

**PENGARUH PERBEDAAN ARUS LISTRIK TERHADAP
KARAKTERISTIK BATERAI DINAMIS ASAM
TIMBAL DENGAN ELEKTROLIT H₂SO₄**

SKRIPSI

Oleh:

Yofinda Eka Setiawan

145090300111021



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018**



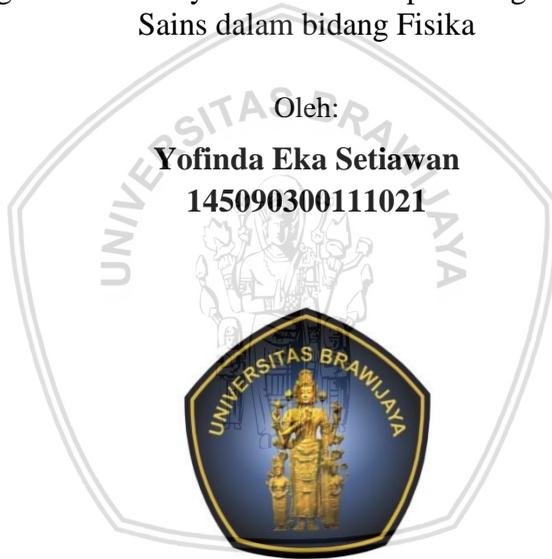
**PENGARUH PERBEDAAN ARUS LISTRIK TERHADAP
KARAKTERISTIK BATERAI DINAMIS ASAM
TIMBAL DENGAN ELEKTROLIT H₂SO₄**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana
Sains dalam bidang Fisika

Oleh:

Yofinda Eka Setiawan
145090300111021



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PENGARUH PERBEDAAN ARUS LISTRIK TERHADAP
KARAKTERISTIK BATERAI DINAMIS ASAM
TIMBAL DENGAN ELEKTROLIT H₂SO₄**

oleh :

YOFINDA EKA SETIAWAN

145090300111021

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji

Pada tanggal ...**26 Juni 2018**.....

dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika

Pembimbing I

Pembimbing II

Muhammad Ghufron, S.Si., M.Si

NIP. 198807272014041002

Dr. Istiroyah, S.Si., MT

NIP. 197408151999032002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika

Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Prof.Dr.Rer.Nat Muhammad Nurhuda

NIP. 19640910199021001



LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Yofinda Eka Setiawan
NIM : 145090300111021
Jurusan : Fisika
Penulis Skripsi Berjudul :

**PENGARUH PERBEDAAN ARUS LISTRIK TERHADAP
KARAKTERISTIK BATERAI DINAMIS ASAM
TIMBAL DENGAN ELEKTROLIT H₂SO₄**

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Isi dari Skripsi yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama yang termaktub di isi dan tertulis di daftar pustaka dalam Skripsi ini.
2. Apabila di kemudian hari ternyata Skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya kan bersedia menanggung segala risiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 11 Mei 2018

Yang menyatakan,

(Yofinda Eka Setiawan)

NIM. 145090300111021



PENGARUH PERBEDAAN ARUS LISTRIK TERHADAP KARAKTERISTIK BATERAI DINAMIS ASAM TIMBAL DENGAN ELEKTROLIT H₂SO₄

ABSTRAK

Baterai dinamis berbasis asam timbal merupakan salah satu jenis baterai yang berhasil dikembangkan sebagai pilihan yang menonjol untuk sumber energi terbarukan. Sistem baterai ini menggunakan tangki sebagai wadah penyimpanan elektrolit yang akan dialirkan menuju sel utama dengan bantuan pompa. Pada penelitian ini digunakan sel tunggal dengan memanfaatkan elektroda Pb-PbO₂ yang memiliki luasan setiap elektroda sebesar 101,25 cm² serta elektrolit H₂SO₄ dengan kadar 30 %. Pengujian dilakukan dengan variasi arus listrik (2 A; 1,5 A; 1,2 A; 1 A; 0,8 A; 0,5 A) pada keadaan pengosongan yang diatur oleh sebuah alat yaitu *Turnigy Accucell-6*. Hasil percobaan menerangkan bahwa meskipun dengan perlakuan yang sama pada pengisian baterai dinamis asam timbal, semakin kecil pembebanan arus listrik pada pengosongan menyebabkan baterai dinamis asam timbal membutuhkan waktu yang lebih lama untuk menghabiskan muatannya. Menilik pada efisiensi baterai dinamis asam timbal, arus 0,5 A merupakan arus listrik paling efisien dengan menghasilkan efisiensi mencapai 76,76 %. Performa baterai dinamis mampu mengungguli baterai statis maupun Li-Po (*Lithium-Polymer*). Pada perlakuan yang sama dengan arus listrik 1,5 A, baterai dinamis mampu menghasilkan kapasitas sebesar 3641 mAh, baterai statis menghasilkan kapasitas sebesar 2111 mAh, dan kapasitas terkecil sebesar 1611 mAh dihasilkan oleh baterai *Li-Po*. Disamping nilai kapasitas baterai, baterai dinamis juga mampu menghasilkan efisiensi energi paling besar dengan efisiensi energi sebesar 53 %, unggul 25,34 % dari baterai statis, dan 19,03 % dari baterai *Li-Po*.

Kata kunci : Baterai dinamis asam timbal, arus listrik, tegangan, efisiensi.



THE EFFECT OF VARIOUS ELECTRIC CURRENT ON CHARACTERISTIC OF LEAD ACID FLOW BATTERY AND H₂SO₄ AS ELECTROLYTE

ABSTRACT

Lead-acid based dynamic batteries are one of the leading battery types that have been developed as an outstanding choice for renewable energy sources. This battery system use tank as an electrolyte reservoir that is streamed to the main cell by the pump. In this research used single cell with electrode Pb-PbO₂, the area of each electrode equal to 101,25 cm² and electrolyte H₂SO₄ with contain of 30%. The experiment is carried out with various currents (2 A; 1,5 A; 1,2 A; 1 A; 0,8 A; 0,5 A) in the discharge state, which is controlled by *Turnigy Accucell-6*. The experimental results explain that with the same treatment on lead-acid dynamic battery charging, the smaller electric current imposed on the discharge causes the dynamic lead-acid battery to take longer to discharge. Considering the efficiency of lead-acid dynamic battery, a current of 0.5 A is the most efficient electric current with a value of 76,76 %. Dynamic battery performance can surpass both static and Li-Po (lithium-polymer) batteries. In the same treatment as the electric current of 1.5 A, the dynamic battery can produce a capacity of 3641 mAh, the static battery produces a capacity of 2111 mAh and the smallest capacity of 1611 mAh is produced by Li-Po batteries. In addition to the capacity of battery, The dynamic battery is also able to produce the highest energy efficiency with 53% energy efficiency, 25,34% higher than the static battery and 19,03% of the Li-Po battery.

Keyword: dynamic lead-acid battery, electric current, voltage, efficiency.





KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil ‘Aalamiin wasy-syukru lillah, segala puji bagi Allah ‘Azza wa Jalla atas inayah yang tiada henti dilimpahkan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Pengaruh Perbedaan Arus Listrik terhadap Karakteristik Baterai Dinamis Asam Timbal dengan Elektrolit H_2SO_4 ”** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains dalam bidang fisika. Tak lupa, rahmat dan kasih-Nya semoga selalu tercurahkan kepada guru junjungan kita Muhammad Shallahu ‘alaihi wa sallam, beserta keluarga dan para sahabatnya, serta kita para umatnya yang senantiasa mendapatkan curahan syafa’atnya hingga nanti di hari akhir.

Penulis berterima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan secara moril maupun fisik sehingga penulis dapat menyelesaikan Proposal Tugas Akhir ini dengan baik, dengan ketundukkan hati, penulis ingin mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Muhammad Ghufron, S.Si., M.Si selaku pembimbing I, yang terus memberikan pembaharuan ide-ide dan ilmu terkait dengan penelitian yang akan dilaksanakan selanjutnya.
2. Ibu Dr. Istiroyah, S.Si., MT selaku pembimbing II, yang turut membantu penulis dalam pengembangan ide serta penulisan laporan.
3. Bapak Prof.Dr.Rer.Nat Muhammad Nurhuda selaku Ketua Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Brawijaya Malang.
4. Kedua orang tua penulis yang tiada henti memberikan dukungan serta dorongan kepada penulis.
5. Ibu Cholisina Anik Perwita, S.Si.,M.Si selaku dosen pembimbing akademik, yang bersedia memberikan arahan baik secara akademis maupun moral kepada penulis.
6. Ibu Dr. Eng. Masruroh, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program studi S1 Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Brawijaya Malang.
7. Bapak Ibu dosen Jurusan Fisika Universitas Brawijaya Malang atas segala ilmu yang telah diberikan kepada penulis.



8. Bapak Puji Santoso selaku laboran Laboratorium Fisika Material Jurusan Fisika yang senantiasa membantu penulis.
9. Teman-teman fisika angkatan 2014, teruntuk Aprilia Dwi M. yang ikut membantu penulis dalam mencari referensi dan pendorong mental penulis serta pada '*genss flow batteries*' Riky Dwi Susilo, Nur Khairati, Ahmad Arif Amirullah, dan Mukhammad Yusmawanto yang terus membantu dan bekerja saling bahu membahu demi terlaksananya kegiatan Tugas Akhir.
10. Teman-teman Fisika angkatan 2014 yang turut mendukung penulis dengan semangat kekeluargaan.

Penulis mengharapkan dengan penulisan ini dapat mengenalkan dan menambah wawasan akan baterai aliran redoks, sehingga kedepan ilmu ini dapat lebih dikaji dan dimanfaatkan secara massal sebagai pengganti energi alternatif. Penulis juga menyadari bahwasanya skripsi ini tak luput dari kesalahan, oleh karena itu penulis memohon maaf yang sedalam-dalamnya atas segala bentuk kekeliruan secara langsung maupun tidak langsung. Penulis dengan senang hati menerima segala kritik dan saran yang bersifat membangun. Semoga skripsi ini bisa memberikan manfaat, baik untuk diri penulis maupun untuk orang lain.

Malang, 11 Mei 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
LEMBAR PERNYATAAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Peneltian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Teknologi Penyimpanan Energi	7
2.2 Arus Listrik	7
2.3 Baterai.....	8
2.3.1 Macam-macam Baterai	8
2.3.2 Kapasitas Baterai	9
2.4 Baterai Aliran Redoks	9
2.4.1 Fitur Utama	11
2.5 Baterai Asam Timbal.....	12
2.5.1 Karakteristik Umum	13
2.5.2 Baterai Dinamis Asam Timbal.....	14
2.6 Efisiensi Energi	15
BAB III METODOLOGI	17
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan	17
3.2 Alat dan Bahan.....	17
3.3 Tahap Penelitian	18
3.3.1 Tahap I : Pembuatan Desain Sel Baterai Aliran Redoks (dengan Pb-PbO ₂ sebagai Elektroda)....	18
3.3.2 Tahap II: Pembuatan Sel Baterai dan Elektroda .	19
3.3.3 Tahap III : Penggabungan Komponen	19



3.3.4 Tahap IV: Pengujian Karakteristik Baterai	20
3.4 Diagram Alir Penelitian	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Karakteristik Baterai Asam Timbal	25
4.1.1 <i>Discharge</i> Awal Baterai Statis-Dinamis Asam Timbal.....	27
4.1.2 Karakteristik Pengisian Baterai Asam Timbal	28
4.1.3 Karakteristik Pengosongan Baterai Asam Timbal.....	30
4.2 Pengaruh Beda Arus Listrik pada Baterai Statis Asam Timbal	32
4.3 Pengaruh Beda Arus Listrik pada Baterai Dinamis Asam Timbal	36
4.4 Perbandingan Baterai Asam Timbal Statis-Dinamis dan <i>Lithium-Polymer (Li-Po)</i>	40
4.5 Efisiensi Energi.....	44
BAB V PENUTUP	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN	53

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 1.1 Pengaduan listrik di asia tenggara	2
Gambar 1.2 Pengaruh pemberian beda arus listrik pada masing-masing permukaan elektroda Pb-PbO ₂	3
Gambar 2.1 Baterai primer	8
Gambar 2.2 Baterai sekunder	9
Gambar 2.3 Durasi kekuatan berbagai macam sistem penyimpanan energi	10
Gambar 2.4 Rangkaian baterai aliran redoks	11
Gambar 2.5 Skema sel baterai aliran redoks	12
Gambar 2.6 Prinsip aliran baterai dinamis asam timbal	14
Gambar 3.1 Desain sel	17
Gambar 3.2 Desain elektroda dalam sel	18
Gambar 3.3 Rangkaian sistem baterai dinamis asam timbal	19
Gambar 3.4 Diagram alir penelitian	22
Gambar 4.1 Rangkaian sederhana sistem 1 sel baterai dinamis asam timbal dengan 3 pelat elektroda	23
Gambar 4.2 (A) <i>Turnigy Accucell-6</i> ; (B) Tampilan paada layar alat ketika pengambilan data <i>discharge</i>	24
Gambar 4.3 Grafik tegangan terhadap waktu pada discharge awal baterai asam timbal 3 pelat statis-dinamis dengan arus 1,5 A serta H ₂ SO ₄ sebagai elektrolit	25
Gambar 4.4 Grafik pengisian dengan arus 1,5 A pada baterai dinamis asam timbal 3 pelat elektroda serta elektrolit H ₂ SO ₄ 30%	26
Gambar 4.5 Grafik perbandingan arus (1,5 A) terhadap waktu pada pengisian baterai asam timbal statis-dinamis	27
Gambar 4.6 Grafik (a) tegangan, (b) arus, dan (c) kapasitas pada pengosongan baterai dinamis asam timbal dengan elektrolit H ₂ SO ₄ 30%	29
Gambar 4.7 Tampilan <i>charge setup</i> (a) serta pengaturan nilai arus listrik (b) pada <i>software ChargeMaster</i> versi 2.02	30



Gambar 4.8 Grafik tegangan terhadap waktu pada proses pengisian dan pengosongan baterai statis asam timbal dengan pemberian beda arus listrik (1,5 A; 1 A; 0,5 A; 0,3 A) . 31

Gambar 4.9 Grafik tegangan awal terhadap arus pada pengisian dan pengosongan baterai statis asam timbal dnegan pengaruh perbedaan arus listrik 33

Gambar 4.10 Grafik tegangan terhadap waktu pada pengosongan baterai dinamis asam timbal dengan variasi arus listrik (2 A; 1,5 A; 1,2 A; 1 A; 0,8 A; 0,5 A) 35

Gambar 4.11 Grafik tegangan terhadap waktu pada pengosongan baterai asma timbal dengan beberapa variasi arus listrik 36

Gambar 4.12 Perbandingan nilai kapasitas pengosongan baterai dinamis asm timbal dengan berbagai variasi arus listrik 38

Gambar 4.13 Perbandingan grafik tegangan terhadap waktu pada pengosongan baterai statis dan dinamis asam timbal ... 38

Gambar 4.14 Grafik tegangan terhadap waktu dnegan variasi perbedaan arus listrik pada pengosongan baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)* 39

Gambar 4.15 Perbandingan grafik tegangan terhadap waktu pada (a) baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)* dan (b) baterai statis dan dinamis asam timbal 40

Gambar 4.16 Grafik pengosongan baterai *Lithium-Polymer* dengan arus listrik sebesar 1,5 A 42

Gambar 4.17 Grafik nilai efisiensi energi setiap perbedaan arus listrik pada baterai statis dan dinamis asam timbal .. 44

Gambar 4.18 Perbandingan efisiensi energi antara baterai asm timbal statis-dinamis dan baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)* 45



DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 4.1 rincian data hasil pengisian-pengosongan baterai dinamis asam timbal	28
Tabel 4.2 Data hasil charge-discharge baterai statis asam timbal dengan beberapa perlakuan arus	32
Tabel 4.3 Data hasil pengosongan baterai dinamis asam timbal dnegan beberapa variasi arus listrik	37
Tabel 4.4 Data hasil charging-discharging baterai asam timbal statis-dinamis dan baterai <i>Lithium-Polymer (Li-Po)</i>	41
Tabel 4.5 Nilai efisiensi energi setiap nilai arus pada baterai asam timbal statis-dinamis serta baterai <i>Lithium-Polymer</i>	43



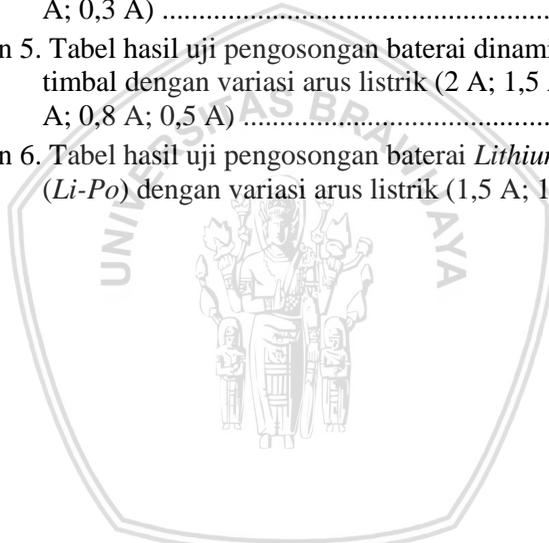
(Halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1. Alat dan bahan	53
Lampiran 2. Sistem baterai dinamis asam timbal	56
Lampiran 3. Tabel hasil uji discharging awal baterai asam timbal statis dan dinamis	57
Lampiran 4. Tabel hasil uji pengisian-pengosongan baterai asam timbal statis dengan variasi arus listrik (1,5 A; 1 A; 0,5 A; 0,3 A)	60
Lampiran 5. Tabel hasil uji pengosongan baterai dinamis asam timbal dengan variasi arus listrik (2 A; 1,5 A; 1,2 A; 1 A; 0,8 A; 0,5 A)	74
Lampiran 6. Tabel hasil uji pengosongan baterai <i>Lithium-Polymer (Li-Po)</i> dengan variasi arus listrik (1,5 A; 1 A)	84





BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan zaman yang semakin pesat diikuti dengan kemajuan teknologi, memaksa masyarakat Indonesia bergantung pada kondisi lingkungan untuk selalu menghasilkan energi. Lingkungan yang kita tempati terus digerus sumber daya yang dihasilkannya. Dampak dari meningkatnya kebutuhan akan energi menyebabkan muncul beberapa persoalan. Pemadaman listrik bergilir merupakan salah satu dari sekian banyak solusi yang kurang efektif dalam menanggulangi kebutuhan akan energi listrik yang besar. Kehidupan saat ini tidak memungkinkan bagi warga dunia umumnya dan Indonesia khususnya tanpa adanya energi listrik. Bahkan warga kota yang notabene memiliki kebutuhan listrik lebih besar juga tak luput dari pemadaman secara bergilir. Banyaknya faktor terutama masalah tingginya kebutuhan dan biaya akan listrik yang membuat kota-kota besar di Indonesia masih mengalami pemadaman listrik secara bergilir. (Republika, 2016).

PT. PLN (Persero) merupakan Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang diberi kewenangan oleh Pemerintah untuk melaksanakan tugas dan usahanya dalam menyediakan tenaga listrik bagi kepentingan umum. Bertindak sebagai perusahaan pemerintah, tentunya PLN mempunyai tanggung jawab yang besar dalam merespon dan mewujudkan kebutuhan masyarakat sebagai penyedia listrik bagi badan usaha sampai pada rumah tangga untuk mencapai kepuasan konsumsi. Sebagaimana disebutkan dalam Pasal 29 UU NO. 30 tahun 2009 poin (b) bahwa: "*konsumen berhak mendapatkan tenaga listrik secara terus menerus dengan mutu dan kendala yang baik*". Akan tetapi pada kenyataannya sering tidak sejalan dengan bunyi butir tersebut. Hal tersebut ditunjukkan dengan tingginya pengaduan akan listrik di Indonesia dibandingkan dengan beberapa negara di Asia Tenggara.

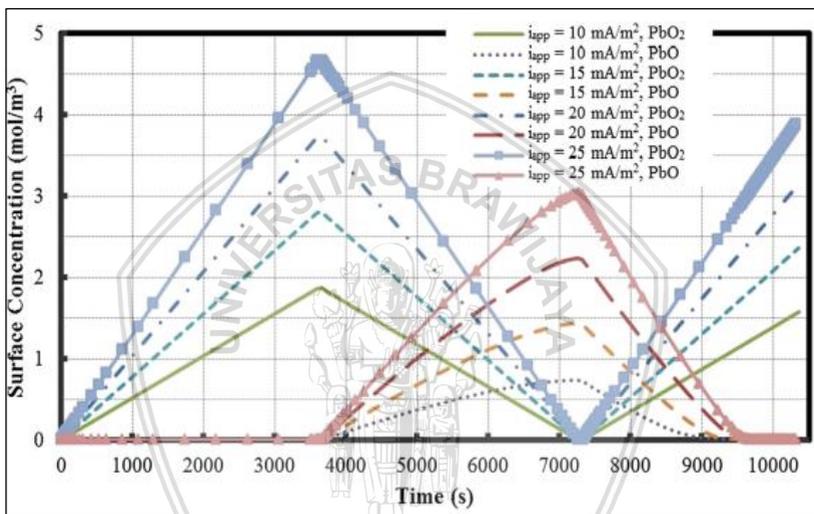


Gambar 1.1 Pengaduan Listrik di Asia Tenggara
(E-Magazine PLN, 2013:41)

Keluhan terhadap PLN di Indonesia ternyata cukup tinggi, hingga mencapai 13% menurut catatan Yayasan Lembaga Konsumen Indonesia (YLKI). Angka tersebut paling tinggi dibanding Malaysia dan Singapura yang hanya mencapai 3%. Sehingga hal ini menjadikan PLN harus menghemat sumber daya alam yang ada dengan cara melakukan pemadaman listrik secara bergilir agar bisa secara merata disalurkan pada para konsumen. Akan tetapi Indonesia harus segera berbenah, diluar kendala sosial maupun politik, memperhatikan masalah konsumsi energi listrik juga patut dilibatkan.

Indonesia sendiri sudah mulai banyak melakukan peningkatan mutu untuk energi terbarukan seperti matahari, angin, dan lain sebagainya. Akan tetapi hal tersebut masih memerlukan biaya untuk perawatan yang besar. Sehingga hal ini membuat industri energi secara intensif mencari teknologi dengan efisiensi yang lebih baik dan biaya penyimpanan listrik yang mampu meningkatkan kehandalan dan keberlanjutan dalam memproduksi listrik. Salah satu solusi yang menjanjikan untuk tujuan ini adalah penggunaan Baterai aliran redoks. *Redox Flow Battery (RFB)* memiliki sejumlah keunggulan penting seperti masa pakai yang panjang, dapat menentukan kapasitas dan daya baterai, serta perawatan yang mudah. (Ponce dkk, 2006).

Banyak perlakuan yang dapat dilakukan untuk terus mengembangkan baterai tersebut, diantaranya dengan menelaah pada suhu elektrolit, konsentrasi elektrolit, dan banyak lagi parameter yang dapat dilakukan. Akan tetapi dalam penelitian terbaru yang telah dilakukan oleh Bates dkk, dengan lebih condong pada pengaruh arus listrik atau perubahan arus listrik pada saat pengisian maupun pengosongan. Efek yang diberikan dari perubahan arus yang diterapkan pada baterai dinamis asam timbal dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 1.2 Pengaruh Pemberian Beda Arus Listrik pada Masing-masing Permukaan Elektroda Pb-PbO₂ (Bates dkk, 2013).

Pada Gambar 1.2 menunjukkan perlakuan arus listrik memiliki dampak yang cukup signifikan pada permukaan elektroda. Terlihat terdapat suatu perubahan kendati perlakuan yang diberikan memiliki perbedaan hanya sebesar 5 mA. Maka dari itu berdasarkan hasil penilitan yang telah dilakukan, penulis terdorong untuk melakukan penelitian pada baterai dinamis asam timbal dengan perlakuan perbedaan arus listrik yang bervariasi. Sehingga dalam penilitian ini penulis ingin meneliti bagaimana pengaruh dari pemberian beda arus listrik serta menentukan efisiensi dari baterai dinamis asam timbal dengan pengaruh pemberian beda arus listrik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang muncul, penulis merumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik baterai dinamis asam timbal yang dihasilkan dengan adanya perbedaan pemberian arus pada keadaan pengosongan?
2. Bagaimana analisis efisiensi energi baterai dinamis asam timbal dengan pemberian beda arus listrik?
3. Bagaimana perbandingan karakteristik baterai dinamis asam timbal dengan baterai statis asam timbal dan *Lithium-Polymer (Li-Po)* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik dari baterai dinamis asam timbal yang dihasilkan dengan pemberian beda arus listrik
2. Mendapatkan besar arus efisien dan efisinesi energi dari baterai dinamis asam timbal dengan elektrolit H_2SO_4
3. Mengetahui karakteristik baterai dinamis asam timbal dengan melakukan perbandingan dengan baterai statis asam timbal dan *Lithium-Polymer (Li-Po)*

1.4 Batasan Masalah

Penilitan ini hanya membahas mengenai pengaruh perbedaan pemberian arus listrik (2 A; 1,5 A; 1,2 A; 1 A; 0,8 A; dan 0,5 A) pada pengosongan baterai dinamis asam timbal dengan luasan masing-masing pelat elektroda Pb-PbO₂ sebesar 101,25 cm² dan elektrolit H₂SO₄ dengan kadar 30 %. Alat yang digunakan untuk mencatat data hanya *Turnigy Accucel-6*, dimana data ditampilkan dalam bentuk grafik melalui software *ChargeMaster* versi 2.02.

1.5 Manfaat Penelitian

Setelah dilakukan penelitian ini, penulis mengharapkan penulisan ini dapat memberikan manfaat. Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Memahami karakteristik dari baterai dinamis asam timbal dengan pemberian perbedaan arus.
2. Memahami besar arus efisien dari baterai dinamis asam timbal.
3. Mengetahui besar efisiensi energi pada baterai dinamis asam timbal dengan perbandingan baterai statis asam timbal dan baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)*.





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknologi Penyimpanan Energi

Perkembangan teknologi saat ini sangatlah pesat, pengkajian terus dilakukan akan sistem penyimpanan energi yang praktis, efisien, dan ramah lingkungan. Selain hal tersebut, besar kapasitansi juga sangatlah diperhitungkan. Akan tetapi kebanyakan penyimpanan energi saat ini tidak mampu berada dalam rentang waktu yang lama. Oleh karena itu dibutuhkan sistem penyimpanan energi yang mampu bertahan dalam siklus pengisian dan pengosongan (*charge* dan *discharge*) (Pickard, 2009). Baterai adalah satu yang sedang terus dikembangkan karena relatif murah dan prospek kedepan juga cukup baik, termasuk juga baterai aliran redoks.

2.2 Arus Listrik

Arus listrik merupakan muatan yang bergerak. Pada sebuah konduktor padat, yang bertindak sebagai pembawa muatan adalah elektron bebas. Sedangkan pada konduktor cair atau yang dikenal dengan elektrolit, pembawa muatannya adalah ion. Pengaruh medan listrik yang membuat ion maupun elektron bebas di dalam konduktor dapat bergerak. Besarnya arus listrik dapat dinyatakan dengan banyaknya elektron tiap detik, satuannya adalah Ampere (A). Rumus arus listrik :

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (2.1)$$

dimana :

I = arus listrik (A)

Q = muatan listrik

t = waktu (s)

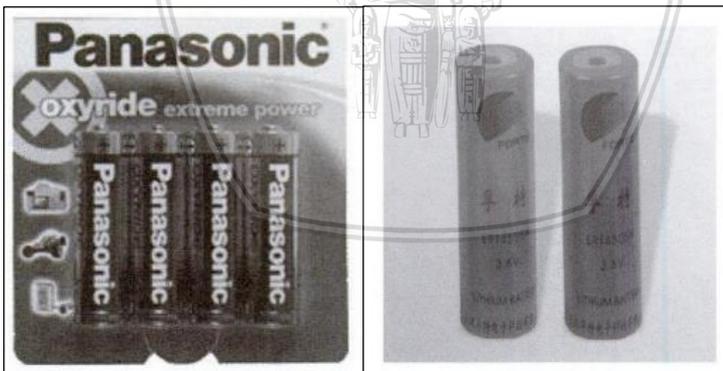
(Faissler, 1991)

2.3 Baterai

Baterai merupakan salah satu sumber energi yang digunakan untuk menghidupkan mesin dan unit daya tambahan, untuk menyediakan daya cadangan, atau dapat dikatan *fly-by-wire*. Selain itu kemudahan perawatan dan kemampuan mengisi ulang cepat juga dapat menjadi alasan utama baterai menjadi pilihan utama sumber energi yang ideal. Baterai beroperasi dengan mengubah energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi pelepasan elektrokimia. Baterai terdiri dari satu atau lebih sel, masing-masing mengandung elektroda positif, elektroda negatif, separator, dan elektrolit (Vutetakis, 2001).

2.3.1 Macam-macam Baterai

Perbedaan tipe baterai yang ada saat ini dapat ditelaah dari reaksi kimia yang terjadi, dimana berdasarkan hal tersebut baterai terbagi menjadi dua yaitu, *baterai primer* dan *baterai sekunder*. Baterai primer merupakan baterai yang pemakaiannya hanya dapat digunakan sekali saja, dikarenakan tidak dapat diisi ulang. Sedangkan baterai sekunder adalah tipe baterai yang dapat diisi ulang dengan alat atau metode tertentu. Baterai aliran redoks yang sedang gencar dikembangkan saat ini masuk dalam katategori baterai sekunder.

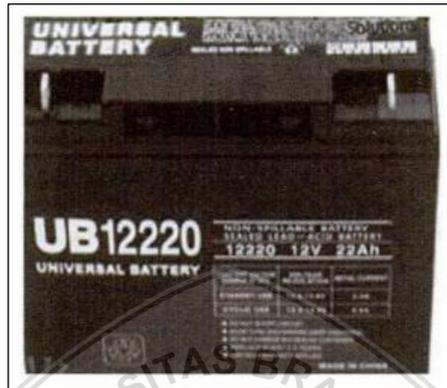


Gambar 2.1 Baterai Primer (Enterprise, 2010).

2.3.1.1 Baterai Sekunder

Jenis baterai ini memiliki reaksi kimia yang dapat dibalik, sedangkan baterai primer tidak bisa atau permanen, hal tersebut yang membuat baterai sekunder dapat digunakan kembali. Di bawah ini terdapat beberapa ciri baterai sekunder :

- Memiliki prinsip mengubah energi kimia menjadi energi listrik
- Dapat digunakan kembali dengan cara melakukan pengisian ulang (*re-charge*)



Gambar 2.2 Baterai Sekunder (Enterprise, 2010).

Dengan berbagai keunggulan yang ada, baterai ini lebih ekonomis dibanding dengan baterai primer maupun penyimpanan energi yang lain jika diakumulasikan secara jangka panjang (Enterprise, 2010).

2.3.2 Kapasitas Baterai

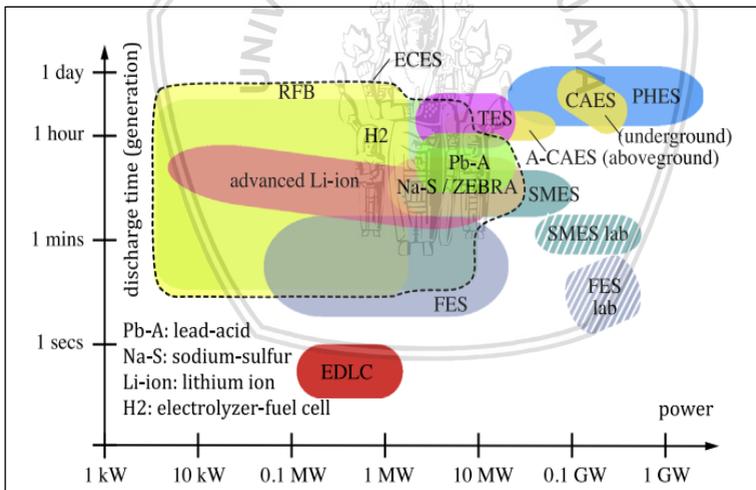
Kapasitas baterai biasanya dinyatakan sebagai *Ampere Hour* (Ah). Satu Ah adalah jumlah muatan yang diberikan saat arus satu ampere dikirim selama satu jam. Karena kapasitas baterai tergantung pada tingkat di mana mereka diberhentikan. Misalnya baterai dengan kapasitas 300 Ah saat dikosongkan selama 10 jam (tingkat 10 jam) dapat memberi $(300 : 10)$ 30 A terus menerus. Singkatnya, semakin panjang waktu yang dibutuhkan untuk mengosongkan baterai maka akan semakin besar kapasitasnya (Whitfield, 2001).

2.4 Baterai Aliran Redoks

Pembahasan di antara penyimpanan energi dengan sistem elektrokimia, baterai aliran redoks merupakan salah satu teknologi terbaru dan pilihan yang cukup menjanjikan untuk penyimpanan energi kedepannya. Baterai aliran redoks ini menggunakan sistem interaksi dengan reaksi reduksi dan oksidasi yang terbentuk dalam

cairan, dimana cairan ini disebut sebagai elektrolit dan disimpan di tangki eksternal atau *chamber* dan dialirkan ke dalam sel yang berisi pasangan elektroda. Teknologi ini cukup menarik dimana kemenarikan tersebut antara lain: skalabilitas, fleksibilitas, ukuran daya dan energi yang independen, efisiensi yang tinggi, daya tahan yang lama, responsif cepat, dan dampak lingkungan yang sedikit (Weber, 2011).

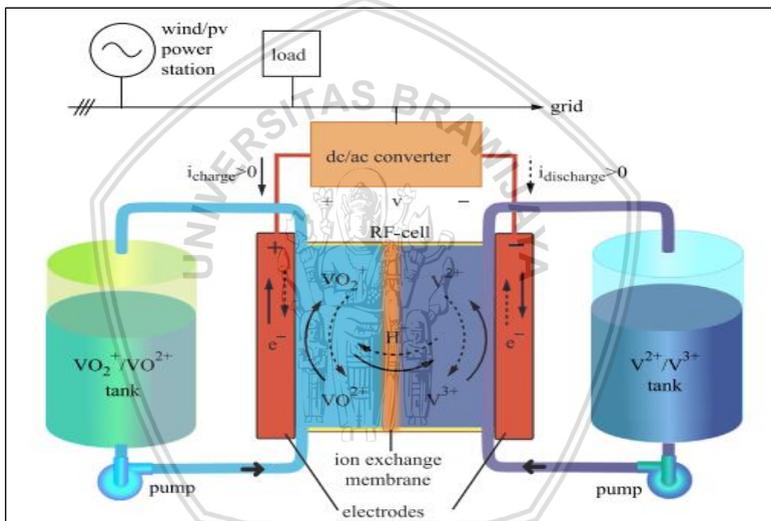
Dibandingkan dengan teknologi penyimpanan elektrokimia lainnya, pada baterai aliran redoks ini konversi daya dipisahkan dari penyimpanan energi, sehingga memungkinkan daya listrik untuk berdiri sendiri. Fitur ini memungkinkan kapasitas yang hampir tak terbatas hanya dengan menggunakan tangki penyimpanan yang lebih besar. Dikarenakan adanya keunggulan-keunggulan tersebut memungkinkan rentang kekuatan operasional dan waktu pengosongan (*discharging*) yang cukup luas, maka hal tersebut membuat baterai aliran redoks ini cukup ideal untuk membantu pembangkit listrik dari sumber terbarukan.



Gambar 2.3 Durasi Kekuatan Berbagai Macam Sistem Penyimpanan Energi (Alotto dkk, 2014).

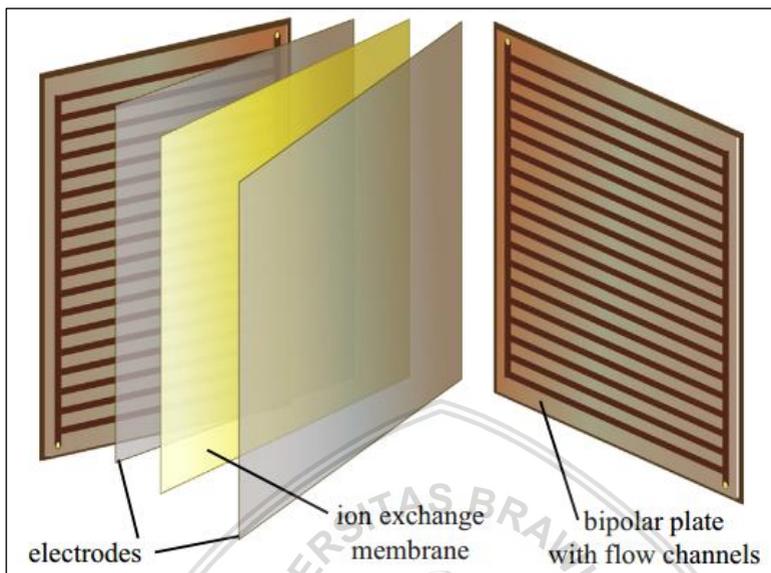
2.4.1 Fitur Utama

Prinsip kerja dari baterai aliran redoks ini adalah dengan digunakan reaksi reduksi dan oksidasi elektrokimia yang terjadi pada dua cairan elektrolit, baterai aliran redoks cukup bergantung dengan jenis larutan kimia yang digunakan. Dimana ion bermigrasi dari satu elektroda ke elektroda lainnya (dari anoda menuju katoda). Untuk menjaga agar larutan dalam fase cair, pengoperasian harus dilakukan pada suhu kamar. Sel yang berisi sepasang elektroda yang dipisahkan dengan membran terhubung ke tangki penyimpanan eksternal yang menyediakan larutan elektrolit dimana elektrolit nantinya dialirkan dengan bantuan pompa (Alotto dkk, 2015).



Gambar 2.4 Rangkaian Baterai Aliran Redoks (Alotto dkk, 2014)

Gambar diatas merupakan sistem baterai aliran redoks dengan elektrolit ganda, terdapat 2 tangki sebagai wadah dari elektrolit yang nantinya akan di pompa menuju sel. pada Gambar 2.5 terdiri dari setumpuk sel individual, di mana pada sel terjadi reaksi kimia saat aliran elektrolit melewatinya, dan juga terdapat membran pemisah. (Alotto, 2011)



Gambar 2.5 Skema Sel Baterai Aliran Redoks (Alotto, 2011)

2.5 Baterai Asam Timbal

Beberapa teknologi penyimpanan energi dengan baterai aliran redoks yang banyak tersedia saat ini, baterai asam timbal adalah teknologi paling efisien yang digunakan untuk instalasi rumah tangga di Belgia. Bahkan baterai asam timbal telah digunakan sudah cukup lama dalam bidang industri yang ada saat ini. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa industri yang menggunakan penyimpanan energi berbasis baterai asam timbal ini tingkat pembelajaran terhadap baterai meningkat 19-24% per tahun dari tahun 1985 sampai 2002. Beberapa peneliti juga memfokuskan penelitian mereka pada penyimpanan rumah tangga dengan baterai asam timbal, dengan alasan teknologi ini paling murah untuk digunakan dan teknologi ini sangat cocok dalam aplikasi hunian dengan skala kecil (Matteson dan Williams, 2015).

Tantangan terbesar dalam teknologi baterai asam timbal salah satunya adalah pengendapan timbal yang muncul pada elektroda. Deposisi yang terjadi dapat menurunkan efisiensi elektroda dan mengurangi performa arus baterai. Hal ini dikarenakan siklus hidup sangat penting untuk penyimpanan energi. Pengurangan efisiensi dan yang jelas adalah penggantian elektroda memerlukan biaya yang tidak

sedikit pula. Namun, saat ini jarang yang mengembangkan, karena masih banyak parameter yang dapat dilakukan untuk mengembangkan baterai asam timbal dinamis (Bates,2014).

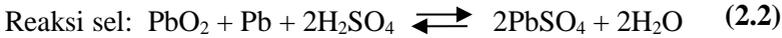
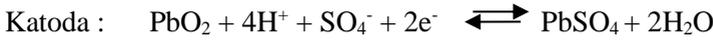
Beberapa penelitian yang dilakukan diantaranya simulasi baterai asam timbal yang dilakukan oleh Achaibou dkk. Mereka mengembangkan model mereka dengan merujuk kedua elektroda yaitu anoda dan katoda, dimana keduanya dikonversi menjadi timbal sulfat selama proses pelepasan dan pengisian dalam pembebasan ion sulfat dan dengan demikian konsentrasi elektrolit akan meningkat. Berdasarkan voltase yang diperoleh dan arus yang diberikan, mereka menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan bervariasi secara linier dengan waktu (Bates,2014).

Oury dkk. mempelajari baterai asam timbal dari sudut pandang matematis. Para penulis berasumsi bahwa sumber spesies aktif ke sel tetap konstan dan oleh karena itu jumlah elektrolit tidak terbatas. *Multiphysics COMSOL* digunakan untuk mempelajari model. Hasil menunjukkan bahwa reaksi meningkat pada tingkat arus yang meningkat pada tepi elektroda. Serta, tegangan *discharge* menunjukkan peningkatan progresif dengan jumlah siklus yang lebih banyak. Sedangkan Shah dkk mengembangkan model analitis sementara untuk semua baterai vanadium dinamis dan membandingkannya dengan hasil eksperimen. Dalam model analitik beberapa yang dipertimbangkan diantaranya adalah transportasi massal, transportasi muatan, reaksi permukaan elektroda, dan efek elektrokimia. Shah dkk melaporkan hasil simulasi memiliki tingkat akurasi yang baik (Bates,2014).

2.5.1 Karakteristik Umum

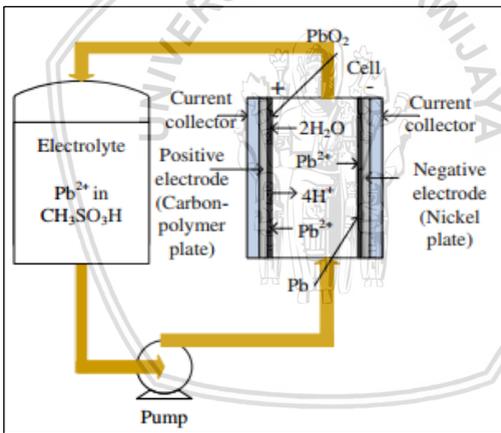
Baterai asam timbal didasarkan pada reaksi elektroda Pb dalam elektrolit asam, misalnya H_2SO_4 . Saat baterai dikenakan beban, pada anoda setiap ion negatif sulfat (SO_4^{2-}) akan bereaksi dengan pelat timbal murni (Pb), dari reaksi tersebut akan menghasilkan timbal (II) sulfat ($PbSO_4$) dengan melepaskan 2 elektron. Sedangkan pada katoda, ion negatif sulfat (SO_4^{2-}) akan berikatan dengan pelat timbal dioksida (PbO_2) dan menghasilkan timbal sulfat ($PbSO_4$) dengan mengambil 2 elektron. Selain negatif sulfat, timbal dioksida juga akan mengikat ion hidrogen (H^+) untuk membentuk air (H_2O). Pelepasan dan pengambilan elektron dalam proses kimia ini menyebabkan timbulnya beda potensial listrik antar kutub-kutub sel pada baterai.

Proses pengisian merupakan kebalikan dari proses pengosongan dimana arus listrik dialirkan yang arahnya berlawanan dengan arus listrik saat pengosongan (Sequeira dan Pedro, 2007)



2.5.2 Baterai Dinamis Asam Timbal

Penelitian yang dilakukan oleh Zhang dkk, dimana baterai aliran redoks dengan penggunaan elektroda asam timbal. Sistem tersebut merupakan elektrolit tunggal, dimana terdiri dari tangki elektrolit yang berisi cairan asam. Elektrolit terus dipompa menuju sel. (Zhang dkk, 2011).



Gambar 2.6 Prinsip Aliran Baterai Dinamis Asam Timbal (Zhang dkk, 2011).

Penelitian tersebut dihasilkan nilai sel standar baterai dinamis asam timbal sebesar 1,62 V. Sistem baterai tersebut (Baterai dinamis asam timbal) mampu diaplikasikan dalam penyimpanan energi yang besar dibandingkan dengan baterai statis asam timbal yang bekerja dalam skala kecil saja. (Zhang dkk, 2011)

2.6 Efisiensi Energi

Setiap baterai akan memiliki nilai jual tinggi ketika mampu menghasilkan nilai efisiensi yang tinggi pula. Sehingga bagus tidaknya suatu baterai dilihat dari nilai efisiensi pada baterai. Efisiensi pengisian sendiri merupakan perbandingan muatan listrik yang diberikan saat pengosonagn (*discharge*) dengan muatan listrik yang diberikan saat pengisian (*charge*). Faktor efisiensi biasanya diukur dengan *coulombic efficiency*. Efisiensi coulumb juga dikenal dengan efisiensi arus yang dirumuskan dengan,

$$\eta_c = \frac{I_D T_D}{I_C T_C} \quad (2.3)$$

dalam mengukur total efisiensi energi pada baterai, yang dirumuskan dengan,

$$\eta = \left(\frac{V_D}{V_C}\right) \left(\frac{I_D T_D}{I_C T_C}\right) \quad (2.4)$$

maka diperlukan nilai V baik pengosongan maupun pengisian yang ditunjukkan dengan rumus :

$$\eta_w = \left(\frac{V_D}{V_C}\right) \quad (2.5)$$

(Bode, 1977)

Oleh karena itu nantinya dalam penelitian ini, diharapkan dapat mengetahui tingkat efisiensi tertinggi dari baterai asam timbal dinamis dengan pemberian beda arus pada tegangan yang telah ditetapkan.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Waktu penelitian tugas akhir ini dimulai pada Oktober 2017 - Maret 2018 dan tempat pelaksanaannya di Laboratorium Fisika Material, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya Malang.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini antara lain:

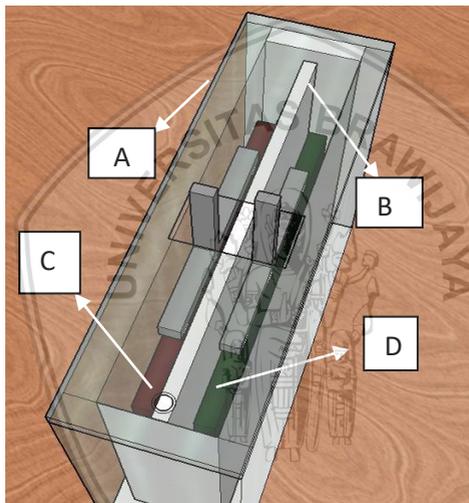
1. Seperangkat alat pengukur *charging-discharging* (*Turnigy accucell-6*),
2. Baterai *Lihtium-Polymer (Li-Po)* 3S-25C
3. *Peristaltic Pump 3V*,
4. Kaca akrilik,
5. Wadah plastik dengan volume 600 mL,
6. Mur dan baut,
7. Selang penghubung (bening),
8. Kabel penghubung,
9. Adaptor,
10. Multimeter,
11. Solder,
12. Laptop,
13. Solder Pemanas,
14. Larutan Elektrolit H_2SO_4 ,
15. Elektroda Pb dan PbO_2 ,
16. Memberan separator,
17. Resin 3126 beserta katalis,
18. Lem,
19. Kertas gosok,
20. Timah.

3.3 Tahap Penelitian

Penelitian *single electrolyte lead-acid flow battery* sebagai alternatif penyimpanan energi dengan beberapa tahap penelitian sebagai berikut :

3.3.1 Tahap I : Pembuatan Desain Sel Baterai Aliran Redoks (dengan Pb-PbO₂ sebagai Elektroda)

Sebelum dilaksanakan penelitian, maka dibuat desain rancang bangun baterai aliran redoks dengan Pb-PbO₂ sebagai elektroda dan H₂SO₄ sebagai elektrolit, sebagai berikut :



Gambar 3.1 Desain Sel

Keterangan :

- A. Akrilik
- B. Membran
- C. Elektroda Pb
- D. Elektroda PbO₂

3.3.2 Tahap II: Pembuatan Sel Baterai dan Elektroda

Sel sebagai tempat elektroda dibuat dari bahan akrilik yang berbentuk balok. Masukan dari elektrolit diletakkan di pojok atas dari sel, sedangkan elektrolit dikeluarkan dari sel melalui lubang yang di letakkan di pojok bawah di sisi sel yang lain. Setiap lubang diberi keran yang dapat diatur untuk laju dari elektrolit yang masuk maupun keluar. pada penutup sel diberi lubang untuk keluaran dari timah yang disambungkan pada masing-masing elektroda, sehingga listrik bisa dialirkan. Penelitian ini digunakan 2 buah elektroda, yaitu Pb dan PbO₂, dimana satu elektroda dilakukan penggabungan dari 3 elektroda yang sama, dimana tiap elektroda memiliki luas permukaan sebesar (4,5 x 7,5) cm². Penggabungan elektroda digunakan timah, dimana pada bagian samping elektroda dikasarkan dengan kertas gosok agar timah dapat menempel.



Gambar 3.2 Desain Elektroda dalam Sel

Keterangan :

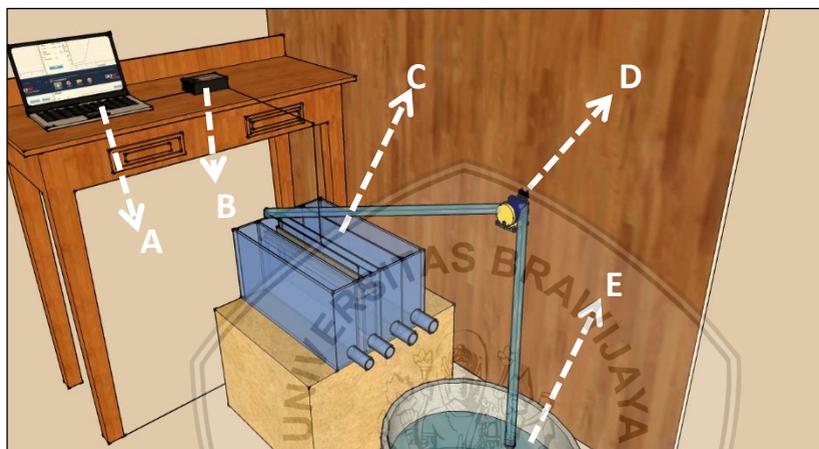
- A. Satu luasan Elektroda (4,5 cm x 7,5 cm)
- B. Timah

3.3.3 Tahap III : Penggabungan Komponen

Setelah sel digabungkan, kemudian dilakukan penggabungan seluruh komponen dari sistem baterai dinamis asam timbal. Sel diletakkan di dekat keluaran elektrolit sel, serta peletakannya lebih tinggi dari *chamber*. *Chamber* sebagai wadah elektrolit eksternal yang nantinya elektrolit akan dialirkan menuju sel dengan bantuan pompa

peristaltik yang diletakan pada dinding. Pompa akan menyedot elektrolit dari *chamber* kemudian dialirkan menuju sel. Peletakkan pompa lebih tinggi dari sel maupun *chamber*. Elektrolit yang mengalir melalui medium selang bening yang telah dihubungkan antara *chamber*, pompa, dan sel.

Gambar 3.3 Rangkaian Sistem Baterai Dinamis Asam Timbal



Keterangan :

- A. Laptop
- B. Turnigy Accucell-6
- C. Sel
- D. Pompa peristaltik
- E. Chamber

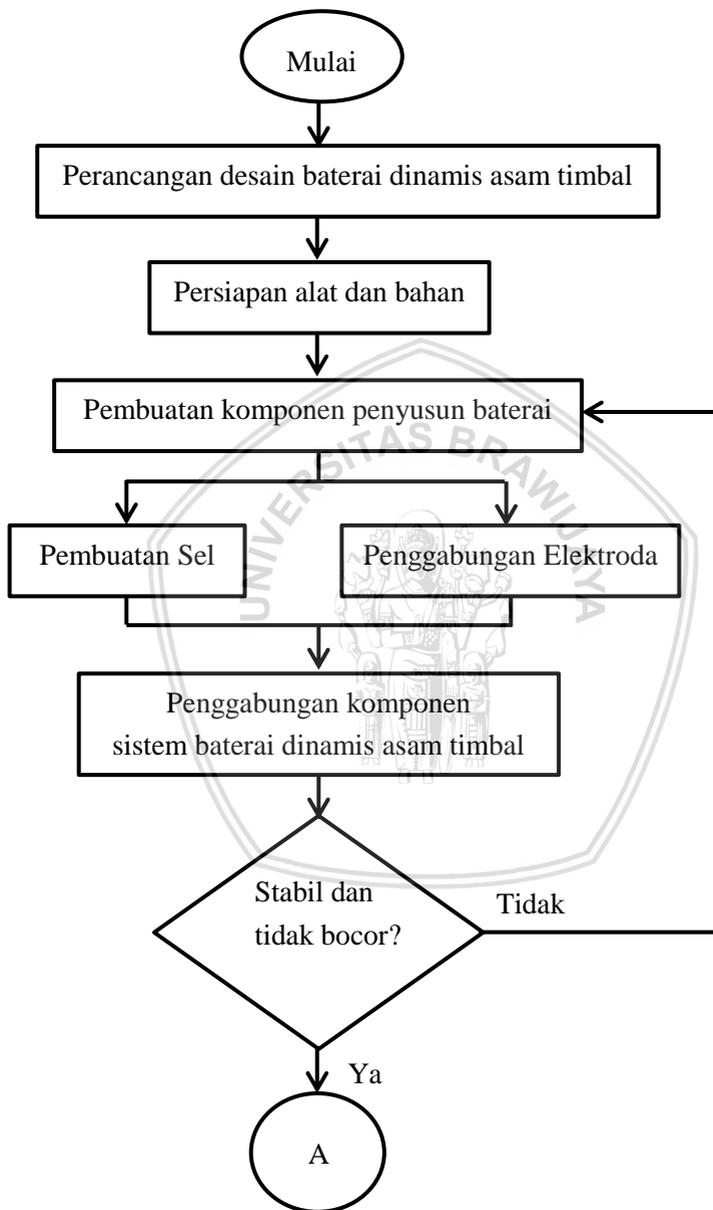
3.3.4 Tahap IV: Pengujian Karakteristik Baterai

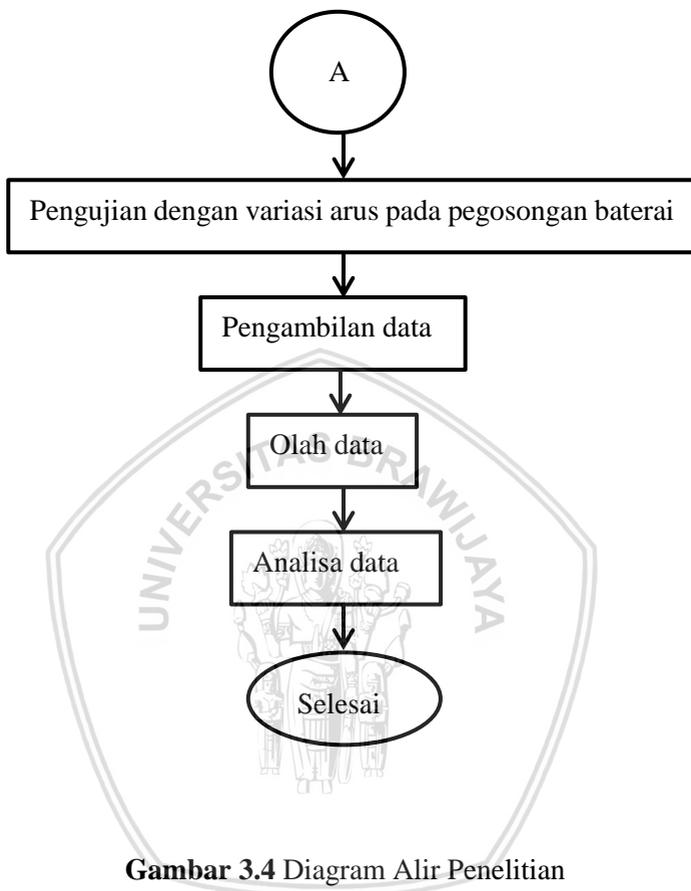
Perlakuan awal yaitu baterai dilakukan pengosongan terlebih dahulu hingga mencapai titik *cut-off*. Setelah itu, pengujian baterai asam timbal dilakukan dengan elektrolit yang mengalir dimana digunakan variasi arus pada pengosongan baterai. Proses pengisian baterai dilakukan dengan besar arus listrik yang sama yaitu sebesar 1,5 A dan waktu yang sama selama 4 Jam. Sedangkan Pengosongan baterai dinamis asam timbal dilakukan hingga titik *cut-off* dengan variasi arus yaitu 2 A; 1,5 A; 1,2 A; 1 A; 0,8 A; dan 0,5 A. Data dicatat

dengan digunakan perangkat lunak *ChargeMaster* versi 2.02. data tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik (tegangan, kapasitas, dan arus) terhadap waktu. Berdasarkan grafik yang dihasilkan diolah menjadi sebuah data digunakan program *WebPlotDigitizer*. Program tersebut akan membaca garis pada gambar grafik berdasarkan titik x dan y yang diatur melalui perangkat tersebut. Setiap data yang tercatat akan dikonversikan dengan aplikasi *Microsoft Office Excel* 2013.



3.4 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

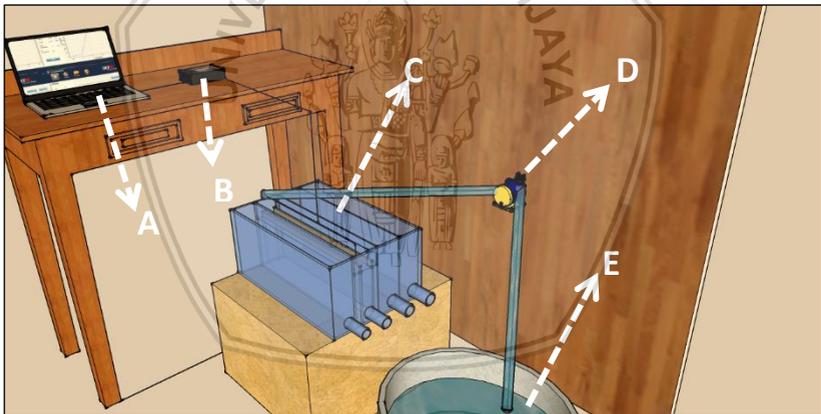


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Baterai Asam Timbal

Baterai asam timbal merupakan salah satu baterai elektrik yang dapat dilakukan pengisian muatan (*charge*) dengan menyambungkan pada sumber listrik serta pengosongan muatan (*discharge*) dengan pemberian suatu beban. Dilakukan perangkaian 3 pelat untuk masing-masing elektroda yaitu Pb dan PbO₂, dimana Pb sebagai tempat terjadinya reaksi oksidasi dan pada PbO₂ berlangsung reaksi reduksi. Penggunaan sel tunggal pada baterai asam timbal tersebut merepresentasikan nilai nominal baterai sebesar 2 Volt. Sistem eksperimen dengan elektrolit H₂SO₄ yang dialirkan diilustrasikan secara sederhana pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.1 Rangkaian Sederhana Sistem 1 Sel Baterai Dinamis Asam Timbal dengan 3 Pelat Elektroda.

Sebuah Laptop (A) sebagai operator induk berisikan perangkat lunak *ChargeMaster* versi 2.02 yang bertanggung jawab atas penginterpretasian data berupa grafik. Tampilan grafik dapat berupa tegangan, arus, dan kapasitas, dimana masing-masing ditampilkan terhadap waktu dalam detik (s). Data baterai asam timbal yang diuji (melakukan *charging-discharging* dengan keadaan yang

diinginkan) dengan sebuah alat yaitu *Turnigy Accucell-6 50W* (B) yang ditunjukkan pada **Gambar 4.2**. Sistem 1 sel baterai berisi elektroda ditunjukkan pada bagian (C), baterai dinamis dibutuhkan elektrolit yang mengalir, H_2SO_4 dialirkan dengan bantuan pompa peristaltik (D) dari chamber (E) menuju sel, dengan volume total elektrolit sebesar 450 ml dengan kadar 30 %.

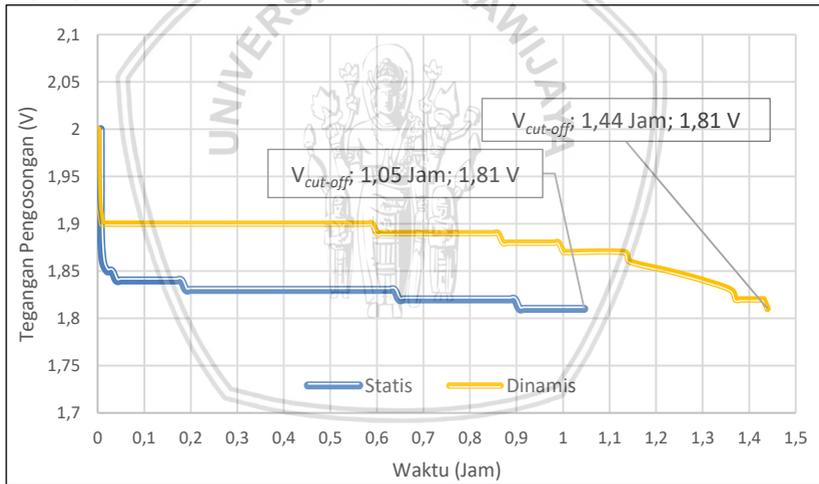


Gambar 4.2 (A) *Turnigy Accucell-6*; (B) Tampilan pada Layar Alat ketika Pengambilan Data *Discharge*.

“DSC” menunjukkan keadaan perlakuan pada baterai, bisa pengisian (*charge ‘CHG’*) maupun pengosongan (*discharge ‘DSC’*). Banyaknya sel dari baterai yang diuji ditampilkan dengan “P-1” berarti satu sel, “1.0A” merupakan besar arus yang dikenakan pada baterai, “011:43” menunjukkan waktu saat pengambilan data, “1,81 V” merupakan nilai tegangan pada baterai saat periode tertentu, sedangkan “00195” merupakan nilai kapasitas dari baterai.

4.1.1 Discharge Awal Baterai Statis-Dinamis Asam Timbal

Setiap jenis baterai termasuk baterai asam timbal statis dan dinamis ini memiliki sebuah nilai tegangan sebelum baterai tersebut dikenakan suatu perlakuan seperti pengisian maupun pengosongan. Tegangan tersebut dikatakan sebagai tegangan awal baterai (V_0), maka dari itu diperlukannya perlakuan *discharge* awal, selain untuk mengetahui berapa besar nilai tegangan awal baterai juga untuk mengetahui kapasitas dari baterai ketika dilakukan pengisian dalam keadaan tegangan terendah ($V_{cut-off}$). Pada baterai statis memiliki nilai V_0 sebesar 2 V, nilai yang serupa juga ditunjukkan pada baterai dinamis asam timbal dengannilai V_0 sebesar 2 V. Saat masing-masing baterai mulai dikosongkan, maka terjadi perbedaan grafik tegangan, dimana nilai tegangan baterai statis turun secara cepat dibanding dengan baterai dinamis yang cenderung untuk mempertahankan nilai tegangannya.



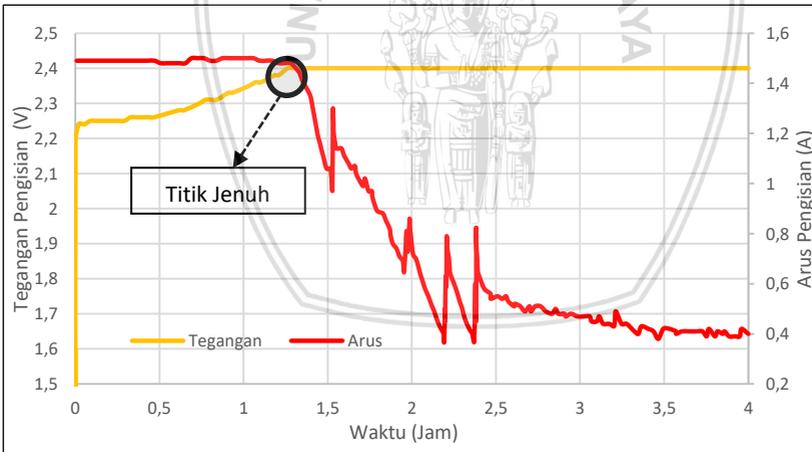
Gambar 4.3 Grafik Tegangan terhadap Waktu pada *Discharge* Awal Baterai Asam Timbal 3 Pelat Statis-Dinamis dengan Arus 1,5 A serta H_2SO_4 sebagai Elektrolit.

Setelah cairan elektrolit dimasukkan dan membuat elektroda tercelup, pada baterai statis asam timbal volume elektrolit dituangkan sebanyak 150 ml, sedangkan untuk baterai dinamis total elektrolit H_2SO_4 sebanyak 450 ml yang diletakkan pada *chamber* sebanyak 300 ml dan 150 ml pada sel. Pada proses pengosongan awal baterai

dinamis, dihasilkan grafik tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan baterai statis asam timbal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Baterai dinamis asam timbal juga menunjukkan bahwa dengan pemberian arus pengosongan yang sama, dalam mencapai $V_{cut-off}$ atau nilai tegangan sebesar 1,81 V, dibutuhkan waktu lebih lama dibandingkan dengan baterai statis asam timbal dengan selisih 0,39 Jam.

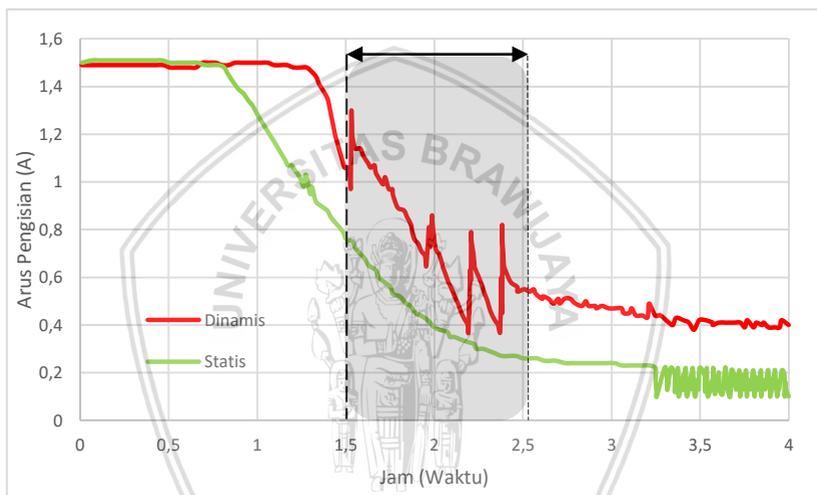
4.1.2 Karakteristik Pengisian Baterai Asam Timbal

Kebanyakan dari sistem energi terbarukan termasuk baterai asam timbal memiliki beberapa hal penting di dalamnya yang dapat menjadikan baterai tersebut memiliki ciri khas tersendiri. Selain masa pakai baterai, kedalaman dari pengosongan (*depth of discharge*) juga merupakan salah satu komponen penting dari baterai. Guna mengetahui bagaimana kedalaman dari pengosongan maka diperlukan pula pengisian baterai dimulai dari tegangan paling rendah ($V_{cut-off}$). Tegangan rendah yaitu 1,81 V didapatkan setelah dilakukan *discharge* awal.



Gambar 4.4 Grafik Pengisian dengan Arus 1,5 A pada Baterai Dinamis Asam Timbal 3 Pelat Elektroda serta Elektrolit H_2SO_4 30%.

Gambar 4.4 menunjukkan baterai dinamis asam timbal dinamis akan memperlihatkan bagaimana grafik pengisian antara tegangan terhadap waktu serta bagaimana grafik tegangan tersebut bisa terbentuk dengan arus konstan sebesar 1,5 A. Saat baterai mulai dilakukan pengisian, seiring dengan bertambahnya waktu, nilai tegangan juga berangsur naik, pemberian arus konstan dengan lama pengisian 4 Jam. Arus akan terus berjalan konstan hingga mencapai titik saturasi, keadaan dimana tegangan puncak bernilai 2,4 V. Kemudian tegangan akan konstan pada nilai 2,4 V, sedangkan arus akan terus mengalami penurunan hingga baterai terisi penuh (*full charged*) pada keadaan arus terendah.



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Arus (1,5 A) terhadap Waktu pada Pengisian Baterai Asam Timbal Statis-Dinamis.

Terdapat beberapa ketidakstabilan pada grafik arus baterai asam timbal dinamis yang dapat dilihat pada Gambar 4.5. Ketika arus mulai turun seiring dengan waktu pengisian baterai, seharusnya grafik arus turun secara konstan seperti pada grafik baterai asam timbal statis. Hal ini disebabkan karena baterai dinamis menggunakan elektrolit yang mengalir. Jika elektroda tercelup sempurna dengan volume elektrolit pada sel sebanyak 150 ml, maka grafik akan konstan. Sehingga ketika elektrolit H_2SO_4 di dalam sel semakin dangkal, transfer elektron di dalam reaksi juga semakin berkurang, yang

berakibat pada turunnya grafik arus. Maka dari itu perlu dijaga kekonstanan aliran elektrolit dan kerja dinamo untuk tetap stabil.

4.1.3 Karakteristik Pengosongan Baterai Asam Timbal

Pengosongan (*discharge*) baterai dilakukan secara langsung setelah proses pengisian (*charge*). Selain ntegangan dan waktu yang didapatkan, besarnya kapasitas pada baterai juga diketahui seperti yang telah disampaikan sebelumnya. Nilai kapasitas dari baterai dinamis asam timbal dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

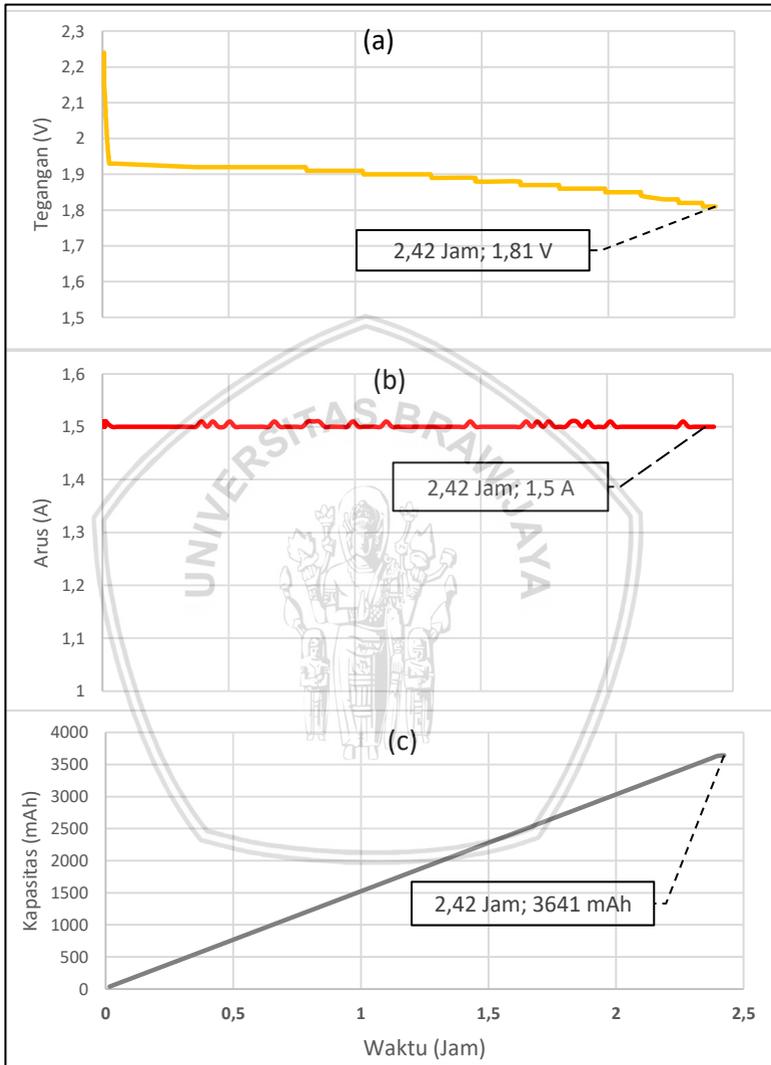
Tabel 4.1 Rincian Data Hasil Pengisian-Pengosongan Baterai Dinamis Asam Timbal

	Pengisian	Pengosongan
Waktu (Jam)	4	2,42
Kapasitas (mAh)	4979	3641
V_{middle}	2,3	1,86
Arus (A)	1,5	1,5

Pengosongan baterai dinamis asam timbal mampu menghasilkan kapasitas sebesar 3641 mAh dalam 2,42 Jam. Nilai kapasitas pengosongan lebih kecil dibandingkan dengan kapasitas pengisian, dimana perbandingan antara kapasitas pengosongan dan pengisian baterai dinamis asam timbal dengan arus 1,5 A diperoleh nilai efisiensi *Coulomb* sebesar 73 %.

Nilai kapasitas pengosongan yang lebih kecil menandakan baterai memiliki *self-discharge*. Pengosongan diri (*self-discharge*) bukan cacat dari baterai melainkan karakteristik dari baterai itu sendiri. Keadaan tersebut bersifat permanen dan tidak dapat dihindarkan. *Self-discharge* terjadi ketika baterai yang telah diisi elektrolit, jika ditinggalkan (tidak digunakan) maka akan kehilangan muatan listriknya. Hal ini disebabkan saat baterai diisi dengan elektrolit, maka baterai akan mulai mengalami suatu reaksi kimia, meskipun baterai tersebut digunakan atau tidak. Kehilangan muatan listrik yang tersimpan tanpa pemakaian melalui rangkaian luar itu

disebut dengan *self-discharge* yang tidak dapat dihindarkan pada semua baterai.



Gambar 4.6 Grafik (a) Tegangan, (b) Arus, dan (c) Kapasitas pada Pengosongan Baterai Dinamis Asam Timbal dengan Elektrolit H_2SO_4 30%.

Proses pengosongan baterai dinamis asam timbal dengan arus sebesar 1,5 A dibutuhkan waktu selama 2,42 Jam hingga baterai mencapai titik *cut-off*. Grafik arus cenderung stabil pada besar arus pengosongannya yaitu 1,5 A. Grafik kapasitas naik secara konstan seiring dengan waktu pengosongan baterai, sedangkan grafik tegangan turun secara perlahan hingga mencapai $V_{cut-off}$ sebesar 1,81 V. Nilai tegangan saat pengisian baterai selama 4 jam sebesar 2,41 V dengan besar kapasitas 4979 mAh, sedangkan saat pengosongan V_0 bernilai 2,24 V dan kapasitas pengosongan sebesar 3641 mAh.

4.2 Pengaruh Beda Arus Listrik pada Baterai Statis Asam Timbal

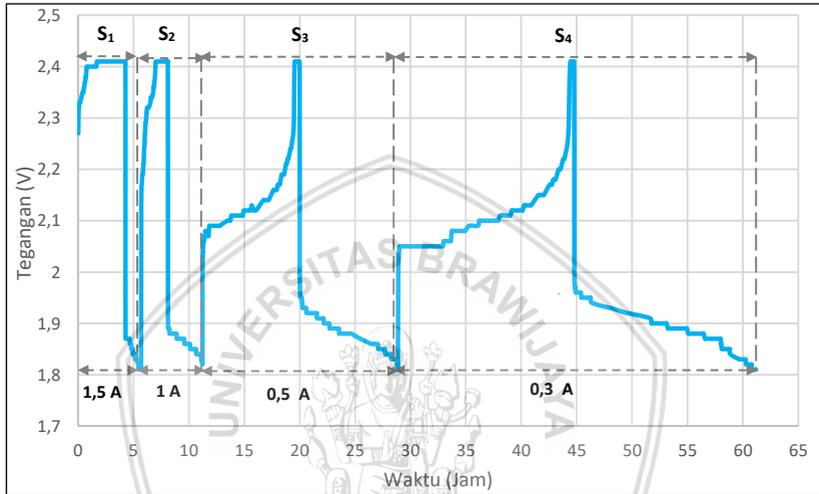
Baterai asam timbal dengan elektrolit diam (statis) diberi perlakuan arus yang berbeda-beda pada proses pengisian (*charge*) dan pengosongan (*discharge*). Penelitian ini digunakan beberapa variasi arus listrik antara lain 1,5 A; 1 A; 0,5 A; dan 0,3 A. Arus *charge* maupun *discharge* diatur melalui perangkat lunak *ChargeMaster* versi 2.02 yang terkoneksi dengan *Turnigy Accucell-6 50W* ditunjukkan pada **Gambar 4.7**.



Gambar 4.7 Tampilan *Charge Setup* (a) serta Pengaturan Nilai Arus Listrik (b) pada *Software ChargeMaster* versi 2.02

ChargeMaster versi 2.02 memberikan cukup banyak variasi arus listrik. Baterai dengan jenis asam timbal dapat dilakukan

pengisian dari arus listrik 0,1 A hingga 10 A dengan nilai pautan terkecil sebesar 0,1 A, sedangkan besar arus listrik untuk pengosongan dari 0,1 A hingga 2 A dengan nilai pautan antar arus listrik sama dengan pengisian. Pengisian (*charging*) dilakukan hingga baterai mencapai tegangan maksimum, sebaliknya pada proses pengosongan dilakukan hingga baterai mencapai titik *cut-off*.



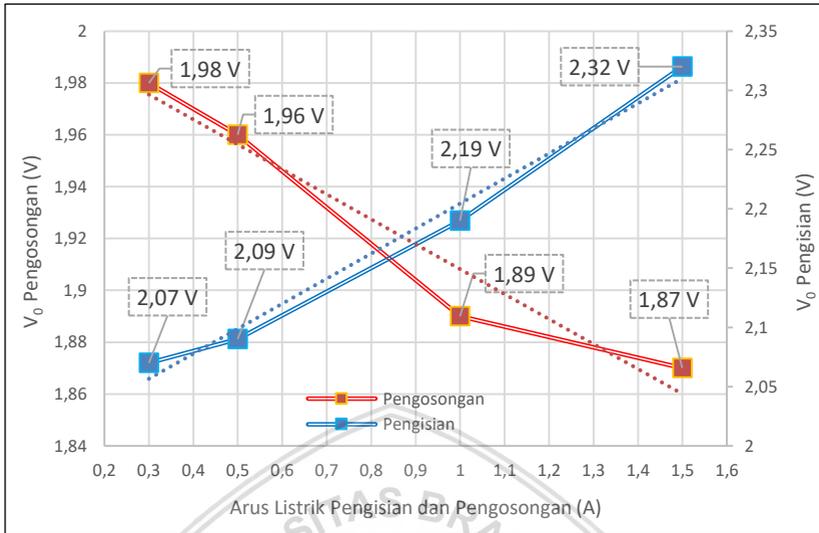
Gambar 4.8 Grafik Tegangan terhadap Waktu pada Proses Pengisian dan Pengosongan Baterai Statis Asam Timbal dengan Pemberian Beda Arus Listrik (1,5 A; 1A; 0,5A; 0,3A).

Baterai statis asam timbal diberi 4 perlakuan arus yang berbeda untuk setiap siklusnya, siklus baterai diungkapkan dengan simbol “S” dan diikuti dengan angka yang menyatakan urutan siklus antara lain S_1 = Siklus 1, S_2 = Siklus 2, S_3 = Siklus 3, dan S_4 = Siklus 4 (Gambar 4.8). Grafik diatas membuktikan bahwa baterai asam timbal dalam penelitian ini tergolong dalam baterai sekunder atau baterai yang dapat diisi ulang, dengan ditunjukkannya baterai yang dapat diisi maupun dikosongkan beberapa kali. Selain itu, grafik tersebut juga memperlihatkan karakter yang berbeda pada setiap arus listrik yang dikenakan pada baterai. Ketika baterai dilakukan pengisian dengan arus listrik yang lebih besar, baterai lebih cepat dalam mencapai tegangan 2,4 V. Data hasil untuk setiap siklus dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.2 Data Hasil *Charge-Discharge* Baterai Statis Asam Timbal dengan Beberapa Perlakuan Arus.

Siklus	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
$I_{charge-discharge}$ (A)	1,5	1	0,5	0,3
t_{max} (Jam)	0,78	1,29	8,32	15,55
$t_{discharge}$ (Jam)	1,41	3,12	8,86	16,40
V_0 charge	2,32	2,19	2,09	2,07
V_0 discharge	1,87	1,89	1,96	1,98

S₁ dikenakan arus sebesar 1,5 A pada pengisiannya, mampu mencapai tegangan 2,4 V dalam waktu 0,78 Jam. Siklus dua (S₂) membutuhkan waktu lebih panjang dibandingkan dengan siklus 1 (S₁) dalam proses pengisian dan pengosongannya. Untuk mencapai tegangan maksimum dengan arus listrik 1 A, baterai statis asam timbal membutuhkan waktu selama 1,29 Jam, sedangkan pada pengosongan baterai membutuhkan waktu selama 3,12 Jam. Siklus 3 (S₃) dikenakan arus listrik sebesar 0,5 A, dalam mencapai titik *cut-off* memiliki selisih sebesar 7,45 Jam dengan (S₁). Selanjutnya pada siklus terakhir atau siklus ke-4 (S₄) dengan arus 0,3 A dibutuhkan waktu lebih panjang dari siklus-siklus sebelumnya, dimana pada pengosongannya memiliki selisih sebesar 14,99 Jam dengan siklus pertama (S₁). Hal tersebut menyatakan bahwa semakin besar arus listrik yang diberikan ketika dilakukan pengisian pada baterai statis asam timbal, akan membuat baterai lebih cepat dalam mencapai tegangan maksimum. Sedangkan pada keadaan pengosongan, semakin rendah arus listrik yang dibebankan, maka waktu yang dibutuhkan baterai statis asam timbal untuk mencapai titik *cut-off* akan semakin lama.



Gambar 4.9 Grafik Tegangan Awal terhadap Arus pada Pengisian dan Pengosongan Baterai Statis Asam Timbal dengan Pengaruh Perbedaan Arus Listrik.

Informasi lain yang bisa didapatkan berdasarkan Tabel 4.2 adalah nilai tegangan awal pengisian dan pengosongan baterai (V_0 charging-discharging). Pemberian beda arus listrik pada pengisian ternyata berdampak pada tegangan awal saat baterai statis asam timbal mulai diisi (*charge*). Pada arus 0,3 A memiliki nilai V_0 sebesar 2,07 V, dengan pemberian arus 5 kali lebih tinggi menghasilkan nilai V_0 sebesar 2,32 V atau mengalami peningkatan sebanyak 0,12 %. Keadaan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi arus listrik yang dikenakan maka baterai tersebut memiliki tegangan awal pengisian semakin tinggi pula. Sebaliknya, jika arus listrik yang dikenakan pada keadaan pengosongan baterai statis asam timbal semakin tinggi akan berdampak pada V_0 discharging yang semakin rendah. Arus 0,3 A menghasilkan tegangan awal pengosongan sebesar 1,98 V, dengan pemberian arus listrik 5 kali lebih besar dihasilkan nilai V_0 discharging sebesar 1,87 V atau mengalami penurunan sebanyak 5,56 %. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.9 dengan garis warna biru untuk V_0 charging yang semakin naik jika diberikan arus listrik yang semakin tinggi pula dan untuk V_0 discharging ditunjukkan dengan garis warna merah yang semakin turun seiring dengan naiknya arus listrik.

Berdasarkan grafik yang terbentuk, dapat dibuat sebuah persamaan garis antara tegangan awal pengisian dan tegangan awal pengosongan dengan arus listrik yang dikenakan pada baterai statis asam timbal. $V_{0 \text{ charging}}$ yang semakin naik ketika arus listrik juga naik memiliki sebuah persamaan:

$$y_1 = 0,2112x + 1,9932; R^2 = 0,9856 \dots\dots (4.1)$$

dimana, y_1 adalah $V_{0 \text{ charging}}$ dan x adalah arus listrik. Persamaan tersebut menerangkan bahwa ketika arus listrik yang dikenakan pada baterai statis asam timbal semakin besar, maka nilai dari tegangan pengisian juga semakin besar. Sebaliknya, pada keadaan pengosongan baterai statis asam timbal, semakin besar arus listrik yang dibebankan pada baterai maka akan menghasilkan nilai tegangan pengosongan yang semakin kecil. Seperti yang ditunjukkan pada persamaan di bawah ini:

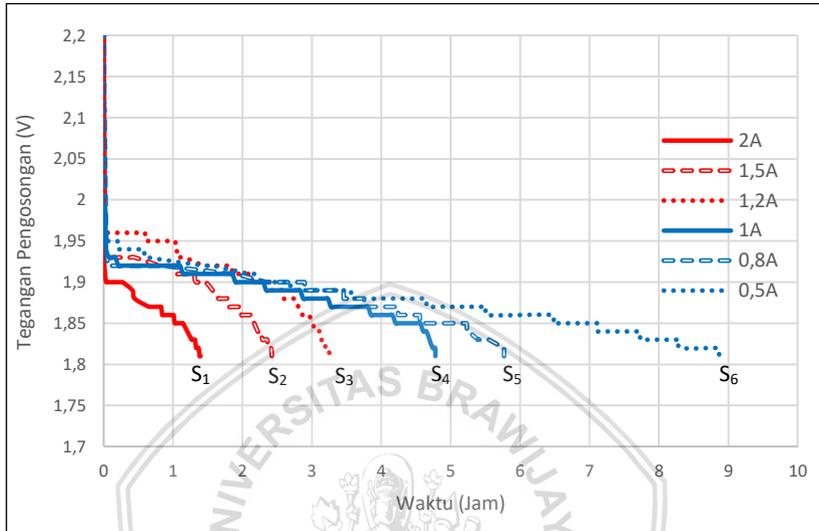
$$y_2 = -0,0963x + 2,0044; R^2 = 0,9456 \dots\dots\dots (4.2)$$

dimana, y_2 adalah $V_{0 \text{ discharging}}$ dan x merupakan arus listrik.

4.3 Pengaruh Beda Arus Listrik pada Baterai Dinamis Asam Timbal

Baterai dinamis asam timbal diberi perlakuan berbeda dengan baterai statis asam timbal, peran dari beda arus lebih ditonjolkan dengan melakukan pengisian baterai (*charge*) dengan nilai arus sama sebesar 1,5 A dan dalam lama waktu pengisian yang sama yaitu 4 Jam. Sehingga, nilai beda arus pada sisi pengosongan akan lebih terlihat. Setelah itu, baterai dikosongkan (*discharge*) dengan digunakan beberapa variasi arus (2 A; 1,5 A; 1,2 A; 1 A; 0,8 A; 0,5 A). Berdasarkan eksperimen tersebut, arus listrik yang diberikan pada pengosongan baterai berdampak pada lama baterai dikatakan kosong atau mencapai $V_{\text{cut-off}}$. Pemberian arus listrik sebesar 2 A lebih cepat habis dibandingkan dengan arus 1,5 A dan pemberian arus 1,5 A lebih cepat mencapai $V_{\text{cut-off}}$ dari pada arus 1 A. Sehingga, muncul sebuah tendensi bahwa semakin besar arus pengosongan yang diberikan pada baterai dinamis asam timbal akan memicu baterai untuk lebih cepat habis atau mencapai $V_{\text{cut-off}}$. Pengaruh beda arus listrik pengosongan

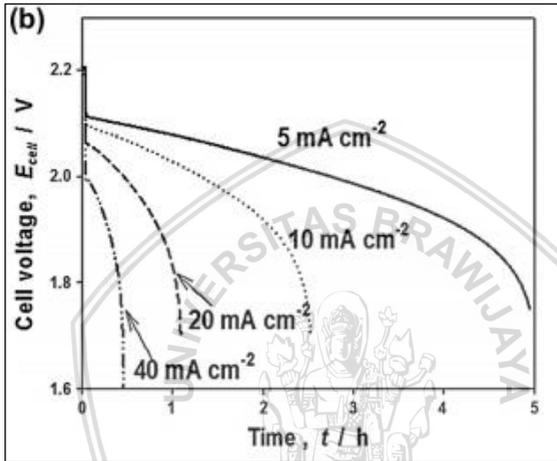
pada baterai dinamis asam timbal diilustrasikan dengan grafik pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik Tegangan terhadap Waktu pada Pengosongan Baterai Dinamis Asam Timbal dengan Variasi Arus Listrik (2 A; 1,5 A; 1,2 A; 1 A; 0,8 A; 0,5 A).

Perbedaan waktu baterai dinamis asam timbal dalam mencapai tegangan terendah dapat terlihat dengan jelas pada gambar diatas, ketika baterai dinamis asam timbal dikenakan arus listrik sebesar 2 A mampu mencapai $V_{cut-off}$ selama 1,39 Jam, selisih 1,03 Jam terhadap arus 1,5 A dan 1,93 Jam terhadap arus 1,2 A. Pemberian arus yang semakin rendah dengan arus sebesar 1 A, baterai dinamis asam timbal mampu mencapai $V_{cut-off}$ selama 4,78 Jam, selisih 0,99 Jam dengan arus 0,8 A dan 4,09 Jam dengan arus sebesar 0,5 A. Data tersebut semakin menguatkan bahwa, meskipun baterai diisi dengan arus dan waktu pengisian yang sama, pengaruh besar kecilnya arus yang dibebankan pada pengosongan baterai dinamis asam timbal berakibat pada lama baterai untuk mencapai $V_{cut-off}$.

Hasil eksperimen tersebut sesuai dengan apa yang telah dilakukan oleh C.P. Zhang dkk.(2013) mengenai pengaruh baterai asam timbal ketika dikenakan arus yang berbeda-beda pada keadaan pengosongannya, dimana C.P. Zhang dkk menyatakan bahwa semakin kecil arus yang dibebankan pada baterai, maka waktu yang ditempuh baterai untuk mencapai $V_{cut-off}$ lebih panjang. Hal tersebut ditampilkan dengan grafik pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.11 Grafik Tegangan terhadap Waktu pada Pengosongan Baterai Asam Timbal dengan Beberapa Variasi Arus Listrik (Zhang dkk, 2011)

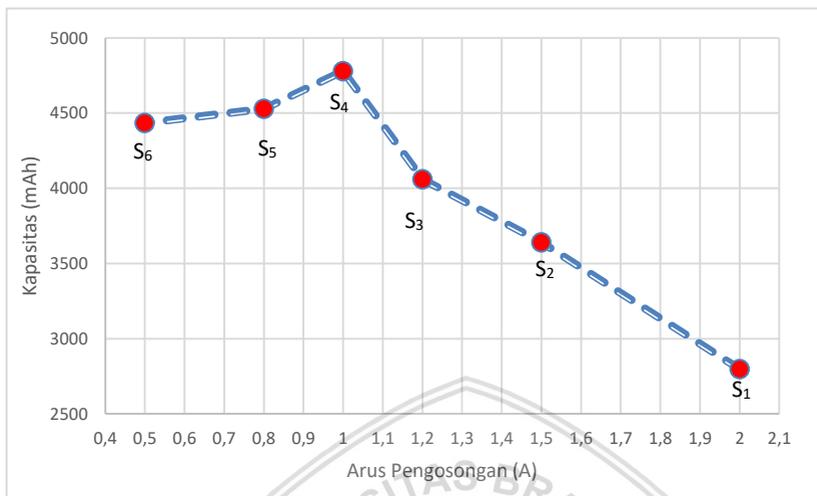
Perbedaan pada nilai tegangan yang dipengaruhi oleh beda arus disebabkan karena arus didefinisikan sebagai banyaknya muatan listrik (Q) yang mengalir melalui sebuah media (konduktor) dalam tiap satuan waktu (t), hal tersebut ditunjukkan pada persamaan 2.1. Pada penelitian ini media konduktor yang digunakan adalah elektrolit H_2SO_4 . Di sisi lain, Hukum Ohm menyatakan bahwa arus listrik (I) yang mengalir melalui konduktor berbanding lurus dengan nilai tegangan (V). Sehingga ketika baterai dengan luasan elektroda yang sama (3 pelat) diberikan arus yang berbeda-beda akan menghasilkan nilai perbedaan nilai tegangan pada waktu yang sama. Semakin besar arus yang diberikan pada pengosongan baterai, maka elektroda akan semakin banyak mengeluarkan muatan tiap detik, sehingga baterai

akan lebih cepat untuk habis yang ditandai dengan penurunan nilai tegangan yang cepat pula.

Tabel 4.3 Data Hasil Pengosongan Baterai Dinamis Asam Timbal dengan Beberapa Variasi Arus

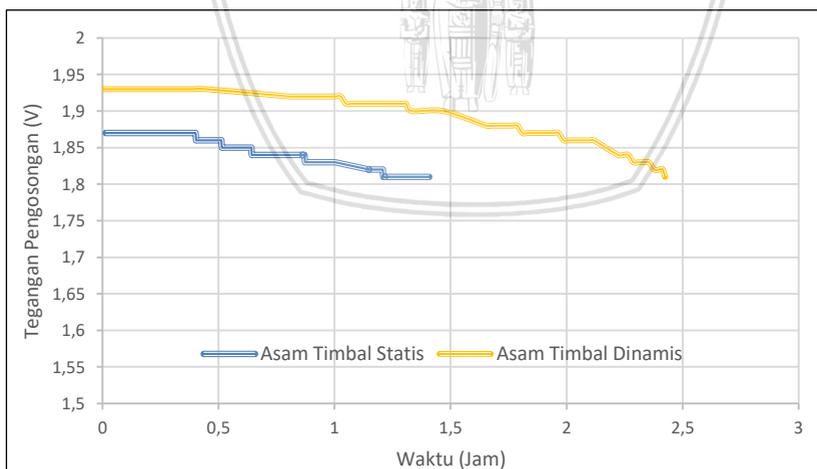
Siklus	1	2	3	4	5	6
$I_{Discharge}$ (A)	2	1,5	1,2	1	0,8	0,5
$C_{discharge}$ (mAh)	2798	3641	4061	4780	4529	4435
t_{charge} (Jam)	4	4	4	4	4	4
$t_{discharge}$ (Jam)	1,39	2,42	3,32	4,78	5,77	8,87

Sejalan dengan data tegangan pada arus konstan, baterai dinamis asam timbal juga menghasilkan nilai kapasitas baterai untuk tiap-tiap nilai arus listrik, pada siklus 1 (S_1) dengan arus pengosongan sebesar 2 A mampu menghasilkan kapasitas sebesar 2798 mAh. Kapasitas baterai pada siklus 2 dengan arus 1,5 A meningkat sebesar 30,13 %. Kapasitas lantas meningkat sebanyak 70,84 % pada siklus ke-4, dimana siklus ini dibebani arus listrik sebesar 1 A mampu menghasilkan kapasitas tertinggi sebesar 4780 mAh. Kemudian terjadi penurunan nilai kapasitas secara berturut-turut dari siklus ke-4 menuju siklus ke-5 sebanyak 5,25 % serta dari siklus ke-5 menuju siklus ke-6 sebanyak 2,07 %, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12. Nilai kapasitas baterai dinamis asam timbal dengan 3 pelat elektroda cenderung untuk meningkat seiring dengan semakin kecilnya nilai arus listrik yang dikenakan pada baterai dinamis asam timbal, terlihat kenaikan grafik dari siklus pertama (S_1) hingga puncaknya pada siklus ke-4 (S_4). Kemudian terjadi sebuah penurunan nilai kapasitas pada siklus ke-5 dan ke-6, hal ini menandakan bahwa ketika mencapai siklus ke-5 kinerja dari baterai dinamis asam timbal sudah mulai berkurang. Akan tetapi, nilai kapasitas pada siklus ke-5 dan siklus ke-6 masih lebih baik dari kapasitas baterai pada siklus ke-1 yang ditandai dengan nilai kapasitasnya yang lebih besar.



Gambar 4.12 Perbandingan Nilai Kapasitas Pengosongan Baterai Dinamis Asam Timbal dengan Berbagai Variasi Arus Listrik.

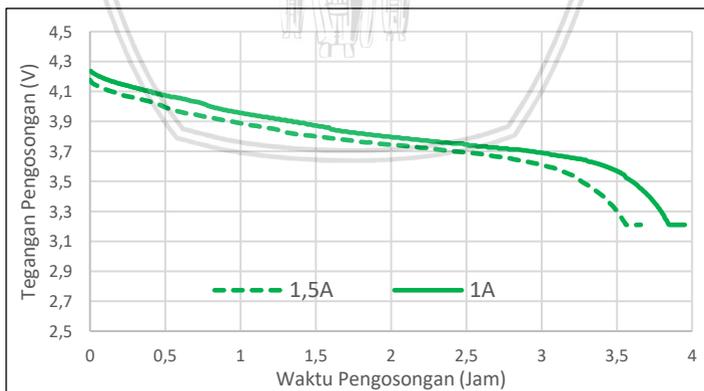
4.4 Perbandingan Baterai Asam Timbal Statis-Dinamis dan *Lithium-Polymer (Li-Po)*



Gambar 4.13 Perbandingan Grafik Tegangan terhadap Waktu pada Pengosongan Baterai Statis dan Dinamis Asam Timbal.

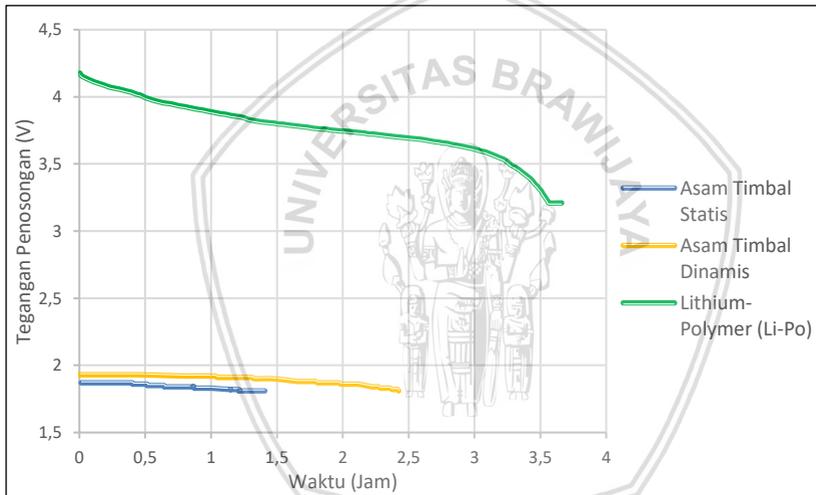
Baterai asam timbal pada penelitian ini terdapat dua perbedaan perlakuan, yaitu baterai asam timbal dengan elektrolit H_2SO_4 diam (statis) dan baterai asam timbal dengan elektrolit H_2SO_4 yang dialirkan (dinamis). Jika keduanya dibandingkan maka akan terlihat beberapa perbedaan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.13. Baterai asam timbal dengan elektrolit yang dialirkan mampu menghasilkan nilai yang lebih baik dibandingkan dengan baterai asam timbal dengan elektrolit diam. Pengosongan dilakukan dengan pemberian besar arus listrik yang sama yaitu 1,5 A, dimana pada baterai dinamis asam timbal mampu mencapai titik *cut-off* 1 Jam lebih panjang dari baterai statis asam timbal. Keadaan tersebut disebabkan baterai dinamis asam timbal memiliki lebih banyak jumlah elektrolit dibanding baterai statis asam timbal, sehingga dengan banyaknya elektrolit H_2SO_4 maka reaksi yang terjadi pada permukaan elektroda juga lebih banyak. Semakin banyak reaksi yang terjadi, mengakibatkan baterai mampu mempertahankan nilai tegangannya lebih lama.

Untuk mengetahui lebih lanjut bagaimana karakter dari baterai asam timbal, maka dilakukan perbandingan dengan jenis baterai yang berbeda. Selain baterai asam timbal yang sedang marak dikembangkan, terdapat pula baterai yang menjadi unggulan yaitu baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)*. Baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)* yang digunakan pada penelitian ini terdapat 1 sel dimana setiap selnya memiliki tegangan nominal sebesar 3,2 V.



Gambar 4.14 Grafik Tegangan terhadap Waktu dengan Variasi Perbedaan Arus Listrik pada Pengosongan Baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)*.

Baterai *Li-Po* juga dikosongkan dengan perbedaan arus listrik yaitu 1,5 A dan 1 A. Grafik pengosongan pada baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)* cenderung memiliki kemiripan dengan baterai asam timbal. Baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)* ternyata juga memiliki karakter yang mirip pada beberapa keadaan, dimana pada grafik pengosongan di atas dihasilkan nilai tegangan yang menurun selama periode waktunya. Pada pengosongan 1,5 A baterai mencapai titik *cut-off* selama 3,66 Jam, lebih pendek 0,29 Jam dengan pengosongan arus listrik sebesar 1 A. Arus listrik yang diberikan semakin besar maka akan menyebabkan muatan yang tersimpan di dalam baterai juga semakin cepat untuk dikeluarkan, sehingga tegangan baterai akan lebih cepat mengalami penurunan.



Gambar 4.15 Perbandingan Grafik Tegangan Pengosongan terhadap Waktu Baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)*, Baterai Statis Asam Timbal, dan Baterai Dinamis Asam Timbal.

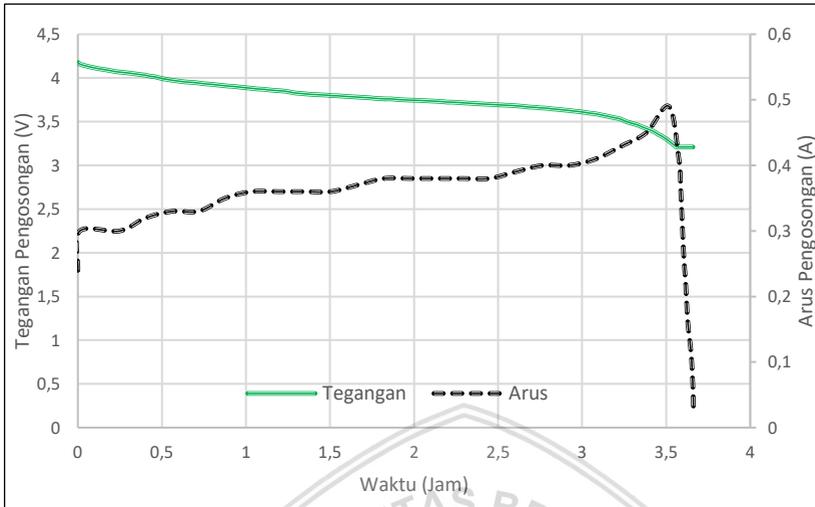
Berkenaan dengan Gambar 4.15 terdapat perlakuan yang sama untuk ketiga jenis baterai, dimana baterai sama-sama diisi dengan arus 1,5 A, kemudian masing-masing baterai dikosongkan hingga baterai mencapai titik *cut-off*. Ketiga jenis baterai menghasilkan nilai tegangan terhadap waktu pada keadaan pengosongan, dimana dengan pemberian arus yang sama pada pengosongannya dihasilkan nilai waktu yang berbeda-beda dalam

mencapai $V_{cut-off}$, dimana paling cepat habis yaitu baterai statis asam timbal, selisih 1 Jam dengan baterai dinamis asam timbal dan terpaut 2,25 Jam dari baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)*. Akan tetapi baterai dinamis asam timbal mampu menghasilkan kapasitas lebih besar dibandingkan baterai statis asam timbal dan *Lithium-Polymer (Li-Po)*.

Tabel 4.4 Data Hasil *Charging-Discharging* Baterai Asam Timbal Statis-Dinamis dan Baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)*.

Jenis Baterai	Asam Timbal Statis	Asam Timbal Dinamis	<i>Lithium-Polymer (Li-Po)</i>
$I_{charge-discharge}$ (A)	1,5	1,5	1,5
$C_{discharging}$ (mAh)	2111	3641	1611
$t_{Discharging}$ (Jam)	1,41	2,42	3,66

Berdasarkan data yang tercatat, meskipun baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)* memiliki tegangan nominal lebih besar dibanding dengan baterai asam timbal (Pb), nilai kapasitas baterai asam timbal jauh lebih besar dibanding baterai *Li-Po*. Pemberian arus sebesar 1,5 A pada pengosongan ternyata terlampau besar bagi baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)*, hal tersebut dibuktikan pada saat perekaman data, grafik arus listrik yang ditampilkan tidak lebih dari nilai 0,5 A, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16. Nilai arus listrik pengeluaran yang kecil menandakan baterai *Li-Po* memiliki kekurangan dibanding dengan baterai asam timbal. Grafik tegangan baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)* yang terbentuk memiliki karakteristik berbeda dengan baterai asam timbal statis maupun dinamis, dimana nilai tegangan pada baterai *Li-Po* cenderung untuk turun secara konstan setiap detiknya. Hal ini ditengarai oleh grafik arus pengosongan terhadap waktu yang cenderung meningkat secara perlahan hingga mencapai nilai 0,5 A.



Gambar 4.16 Grafik Pengosongan Baterai *Lithium-Polymer* dengan Arus Listrik Sebesar 1,5 A.

Gambar diatas memperlihatkan bahwa ketika baterai *Li-Po* dikosongkan arus cenderung untuk naik secara konstan, bertambahnya nilai arus membuat muatan yang tersimpan di dalam baterai lebih cepat untuk berkurang, sehingga berakibat pada nilai tegangan ikut berkurang. Ketika mencapai maksimum pada baterai, arus akan langsung turun mendekati 0 A, yang menandakan bahwa baterai telah habis. Berbeda halnya dengan baterai asam timbal yang telah dipaparkan pada subbab sebelumnya, bahwa saat proses pelepasan muatan baterai, grafik arus pengosongan pada baterai cenderung konstan pada nilai arus yang diberikan, niali tersebut konstan hingga baterai mencapai titik *cut-off*.

4.5 Efisiensi Energi

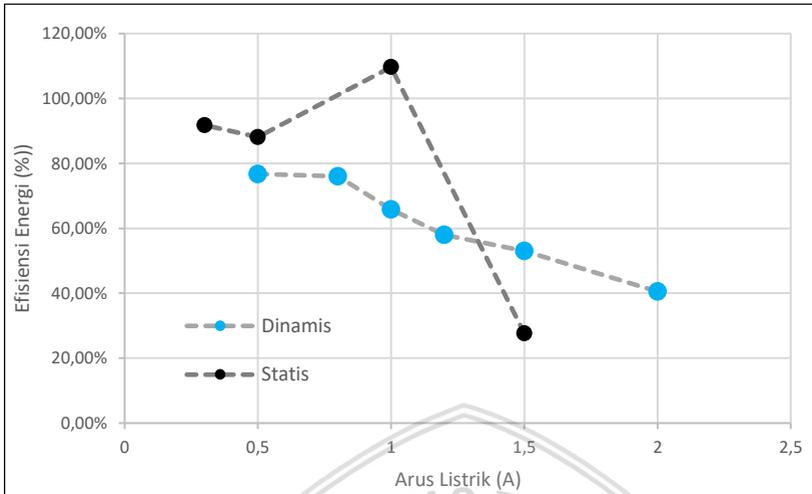
Setiap baterai pasti memiliki nilai jual, dimana nilai jual baterai tergantung dari tingginya efisiensi dari baterai tersebut. Semakin tinggi efisiensi baterai, baterai tersebut dianggap semakin baik. Faktor efisiensi biasanya diukur dengan *coulombic efficiency*. Efisiensi coulumb juga dikenal dengan efisiensi arus yang dirumuskan pada persamaan 2.3. Sedangkan untuk mengukur total efisiensi energi pada baterai (Persamaan 2.4), maka diperlukan nilai V_{middle} baik

pengosongan maupun pengisian yang ditunjukkan pada Persamaan 2.5. Berikut nilai efisiensi energi dari berbagai variasi arus pada baterai asam timbal statis dan dinamis yang ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 4.5 Nilai Efisiensi Energi Setiap Nilai Arus pada Baterai Asam Timbal Statis-Dinamis serta Baterai *Lithium-Polymer*.

Jenis Baterai	Arus (A)		Energy Efficiency
	Charge	Discharge	
Asam Timbal Statis	1,5	1,5	27,66 %
	1	1	109,97 %
	0,5	0,5	88,09 %
	0,3	0,3	91,77 %
	1,5	2	40,52 %
Asam Timbal Dinamis	1,5	1,5	53,00 %
	1,5	1,2	57,97 %
	1,5	1	65,81 %
	1,5	0,8	75,98%
	1,5	0,5	76,76 %
	<i>Lithium-Polymer (Li-Po)</i>	1,5	1,5

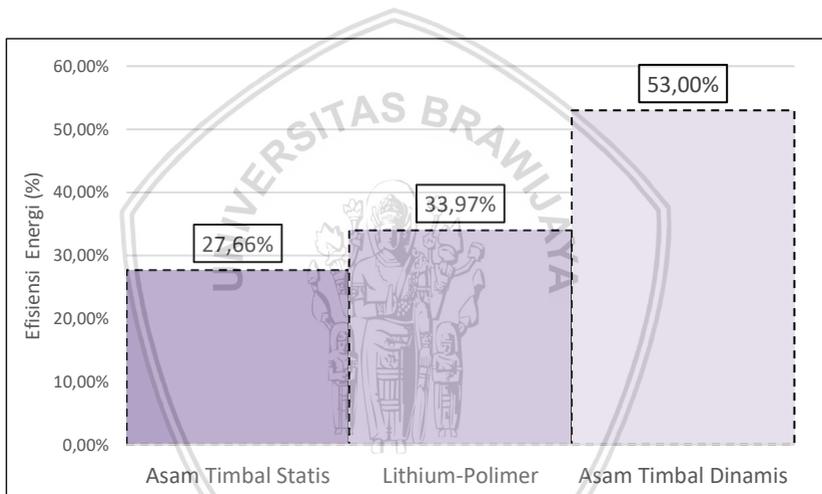
Berdasarkan data yang diperoleh, pada baterai statis asam timbal dengan pemberian arus listrik 0,3 A dihasilkan nilai efisiensi sebesar 91,77%. Turun sebanyak 3,68 % pada pemberian arus listrik 0,8 A. Efisiensi tertinggi pada baterai statis asam timbal didapatkan pada arus listrik 1 A dengan nilai mencapai 109,97 %. Pada baterai dinamis asam timbal didapatkan efisiensi terkecil pada arus terbesar yaitu sebanyak 40,52 %. Sedangkan, efisiensi terbesar ketika arus listrik yang dikenakan 1/4 lebih kecil dari arus terbesar yaitu 2 A, dimana dihasilkan sebanyak 76,76 %.



Gambar 4.17 Grafik Nilai Efisiensi Energi Setiap Perbedaan Arus Listrik pada Baterai Statis dan Dinamis Asam Timbal.

Gambar diatas menunjukkan bahwa nilai efisiensi untuk setiap arus listrik pada baterai asam timbal cenderung naik ketika pemberian arus listrik semakin kecil. Akan tetapi terdapat sebuah anomali pada baterai statis asam timbal dengan pemberian arus 1 A, besarnya nilai efisiensi tersebut dikarenakan waktu pengisian baterai pada arus 1 A sangat pendek, bahkan lebih pendek dari arus 1,5 A. Hal tersebut terjadi karena pemberian arus 1,5 A yang cukup besar membuat muatan yang dihabiskan juga tidak akan terlalu banyak, maka dari itu akan dihasilkan sisa muatan yang banyajak pula. Pada siklus selanjutnya, dengan arus 1 A, kondisi baterai masih terdapat banyak muatan, sehingga pengisian baterai tidak membutuhkan waktu lama untuk mencapai V_{max} . Perbandingan waktu (Jam) yang cukup signifikan antara pengisian dan pengosongan baterai menyebabkan nilai efisiensi baterai statis asam timbal yang tinggi pula.

Untuk melihat efisiensi energi yang paling unggul dari ketiga jenis baterai, maka dilakukan perbandingan pada arus listrik sama yaitu sebesar 1,5 A. Pada arus 1,5 A dilakukan perlakuan yang sama, pada proses pengisiannya, perbedaannya pada nilai arus listrik pengosongannya. Berdasarkan data yang didapatkan, nilai efisiensi baterai dinamis asam timbal mampu menghasilkan efisiensi paling tinggi dibanding baterai statis asam timbal maupun baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)* dengan nilai efisiensi mencapai 53 %, sedangkan baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)* mampu mengungguli baterai statis asam timbal. Perbandingan ketiga nilai tersebut diilustrasikan pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.18 Perbandingan Efisiensi Energi antara Baterai Asam Timbal Statis-Dinamis dan Baterai *Lithium-Polymer (Li-Po)*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah melihat hasil analisis dan perbandingan dari baterai dinamis asam timbal yang digunakan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Telah berhasil diciptakan baterai dinamis berbasis asam timbal yang dapat dilakukan pengisian dan pengosongan (*rechargeable*) dengan tegangan kerja baterai berkisar antara 1,82 V hingga 2,21 V bergantung pada arus listrik yang dikenakan pada baterai, dimana pemberian variasi arus listrik pada keadaan pengosongan berdampak pada nilai tegangan dan kapasitas baterai dinamis asam timbal, semakin kecil arus listrik yang diberikan pada baterai menghasilkan waktu *discharging* yang semakin panjang. Keadaan tersebut juga terjadi pada nilai kapasitas yang semakin tinggi pula, terjadi penurunan pada arus 0,8 A hingga 0,5 A, dikarenakan performa dari baterai yang mulai menurun.
2. Penurunan nilai arus listrik yang dibebankan pada baterai membuat nilai efisiensi energi baterai semakin naik, dimana efisiensi optimum diperoleh pada arus listrik sebesar 0,5 A dengan nilai mencapai 76,76 %.
3. Perlakuan sama pada pengisian ketiga jenis baterai yaitu baterai asam timbal statis dan dinamis dan *Lithium-Polymer (Li-Po)*, dimana didapatkan grafik tegangan pengosongan yang menunjukkan bahwa baterai statis maupun dinamis asam timbal memiliki grafik tegangan konstan dikarenakan arus *discharging* konstan, sedangkan pada baterai *Li-Po* grafik tegangan cenderung untuk lebih cepat turun dikarenakan nilai arus listrik yang naik ketika kondisi pengosongan. baterai dinamis asam timbal memiliki nilai efisiensi paling besar dengan nilai mencapai 53 %. Unggul 19,03 % dari baterai *Li-Po* dan 25,34 % dari baterai statis asam timbal.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan uji siklibilitas yang lebih banyak dengan perlakuan arus listrik yang sama baik pada pengisian maupun pengosongan, sehingga dapat diketahui pengaruh arus terhadap masa hidup baterai.
2. Perlu dilakukan pengujian dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) guna mengetahui komposisi pada permukaan elektroda yang dikenakan arus listrik yang berebda-beda.



DAFTAR PUSTAKA

- Alotto Piergiorgio, Massimo Guarnieri, Moro Federico. Redox flow batteries for the storage of renewable energy: a Review 2014;29:325-335.
- Bates Alex, Santanu Mukerjee , Sang C. Lee , Dong-Ha Lee , Sam Park. An analytical study of a lead-acid flow battery as an energy storage system. 2014;249:207-218.
- Bode, H. 1977. *Lead-acid batteries*. London: UCSB.
- Enterprise, Jubille. 2010. Teknik Menghemat Baterai. Jakarta : PT Elex Media Komputindo.
- Faessler, William L. 1991. An Introduction to Modern Electronics. Michigan : J. Wiley.
- Matteson S, Williams E. Residual learning rates in lead–acid batteries: Effects on emerging technologies. Energy Policy 2015;85:71–79.
- Pickard WF, Shen AQ, Hansing NJ. Parking the power: strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply-demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13:1934–1945.
- Ponce A., A. Frías-Ferrer, J. González-García, D.A. Szánto and F.C. Walsh, "*Redox flow cells for energy conversion*," J.Power Sources, vol. 160, no. 1, hal . 716-732, 9/29 2006.

Republika. 2016. Dirut PLN Beberkan Penyebab Pemadaman Bergilir Sering Terjadi di Jakarta. <http://www.republika.co.id/berita/nasional/jabodetabek-nasional/16/01/28/01nuhj383-dirut-pln-beberkan-penyebab-pemadaman-bergilir-sering-terjadi-di-jakarta>. Diakses tanggal 18 Juni 2017.

Sequeira, C. A. C. and Pedro, M. R. (2007) 'Lead-Acid battery storage', *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 19(1–2), hal. 59–65.

Skyllas-Kazacos M, Chakrabarti MH, Hajimolana SA, Mjalli FS, Saleem M. Progress in flow battery research and development. *Journal of the Electrochemical Society* 2011;158(8):R55–79.

Vutetakis G. David. 2001. *Batteries*. LCC Press

Whitfield, John. 2001. *Electrical Craft Principles Volume 1 (4th Edition)*. USA :The Institute of Electrical Engineers.

Weber Z, Mench MM, Meyers JP, Ross PN, Gostick JT, Liu Q. Redox flow batteries: a review. *Journal of Applied Electrochemistry* 2011;41:1137-64.

Zhang, C. P. *et al.* (2011) 'The performance of a soluble lead-acid flow battery and its comparison to a static lead-acid battery', *Energy Conversion and Management*, 52(12), hal. 3391–3398. doi: 10.1016/j.enconman.2011.07.006.