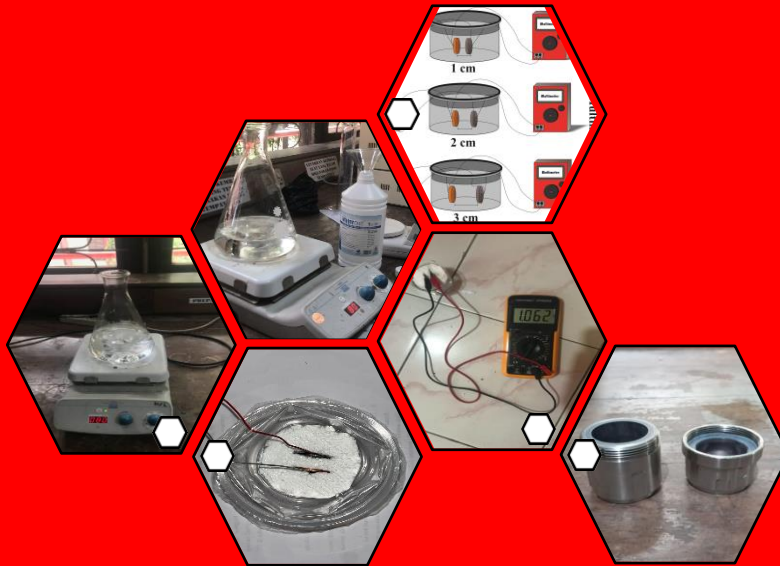


**PENGARUH PERUBAHAN UKURAN KRISTAL TERHADAP PERFORMA
BATERAI BERAIR *CUPRUM-ZINC***



**YUSRI
H021191057**



**PROGRAM STUDI FISIKA DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

**PENGARUH PERUBAHAN UKURAN KRISTAL TERHADAP PERFORMA
BATERAI BERAIR *CUPRUM-ZINC***

**YUSRI
H021191057**



**PROGRAM STUDI FISIKA DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

**PENGARUH PERUBAHAN UKURAN KRISTAL TERHADAP PERFORMA
BATERAI BERAIR *CUPRUM-ZINC***

YUSRI
H021191057

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Fisika

pada

**PROGRAM STUDI FISIKA
DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

SKRIPSI

PENGARUH PERUBAHAN UKURAN KRISTAL TERHADAP PERFORMA
BATERAI BERAIR CUPRUM-ZINC

YUSRI
H021191057

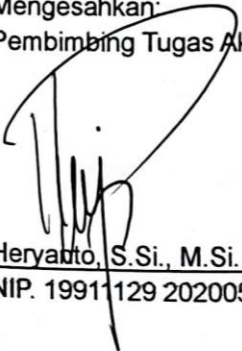
Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Fisika pada 25 November 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
pada



Program Studi Fisika
Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin
Makassar

Mengesahkan:
Pembimbing Tugas Akhir,


Heryanto, S.Si., M.Si.
NIP. 19911129 202005 3 001

Mengetahui:
Ketua Program Studi,


Prof. Dr. Arifin, M.T.
NIP. 19670520 199403 1 002

**PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul "Pengaruh Perubahan Ukuran Kristal Terhadap Performa Baterai Berair *Cuprum-Zinc*" adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing Heryanto, S.Si., M.Si. sebagai Pembimbing Utama. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar. 25 November 2024



YUSRI

NIM H021191057

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* atas segala limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Shalawat dan salam senantiasa tercurahkan kepada baginda Rasulullah *Shallallahu 'Alaihi Wa Sallam* beserta keluarga dan sahabatnya. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat akademik untuk memperoleh gelar sarjana pada Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan dorongan dari berbagai pihak sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada **Bapak Heryanto S.Si., M.Si.** selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan bimbingan dari awal hingga selesainya skripsi ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Penasehat Akademik sekaligus dosen penguji penulis **Bapak Prof. Dr. Dahlang Tahir, M.Si.** dan **Bapak Prof. Dr. Arifin, M.T.** selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan dan kritik dalam penyempurnaan skripsi ini. Terima kasih kepada Rektor Universitas Hasanuddin dan seluruh jajaran Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam serta kepada segenap **Dosen Pengajar** dan **Staf Departemen Fisika** karena telah memberikan ilmu dan fasilitas yang sangat baik kepada penulis selama menempuh pendidikan sarjana.

Kepada kedua orang tua tercinta penulis **Ibunda Sapinah** dan **Ayahanda Mansur**, penulis menyampaikan terima kasih yang setulus-tulusnya serta penghargaan yang setinggi-tingginya karena selalu berjuang dalam mengupayakan yang terbaik untuk penulis, senantiasa memberikan dukungan, limpahan cinta dan doa restu mulianya. Ucapan terima kasih juga kepada saudara tersayang penulis **Yusran, Ferdy** dan **Nurfadillah** serta kepada keluarga besar yang senantiasa memberikan semangat dan doa mulia kepada penulis. Terima kasih kepada saudara dan saudari Himafi 2019 **Jimbo, Steven, Ikram, Agus, Syawalia, Alya, Faradiba, Asira, Ani, Nara, Ririn, Septi, Lela, Yuni, Nabila, Sire, Umni, Tiche, dan Rati B** yang telah kebersamai dalam berbagai drama kisah angkatan dan menjadi tempat berkeluh kesahnya penulis. Terima kasih pula kepada adi **Himafi 2020 Fausi, Vicram, Rifaldi, Husain, Akmal dkk., Himafi 2021 Palele, Amar, Bejo, Chimar, Alif, Alfito dkk., dan Himafi 2022** yang senantiasa ada kebersamai penulis sebagai keluarga besar Himafi FMIPA Unhas. Terakhir, terima kasih kepada **Andi Nurannisa Azzahra** yang telah memberikan dukungan serta motivasi luar biasa kepada penulis selama penyusunan skripsi.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini, untuk itu dengan segala kerendahan hati penulis memohon maaf. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat untuk berbagai pihak.

Penulis,

Yusri

ABSTRAK

YUSRI. Pengaruh Perubahan Ukuran Kristal Terhadap Performa Baterai Berair Cuprum-Zinc (dibimbing oleh Heryanto S.Si., M.Si.).

Latar Belakang. Peningkatan permintaan energi listrik yang diproyeksikan akan meningkat signifikan sehingga permintaan untuk baterai sekunder berskala besar menjadi opsional dengan harga dan keamanan sebagai faktor terpenting untuk komersialisasi listrik. Salah satu solusi yaitu baterai berair berbasis Cuprum-Zinc (Cu-Zn). Untuk mencapai kinerja komprehensif Cu-Zn berair yang memuaskan, eksplorasi baterai berair banyak dilakukan untuk mengembangkan potensi performa tinggi baterai. Penyesuaian ukuran kristal yang lebih kecil bermanfaat dalam peningkatan kinerja siklus yang tahan lama dan stabil. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh perubahan ukuran kristalit dengan melakukan perbandingan antara kombinasi ukuran anoda dan katoda terhadap tegangan (V) dan arus (mA). **Metode.** Penelitian ini menggunakan serbuk Cu dan Zn dengan kemurnian >99,9% (Merck KGaA). Masing-masing sampel dilakukan penggilingan selama 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 20, 28, 32 dan 48 jam. Variasi waktu mengakibatkan degradasi ukuran kristal yang kemudian di kombinasikan antara katoda Cu dan anoda Zn. Ukuran kristal dianalisa melalui X-Ray Diffraction (Shimadzu XRD-700 MAXima). Uji performa data tegangan dan arus diukur setiap 10 menit selama 270 menit, dengan mengganti elektrolit setiap 90 menit. **Hasil.** Ukuran kristal secara umum mengalami degrasi seiring durasi waktu penggilingan terhadap sampel. Berdasarkan data XRD, sampel Cu terdegradasi dari 28,03 hingga 7,62 nm serta sampel Zn terdegradasi dari 25,12 hingga 5,26 nm. Berdasarkan data FTIR, diamati sejumlah gugus fungsi yang memiliki nilai absopsi tinggi pada ikatan Cu-O, C=O dan Zn-O. Dari hasil uji performa bahwa kombinasi elektroda Cu S10 dan Zn S7 dengan ukuran kristal kecil dan perubahan jarak antarkisi semakin rapat menunjukkan rata-rata tegangan yang stabil yaitu 0,86 V dan arus 1,87 mA. **Kesimpulan.** Penggilingan mekanik mendegrasi ukuran kristal sangat berpengaruh signifikan pada elektroda baterai. Ukuran kristal yang kecil memberikan performa baterai yang dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama dan stabil sehingga dapat dipertimbangkan untuk dikembangkan lebih lanjut guna menjadi solusi bagi permintaan energi listrik.

Kata kunci: Baterai Berair, Cu-Zn, Penggilingan Mekanik, Ukuran Kristalit

ABSTRACT

YUSRI. **Effect Of Crystal Size Change On Cuprum-Zinc Aqueous Battery Performance** (supervised by Heryanto S.Si., M.Si.).

Background. The projected increase in demand for electrical energy will increase significantly making the demand for large-scale secondary batteries optional with price and safety as the most important factors for electrical commercialization. One solution is Cuprum-Zinc (Cu-Zn) based aqueous batteries. In order to achieve satisfactory comprehensive performance of aqueous Cu-Zn, many aqueous battery explorations are conducted to develop the high performance potential of the battery. Smaller crystal size adjustment is beneficial in the improvement of long-life and stable cycle performance. **Aim.** This study aims to analyze the effect of crystallite size change by comparing the combination of anode and cathode size on voltage (V) and current (mA). **Methods.** This study used Cu and Zn powder with purity >99.9% (Merck KGaA). Each sample was milled for 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 20, 28, 32 and 48 hours. The time variation resulted in degradation of crystal size which was then combined between Cu cathode and Zn anode. Crystal size was analyzed through X-Ray Diffraction (Shimadzu XRD-700 MAXima). Performance test data of voltage and current were measured every 10 minutes for 270 minutes, replacing the electrolyte every 90 minutes. **Results.** The crystal size generally degraded with the duration of grinding time for the samples. Based on XRD data, Cu samples degraded from 28.03 to 7.62 nm and Zn samples degraded from 25.12 to 5.26 nm. Based on FTIR data, a number of functional groups with high absorption values were observed in Cu-O, C=O and Zn-O bonds. From the performance test results, the combination of Cu S10 and Zn S7 electrodes with small crystal size and changes in the distance between the grids getting closer showed a stable average voltage of 0.86 V and current of 1.87 mA. **Conclusion.** Mechanical milling degrades crystal size significantly on battery electrodes. Small crystal size provides battery performance that can be used for a long period of time and is stable so that it can be considered for further development to become a solution to the demand for electrical energy.

Keywords: Aqueous Battery, Cu-Zn, Mechanical Alloying, Crystallit Size

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	Error! Bookmark not defined.
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	2
I.3 Tujuan Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
II.1 Baterai Berbasis Air.....	3
II.2 Elektroda	3
II.3 Elektrolit	8
II.4 Penggilingan Mekanik.....	9
BAB III METODE PENELITIAN	11
III.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	11
III.2 Alat dan Bahan.....	11
III.2.1 Alat	11
III.3 Prosedur Penelitian.....	11
III.3.1 Pembuatan Pellet Elektroda.....	11
III.3.2 Uji Karakterisasi	12
III.3.2.1 Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	12
III.3.2.2 Analisis <i>Fourier Transforms Infra-Red</i> (FTIR).....	12
III.3.2.3 Uji Performa Baterai	12
III.4 Bagan Alir Penelitian	Error! Bookmark not defined.
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	14
IV.1 Analisis <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	14
IV.2 <i>Fourier Transform Infra-Red</i> (FTIR)	17
IV.3 Uji Performa Baterai.....	19
IV.3.1 Tegangan (V).....	19
BAB V PENUTUP	24

V.1 Kesimpulan	24
V.2 Saran	24
DAFTAR PUSTAKA	25

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Kapasitas teoritik spesifik beberapa logam.....	4
Tabel 2. Performa kapasitas, densitas arus, dan tegangan serta siklus dari beberapa material elektroda.....	6
Tabel 3. Sudut datang sinar dan jarak antar kisi serta ukuran rata-rata kristal.....	16
Tabel 4. Gugus fungsi Cu.....	18
Tabel 5. Gugus fungsi Zn.....	18
Tabel 6. Data uji arus (mA).....	23

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Rangkaian sel baterai Cu-Zn Daniell	4
Gambar 2. (a). Perbandingan antara harga dan produksi material (b) Kapasitas vs Densitas capaian dari beberapa sumber	6
Gambar 3. Data Eksperimen terhadap Tegangan yang dihasilkan oleh sel terhadap waktu	8
Gambar 4. (a) Pergerakan bola dan partikel selama proses penggilingan, (b) Perbandingan waktu pengecilan ukuran partikel dengan variasi ukuran bola	9
Gambar 5. Struktur kristalin, polikristalin, dan amorf	9
Gambar 6. Skema Rangkaian Sel	13
Gambar 7. Pellet dengan variasi waktu berbeda (a) Cu control (b) Zn control (c) Cu S10 (d) Zn S7	14
Gambar 8. Plot difraksi sinar-X (a) Cu (b) Zn	15
Gambar 9. Tegangan selama 270 menit di setiap jarak berbeda	20
Gambar 10. Arus (mA) setiap sampel sebelum dan sesudah penggunaan serta pergantian elektrolit setiap 90 menit selama 270 menit	22

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Masyarakat ekonomi modern dan peradaban industri telah menyaksikan peningkatan permintaan energi listrik yang diproyeksikan akan meningkat dua kali lipat pada tahun 2050 [1]. Menggunakan listrik murah dan andal yang dihasilkan dari sumber energi terbarukan dan bersih sangat penting untuk pembangunan manusia yang berkelanjutan. Untuk mewujudkan tujuan ini, penyimpanan energi listrik sangat penting untuk keandalan jaringan listrik karena sumber energi terbarukan, seperti angin, matahari, pasang surut, dan sumber panas bumi, semuanya secara inheren bersifat intermiten dan tersebar secara spasial [2][3].

Meskipun baterai lithium-ion yang dapat diisi ulang menjadi fokus pasar/industri penyimpanan energi saat ini, namun kenyataannya masih menyimpan banyak kritikan termasuk keamanan, toksisitas, dan keterbatasan sumber daya yang telah menghambat aplikasi berskala besar dan aplikasi yang sangat penting bagi keamanan [4]. Sehingga permintaan untuk baterai sekunder berskala besar mengalami peningkatan dengan harga dan keamanan yang muncul sebagai faktor terpenting untuk komersialisasi listrik [5]. Untuk mengatasi masalah ini, penelitian sedang dilakukan untuk mengganti elektrolit organik dengan elektrolit berair yang tidak mudah menguap yang menawarkan ketahanan termal yang tinggi [6][7]. Metode ini tidak hanya mengurangi risiko pelarian panas tetapi juga mengurangi biaya dengan menggunakan pemisah dan garam yang tidak mahal yang cocok untuk elektrolit berair.

Baterai berair telah menarik perhatian luar biasa karena keuntungannya yang meliputi keamanan, ramah lingkungan dan memiliki konduktivitas ionik yang tinggi dibandingkan dengan jenis elektrolit lainnya seperti elektrolit organik, elektrolit polimer dan elektrolit padat anorganik [8]. Salah satu penyimpan energi cadangan yang paling menarik karena biaya rendah, kinerja yang cukup tinggi, dan potensi redoks rendah adalah baterai berair berbasis *Cuprum-Zinc* (Cu-Zn). Zhu dkk pada tahun 2019 baru-baru ini menjawab tantangan yang selama ini sulit terpecahkan yaitu membuat baterai berair Cu-Zn mampu bereaksi reversibel dengan menyesuaikan kelarutan Cu didalam larutan basa sejak diperkenalkan pertama kali oleh kimiawan asal Inggris John Frederic Daniell pada tahun 1836 yang bersifat irreversibel [9]. Performa baterai berair dengan menyandingkan Cu dan Zn sebagai katoda dan anoda serta KOH sebagai elektrolitnya kini layak dipertimbangkan sebagai kandidat penyimpanan energi elektrokimia masa depan.

Untuk mencapai kinerja komprehensif Cu-Zn berair yang memuaskan, eksplorasi baterai berair banyak dilakukan untuk mengembangkan potensi performa tinggi baterai. Kunci pengoperasian elektroda yang efisien terletak pada kontak yang efektif antara elektrolit dan partikel bahan aktif dalam elektroda. Banyak faktor yang mempengaruhi performa baterai, salah satunya ukuran kristalit bahan aktif elektroda yang mempengaruhi umur siklus dimana ukuran kristalit yang lebih kecil memiliki kemampuan stabilitas lebih baik [10][11].

Ukuran kristalit material pada baterai memainkan peranan penting dalam difusi ion dan performa baterai seperti nilai transfer ion dan waktu pengisian ulang baterai. Granulasi dan penggilingan mekanis adalah metode umum untuk mendapatkan ukuran kristalit bahan aktif yang diinginkan. Penyesuaian ukuran kristal yang lebih kecil bermanfaat dalam peningkatan kinerja siklus yang tahan lama dan stabil karena bertumbuhnya sejumlah situs aktif setelah perlakuan penggilingan terhadap material. Elektroda dengan ukuran partikel lebih kecil menunjukkan performa elektrokimia yang lebih baik [12]. Namun penggilingan yang berlebihan dapat menyebabkan kerugian pada material dikarenakan sejumlah kerusakan terhadap partikel material. Sehingga memerlukan penentuan ukuran kristalit yang tepat sebagai bahan aktif untuk memperoleh performa yang maksimal.

Studi ini menganalisis kinerja baterai berair dari elektroda Cu sebagai katoda dan Zn sebagai anoda dalam penyimpanan energi elektrokimia. Pengaruh perubahan ukuran kristalit dan performa elektrokimia diteliti. Pemahaman yang mendalam tentang efek dan mekanisme interaksi pada elektroda baterai akan membantu mengembangkan dan memproduksi baterai berair Cu-Zn yang praktis dan memiliki nilai komersil.

I.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh perlakuan mekanik dengan metode penggilingan terhadap karakteristik ikatan kimia dan sifat struktur elektroda Cu dan Zn?
2. Bagaimana pengaruh perubahan ukuran kristalit terhadap performa baterai berair Cu-Zn?

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang melatarbelakangi penelitian ini adalah:

1. Menganalisa pengaruh perlakuan mekanik dengan metode penggilingan terhadap karakteristik ikatan kimia dan sifat struktur elektroda Cu dan Zn.
2. Menganalisa pengaruh perubahan ukuran kristalit terhadap performa tegangan dan arus baterai berair Cu-Zn.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Baterai Berbasis Air

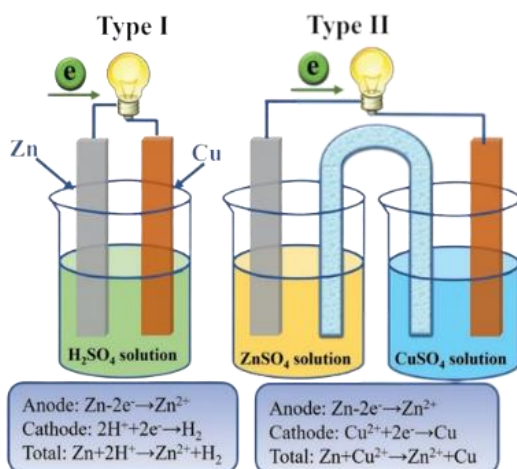
Karena berkurangnya pasokan dan polusi yang disebabkan oleh pembakaran bahan bakar fosil, pencarian energi bersih alternatif menjadi sorotan penelitian di seluruh dunia. Hal ini telah menyebabkan peningkatan permintaan untuk penyimpanan energi listrik, terutama pada baterai canggih yang memiliki potensi praktis untuk aplikasi skala luas [13]. Baterai lithium-ion (Li-ion) menjadi pemeran utama dalam hal ini. Namun, meskipun kepadatan energi tinggi, keamanan tetap menjadi masalah di mana-mana yang telah menghambat baterai Li-ion dalam aplikasi yang sangat penting bagi keamanan. Insiden dalam beberapa tahun terakhir termasuk kebakaran baterai Boeing 787 di 2013, ledakan Samsung Note 7 pada tahun 2016, dan Tesla Model S pada tahun 2019. Hal ini telah menyebabkan ancaman serius bagi manusia kesehatan atau kehidupan, yang mengingatkan kita terus menerus bahwa keselamatan adalah prasyarat untuk baterai [14]. Selain itu, kelimpahan yang langka dan meningkatnya biaya Li juga menimbulkan tantangan untuk aplikasi skala besar [15].

Baterai berair merupakan alternatif yang lebih aman dibandingkan dengan baterai litium yang ada saat ini. Penggunaan elektrolit berair juga menawarkan daya saing yang luar biasa dalam hal biaya rendah, ramah lingkungan, tidak mudah menguap, tidak beracun, tidak mudah terbakar, kemampuan pengisian cepat, kepadatan daya yang tinggi karena konduktivitas ionik yang tinggi dari media berair, dan toleransi yang tinggi terhadap kesalahan penanganan listrik yang tidak akan tidak akan menyebabkan konsekuensi bencana apapun [7].

II.2 Elektroda

Hingga saat ini, berbagai jenis baterai berair telah berhasil dibuat dengan kemajuan dalam pengembangan bahan dan kinerja elektrokimia yang lebih baik. Baterai berair menjadi salah satu kandidat ideal yang sedang direvitalisasi terutama untuk penyimpanan energi skala besar [7].

Pada tahun 1836, baterai berair Cu-Zn diperkenalkan oleh kimiawan asal Inggris bernama Jhon Frederic Daniell. Baterai utama Daniell terbagi atas dua tipe berdasarkan perbedaan sistem elektrolitnya. Dalam keadaan asam (Tipe I), Zn kehilangan dua elektron kemudian berpindah ke sisi lain melalui sirkuit eksternal dan H^+ tereduksi ke permukaan Cu menghasilkan H_2 . Zn dan H^+ reaksinya adalah irreversibel dan tidak ada reaksi kimia untuk Cu. Mekanisme pada baterai tipe II bersumber dari beda potensial antara Cu dan Zn. Zn kehilangan elektronnya di larutan $ZnSO_4$ dan melalui sirkuit luar mereduksi Cu^{2+} ke larutan $CuSO_4$. Semua reaksi Zn dan Cu^{2+} adalah irreversibel [9]. Baterai Cu-Zn Daniell kurang diminati karena reaksi irreversibelnya yang mengakibatkan siklus hidupnya terlalu singkat dan tidak dapat diisi ulang. Akibatnya, baterai berair tersebut kurang efektif untuk diterapkan di berbagai aplikasi.



Gambar 1. Rangkaian sel baterai Cu-Zn Daniell

Sejauh ini, diketahui bahwa Zn dapat reversibel pada larutan basa, netral dan dengan elektrolit $\text{Zn}(\text{CF}_3\text{SO}_3)_2$ dengan menggunakan garam seng dengan anion besar misalnya CF_3SO_3^- [3][16]. Zhang dkk [17] mencoba membuat baterai Cu-Zn yang reversibel dengan cara menggunakan Li^+ sebagai penghantar pesan elektrokimia. Li^+ ditugaskan sebagai penghubung antara Cu^{2+} dan Zn^{2+} untuk menyebrang ke sisi lain. Selanjutnya adalah kelarutan Cu^{2+} , Zhu dkk.[9] berhasil merealisasikan baterai Cu-Zn yang bersifat reversibel. Dengan cara menyesuaikan kelarutan Cu^{2+} tetap dalam keadaan basa sehingga kelarutannya dapat dikendalikan.

Kapasitas teoritik yang tinggi merupakan modal yang baik untuk mendapatkan performa elektroda baterai yang dapat diandalkan. Namun dalam rana praktiknya, kapasitas tersebut sangat sulit untuk dicapai karena masalah-masalah kompleks yang dimilikinya.

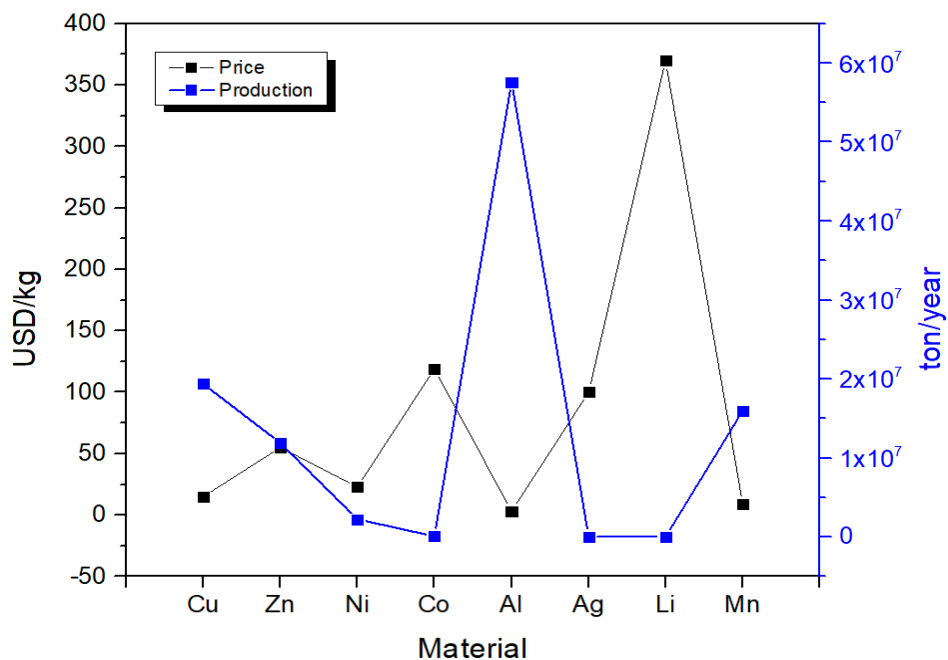
Tabel 1. Kapasitas teoritik spesifik beberapa logam

Material	Kapasitas Teoritik (mAh/g)
Cu	844
Zn	820
Ag	248
Al	993
Mn	976
Co	1364
Ni	913

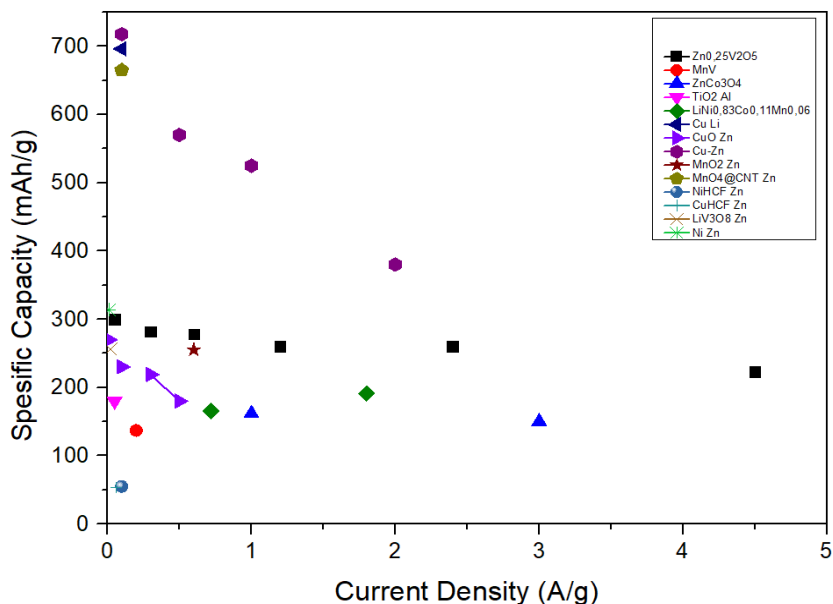
Cu dapat reversibel jika berada pada kondisi basa dan mampu memberikan kapasitas maksimalnya. Ni dan Co juga demikian, hanya saja tidak pada reaksi inisiasinya dan kehilangan sejumlah kapasitas. Ni reversibel pada proses transfer satu elektron ($\text{Ni}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{NiOOH}$), menghasilkan kapasitas teoritik hanya 289 mAh/g. Co terlihat lebih baik daripada Ni karena memiliki beberapa keadaan valensi (Co^{2+} , Co^{3+} , dan Co^{4+}). Disamping itu, sebuah laporan menunjukkan ada proses transfer

satu elektron oleh $\text{Co}(\text{OH})_2 - 1e^- \leftrightarrow \text{CoOOH}$ [18] atau $\text{CoOOH} - 1e^- \leftrightarrow \text{CoO}_2$ [19], yang artinya kapasitas teoritik tidak akan melampaui 300 mAh/g. Selain itu, transfer dua elektron $\text{Co}(\text{OH})_2 - 2e^- \leftrightarrow \text{CoO}_2$ hanya mampu mencapai maksimum 576 mAh/g.

Dari segi harga dan produksi seperti yang ditunjukkan Gambar II.2, Li menjadi yang termahal yaitu 369,8 USD/kg akibat produksinya terhitung sedikit hanya 35.000 ton/tahun karena kelangkaannya. Disusul oleh Co dan Ag dengan harga berturut-turut 119 dan 100 USD/kg, sama halnya dengan Li juga diakibatkan oleh produksi yang sedikit yaitu 123.000 dan 27.000 ton/tahun. Material lainnya memiliki harga dibawah 50 USD/kg sehingga menguntungkan dari segi ekonomi karena muda dijangkau. Cu, Zn, Ni, Al, dan Mn memiliki harga masing-masing 15, 50, 23, 3, dan 9 USD/kg dengan produksi yang cukup banyak yaitu 19.400.000, 11.900.000, 2.250.000, 57.600.000, dan 16.000.000 ton/tahun. Perbandingan ini menunjukkan hubungan antara harga dan produksi yang berbanding lurus. Semakin sedikit produksi karena kelangkaan, semakin mahal pula harga material tersebut.



(a)



(b)

Gambar 2. (a). Perbandingan antara harga dan produksi material (b) Kapasitas vs Densitas capaian dari beberapa sumber

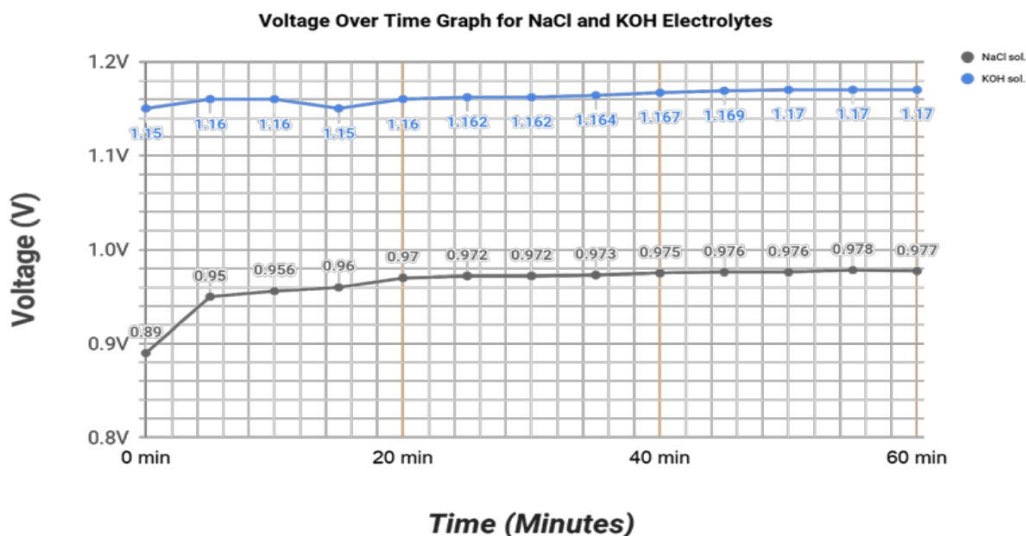
Sejauh ini, kapasitas elektroda cukup menjanjikan dihasilkan oleh Cu-Zn karena proses transfer $2e^-$ baik dari Cu^{2+} dan Zn^{2+} . Logam Cu memiliki stabilitas kimia yang baik dalam elektrolit berair karena potensi elektroda positif logam Cu (+0,34 V vs standar elektron hidrogen) dan memiliki kapasitas teoritik tinggi (844 mAh/g) [20]. Sebanding dengan elektroda kontranya yaitu logam Zn memberikan banyak keuntungan sebagai elektroda baterai, termasuk kapasitas teoritik yang tinggi (820 mAh/g), potensial redoks rendah (-0,76 V vs standar elektron hidrogen) dan sangat melimpah [9]. Kapasitas spesifik 718 mAh/g sangat menjanjikan untuk kebutuhan komersial di masa yang akan datang. Dibandingkan elektroda pembanding lainnya, memiliki kapasitas kisaran 53-696 mAh/g dengan densitas arus yang rendah yang ketika densitas arus dinaikkan maka kapasitas spesifik arus juga akan berkurang menunjukkan bahwa masih perlunya pengembangan di rana ini. Melihat kapasitas teoritik daripada Cu dan Zn menunjukkan bahwa baterai ini masih bisa ditingkatkan performanya.

Tabel 2. Performa kapasitas, densitas arus, dan tegangan serta siklus dari beberapa material elektroda

Material	Performa	Cycle	Ref
CuO/Zn	219 mAh/g 0,3 A/g 0,82 V	200 cycle	[4]
Cu-Zn	718 mAh/g 0,1 A/g	500 cycle	[9]

LiNi _{0,83} Co _{0,11} Mn _{0,06} O ₂	191 mAh/g 0,25 A/g 3,0-4,4 V	157 mAh pada 100 cycle	[10]
Zn _{0,25} V ₂ O ₅ 1 M ZnSO ₄	260 mAh/g 2,4 A/g	Mempertahankan 81% pada 1000 cycle	[16]
Zn Co ₃ O ₄ Elektrolit 1 M KOH	162 mAh/g 1 A/g	Mempertahankan 20% pada 2000 cycle	[18]
Mn MnVO Mn(CF ₃ SO ₃) ₂	137 mAh/g 0,2 A/g 1,33 V	Mempertahankan 86,7% pada 200 cycle	[21]
Ni/Co 6 M KOH	455 mAh/g 1 C 0,82 V	373 mAh/g pada 50 cycle	[22]
TiO ₂ nanospheres 1 M AlCl ₃	180 mAh/g 0,05 A/g	30 cycle	[23]
Li-Cu ₂ O	260 mAh/g 0,2 A/cm ²	-	[24]
11aCuO nanowires	696 mAh/g 0,1 A/g	40 cycle	[25]
αMnO ₂ 2 M ZnSO ₄	255 mAh/g 0,06 A/g 1,32 V	Mempertahankan 92% pada 5000 cycle	[26]
αMnO ₄ @CNT 2 M ZnSO ₄	665 mAh/g 0,1 A/g 1,35 V	Mempertahankan 99% pada 500 cycle	[27]
NiHCF 0,5 M Zn(ClO ₄) ₂	55 mAh/g 0,06 A/g 1,23 V	-	[28]
CuHCF	53 mAh/g 0,06 A/g 1,7 V	Mempertahankan 96% pada 100 cycle	[29]
PVO 3D Ni-Zn	314 mAh/g 10 A/g	Mempertahankan 80% pada 1000 siklus	[30]

II.3 Elektrolit

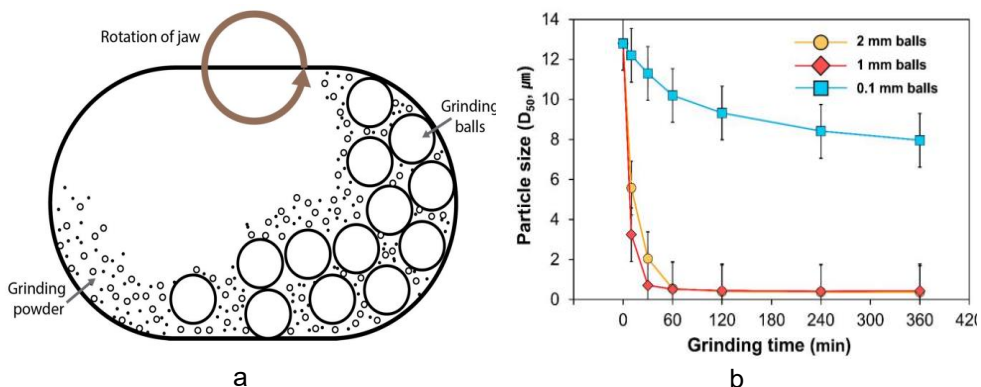


Gambar 3. Data Eksperimen terhadap Tegangan yang dihasilkan oleh sel terhadap waktu

Jiaxuan Li [31] melaporkan performa baterai dengan membandingkan dua elektrolit berbeda yaitu NaCl dan KOH. Sel pada inisiasinya menghasilkan tegangan yang relative rendah kemudian meningkat bertahap-tahap dan stabil pada kisaran nilai yang tinggi. NaCl pada inisiasinya menghasilkan tegangan 0,89 V, dan sangat lambat yang membutuhkan waktu 40 menit untuk mencapai kestabilan di 0,97 V. KOH menghasilkan tegangan pada inisiasinya sebesar 1,15 V dan meningkat hingga 1,17 V untuk mencapai kestabilan setelah 45 menit. Spekulasinya saat ini karena elektroda awalnya ditutupi dalam lapisan oksida tipis yang menghambat efisiensi reaksi redoks.

Dalam hal kinerja, disimpulkan bahwa kalium hidroksida (KOH) adalah elektrolit superior untuk baterai Cu-Zn dibanding dengan NaCl karena ion OH^- dalam larutan KOH lebih baik dalam membawa muatan dan partikel logam.

II.4 Penggilingan Mekanik

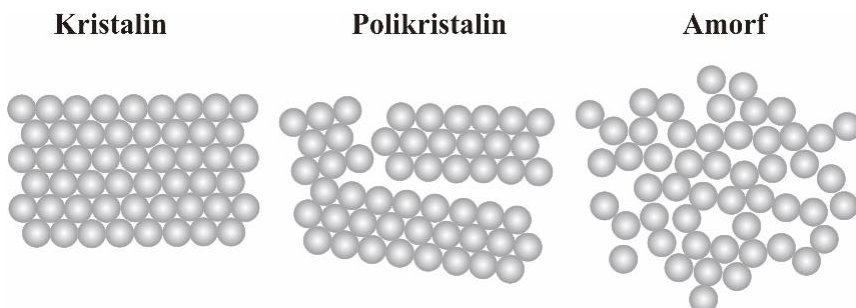


Gambar 4. (a) Pergerakan bola dan partikel selama proses penggilingan, (b) Perbandingan waktu pengecilan ukuran partikel dengan variasi ukuran bola

Produksi partikel bahan aktif adalah tahapan pertama yang penting. Granulasi dan penggilingan mekanis adalah metode umum untuk mencapai ukuran partikel bahan aktif yang diinginkan. Semakin lama partikel digiling, maka akan semakin kecil ukurannya. Penggilingan berlebihan akan menyebabkan runtuhnya struktur kristal mengakibatkan agregasi partikel ultrahalus. Selain runtuhnya struktur kristal dan sifat fisikokimia, sifat-sifat partikel seperti perilaku kapasitas pertukaran kation juga diubah melalui penggilingan mekanik. Dampak tumbukan dan gesekan antar partikel dan bola dalam vakum menggiling partikel skala mikro menjadi partikel sub-mikro [32].

Berdasarkan Gambar II.4 b, waktu yang dibutuhkan untuk mengubah ukuran partikel berhubungan dengan ukuran bola yang digunakan. Secara umum, semakin besar bola yang bergesekan dengan partikel maka akan semakin cepat pula proses pengecilan ukuran partikel tersebut. Berdasarkan gambar, bola dengan ukuran 1 mm sedikit lebih cepat menggerus ukuran partikel daripada bola dengan ukuran 2 mm. Lama penggilingan untuk mendapatkan ukuran partikel dan ukuran kristal yang lebih kecil juga ditentukan oleh ukuran bola yang sesuai yaitu tidak terlalu kecil dan tidak pula terlalu besar [32].

II.5 Kristalinitas



Gambar 5. Struktur kristalin, polikristalin, dan amorf

Dalam struktur kristal terdapat atom, ion dan molekul terorganisir dalam pola tiga dimensi yang teratur. Tata letak dan susunan atom, ion, atau molekul dalam kristal menentukan sifat-sifat kristal tersebut seperti tingkat kekerasan, konduktivitas, dan kejernihan. Kristal memiliki susunan partikel-partikel yang teratur dan berulang dalam satu pola geometris disebut unit sel, yang terbentuk melalui proses kristalisasi. Sedangkan amorf tidak memiliki susunan partikel-partikel yang teratur layaknya kristal dimana partikel-partikel penyusun tersebut tersebar secara acak.

Material struktur dengan berbagai bentuk dan ukuran dapat secara signifikan meningkatkan sifat fisiokimia dari bahan yang dikembangkan. Material amorf memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, struktur yang tidak teratur, dan stabilitas struktural yang ditingkatkan dapat mengakomodasi berbagai cacat dan regangan yang berkembang selama reaksi elektrokimia. Variasi dalam pilihan material baik kristal maupun amorf menghadirkan banyak peluang untuk eksplorasi lebih lanjut tentang pengembangan material dengan sifat yang unik [33]. Ukuran kristalit yang lebih besar dapat menghasilkan kapasitas spesifik awal yang lebih tinggi, tetapi juga dapat mengakibatkan perendaman yang lebih buruk oleh elektrolit dalam aglomerat berdampak negatif pada kinerja elektrokimia. Sebaliknya, kristalit yang lebih kecil dapat memiliki kapasitas spesifik yang lebih tinggi dan stabilitas siklus yang lebih baik [12].