitian harus dilakukan hati-hati karena jenis bahan, ukuran elektroda, jumlah sel, jarak elektroda, dan alat ukur berbeda.

Pengaruh volume $MgSO_4$ terlihat jelas pada setiap waktu fermentasi. Sebagai contoh, pada hari ke-6, peningkatan volume $MgSO_4$ dari 25 menjadi 75 mL menaikkan tegangan dari 8,15 menjadi 12,17 V, arus dari 18,62 menjadi 20,17 mA, dan daya dari 151,75 menjadi 245,67 mW. Tegangan meningkat sekitar 49,33%, arus 8,32%, dan daya 61,89%. Respons arus yang lebih kecil kembali menunjukkan bahwa sistem tidak hanya dikendalikan oleh jumlah ion. Setelah titik tertentu, hambatan pada antarmuka elektroda atau keterbatasan reaksi dapat menjadi faktor pembatas. Penambahan $MgSO_4$ juga meningkatkan volume total elektrolit, sehingga efek yang diamati merupakan gabungan penambahan jumlah ion dan perubahan rasio sari jeruk terhadap volume total larutan.

Pada hari ke-7, tegangan, arus, dan daya menurun pada seluruh volume $MgSO_4$. Untuk 75 mL, tegangan turun 14,87%, arus turun 5,40%, dan daya turun 19,54% dibandingkan hari ke-6. Penurunan daya lebih besar karena merupakan hasil gabungan penurunan tegangan dan arus. Pola ini memperkuat kesimpulan bahwa hari ke-6 merupakan kondisi optimum pada rentang yang diuji. Akan tetapi, optimum tersebut bersifat spesifik terhadap bahan, kondisi fermentasi spontan, konsentrasi $MgSO_4$ 0,3 M, volume sari, dan konfigurasi biochamber dalam penelitian ini. Perubahan suhu, jenis starter, sanitasi, atau geometri elektroda dapat menggeser waktu optimum.



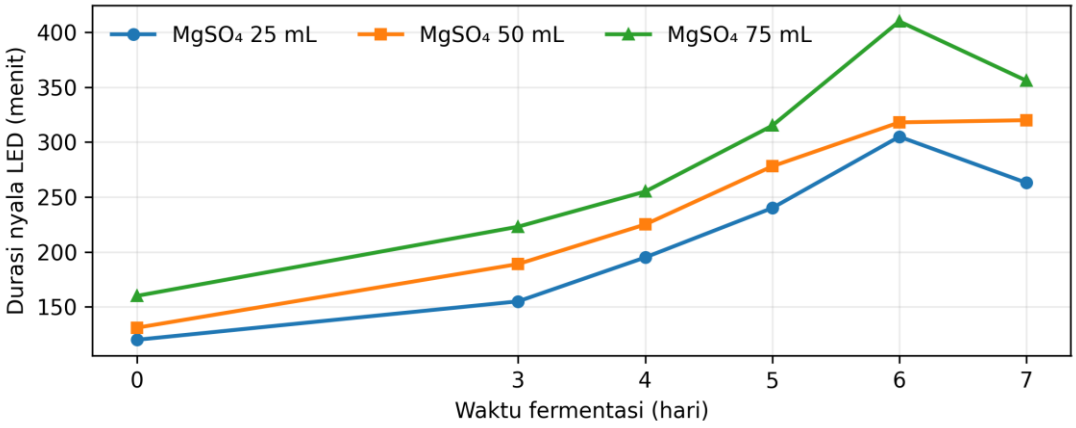
Gambar 3. Perubahan tegangan, arus, dan daya berdasarkan waktu fermentasi dan volume $MgSO_4$

3.4 Durasi Nyala LED dan Konsistensi Kondisi Optimum

Pengujian LED memberikan ukuran kinerja yang lebih aplikatif daripada pembacaan sesaat pada multimeter. Durasi nyala meningkat seiring waktu fermentasi dan volume $MgSO_4$, dengan nilai tertinggi 410 menit pada fermentasi 6 hari dan $MgSO_4$ 75 mL. Perlakuan hari ke-0 dengan $MgSO_4$ 25 mL hanya menyalakan LED selama 120 menit. Dengan demikian, kondisi optimum memperpanjang durasi sebesar 290 menit atau 241,67%. Kurva durasi pada Gambar 4 umumnya mengikuti pola daya, sehingga elektrolit yang menghasilkan daya awal lebih tinggi juga cenderung mempertahankan beban lebih lama.

Hubungan tersebut tidak sepenuhnya identik. Pada $MgSO_4$ 50 mL, durasi hari ke-7 sebesar 320 menit sedikit lebih tinggi daripada hari ke-6 sebesar 318 menit, walaupun konduktivitas, tegangan, arus, dan daya hari ke-7 lebih rendah. Selisih dua menit sangat kecil dan dapat berasal dari variasi awal penyalaan, ambang padam LED, kondisi elektroda, atau ketelitian stopwatch. Karena penelitian tidak melaporkan ulangan, selisih kecil itu tidak cukup untuk menyatakan bahwa hari ke-7 lebih baik. Penetapan kondisi optimum tetap lebih kuat pada hari ke-6 dengan 75 mL karena semua parameter utama mencapai nilai maksimum pada kombinasi yang sama.

Durasi LED tidak dapat langsung disetarakan dengan kapasitas baterai tanpa kurva arus terhadap waktu. Perhitungan kapasitas sederhana $Q = I \times t$ hanya valid apabila arus yang digunakan merupakan arus rata-rata selama pengosongan atau tersedia data integrasi arus terhadap waktu. Penelitian ini mencatat arus awal dan waktu nyala, tetapi tidak melaporkan perubahan arus secara real time. Oleh karena itu, artikel ini tidak menghitung kapasitas mAh agar tidak menghasilkan estimasi yang terlalu tinggi. Pengujian lanjutan perlu menggunakan data logger, resistor beban terdefinisi, dan pencatatan tegangan serta arus periodik sampai tegangan cutoff.



Gambar 4. Durasi nyala LED berdasarkan waktu fermentasi dan volume $MgSO_4$

3.5 Hubungan Deskriptif Antarparameter

Pengamatan terhadap seluruh 18 kombinasi menunjukkan bahwa perubahan konduktivitas bergerak sangat searah dengan perubahan keluaran listrik. Koefisien korelasi deskriptif antara konduktivitas dan tegangan adalah $r = 0{,}978$, antara konduktivitas dan arus $r = 0{,}944$, antara konduktivitas dan daya $r = 0{,}980$, serta antara konduktivitas dan durasi LED $r = 0{,}974$. Hubungan

tersebut mendukung argumentasi bahwa transport ion dalam elektrolit merupakan salah satu faktor utama yang menentukan kinerja rangkaian. Ketika konduktivitas meningkat, rugi ohmik di dalam larutan cenderung menurun dan reaksi elektrokimia dapat mempertahankan aliran muatan dengan lebih baik. Namun, koefisien tinggi tidak membuktikan bahwa konduktivitas adalah satu-satunya penyebab, sebab semua parameter juga berubah bersama waktu fermentasi dan volume $MgSO_4$.

Hubungan paling kuat terlihat antara tegangan dan daya, yaitu r = 0,998. Hasil ini logis karena daya dihitung langsung dari perkalian tegangan dan arus, sedangkan variasi relatif tegangan lebih besar daripada variasi arus. Korelasi daya dengan durasi LED juga tinggi, yaitu r = 0,981. Artinya, kombinasi yang menghasilkan daya awal lebih besar pada umumnya mampu mempertahankan LED lebih lama. Meski demikian, daya awal tidak mewakili seluruh profil pengosongan. Dua elektrolit dengan daya awal mirip dapat memiliki durasi berbeda apabila laju polarisasi, penurunan konsentrasi ion di sekitar elektroda, atau korosi Zn berlangsung dengan kecepatan berbeda.

Korelasi waktu fermentasi dengan konduktivitas, tegangan, arus, daya, dan durasi masing-masing sebesar 0,764; 0,797; 0,887; 0,800; dan 0,862. Nilai ini lebih rendah daripada korelasi antarparameter kinerja karena respons terhadap waktu tidak linear sempurna. Semua parameter meningkat sampai hari ke-6, lalu menurun pada hari ke-7. Dengan demikian, model linear hanya merangkum kecenderungan umum dan tidak menggantikan identifikasi titik optimum. Korelasi volume $MgSO_4$ dengan parameter kinerja berada pada tingkat sedang karena pengaruh volume juga berinteraksi dengan waktu fermentasi. Peningkatan dari 25 ke 75 mL memberikan manfaat terbesar ketika sari telah mencapai kondisi fermentasi yang mendukung.

Secara konseptual, data membentuk rantai respons: fermentasi dan $MgSO_4$ mengubah komposisi elektrolit, perubahan tersebut tercermin pada konduktivitas, lalu kondisi transport ion memengaruhi tegangan terminal, arus, daya, dan ketahanan beban. Rantai ini berguna sebagai kerangka kerja penelitian lanjutan. Namun, untuk menguji mekanismenya dibutuhkan pengukuran hambatan internal dan analisis komposisi kimia. Tanpa data tersebut, korelasi hanya menunjukkan keterkaitan pola, bukan jalur sebab-akibat yang telah terverifikasi.

Tabel 2. Korelasi deskriptif antarparameter pada 18 kombinasi perlakuan

Pasangan parameter	Koefisien r	Interpretasi deskriptif
Konduktivitas - tegangan	0,978	Sangat kuat, searah
Konduktivitas - arus	0,944	Sangat kuat, searah
Konduktivitas - daya	0,980	Sangat kuat, searah
Konduktivitas - durasi LED	0,974	Sangat kuat, searah
Daya - durasi LED	0,981	Sangat kuat, searah

3.6 Kondisi Optimum, Implikasi, dan Keterbatasan

Ringkasan kondisi penting pada Tabel 3 memperlihatkan transisi dari sari jeruk murni menuju elektrolit terfermentasi yang diperkuat $MgSO_4$. Kombinasi fermentasi 6 hari dan $MgSO_4$ 75 mL menghasilkan seluruh nilai maksimum: pH 3, konduktivitas 12,28 mS/cm, tegangan 12,17 V, arus 20,17 mA, daya 245,67 mW, dan durasi LED 410 menit. Konsistensi antarpengukuran memperkuat interpretasi bahwa perlakuan tersebut menyediakan kondisi transport ion paling menguntungkan dalam rentang percobaan. Tabel 4 menunjukkan besarnya peningkatan relatif terhadap kontrol hari ke-0 dengan $MgSO_4$ 25 mL.

Secara praktis, hasil ini menunjukkan bahwa sari jeruk nipis dapat dimanfaatkan sebagai elektrolit bio-baterai skala kecil setelah modifikasi sederhana. Fermentasi berfungsi sebagai tahap pengondisian biologis, sedangkan $MgSO_4$ bertindak sebagai penguat ionik. Pendekatan ini cocok untuk demonstrasi prinsip sel galvanik, media pembelajaran, atau sumber daya berdaya rendah. Namun, sistem belum dapat diposisikan sebagai pengganti baterai komersial karena belum dievaluasi densitas energi, efisiensi coulombic, stabilitas siklus, kebocoran, korosi elektroda, konsistensi antarbatch, masa simpan, dan aspek keselamatan.

Dari sudut pandang desain, peningkatan tegangan rangkaian dapat dicapai melalui penambahan sel secara seri, sedangkan kemampuan memasok arus dapat diperbaiki melalui luas elektroda, jarak antarelektrroda yang lebih kecil, dan konfigurasi paralel yang tepat. Akan tetapi, penambahan jumlah sel juga menambah sambungan, resistansi kontak, kebutuhan elektrolit, dan risiko ketidakseimbangan antar-kompartemen. Karena nilai 12,17 V merupakan tegangan terminal biochamber multisel, penelitian lanjutan perlu melaporkan jumlah sel aktif dan tegangan setiap sel. Pelaporan tersebut akan memungkinkan perhitungan efisiensi penyusunan seri dan mengidentifikasi sel yang membatasi performa keseluruhan.

Aspek keberlanjutan juga memerlukan evaluasi setelah pengoperasian. Sisa elektrolit mengandung komponen organik, $MgSO_4$, dan kemungkinan ion Zn hasil oksidasi anoda. Larutan tersebut tidak seharusnya langsung dibuang tanpa karakterisasi. Strategi yang lebih bertanggung jawab mencakup pemisahan elektroda untuk digunakan kembali, pengukuran kandungan logam pada elektrolit bekas, dan penentuan metode pengolahan sebelum pembuangan. Dengan demikian, penggunaan bahan alami pada elektrolit dapat dikombinasikan dengan pengelolaan logam yang memadai. Penilaian daur hidup sederhana juga diperlukan untuk membandingkan energi dan bahan yang digunakan selama pemerasan, fermentasi, pembuatan garam, serta perakitan dengan energi listrik yang benar-benar dihasilkan.

Penelitian memiliki beberapa keterbatasan penting. Pertama, tidak terdapat informasi replikasi dan variasi data, sehingga kesimpulan bersifat deskriptif. Kedua, pH diukur dengan indikator kertas sehingga resolusinya rendah. Ketiga, fermentasi berlangsung spontan tanpa kontrol mikroorganisme, suhu, total gula, atau komposisi asam. Keempat, penambahan volume $MgSO_4$ sekaligus mengubah volume total dan pengenceran sari, sehingga efek konsentrasi ion tidak sepenuhnya terpisah dari efek volume. Kelima, ukuran elektroda dicatat tidak konsisten pada bagian metode, sehingga densitas arus tidak dapat dihitung. Keenam, konfigurasi listrik per sel, hambatan internal, dan kurva discharge tidak tersedia. Keterbatasan ini perlu dicantumkan agar hasil tidak ditafsirkan melebihi cakupan data.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan rancangan faktorial dengan sedikitnya tiga ulangan, mengontrol suhu dan kondisi anaerob atau aerob, serta mengukur pH menggunakan pH meter. Konsentrasi asam organik, total padatan terlarut, dan jumlah mikroorganisme perlu dianalisis untuk menghubungkan proses fermentasi dengan perubahan konduktivitas. Volume total elektrolit sebaiknya dibuat sama pada semua perlakuan agar efek $MgSO_4$ dapat diisolasi. Pengujian elektrokimia dapat diperkuat melalui pengukuran open-circuit voltage per sel, internal resistance, electrochemical impedance spectroscopy, dan kurva discharge pada beban tetap. Dengan perbaikan tersebut, mekanisme peningkatan kinerja dapat diuji secara kuantitatif dan hasilnya lebih mudah dibandingkan dengan penelitian lain.

Tabel 3. Ringkasan karakteristik elektrolit dan kinerja pada kondisi terpilih

Kondisi	$MgSO_4$ (mL)	M	pH	$\varkappa$ (mS/cm)	V (V)	I (mA)	P (mW)	LED (menit)
Sari murni	-	-	3	4,685	2,91	4,75	-	-
Hari 0	25	0,3	3	6,850	4,32	12,84	55,47	120
Hari 6	25	0,3	3	9,520	8,15	18,62	151,75	305
Hari 6	50	0,3	3	10,87	9,84	19,34	190,31	318
Hari 6	75	0,3	3	12,28	12,17	20,17	245,67	410
Hari 7	75	0,3	3	11,31	10,36	19,08	197,67	356

Tabel 4. Peningkatan kondisi optimum terhadap kontrol hari ke-0 dengan $MgSO_4$ 25 mL

Parameter	Kontrol	Optimum	Peningkatan
Konduktivitas	6,850 mS/cm	12,28 mS/cm	79,27%
Tegangan	4,32 V	12,17 V	181,71%

Parameter	Kontrol	Optimum	Peningkatan
Arus	12,84 mA	20,17 mA	57,09%
Daya	55,47 mW	245,67 mW	342,89%
Durasi LED	120 menit	410 menit	241,67%

KESIMPULAN

Fermentasi dan penambahan $MgSO_4$ menghasilkan pola perubahan yang konsisten pada karakteristik elektrolit dan kinerja bio-baterai sari jeruk nipis. Fermentasi menurunkan pH sari dari 3 menjadi 2, sedangkan pH setelah penambahan $MgSO_4$ terukur 3. Konduktivitas, tegangan, arus, daya, dan durasi nyala LED meningkat sampai fermentasi hari ke-6 dan umumnya menurun pada hari ke-7. Kondisi optimum diperoleh pada fermentasi 6 hari dengan $MgSO_4$ 0,3 M sebanyak 75 mL, yang menghasilkan konduktivitas 12,28 mS/cm, tegangan terminal 12,17 V, arus 20,17 mA, daya 245,67 mW, dan durasi LED 410 menit. Dibandingkan kontrol hari ke-0 dengan $MgSO_4$ 25 mL, peningkatan masing-masing parameter adalah 79,27%, 181,71%, 57,09%, 342,89%, dan 241,67%. Hasil menunjukkan bahwa fermentasi dan penguatan ionik dapat memperbaiki transport muatan, tetapi waktu fermentasi perlu dibatasi pada kondisi optimum. Karena data belum dilengkapi replikasi dan uji inferensial, temuan ini menjadi dasar optimasi lanjutan, bukan bukti signifikansi statistik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, atas dukungan fasilitas laboratorium selama pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Andini, S. J., & Heriansyah. (2024). Pengaruh waktu fermentasi terhadap kelistrikan bio-baterai pada larutan buah mengkudu (Morinda citrifolia L.). Laboratory Journal: Jurnal Laboratorium Sains Terapan, 7-11.

Aprilia, L. A., Zamhari, M., & Yerizam, M. (2025). Karakterisasi elektrolit biobaterai berbasis kulit nanas dengan NaCl sebagai penguat konduktivitas dan NaOH sebagai pelarut. Chemical Engineering Journal Storage, 5(4).

Atkins, P., & de Paula, J. (2014). Physical Chemistry (10th ed.). Oxford University Press.

Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications (2nd ed.). Wiley.

Bockris, J. O. M., & Reddy, A. K. N. (2000). Modern Electrochemistry 1: Ionics (2nd ed.). Kluwer Academic/Plenum Publishers.

Bramantio, I., Rusdianasari, & Pramito, A. I. A. (2025). Pemanfaatan jeruk manis dengan penambahan natrium karbonat (Na_2CO_3) untuk pembuatan bio-baterai. Jurnal Teknologi, 25(3), 204-209.

Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). Chemistry: The Central Science (14th ed.). Pearson.

Chang, R., & Goldsby, K. A. (2016). Chemistry (12th ed.). McGraw-Hill Education.

Christwardana, M., Pramudita, R. A., & Ngadiwiyana. (2025). Electrochemical characteristics of ambarella peel waste as liquid electrolyte for Zn-Cu biobattery. Applied Science and Engineering Progress. https://doi.org/10.14416/j.asep.2024.11.001

Jumiati, E., Nasution, N., & Pratiwi, P. A. (2024). Analisis elektroda Cu-Zn pada tegangan, arus dan daya listrik bio-baterai larutan sari apel hijau. FISITEK: Jurnal Ilmu Fisika dan Teknologi, 8(1), 17-22. https://doi.org/10.30821/fisitek.v8i1.17918

Kalikin, N. N., & Budkov, Y. A. (2024). Modified Debye-Hückel-Onsager theory for electrical conductivity in aqueous electrolyte solutions. The Journal of Chemical Physics, 161.

Koumeir, D., Matar, Z., & Chmayssem, A. (2024). Recent advances in applied electrochemistry: A review. Chemistry, 6(3), 407-434.

Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2018). Brock Biology of Microorganisms (15th ed.). Pearson.

Mauliza, R., & Afrida, J. (2024). Effect of fermentation duration on the electrical properties of ketapang and tamarind extracts. EduFisika: Jurnal Pendidikan Fisika, 9(3), 332-342.

Mita, F., Rahmawati, R., Toruan, P. L., & Rahman, D. Y. (2025). Development of a bio-battery based on key lime juice and $MgSO_4$ electrolyte in a solid tapioca flour matrix. Jurnal Penelitian Fisika dan Terapannya (JUPITER), 7(1), 10-18.

Pinem, L. F., Masthura, & Daulay, A. H. (2025). Analisis pengaruh variasi waktu fermentasi terhadap kelistrikan biobaterai sari buah markisa (Passiflora edulis). JISTech: Journal of Islamic Science and Technology, 10(1).

Sarah, M., Zelfi, E. R., Kuswara, M. P., & Hasibuan, I. M. (2024). Studi pengaruh variasi konsentrasi garam dapur (NaCl) sebagai larutan elektrolit dan pH bahan baku dalam pembuatan biobaterai kering berbasis limbah kulit pisang kepok. Jurnal Teknik Kimia USU, 13(1), 32-39.

Sigalingging, R., & Sitorus, Y. (2024). Study of fruit waste as bio-battery materials for alternative electricity. Journal of Sustainable Agriculture and Biosystems Engineering, 2(1), 1-10. https://doi.org/10.32734/jsabe.v2i1.14683

Suriana, I. W., Antari, I. A. D. G., Ariastina, W. G., & Setiawan, I. N. (2025). Journal review: Potential of orange peel, fruit, and vegetable waste as an environmentally friendly electrolyte source for bio-batteries. Journal La Lifesci, 6(4).

Yuan, X., Wang, T., Sun, L., Qiao, Z., Pan, H., Zhong, Y., & Zhuang, Y. (2024). Recent advances of fermented fruits: A review on strains, fermentation strategies, and functional activities. Food Chemistry: X, 22, 101482. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101482

Yudha, P. K. (2023). Pemanfaatan ekstrak kulit jeruk nipis sebagai potensi sumber alternatif energi listrik. Jurnal Ilmu Fisika dan Terapannya, 10(2), 35-39.