



BIO-KOTAK: Biobaterai Komposit Ampas Kelapa (*Cocos nucifera*) dan Limbah Cair Tahu sebagai Alternatif Sumber Listrik Portabel Terbaru

Bondan Attoriq*, Muhammad Syauqi Fittuqo, Yusuf Rahmad Ramadhan

SMA Negeri 3 Semarang, Jalan Pemuda 149, Kota Semarang, 50132, Indonesia

*Alamat email penulis koresponden: bondanatr123@gmail.com

Abstrak

Sampah baterai yang tidak dikelola berpotensi mencemari lingkungan akibat kandungan logam-logam beratnya. Kondisi tersebut mendorong pemanfaatan biobaterai dari limbah pengolahan makanan populer di Indonesia, yakni tahu. Geliat industri tahu yang menjamur di kota peneliti, Semarang, menghasilkan limbah cair yang dominan terbuang. Kandungan asam asetat dalam limbah tersebut didayagunakan sebagai elektrolit biobaterai yang dioptimalkan melalui fermentasi, dipadatkan dengan tepung ampas kelapa, dan diperkuat larutan KCl 40%. Penelitian ini bertujuan menganalisis gaya gerak listrik (GGL), penurunan daya listrik dalam rangkaian LED, dan komposisi optimum biobaterai dalam variasi komposit tepung ampas kelapa dan fermentasi limbah cair tahu dengan rasio b/v 0, 25, 50, 75, dan 100% (g/mL). Biobaterai dibuat dengan mensubstitusi pasta baterai ABC Dry Cell tipe AA bekas. Baterai ABC baru turut diuji sebagai kelompok kontrol. Hasil uji GGL optimal diperoleh BIO-KOTAK komposisi 25% dengan rata-rata perolehan $1,59 \pm 0,03$ V. Rerata GGL tersebut sama besarnya dengan kelompok baterai kontrol menurut analisis ANOVA. Rata-rata penurunan daya listrik terbesar juga diperoleh BIO-KOTAK komposisi 25% (13,77; 3,74; 3,64; 2,89; 2,08; 1,4; 1,38 mW). Menurut analisis Kruskal-Wallis, rerata penurunan daya pada masing-masing komposisi bernilai sama. Komposisi optimum BIO-KOTAK ditemukan pada rasio 25%.

Kata kunci: biobaterai, limbah cair tahu, ampas kelapa, GGL, daya listrik

PENDAHULUAN

Sampah baterai yang dikategorikan bahan berbahaya dan beracun (B3) kerap dibuang secara sembarangan. Padahal, limbah baterai yang tidak dikelola berpotensi mencemari lingkungan karena kandungan logam-logam beratnya sulit terurai oleh mikroba (Nurmala, dkk., 2016). Iswanto, dkk. (2016) menyatakan kandungan logam berat pada baterai meliputi Pb, Cd, Ni, Co, dan Cr. Selain itu, terdapat pula campuran mangan dioksida sebagai komponen terbanyak pada baterai seng karbon (Sobianowska-Turek *et al.*, 2016; Hidayat & Suprpto, 2017). Unsur mangan tersebut dapat mengeruhkan air dan meninggalkan noda pada cucian (Oktiawan & Krisbiantoro, 2007).

Kondisi demikian mendorong pengembangan biobaterai ramah lingkungan melalui pemanfaatan hasil samping yang mudah terurai. Biobaterai berfungsi sebagai alat penyimpan energi listrik yang beroperasi dengan bantuan senyawa organik (Siddiqui & Pathrikar, 2013). Bahan biobaterai yang kini diteliti dan dieksplorasi berpangkal dari limbah pengolahan sayur, buah, makanan atau minuman. Akan tetapi, penelitian tersebut masih memiliki keterbatasan esensial sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Tinjauan penelitian biobaterai terdahulu

No.	Judul Penelitian	Rujukan	Kegunaan	Kekurangan
1.	Pembuatan Biobaterai Berbasis Ampas Kelapa dan Tomat Busuk	Abidin dkk. (2020)	Membuat biobaterai berbahan dasar ampas kelapa dan tomat busuk	Nilai GGL dan arus biobaterai fluktuatif; pengujiannya terbatas pada rangkaian terbuka (tanpa beban listrik).
2.	Analisis Karakteristik Elektrik Onggok Singkong sebagai Pasta Bio-Baterai	Sumanzaya dkk. (2019)	Membuat biobaterai onggok singkong berelektroda Zn-Cu dalam variasi waktu fermentasi	Nilai GGL biobaterai (1,01 V) pada komposisi optimum belum memenuhi spesifikasi baterai Zn-C (1,5 V).
3.	Identifikasi Sifat Kelistrikan Bio-baterai Berbahan Dasar Ampas Kopi	Pawarangan & Jefriyanto (2022)	Membuat biobaterai dengan pasta elektrolit ampas kopi.	Nilai tegangan ($1,11 \pm 0,09$ V), arus ($0,39 \pm 0,07$ mA), dan daya listrik ($0,38 \pm 0,08$ mW) maksimum relatif kecil; wadah biobaterai berupa kemasan plastik yang tidak praktis; pengujian tidak melibatkan beban listrik.

Menanggapi permasalahan di atas, penelitian ini memanfaatkan wadah baterai seng karbon (Zn-C) bekas yang lebih praktis dengan pengujian secara komprehensif, baik dalam rangkaian listrik terbuka dan tertutup. Bahan dasar biobaterai berasal dari hasil samping pengolahan makanan populer di Indonesia, yakni tahu.

Geliat industri tahu di kota peneliti, Semarang, berkembang pesat akibat eksistensi oleh-oleh khas yang disebut tahu bakso. Tidak dapat dimungkiri bahwa industrialisasi tersebut menggerakkan sendi-sendi perekonomian masyarakat secara positif. Namun, kegiatan produksi tahu menghasilkan limbah cair yang dominan terbuang dan berpotensi mencemari lingkungan (Matilda, dkk., 2016; Pagoray, 2021). Rismawati, dkk. (2020) menyatakan kelimpahan limbah cair tahu bahkan mencapai 20 juta m³/tahun.

Selama proses pembuangan, limbah cair tahu akan dihidrolisis dan difermentasi secara anaerob-spontan oleh mikroba, yang pada akhirnya menghasilkan asam asetat (Yudhistira, 2016). Senyawa asam tersebut mampu didayagunakan sebagai elektrolit biobaterai. Sebagai pematatnya, digunakan tepung ampas kelapa yang sifat pengemulsiannya secara signifikan lebih tinggi dibanding tepung kaya serat lainnya (Trinidad, 2002; Abidin, dkk., 2020). Komariyah & Rohmawati (2021) menyatakan penambahan tepung tersebut dapat merapatkan dan mengikat sifat elektrolitnya, yang membuat tegangan dan kuat arus biobaterai menjadi lebih besar.

Fokus penelitian ini adalah mengekspansi temuan atas bahan-bahan biobaterai potensial, yaitu komposit limbah cair tahu dan ampas kelapa. Eksplorasi bahan biobaterai menjadi esensial untuk menemukan komposisi baru yang dapat menutupi kekurangan biobaterai pada penelitian sebelumnya. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk meyintesis solusi alternatif atas problematika limbah baterai bekas, limbah cair tahu, dan ampas kelapa. Biobaterai hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi positif kepada industri terkait, mengeskalasi aspek keberlanjutan pada sumber listrik portabel, serta menciptakan model biobaterai yang efisien, optimal, dan ramah lingkungan.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini berjenis eksperimental laboratoris yang dilaksanakan dengan menganalisis nilai GGL, penurunan daya listrik dengan beban LED merah 10 mm, dan komposisi optimum biobaterai. Variasi elektrolit terdiri atas komposit tepung ampas kelapa dan fermentasi limbah cair tahu dengan perbandingan tertentu. Penelitian dilakukan di laboratorium kimia dan fisika SMAN 3 Semarang serta kediaman peneliti. Rentang waktu penelitian adalah bulan November 2023 – Januari 2024.

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah cair tahu dengan koagulan asam asetat (CH_3COOH) yang diperoleh dari Kecamatan Candisari, Kota Semarang; ampas kelapa yang didapatkan dari Kecamatan Pedurungan, Kota Semarang; larutan KCl 40%; dan baterai ABC Dry Cell tipe AA dalam kondisi baru dan bekas.

Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah botol kaca 450 mL, pH meter, kain saring, *plastic wrap* untuk proses fermentasi; oven, baskom, kain peras, nampan, blender, neraca digital, dan ayakan untuk proses pembuatan tepung ampas kelapa; gelas ukur, neraca digital, gelas piala, dan pengaduk kaca untuk pembuatan variasi elektrolit; obeng minus dan spatula laboratorium untuk perakitan biobaterai; dan *basicmeter* dengan rentang pengukuran $100 \mu\text{A} - 5 \text{ A}/100 \text{ mV} - 50 \text{ V}$, kabel jepit buaya, serta lampu LED merah 10 mm untuk pengujian biobaterai.

Fermentasi Spontan Limbah Cair Tahu

Penelitian Yudhistira (2016) menyatakan proses ini diawali dengan pengambilan limbah cair tahu berkoagulan CH_3COOH pasca proses produksi dalam wadah steril. Sebanyak 450 ml limbah cair kemudian disaring menggunakan kain saring. Setelah itu, dilakukan pengukuran pH awal filtrat, lalu disimpan pada suhu ruang (30°C) selama 24 jam dalam keadaan terlindung dari cahaya dan kondisi anaerob, guna berjalannya fermentasi secara spontan. Penyimpanan ini dilakukan dalam botol kaca 450 mL steril yang ditutup dengan *plastic wrap*. Terakhir, dilakukan pengukuran pH kembali untuk mengetahui keberhasilan fermentasi anaerob.

Pembuatan Tepung Ampas Kelapa

Penelitian Hamka & Geroda (2017) menyatakan ampas kelapa ditimbang dan direndam dalam air dengan perbandingan b/v (g/mL) 50% selama 3 jam. Rendaman tersebut kemudian diperas dan dioven selama 4 jam dengan suhu 70°C . Setelah itu, ampas kering dihaluskan dengan blender yang dilanjutkan dengan pengayakan.

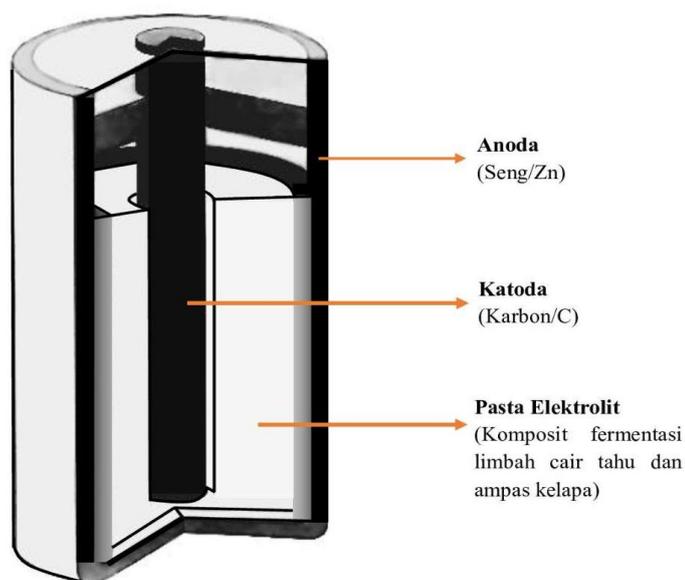
Pembuatan Variasi Konsentrasi Elektrolit

Pembuatan variasi elektrolit diawali dengan mengukur volume fermentasi limbah cair tahu dengan gelas ukur dan menimbang massa tepung ampas kelapa dengan neraca

digital. Setelah itu, dilakukan proses pencampuran untuk membentuk komposit tepung ampas kelapa dan limbah cair tahu dengan komposisi b/v (g/mL) 0, 25, 50, 75, dan 100% dalam gelas piala. Setiap pembuatan variasi elektrolit (4 biobaterai) secara berturut-turut membutuhkan 32 mL limbah cair tahu serta 0 gram (0%), 8 gram (25%), 16 gram (50%), 27 gram (75%), dan 32 gram (100%) tepung ampas kelapa. Untuk setiap variasi elektrolit, diberi 8 ml larutan KCl 40% sebagai zat penambah kuat arus dan tegangan baterai paling optimal (Fitrya, dkk., 2023).

Perakitan Biobaterai

Perakitan biobaterai bermula dengan melepaskan pelapis tabung baterai AA bekas menggunakan obeng minus, kemudian mengeluarkan katodanya secara perlahan. Setelah itu, pasta baterai dikeluarkan sampai tabung seng (anoda) kosong. Baterai yang telah kosong diisi dengan variasi konsentrasi elektrolit menggunakan spatula, lalu dilakukan pemasangan ulang. Desain biobaterai pada penelitian tertera pada Gambar 1.

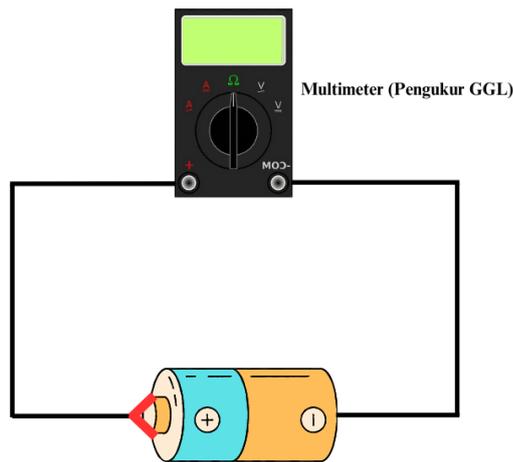


Gambar 1. Desain prototipe BIO-KOTAK

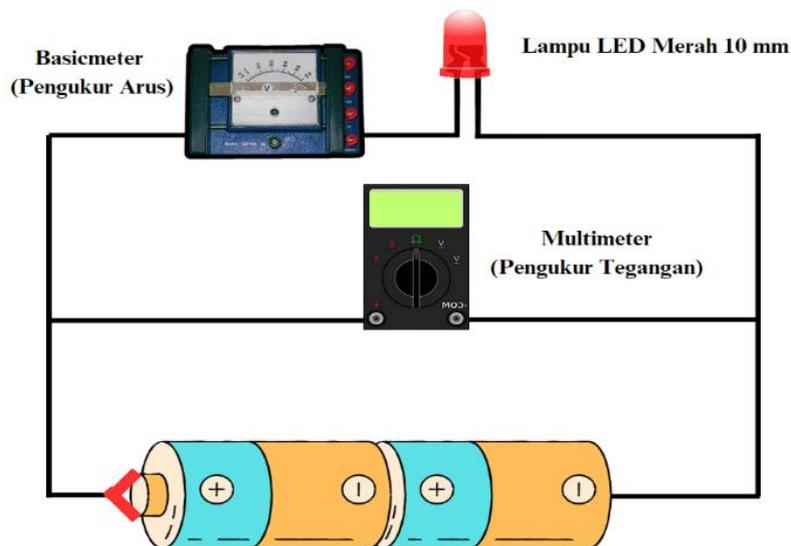
Pengujian Biobaterai

Pengujian karakteristik elektrik biobaterai meliputi pengukuran GGL dengan multimeter digital dalam sistem uji baterai satu per satu (tanpa rangkaian), serta pengukuran tegangan dan kuat arus selama 1 jam secara kontinu dalam rangkaian seri, dengan sumber tegangan berupa dua biobaterai, dan beban berupa lampu LED merah 10 mm. Setiap pengujian dilakukan sebanyak 5 kali duplikasi. Hasil pengukuran tegangan (V) dan kuat arus (I) akan dikalkulasi menjadi daya listrik (P) menurut persamaan (1). Konfigurasi pengujian biobaterai tertera secara berturut-turut pada Gambar 2 dan 3.

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



Gambar 2. Konfigurasi pengujian GGL biobaterai



Gambar 3. Konfigurasi pengujian tegangan, kuat arus, dan daya biobaterai

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Fermentasi Limbah Cair Tahu

Metode fermentasi limbah cair tahu pada penelitian ini adalah anaerob-spontan, yakni dengan memanfaatkan kondisi lingkungan yang optimal bagi pertumbuhan mikroba anaerob tanpa penambahan *starter*. Fermentasi bermula dengan menghidrolisis senyawa organik dalam limbah cair tahu, seperti karbohidrat, protein, dan lemak, oleh bakteri-bakteri hidrolitik. Bakteri tersebut mendekonstruksi molekul organik kompleks menjadi molekul monomer terlarut, seperti glukosa. Yudhistira (2016) menyatakan kadar glukosa sebelum fermentasi pada limbah cair tahu berkoagulan CH_3COOH adalah 1,3263 mg/mL, sementara kadar glukosa pasca-fermentasi adalah 0,2502 mg/mL.

Penurunan kadar glukosa tersebut disebabkan oleh bakteri asidogenik, seperti *Clostridium*, yang mengubah molekul glukosa menjadi asam organik, seperti asam asetat,

propionat, dan butirat. Namun, hasil analisis jenis asam pada sampel dengan kromatografi gas (GC) hanya mendeteksi jenis asam asetat, sementara asam butirat dan propionat tidak terdeteksi sama sekali (Yudhistira, 2016). Indikator keberhasilan proses fermentasi adalah penurunan derajat keasaman (pH) antara sebelum dan sesudahnya. Dengan metode fermentasi serupa, penyimpanan selama 24 jam pada suhu ruang, hasil penelitian menunjukkan penurunan pH limbah cair tahu pasca-fermentasi, yaitu 4,76 menjadi 2,81. Hasil yang serupa diperoleh penelitian Yudhistira (2016), dengan jumlah asam asetat pasca-fermentasi pada sampel penelitian terdahulu mencapai 1,90482 mg/mL.

Penurunan pH limbah cair tahu beriringan dengan peningkatan kadar asam asetat, yang merupakan asam elektrolit (Yudhistira, 2016). Asam asetat (CH_3COOH) dapat mengalami ionisasi membentuk H^+ dan CH_3COO^- dalam larutan (limbah cair). Eksistensi H^+ berfungsi sebagai sumber energi dan penghantar elektron dalam reaksi redoks biobaterai yang menimbulkan gaya gerak listrik (GGL). Semakin tinggi konsentrasi H^+ atau tingkat keasamannya (pH mengecil), maka semakin baik pula karakteristik elektrik yang dihasilkan. Eskalasi tingkat keasaman tersebut sebanding dengan nilai konduktivitas listrik, tegangan, dan kuat arus pada biobaterai (Sumanzaya, dkk., 2019).

Karakterisasi dan Pembuatan Tepung Ampas Kelapa

Segmen ini berfokus pada karakterisasi tepung ampas kelapa serta pemanfaatannya sebagai pematat limbah cair tahu dalam biobaterai. Pengukuran homogenitas ampas kelapa sebelum proses pengeringan serta pengayakan tidak dilakukan, dan dapat menjadi fokus penelitian selanjutnya. Pada penelitian ini, ampas kelapa hasil pengolahan santan langsung direndam selama 3 jam, sebelum dioven selama 4 jam pada suhu 70°C . Penentuan lama waktu perendaman tersebut berdasarkan perolehan kadar air yang terendah (Hamka & Geroda, 2017).

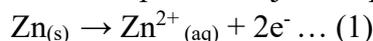
Rendahnya kadar air pada tepung berfungsi untuk mengoptimalkan kapasitas kelarutannya. Tingkat kelarutan dinyatakan dalam nilai indeks kelarutan air (NKA), dengan perolehan NKA tepung ampas kelapa sebesar 94,62% (Putri, 2014). Selain itu, sifat pengemulsi tepung ampas kelapa secara signifikan lebih baik dibandingkan tepung kaya serat lainnya (Trinidad, 2004; Abidin, dkk., 2020). Kapasitas kelarutan, penyerapan, dan *emulsifying* pada tepung ampas kelapa dimanfaatkan sebagai pematat limbah cair tahu guna membentuk pasta biobaterai.

Tepung ampas kelapa dapat terdispersi dalam limbah cair tahu melalui sifat kelarutannya yang tinggi. Dispersi tersebut membentuk pasta suspensi, yaitu campuran heterogen antara limbah cair tahu dan ampas kelapa dengan partikel terdispersi yang relatif besar. Namun, karena kandungan medium pendispersi (limbah cair tahu) yang digunakan relatif sedikit, pasta biobaterai cenderung mengalami agregasi. Secara makroskopis, pasta tersebut terlihat kasar dan bergumpal. Hasil ini sejalan dengan penelitian Jia *et al.* (2022), yang menunjukkan konsentrasi tinggi material aktif meningkatkan kecenderungan agregasi dalam pasta baterai.

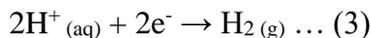
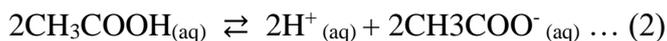
Pencampuran limbah cair tahu dan tepung ampas kelapa bertujuan untuk menciptakan komposit yang berfungsi mencegah adanya kebocoran elektrolit. Kebocoran ini dapat terjadi pada elektrolit cair, yaitu limbah cair tahu tanpa penambahan tepung atau penggumpal. Pencampuran tersebut juga berfungsi meningkatkan kerapatan elektrolit biobaterai. Akibatnya, seperti penelitian Komariyah & Rohmawati (2022), nilai GGL dan kuat arus biobaterai menjadi lebih tinggi dengan penambahan tepung ampas kelapa.

Prinsip Kerja BIO-KOTAK

BIO-KOTAK bekerja dengan mengubah energi kimia yang terkandung dalam selubung seng (Zn) serta komposit tepung ampas kelapa dan limbah cair tahu menjadi gaya gerak listrik (GGL). Melalui reaksi redoks pada anoda dan katoda, energi potensial kimia ditransformasi menjadi energi potensial elektromagnetik. Berdasarkan prinsip sel Volta, reaksi tersebut berawal dari oksidasi anoda (Zn) menjadi kationnya (Zn^{2+}), dengan melepaskan 2 elektron (e^-) dari anoda seperti ditunjukkan pada persamaan (1).



Di sisi lain, kandungan asam asetat (CH_3COOH) pada fermentasi limbah cair tahu mengalami ionisasi membentuk anion dan kation bebas. Elektron dari anoda kemudian bergerak menuju katoda berupa batang karbon yang bersifat inert (stabil), melalui serangkaian reaksi reduksi seperti ditunjukkan pada persamaan (2) dan (3).



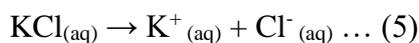
Secara lengkap, reaksi redoks yang terjadi pada biobaterai beserta kalkulasi energi potensial sel dapat dituliskan pada persamaan (4).

Anoda:	$Zn_{(s)} \rightarrow Zn^{2+}_{(aq)} + 2e^-$	$E^\circ = -0,76 \text{ V}$
Katoda:	$2H^+_{(aq)} + 2e^- \rightarrow H_{2(g)}$	$E^\circ = 0 \text{ V}$
Energi Potensial Sel:	$E_{sel} = E_{katoda} - E_{anoda} = 0 - (-0,76) \text{ V}$	$E_{sel} = 0,76 \text{ V} \dots (4)$

Berpindahnya elektron dari titik anoda ke katoda menghasilkan beda potensial yang disebut gaya gerak listrik (GGL) (Rasyiq, 2019). Pengoptimalan BIO-KOTAK dilakukan melalui fermentasi limbah cair tahu, pencampuran dengan tepung ampas kelapa, dan penambahan larutan KCl 40%. Fermentasi berfungsi menambah konsentrasi ion H^+ yang berbanding lurus dengan GGL biobaterai (Sumanzaya, dkk., 2019). Gas hidrogen (H_2) hasil reaksi pun berpotensi kecil menyebabkan eksplosi dan pengembangan baterai. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan jumlah reaktan, yaitu kandungan asam asetat maksimal pasca-fermentasi pada penelitian Yudhistira (2016) sebesar 1,90482 mg/mL, yang membuat jumlah produk (H_2) turut terbatas.

Penambahan larutan KCl sebagai penguat (*dopan*) optimal terbukti meningkatkan nilai GGL dan kuat arus secara signifikan, yaitu masing-masing 58,84% dan 58,96%

(Fitrya, dkk., 2023). Fitrya, dkk. (2023) memaparkan penambahan garam KCl dapat berpengaruh terhadap lama waktu penyalaan LED dengan kenaikan sebesar 87,75%. Eskalasi tersebut disebabkan oleh proses ionisasi sempurna KCl dalam larutan. Hasil ionisasi berupa anion-kation garam dapat membantu proses transfer elektron pada reaksi elektrokimia biobaterai (Sumanzaya, 2019). Reaksi ionisasi KCl dapat dituliskan dalam persamaan (5).



Perolehan Gaya Gerak Listrik (GGL) BIO-KOTAK dalam Berbagai Komposisi

Besarnya GGL menentukan seberapa tinggi kekuatan penggerak internal yang merupakan penyedia energi baterai (Bergveld *et al.*, 2008; Arzanto, 2019). Pengukuran GGL dilakukan melalui sistem uji baterai tanpa rangkaian. Baterai yang diujikan berasal dari kelompok perlakuan (BIO-KOTAK) dan kelompok kontrol (baterai baru) sebagai pembandingan. Hasil pengujian tersebut tertera pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian GGL kelompok baterai kontrol dan perlakuan

Variasi (b/v)	Pengukuran GGL ke- (V)					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
Baru (Kontrol)	1,66	1,68	1,66	1,64	1,58	1,64 ± 0,04
0%	1,42	1,52	1,47	1,54	1,46	1,48 ± 0,05
25%	1,60	1,63	1,58	1,60	1,54	1,59 ± 0,03
50%	1,54	1,58	1,53	1,52	1,57	1,55 ± 0,03
75%	1,30	1,37	1,39	1,35	1,30	1,34 ± 0,04
100%	1,50	1,44	1,52	1,47	1,52	1,49 ± 0,03

Hasil penelitian membuktikan bahwa tepung ampas kelapa dapat menambah kerapatan elektrolit biobaterai yang ditunjukkan oleh peningkatan rerata GGL pada komposisi 0% (1,48 ± 0,05 V) dan 25% (1,59 ± 0,03 V), bersesuaian dengan penelitian Komariyah & Rohmawati (2021). Namun, penambahan tepung pada limbah cair tahu tidak selalu berkorelasi positif terhadap besaran GGL. Hal tersebut ditunjukkan oleh penurunan rata-rata GGL pada komposisi 50% (1,55 ± 0,03 V) dan 75% (1,34 ± 0,04 V). Penurunan ini disebabkan oleh kepadatan komposit yang terlalu tinggi atau berlebihan (Komariyah & Rohmawati, 2021). Akibatnya, penguapan elektrolit cair (limbah cair tahu) lebih mudah terjadi, yang mengakibatkan penurunan nilai GGL selama pengoperasian biobaterai (Ajayi & Weigele, 2012).

Analisis *One-Way* ANOVA terhadap Gaya Gerak Listrik (GGL) BIO-KOTAK

Kelompok data GGL BIO-KOTAK dan baterai kontrol diuji normalitas dan homogenitasnya untuk memenuhi asumsi pengujian ANOVA. Semua kelompok data terbukti homogen dan berdistribusi normal dengan nilai Sig. > 0,05 pada masing-masing pengujian. Oleh sebab itu, uji *one-way* ANOVA dapat dilaksanakan dengan hasil yang tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil uji *one-way* ANOVA pada kelompok data GGL

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.276	5	.055	39.285	<.001
Within Groups	.034	24	.001		
Total	.310	29			

Hasil tersebut menyatakan terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antarkelompok data GGL dengan nilai Sig. < 0,05. Kelompok data kemudian diuji lebih lanjut menggunakan Post-Hoc dengan hasil tercantum pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil uji Post-Hoc pada kelompok data GGL

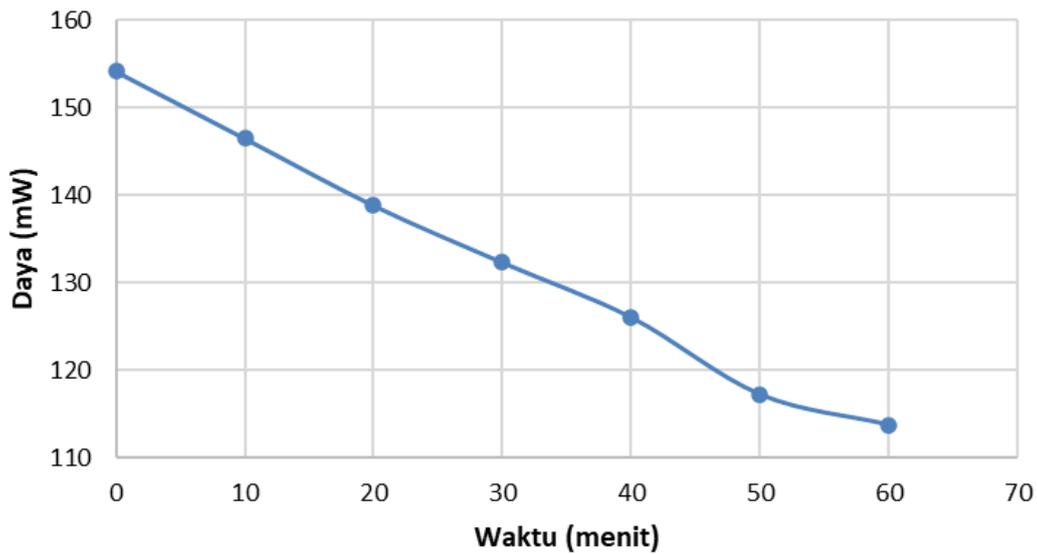
(I) Variasi	(J) Variasi	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Baru (Kontrol)	0% b/v	.16200*	.02372	<.001	.0887	.2353
	25% b/v	.05400	.02372	.242	-.0193	.1273
	50% b/v	.09200*	.02372	.008	.0187	.1653
	75% b/v	.30200*	.02372	<.001	.2287	.3753
	100% b/v	.15400*	.02372	<.001	.0807	.2273

(*) Terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan pada taraf 0,05.

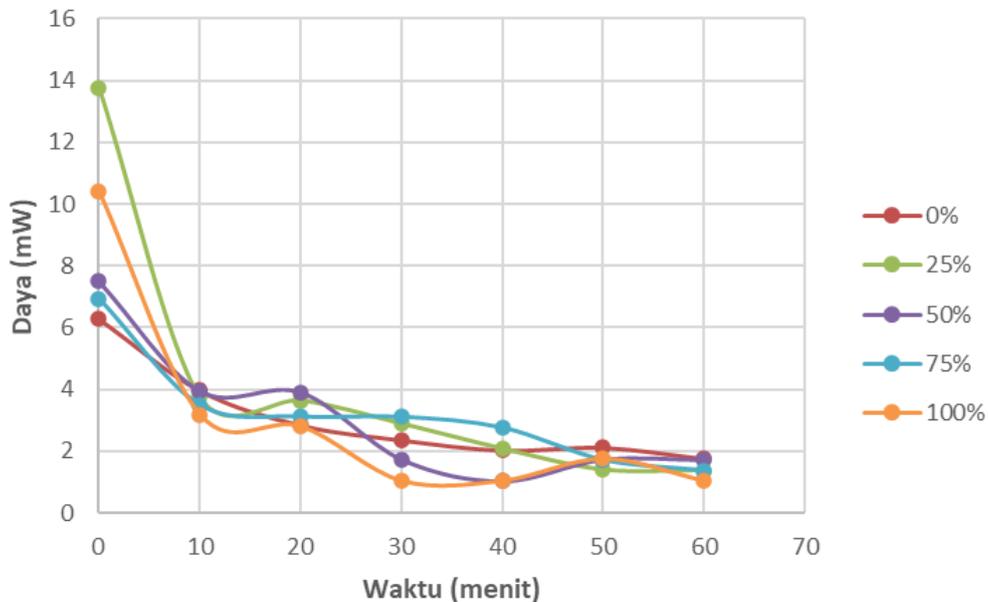
Hasil tersebut menunjukkan perbedaan rerata GGL yang tidak signifikan antara BIO-KOTAK komposisi 25% dan baterai kontrol (baru) dengan nilai Sig. > 0,05. Dengan kata lain, nilai GGL baterai baru (ABC Dry Cell tipe AA) dan BIO-KOTAK komposisi 25% sama besarnya. Sementara itu, komposisi lainnya terbukti memiliki perbedaan yang signifikan dengan kelompok baterai kontrol.

Penurunan Daya Listrik BIO-KOTAK dalam Rangkaian Seri dengan Lampu

Nilai daya listrik dipengaruhi oleh besarnya tegangan, kuat arus, hambatan, serta posisinya terhadap waktu (Ponto, 2018). Analisis perubahan daya listrik pada uji rangkaian telah mewakili analisis perubahan tegangan dan kuat arus karena memiliki nilai hambatan yang tetap (LED merah 10 mm) dan waktu pengujian yang seragam (60 menit). Hasil pengujian daya listrik kelompok baterai kontrol dan perlakuan tercantum berturut-turut pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Grafik rerata penurunan daya baterai kontrol



Gambar 5. Grafik rerata penurunan daya baterai perlakuan (BIO-KOTAK)

Pada penelitian ini, hambatan berupa lampu LED menyerap daya listrik yang disalurkan baterai untuk diubah menjadi energi cahaya. Prinsip serap-menyerap tersebut menggambarkan performa baterai dalam mengoperasikan piranti elektronik (LED). Baterai baru (kontrol) dapat menyalakan LED selama 1 jam secara optimal (terang) dengan perubahan daya yang stabil dan tinggi. Di sisi lain, semua komposisi BIO-KOTAK hanya dapat menyalakan LED dengan terang selama 10 menit awal. Peristiwa tersebut sejalan dengan tingkat penurunan daya listriknya yang signifikan selama 10 menit, tetapi melandai di menit-menit berikutnya.

Analisis Kruskal-Wallis terhadap Rerata Penurunan Daya Listrik

Data penurunan daya listrik BIO-KOTAK dan baterai kontrol terbukti tidak berdistribusi normal dengan perolehan Sig. < 0,05 pada beberapa kelompok perlakuan. Hasil uji Shapiro-Wilk tersebut ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil uji Shapiro-Wilk pada kelompok data penurunan daya

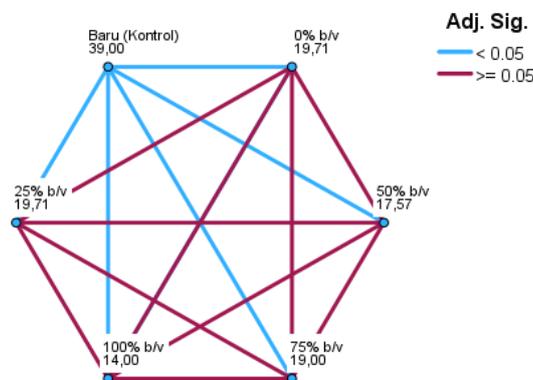
Variasi	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Daya Baru (Kontrol)	.136	7	.200*	.966	7	.864
0% b/v	.271	7	.129	.742	7	.010
25% b/v	.393	7	.002	.656	7	.001
50% b/v	.296	7	.064	.820	7	.064
75% b/v	.295	7	.065	.831	7	.082
100% b/v	.340	7	.014	.667	7	.002

Pengujian Kruskal-Wallis sebagai alternatif uji statistik non-parametrik dilaksanakan dengan hasil tercantum pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil uji Kruskal-Wallis pada kelompok data penurunan daya

Null Hypothesis	Test	Sig. ^{a,b}	Decision
The distribution of Daya is the same across categories of Variasi.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.003	Reject the null hypothesis.

Hasil tersebut menyatakan terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antarkelompok data penurunan daya dengan nilai Sig < 0,05. Setelahnya, data diuji menggunakan model Pairwise Comparison dengan hasil tertera pada Gambar 6.



*Setiap node menunjukkan peringkat rata-rata kelompok data

Gambar 6. Hasil uji Pairwise-Comparison pada kelompok data penurunan daya

Hasil tersebut menunjukkan perbedaan rata-rata yang signifikan dalam penurunan daya antara kelompok baterai kontrol dengan semua variasi BIO-KOTAK. Sementara

masing-masing komposisinya, saling memiliki beda rerata yang tidak signifikan. Dengan kata lain, berdasarkan analisis penurunan daya, performansi setiap komposisi BIO-KOTAK dalam mengoperasikan perangkat elektronik (LED) adalah sama.

Secara keseluruhan, BIO-KOTAK berpotensi menjadi alternatif biobaterai yang ramah lingkungan. Keunggulan penelitian ini adalah mampu menghasilkan produk biobaterai dengan nilai GGL ($1,59 \pm 0,03$ V) dan daya optimal (13,77 mW) yang lebih tinggi dari penelitian serupa, yaitu Komariyah dan Rohmawati (2021), yang memperoleh GGL maksimum sebesar 1,46 V. Instrumen penelitian juga dirancang lebih komprehensif untuk mengukur performa biobaterai dalam suatu sirkuit listrik. Namun, penelitian ini memiliki kekurangan, yakni belum dilaksanakannya uji kapasitas baterai dalam ukuran mAh.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka diperoleh hasil, yaitu gaya gerak listrik (GGL) BIO-KOTAK optimal pada komposisi 25% dengan rerata perolehan $1,59 \pm 0,03$ V. Nilai GGL tersebut sama besarnya dengan kelompok kontrol, yakni baterai ABC Dry Cell tipe AA. Penurunan daya listrik terbesar juga diperoleh BIO-KOTAK komposisi 25% dengan rata-rata perolehan tiap 10 menit selama 1 jam sebesar 13,77; 3,74; 3,64; 2,89; 2,08; 1,4; 1,38 mW. Masing-masing komposisi memiliki penurunan daya yang sama, mengindikasikan adanya kesamaan performansi BIO-KOTAK dalam pengoperasian piranti elektronik. Dengan demikian, berdasarkan GGL tertinggi, komposisi optimum BIO-KOTAK ditemukan pada rasio 25% (g/mL) tepung ampas kelapa berbanding limbah cair tahu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyadari bahwa penelitian ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Penulis hendak menyampaikan terima kasih Ridho Adi Negoro, S. Pd., M. Pd., selaku guru fisika atas saran dan masukannya. Penulis juga menuturkan banyak terima kasih kepada Parto Marwi dan Suharto, selaku pemilik pabrik tahu dan produsen tempe gembus di Kecamatan Candisari, Kota Semarang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, M., Hafidh, A.F., Widyaningsih, M., Yusuf, M. & Murniati, A. 2020. Pembuatan biobaterai berbasis ampas kelapa dan tomat busuk. *al Kimiya: Jurnal Ilmu Kimia dan Terapan*. 7(1): 28-34..
- Ajayi, F.F. & Weigele, P.R. 2012. A terracotta bio-battery. *Bioresource Technology*. 116: 86-91.
- Arzanto, A.W. 2019. Pengaruh penambahan garam ammonium terhadap konduktivitas polimer elektrolit berbasis kitosan. Skripsi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Negeri Semarang. Semarang.

- Bergveld, H.J., Kruijt, W.S., Notten, P.H.L. 2002. Battery Management Systems. In: *Battery Management Systems Design by Modelling*. Philips Research, vol 1. Springer. Dordrecht
- Fitrya, N., Halwani, P. & Wirman, S.P. 2023. Uji karakteristik elektrolit ampas kulit nanas dengan penambahan $MgCl_2$, NaCl, dan KCl. *Photon: Jurnal Sain Dan Kesehatan*. 13(2): 35-40.
- Hamka & Geroda, Z.P. 2017. Pengaruh lama perendaman dan perbedaan metode pengeringan pada pembuatan tepung ampas kelapa (*Cocos nucifera* L.). *Buletin Loupe*. 14(2): 1-5.
- Hidayat, M.I. & Suprpto, S. 2017. Pemisahan mangan dioksida (MnO_2) dari limbah pasta baterai dengan metode elektrolisis. *Jurnal Sains dan Seni ITS*: 6(2): C41-C45.
- Iswanto, I., Sudarmadji, S., Wahyuni, E.T. & Sutomo, A.H. 2016. Timbulan sampah B3 rumah tangga dan potensi dampak kesehatan lingkungan di Kabupaten Sleman, Yogyakarta. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*. 23(2): 179-188.
- Jia, X., Ma, J., Zhang, L., Zhang, C. & Wang, G. 2022. Aquatic colloidal graphene gel polymer electrolyte for flexible rechargeable zinc air batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. 169(12): 120526.
- Komariyah, A. Y. & Rohmawati, L. (2021). Pemanfaatan limbah tomat busuk dan ampas kelapa sebagai baterai alami yang ramah lingkungan. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (SNF) 2021*. Surabaya, 18 Oktober 2021. 5: pp. 161-165.
- Matilda, F., Biyatmoko, D., Rizali, A. & Abdullah, A. 2016. Peningkatan kualitas efluen limbah cair industri tahu pada sistem lumpur aktif dengan variasi laju alir menggunakan arang aktif kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*). *EnviroScienteeae*. 12(3): 207-215.
- Nurmala, A., Subarkah, C.Z. & Sundari, C.D.D. 2016. Penerapan model *task based learning* untuk mengembangkan literasi kimia mahasiswa pada pembuatan bio-baterai. *Prosiding Simposium Nasional Inovasi Dan Pembelajaran Sains*. Bandung 21-22 Juli 2016. pp. 821-825.
- Oktiawan, W. & Krisbiantoro, K. 2007. Efektifitas penurunan Fe^{2+} dengan unit saringan pasir cepat media pasir aktif. *Jurnal Presipitasi*. 2(1): 56-59.
- Pagoray, H., Sulistyawati, S. & Fitriyani, F. 2021. Limbah cair industri tahu dan dampaknya terhadap kualitas air dan biota perairan. *Jurnal Pertanian Terpadu*. 9(1): 53-65.
- Pawarangan, I., & Jefriyanto, W. 2022. Identifikasi sifat kelistrikan bio-baterai berbahan dasar ampas kopi. *Buletin Fisika*. 23(2): 92-96.
- Ponto, H. 2018. *Dasar Teknik Listrik*. Deepublish. Yogyakarta.
- Putri, M.F., 2014. Kandungan gizi dan sifat fisik tepung ampas kelapa sebagai bahan pangan sumber serat. *Jurnal Teknologi Busana dan Boga*. 1(1): 32-43
- Rasyiq, M.S.G. 2019. Prototype sel volta sebagai pemanfaatan energi terbarukan limbah kulit pisang. Skripsi. Fakultas Teknik. Universitas Hasanuddin. Makasar.

- Rismawati, D., Thohari, I. & Rochmalia, F. 2020. Efektivitas tanaman kayu apu (*Pistia stratiotes* L.) dalam menurunkan kadar BOD5 dan COD limbah cair industri tahu. *Jurnal Penelitian Kesehatan Suara Forikes*. 11(2): 186-190.
- Siddiqui, U.Z. & Pathrikar, A.K. 2013. The future of energy biobattery. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2(11): 99-111.
- Sobianowska-Turek, A., Szczepaniak, W., Maciejewski, P. & Gawlik-Kobylińska, M., 2016. Recovery of zinc and manganese, and other metals (Fe, Cu, Ni, Co, Cd, Cr, Na, K) from Zn-MnO₂ and Zn-C waste batteries: Hydroxyl and carbonate coprecipitation from solution after reducing acidic leaching with use of oxalic acid. *Journal of Power Sources*. 325: 220-228.
- Sumanzaya, T., Supriyanto, A., & Pauzi, G.A. (2019). Analisis karakteristik elektrik ongkok singkong sebagai pasta bio-baterai. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*. 7(2): 231–238.
- Trinidad, T.P. 2002. *Dietary Fiber From Coconut Flour From “Sapal”, A Promising Functional Food*. Food And Nutrition Research Institute. Department Of Science And Technology, Manila.
- Yudhistira, B., Andriani, M. & Utami, R. 2016. Karakterisasi: Limbah cair industri tahu dengan koagulan yang berbeda (asam asetat dan kalsium sulfat). *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture*. 31(2): 137–145