

repository.ub.ac.id

**ANALISIS SIKLUS *CHARGING-DISCHARGING*
BATERAI DINAMIS (*REDOX FLOW BATTERY*)
DENGAN ELEKTRODA Pb-PbO₂ DAN ELEKTROLIT
H₂SO₄**

SKRIPSI

Oleh :

**Riky Dwi Susilo
145090300111006**



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

UNIVERSITAS
BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id

**ANALISIS SIKLUS *CHARGING-DISCHARGING*
BATERAI DINAMIS (*REDOX FLOW BATTERY*)
DENGAN ELEKTRODA Pb-PbO₂ DAN ELEKTROLIT
H₂SO₄**

SKRIPSI

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

Oleh :

Riky Dwi Susilo
145090300111006



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

UNIVERSITAS
BRAWIJAYA

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI
ANALISIS SIKLUS *CHARGING-DISCHARGING* BATERAI
DINAMIS (*REDOX FLOW BATTERY*) DENGAN
ELEKTRODA Pb-PbO₂ DAN ELEKTROLIT H₂SO₄

oleh :
RIKY DWI SUSILO
145090300111006

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang fisika

Pembimbing I

Pembimbing II

Muhammad Ghufron, S.Si.,M.Si
NIP.198807272014041002

Cholisina A. Perwita, S.Si.,M.Si
NIP.198802022015042001

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 : Riky Dwi Susilo
NIM : 145090300111006
Jurusan : Fisika
Penulis Skripsi berjudul :

**ANALISIS SIKLUS *CHARGING-DISCHARGING*
BATERAI DINAMIS (*REDOX FLOW BATTERY*)
DENGAN ELEKTRODA Pb-PbO₂ DAN 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 dikemudian hari ternyata Skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung segala resiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 13 April 2018
Yang menyatakan,

(Riky Dwi Susilo)
NIM. 145090300111006



repository.ub.ac.id

ANALISIS SIKLUS *CHARGING-DISCHARGING* BATERAI DINAMIS (*REDOX FLOW BATTERY*) DENGAN ELEKTRODA Pb-PbO₂ DAN ELEKTROLIT H₂SO₄

ABSTRAK

Karakteristik baterai dapat diketahui melalui berbagai macam analisa salah satunya adalah analisa siklus pengisian-pengosongan (*charging-discharging*) baterai. Analisa siklus pengisian-pengosongan baterai dapat digunakan untuk mengetahui waktu hidup serta performa baterai. Pada penelitian ini dibuat baterai dinamis (RFB) asam timbal sel tunggal dengan luas elektroda 202,5 cm² dan 337,5 cm² serta larutan asam sulfat (H₂SO₄) 30%. Dilakukan uji pengisian-pengosongan (*charge-discharge*) selama 30 siklus untuk tiap luasan elektroda dengan arus pembebanan 1A yang dikontrol oleh *battery management system (Turnigy Accucell-6)*. Data yang diperoleh merupakan grafik tegangan, kapasitas serta arus terhadap waktu. Hasil percobaan menunjukkan bahwa kapasitas dan efisiensi baterai dengan luasan 337,5 cm² lebih tinggi daripada luasan 202,5 cm². Berdasarkan hasil pengujian siklibilitas, seiring bertambahnya siklus pengisian-pengosongan maka akan menurunkan performa baterai. Berdasarkan hasil pengujian, baterai dengan ukuran 337,5 cm² memiliki efisiensi energi dan kapasitas rata-rata masing-masing sebesar 75,9% dan 5043 mAh. Hasil percobaan juga menunjukkan waktu hidup baterai dengan luasan elektroda 337,5 cm² lebih panjang daripada luasan 202,5 cm². Berdasarkan hasil pengujian, baterai luasan 202,5 cm² memiliki waktu hidup sebanyak 8 siklus sedangkan baterai luasan 337,5 cm² memiliki waktu hidup sebanyak 25 siklus.

Kata kunci: baterai dinamis asam-timbal, Pb-PbO₂, waktu hidup, kapasitas, efisiensi energi.



repository.ub.ac.id

CHARGING-DISCHARGING CYCLE ANALYSIS OF DINAMYC BATTERY (REDOX FLOW BATTERY) WITH Pb-PbO₂ ELECTRODES AND H₂SO₄ AS ELECTROLYTE

ABSTRACT

Battery characteristics may be known through a variety of analyzes, one of which is the analysis of charge-discharge cycles of batteries. The battery charge-discharge cycle analysis can be used to determine the life and battery performance. In this research has been made a single cell lead acid dynamic battery with 202,5 cm² and 337,5 cm² surface area of electrodes and sulfuric acid solutions (H₂SO₄) 30% as electrolyte. This system is tested by doing charge-discharge test for 30 cycles on each area of electrodes variations with constant loading current 1 A which is controlled by *Turnigy Accucell-6*. The data obtained is a plot of voltage, capacitance and current over time. Based on the results of the cyclibility test, as the increasing charge-discharge cycle reduces battery performance. The experimental result show that battery with 337,5 cm² surface area has more capacity and energy efficiency than 202,5 cm² surface area. Based on the test result, battery with 337,5 cm² surface area of electrodes has capacity and energy efficiency of 5043 mAh and 75,9%. From the test result can show that battery with 337,5 cm² surface area has longer lifetime than 202,5 cm² surface area. Besides that, battery with 202,5 cm² surface area of electrodes can lasted only for 8 cycles while 337,5 cm² surface area of electrodes can lasted for 25 cycles before reach battery's end of life conditions.

Keyword: dynamic lead-acid battery, Pb-PbO₂, lifetime, capacity, energy efficiency.



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas segala limpahan rahmat, kuasa, hidayah dan inayah-Nya lah penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “**Analisis Siklus Charging-Discharging Baterai Dinamis (Redox Flow Batter) dengan Elektroda Pb-PbO₂ dan Elektrolit H₂SO₄**”. Skripsi ini disusun berdasarkan data penelitian yang dimulai sejak bulan November 2017 hingga Februari 2018 yang didukung dengan teori dari referensi-referensi yang menunjang.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah membantu penulis baik dalam berupa dukungan, bantuan, dan saran sampai penulis dapat menyelesaikan skripsi ini, khususnya kepada :

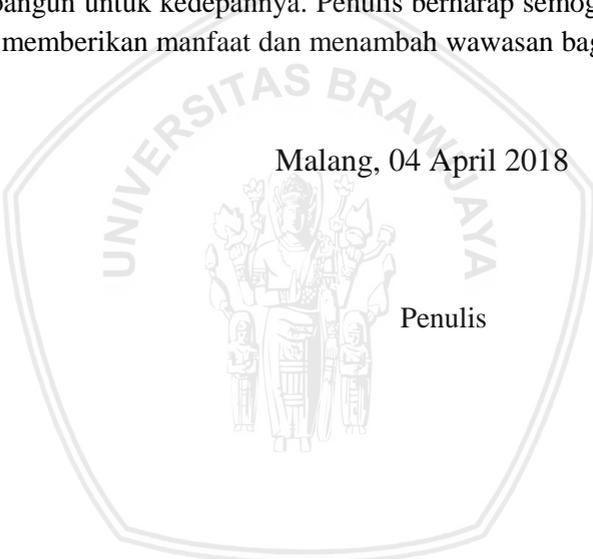
1. Keluarga yang selalu memberikan dukungan baik moral maupun material dan selalu memberikan doa restu, motivasi yang tidak pernah putus dan kerja keras yang tidak mengenal asa.
2. Bapak Prof. Dr. Muhammad Nurhuda, Rer.Nat. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Brawijaya Malang.
3. Ibu Dr. Eng. Masruroh, M.Si. selaku ketua prodi Fisika.
4. Bapak Muhammad Ghufron, S.Si.,M.Si selaku dosen Pembimbing I yang selalu membimbing dan senantiasa meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan motivasi dan arahan kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
5. Ibu Cholisina Anik Perwita, S.Si.,M.Si selaku dosen Pembimbing II dan pembimbing akademik yang telah memberikan dukungan, kepercayaan, kritik dan saran dalam penyelesaian skripsi ini.

- repository.ub.ac.id
6. Dosen-dosen jurusan fisika atas ilmu, teladan dan nasehat-nasehat bijak yang senantiasa diselipkan dalam setiap mata kuliah yang disampaikan.
 7. Rekan Tim “FlowBattery” yaitu Nur Khairati, Ahmad Arif Amirullah, Yofinda Eka Setiawan, Muhammad Yusmawanto yang telah berjuang bersama untuk menyelesaikan penelitian.
 8. Teman-teman Jurusan Fisika FMIPA Universitas Brawijaya Malang yang membantu terbentuknya skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi tidak luput dari kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk kedepannya. Penulis berharap semoga laporan ini dapat memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi pembaca.

Malang, 04 April 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.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Baterai.....	5
2.2 Reaksi Redoks	5
2.3 Baterai Dinamis (<i>Redox Flow Battery</i>).....	6
2.3.1 Baterai dinamis elektrolit ganda (RFBD)	8
2.3.2 Baterai dinamis elektrolit tunggal (RFBS)	9
2.3.3 Baterai dinamis berbasis asam-timbal	10
2.4 Elektroda Pb dan PbO ₂	12
2.5 Kapasitas Baterai	13
2.6 Waktu Hidup (<i>Lifetime</i>) Baterai	14
BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan.....	19
3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian	19
3.3 Tahapan Penelitian	20
3.3.1 Pembuatan sel elektrokimia	22
3.3.2 Pembuatan kerangka rancang bangun baterai dinamis asam-timbal.....	24
3.3.3 Pengujian karakteristik baterai.....	25
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Karakteristik baterai dinamis asam timbal	27

4.1.1 Keadaan awal baterai dinamis asam timbal.	27
4.1.2 Karakteristik <i>charge-discharge</i> baterai dinamis asam timbal.	31
4.2 Analisis siklus pengisian-pengosongan baterai dinamis luasan elektroda 202,5 cm ²	35
4.3 Analisis siklus pengisian-pengosongan baterai dinamis dengan luasan elektroda 337,5 cm ²	40
4.4 Perbandingan baterai dinamis asam timbal luasan <i>L1</i> & <i>L2</i>	46
4.5 Efisiensi energi dan kapasitas baterai dinamis asam timbal	50
BAB V PENUTUP	53
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN	61



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Sistem <i>Redox Flow Battery</i> di stasiun kota Lyon.....	2
Gambar 2.1 Skema baterai dinamis dengan dua aliran elektrolit.....	8
Gambar 2.2 Skema baterai dinamis dengan satu aliran elektrolit	10
Gambar 2.3 Bentuk elektroda sel baterai asam timbal	12
Gambar 2.4 Grafik Siklus <i>Charge-Discharge</i> Baterai	14
Gambar 2.5 Siklus 1-5 <i>Charge-Discharge</i> Baterai Dinamis Asam Timbal.....	15
Gambar 2.6 Siklus 1-100 <i>Charge-Discharge</i>	16
Gambar 2.7 Karakteristik siklus hidup (% efisiensi pengisian terhadap banyak siklus) baterai dinamis asam timbal dengan variasi DOD (25-100%)	17
Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian.....	21
Gambar 3.2 Elektroda yang digunakan a.) desain sambungan elektroda b.) hasil penyambungan.. ..	22
Gambar 3.3 Tampak atas susunan elektroda dalam wadah.....	23
Gambar 3.4 Skema susunan rangkaian penelitian	24
Gambar 4.1 Nilai tegangan <i>open-circuit</i> baterai dinamis asam timbal pada keadaan awal	27
Gambar 4.2 Grafik proses pengosongan awal baterai dinamis asam timbal a.) tegangan terhadap waktu b.) kapasitas terhadap waktu.....	29
Gambar 4.3 Tampilan <i>software Chargemaster V2.02</i> pada saat proses pengosongan baterai dinamis asam timbal	30
Gambar 4.4 Grafik tegangan terhadap kapasitas pada proses pengisian dan pengosongan baterai dinamis asam-timbal	32
Gambar 4.5 Grafik arus terhadap waktu pada proses pengisian baterai dinamis asam-timbal	33
Gambar 4.6 Grafik laju muatan terhadap waktu pada proses pengisian dan pengosongan baterai asam timbal	34
Gambar 4.7 Karakteristik baterai konvensional (model 6N4-2A-4)..	35
Gambar 4.8 Grafik proses pengisian-pengosongan baterai dinamis luasan LI (siklus 1-30)	36
Gambar 4.9 Perbandingan grafik siklus proses pengisian- pengosongan baterai dinamis luasan LI	38

Gambar 4.10 Grafik proses pengisian-pengosongan baterai dinamis luasan **L2** (siklus 1-30).....41

Gambar 4.11 Perbandingan grafik siklus proses pengisian-pengosongan baterai dinamis luasan **L2**43

Gambar 4.12 Kondisi elektroda Pb a.) sebelum pengujian b.) setelah pengujian 30 siklus.....45

Gambar 4.13 Grafik *trendline* tegangan awal proses pengosongan (V_o) baterai dinamis luasan **L2**45

Gambar 4.14 Perbandingan karakteristik baterai dinamis asam timbal proses pengisian-pengosongan luasan **L1 & L2** (siklus 1-5)48

Gambar 4.15 Perbandingan nilai efisiensi energi pada baterai dinamis asam timbal luasan **L1 & L2**50



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Nilai karakteristik baterai dinamis asam timbal luasan L1	38
Tabel 4.2 Nilai karakteristik baterai dinamis asam timbal luasan L2	42
Tabel 4.3 Perbandingan nilai karakteristik baterai dinamis asam timbal luasan L1 & L2 (5 siklus pertama).....	49





DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Alat dan Bahan.....	61
Lampiran 2. Sampe Elektroda	63
Lampiran 3. Sistem Baterai Dinamis dan Hasil dari Pengujian	65
Lampiran 4. Tabel Hasil Uji Luasan 202,5 cm ²	67
Lampiran 5. Tabel Hasil Uji Luasan 337,5 cm ²	103





BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan aspek paling utama yang digunakan sehari-hari untuk media penerangan, hiburan, serta lain-lain. Selain itu, tanpa adanya sarana listrik maka akan menghambat proses pemenuhan kehidupan. Kebutuhan akan energi listrik menjadi topik utama perbincangan kalangan ilmuwan dalam beberapa waktu terakhir, tidak terkecuali di Indonesia. Pemerintah Indonesia ingin melakukan pemerataan instalasi listrik di seluruh pelosok Indonesia untuk mewujudkan keinginan Indonesia 100% teraliri listrik. Hal ini terkait oleh data dari Badan Pusat Statistik bahwa 25% desa di wilayah Indonesia bagian timur atau sebanyak 12.000 desa masih belum teraliri oleh listrik secara penuh. Sedangkan kebutuhan energi berupa listrik di Indonesia diperkirakan akan naik rata-rata 4,8% per tahun selama periode 2000 – 2035 (Hudaya, 2008). Untuk itu pemerintah Indonesia bekerja sama dengan berbagai instansi untuk berupaya mewujudkan Indonesia 100% teraliri listrik.

Pada kenyataannya, pemerintah masih terkendala dalam pembangunan infrastruktur kelistrikan yang mudah, murah, berskala besar, dan tahan lama karena kebanyakan pembangkit listrik di Indonesia merupakan pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil yang cenderung menimbulkan polusi. Selain itu sistem pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil mengalami ancaman berkurangnya sumber bahan bakar fosil secara global. Hal ini terjadi karena bahan bakar fosil merupakan salah satu sumber energi non terbarukan. Akibatnya wilayah Indonesia bagian timur sering mengalami krisis energi listrik tanpa adanya langkah konkrit untuk mengatasi permasalahan tersebut.

Jenis-jenis sumber pembangkit energi listrik tidak hanya berasal dari bahan bakar fossil, namun juga dapat berupa sumber energy terbarukan. Energi terbarukan ini bisa berupa energi dari angin, air, cahaya matahari, panas bumi (*geothermal*), serta ombak laut. Sistem elektronik pada pembangkit listrik dengan energi alam yang terbarukan cenderung mudah rusak karena tidak stabilnya masukan dari sumber energi alam itu sendiri. Salah satu komponen

yang sangat riskan untuk terjadinya kerusakan adalah media penyimpanan listrik. Pada penelitian sebelumnya, sistem penyimpanan energi atau *energy restore system* menggunakan prinsip baterai statis kurang dapat beradaptasi dengan keadaan energi masukan dari pembangkit energi yang fluktuatif. Salah satu jenis sistem yang digunakan untuk media penyimpanan listrik yang sedang dikembangkan dan mampu menyimpan energi listrik dalam skala yang besar dan dapat beradaptasi dengan sumber energi yang fluktuatif serta memiliki ketahanan hidup lama adalah Baterai Aliran Redoks (*Redox Flow Battery*).



Gambar 1.1 Sistem *Redox Flow Battery* di stasiun kota Lyon (May dkk., 2018)

Flow battery (baterai dinamis) merupakan salah satu bentuk teknologi penyimpanan energi yang dapat digunakan untuk menyimpan energi listrik dengan performa yang cukup baik dan konstan dalam waktu yang cukup lama. Baterai dinamis ini juga biasa disebut dengan baterai aliran redox (*redox flow battery*) dimana larutan elektrolinya diedarkan melalui sepasang sel elektrokimia yang terdiri dari sel katoda dan sel anoda. Larutan elektrolit sendiri berperan sangat penting dalam setiap jenis baterai karena elektrolit ini difungsikan sebagai jembatan penghubung antara elektroda positif dan negatif. Dalam penelitian dan perkembangan terbaru, penggunaan elektrolit tidak diharuskan memiliki dua jenis larutan

repository.ub.ac.id

berbeda, namun dapat menggunakan satu jenis larutan elektrolit yang sama. Baterai jenis ini disebut baterai aliran redoks elektrolit tunggal (*Single Electrolyte Redox Flow Battery*). Salah satu jenis dari baterai ini adalah baterai asam timbal (*Lead Acid*). Karena menggunakan satu jenis elektrolit, maka pemasangan separator tidak dilakukan sehingga kinerja pompa untuk mengalirkan elektrolit tidak lagi besar yang berimbas pada berkurangnya biaya operasi dari sistem baterai ini (Collins dkk., 2010)

Beberapa faktor yang mempengaruhi waktu hidup (*Life Time*) sebuah sistem baterai dapat berupa konsentrasi elektrolit yang digunakan, luas penampang elektroda, jarak antar elektroda hingga arus dan tegangan masukan yang diberikan kepada sistem. Hal inilah yang merupakan landasan utama untuk mendapatkan sebuah sistem penyimpanan energi yang mempunyai waktu hidup panjang. Oleh karena itu, penulis ingin mengetahui analisa dari karakteristik pengisian-pengosongan dari baterai dinamis berbasis asam timbal yang nantinya sebagai acuan awal pengembangan model baterai yang sesuai dengan kebutuhan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana grafik siklus *Charging-Discharging* baterai dinamis yang dihasilkan menggunakan elektroda Pb-PbO dan elektrolit tunggal H_2SO_4 ?
2. Bagaimana analisis waktu hidup (*Life Time*) baterai dinamis menggunakan elektroda Pb-PbO dan elektrolit tunggal H_2SO_4 ?
3. Bagaimana pengaruh jumlah siklus *Charging-Discharging* terhadap efisiensi dan kapasitas baterai dinamis menggunakan elektroda Pb-PbO dan elektrolit tunggal H_2SO_4 ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini yaitu grafik *charging-discharging* baterai dinamis asam timbal dengan arus pembebanan 1A, jarak antar elektroda sebesar 3mm, dan konsentrasi H_2SO_4 (30%), volume elektrolit 600 ml serta tidak dilakukannya pengujian siklus hidup pada baterai statis asam timbal.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisa siklus *Charging-Discharging* baterai dinamis yang dihasilkan menggunakan elektroda Pb-PbO dan elektrolit tunggal H_2SO_4 .
2. Menganalisa waktu hidup (*Life Time*) baterai dinamis menggunakan elektroda Pb-PbO dan elektrolit tunggal H_2SO_4 .
3. Menganalisa pengaruh jumlah siklus *Charging-Discharging* terhadap efisiensi dan kapasitas baterai dinamis menggunakan elektroda Pb-PbO dan elektrolit tunggal H_2SO_4 .

1.5 Manfaat

1. Memperoleh desain *Redox Flow Battery* awal yang sederhana yang nantinya dapat diaplikasikan untuk menjadi baterai dengan performa yang lebih baik dan sesuai dengan kebutuhan.
2. Memperoleh data awal karakteristik *flow battery* yang dapat dianalisa dan dapat diaplikasikan menjadi sistem baterai yang lebih baik.
3. Mendapatkan grafik siklus *Charging-Discharging* baterai dinamis yang dihasilkan menggunakan elektroda Pb-PbO dan elektrolit tunggal H_2SO_4 .
4. Mengetahui karakteristik baterai dinamis menggunakan elektroda Pb-PbO dan elektrolit tunggal H_2SO_4 .
5. Mengetahui analisa waktu hidup baterai dinamis menggunakan elektroda Pb-PbO dan elektrolit tunggal H_2SO_4 sehingga dapat menentukan umur pakai baterai yang ideal.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baterai

Baterai adalah perangkat yang dapat mengkonversi energi kimia yang terkandung pada bahan aktif komponen penyusun baterai menjadi energi listrik melalui reaksi elektrokimia reduksi dan oksidasi (Wei dkk., 2016). Menurut definisi lain, baterai merupakan suatu piranti yang memiliki potensial listrik yang dapat menyimpan dan mengkonversikan energi menjadi daya. Baterai dapat menyimpan serta menghasilkan energi listrik melalui proses kimia berupa reaksi reduksi-oksidasi (Ramsey, 2001).

Jenis baterai ada dua macam, yaitu baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer adalah baterai yang tidak dapat diisi ulang dan hanya dapat digunakan sekali pakai (Satriady dkk., 2016). Hal ini terjadi karena reaksi kimia dari material aktif baterai tidak dapat dikembalikan ke keadaan semula. Contoh dari baterai primer adalah baterai Lithium, baterai Zinc-Carbon, baterai Silver Oxide dll. Baterai sekunder adalah jenis baterai yang dapat melakukan proses pengosongan daya serta pengisian daya (*Charge-Discharge*) atau sering disebut baterai isi ulang. Hal ini dapat terjadi karena adanya proses reaksi di dalam material aktifnya yang berlangsung secara putar balik (*reversible*) (Wills dkk., 2010). Contoh dari baterai jenis ini adalah baterai Ni-Cd, baterai Ni-Mh, baterai Li ion dll.

Perbedaan utama dari kedua baterai ini pada proses reaksi kimia didalam baterai. Baterai primer menggunakan reaksi searah sehingga tidak dapat dilakukan pengisian daya ulang. Sedangkan baterai sekunder menggunakan prinsip reaksi redoks yang berlangsung 2 arah atau bolak-balik (*reversible*) sehingga memungkinkan untuk dilakukannya proses pengisian daya ulang (Hudaya, 2008).

2.2 Reaksi Redoks

Reaksi Reduksi-Oksidasi atau sering disingkat menjadi reaksi Redoks merupakan reaksi yang menyebabkan perubahan nilai bilangan oksidasi dari suatu materi. Perubahan nilai bilangan oksidasi terjadi karena adanya fenomena pelepasan dan penangkapan elektron. Pada reaksi reduksi, terjadi proses penangkapan elektron

sehingga nilai bilangan oksidasi turun. Sebaliknya, pada reaksi oksidasi terjadi pelepasan elektron sehingga nilai bilangan oksidasi meningkat (Suyanta, 2013).

Reaksi-reaksi elektroda melibatkan berpindahnya (*transfer*) muatan dari elektroda kedalam spesies yang terlarut atau sebaliknya. Reaksi-reaksi yang melibatkan transfer muatan dari satu spesies ke yang lain ini sering disebut dengan reaksi redoks. Reaksi oksidasi dan reduksi dapat digabung dalam suatu sistem reaksi berikut :



Persamaan reaksi diatas merupakan suatu bentuk persamaan umum yang terjadi pada kedua elektroda di suatu sistem baterai. Pada kenyataannya, reaksi oksidasi selalu diikuti dengan reaksi reduksi pada elektroda dan juga berlaku sebaliknya. Fenomena ini terjadi karena adanya proses perpindahan elektron dari satu ion ke ion lain yang nantinya akan menjadi dasar dalam suatu sistem sel elektrokimia atau baterai (Suyanta, 2013).

Elektroda merupakan bagian material aktif dari sistem baterai yang akan bereaksi dengan elektrolit sehingga menimbulkan suatu reaksi kimia berupa reaksi reduksi-oksidasi. Elektroda didalam sel elektrokimia terdiri dari 2 jenis, yaitu elektroda positif (katoda) serta elektroda negatif (anoda). Penetapan kutub positif maupun negatif dari suatu baterai tergantung dari jenis material penyusun elektroda yang digunakan serta reaksi redoks yang terjadi di dalam sel. Akibat reaksi redoks pada elektroda, maka muncul beda potensial pada kedua elektroda yang dapat menimbulkan energi listrik. Reaksi reduksi terjadi pada katoda, sedangkan oksidasi terjadi di anoda (Suyanta, 2013).

2.3 Baterai Dinamis (*Redox Flow Battery*)

Baterai aliran redoks atau *Redox Flow Battery* merupakan salah satu jenis baterai tipe sekunder dimana baterai jenis ini mempunyai dua siklus (*charging* dan *discharging*) yang bersifat *reversible* (Weber dkk., 2011). Secara umum baterai ini menggunakan prinsip elektrolit yang dialirkan melalui pipa atau selang dari *chamber* atau tangki kedalam *cell* maupun sebaliknya menggunakan bantuan dorongan dari pompa. Elektrolit di dalam

tangki akan didedarkan kedalam system dan akan melakukan proses reduksi dan oksidasi dengan elektroda yang ada pada *cell* (Li dkk., 2017)

Prinsip utama dari sistem baterai aliran redoks ini adalah dengan adanya ruangan sel yang telah terdapat elektroda-elektroda dan elektrolit yang akan dialirkan dari *chamber* kedalam ruang sel menggunakan bantuan pompa. Elektrolit yang digunakan merupakan elektrolit dalam fase larutan (*aquoeous*) yang disimpan diruangan yang berbeda dari sel.

Terdapat dua jenis utama dari baterai aliran redoks yaitu elektrolit tunggal (*single electrolyte*) dan elektrolit ganda (*double electrolyte*). Perbedaan dari kedua jenis tipe ini adalah pada elektrolit yang digunakan. Pada tipe elektrolit ganda, maka jenis elektrolit yang digunakan berupa dua buah larutan yang memiliki perbedaan rumus kimia dan diharuskan adanya separator yang akan mencegah bercampurnya kedua larutan. Sedangkan pada jenis elektrolit tunggal, maka jenis larutan elektrolit yang digunakan hanya berupa satu jenis saja dan tidak diperlukan pemasangan separator (Collins dkk., 2010).

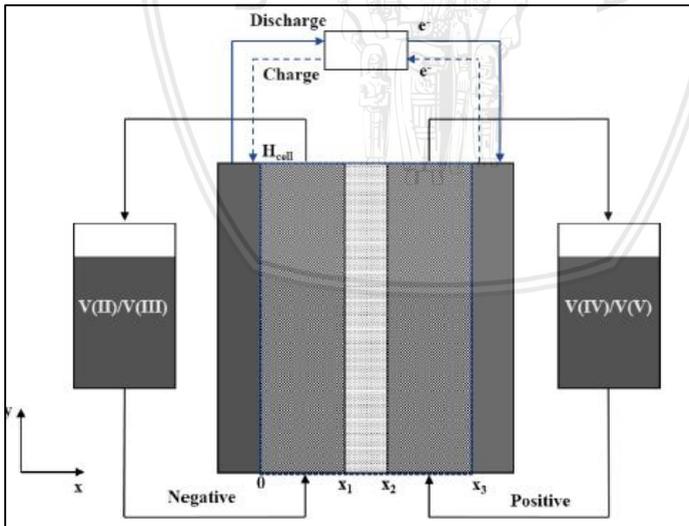
Baterai dinamis memiliki keunggulan-keunggulan dibandingkan dengan baterai statis (konvensional). Keunggulan-keunggulan tersebut antara lain adalah kemampuan untuk menyimpan energi yang besar, potensi siklus hidup (*life cycle*) yang panjang dan efisiensi energi yang relatif lebih esar dari baterai konvensional (Li dkk., 2016). Namun baterai dinamis masih dalam tahapan pengembangan awal yang menyebabkan baterai ini masih mempunyai masalah di beberapa bagian. Beberapa masalah tersebut terkait dengan proses termal serta stabilitas membran kimia dan elektrolit. Pada jenis baterai dinamis berbasis vanadium, kerapatan energi yang dihasilkan oleh sistem cenderung lebih kecil daripada baterai konvensional. Untuk menciptakan baterai sekunder yang memiliki kerapatan energi (*energy density*) yang tinggi dan mempunyai waktu hidup (*lifetime*) yang panjang harus memenuhi parameter-parameter diantaranya yaitu kerapatan energi (Wh/dm³), kerapatan daya (W/kg), kapasitas (Ah/g), dan banyaknya siklus (*cycles*) (Tian dkk., 2017).

2.3.1 Baterai dinamis elektrolit ganda (RFBD)

Elektrolit memiliki peranan penting dalam segala jenis baterai karena elektrolit merupakan jembatan penghubung kedua elektroda katoda dan anoda. Jenis baterai terdiri dari dua wadah penyimpanan, di mana elektrolit ditempatkan diluar sel dan dihubungkan dengan menggunakan pipa kecil kemudian diedarkan (oleh pompa) melalui sel elektrokimia yang terdiri dari katoda, anoda dan membran pemisah

(Weber dkk., 2011).

Baterai dinamis elektrolit ganda merupakan sebuah desain skema dari baterai dinamis dimana memiliki dua jenis elektrolit yang berbeda satu sama lain yang ditempatkan pada wadah yang berbeda. Elektrolit ini terdiri dari elektrolit positif (anolit) serta negatif (katolit). Elektrolit ini akan dialirkan menuju sel elektrokimia baterai yang sebelumnya telah dipisahkan membran separator semipermeable diantara kedua elektroda menggunakan sistem pompa. Ketika melewati suatu sel elektrokimia, kedua elektrolit akan saling bereaksi dan terjadi reaksi redoks diantara keduanya. Membran separator ini menjadi jembatan jalannya ion dari kedua elektrolit yang terpisah (Zhang dkk., 2011).



Gambar 2.1 Skema baterai dinamis dengan dua aliran elektrolit (Zhou dkk., 2015)

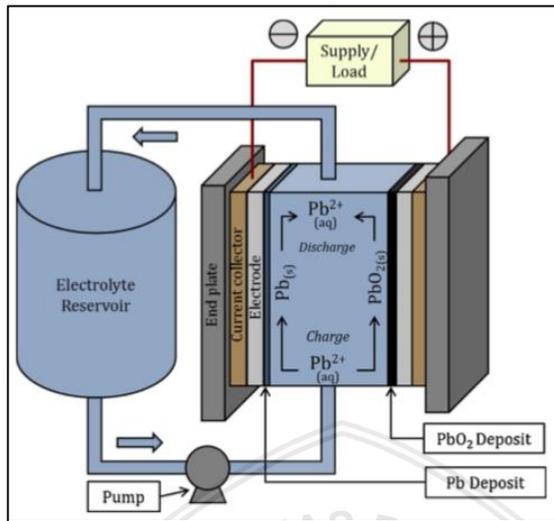
repository.ub.ac.id

Energi kimia diubah menjadi listrik ketika dua elektrolit masuk melalui sel elektrokimia. Kedua elektrolit disimpan secara terpisah dalam tangki penyimpanan yang besar di luar sel elektrokimia (Noack dkk., 2016). Ukuran tangki dan jumlah elektrolit membatasi kepadatan energi dari baterai tersebut. Namun, rapat daya di aliran-baterai tergantung pada tingkat reaksi elektroda yang terjadi di anoda dan katoda (Divya dan Ostergaard, 2009).

2.3.2 Baterai dinamis elektrolit tunggal (RFBS)

Jenis baterai ini biasa menggunakan elektrolit berupa asam timbal atau asam metanasulfonat dalam fase cairan atau larutan. Sedangkan elektroda yang digunakan adalah timbal dioksida dan timah yang masing-masing akan menjadi anoda dan katoda (Weber dkk., 2011). Kemudian elektrolit di edarkan dengan menggunakan pompa kembali menuju sel elektroda (Knudsen dkk., 2015). Baterai jenis ini disebut baterai dinamis elektrolit tunggal (*flow battery single electrolyte*). Ukuran dari tangki dan jumlah elektrolit menentukan dari densitas energi dari sistem baterai tipe ini (*flow battery*).

Pada baterai jenis ini, elektrolit akan dialirkan kedalam baterai menggunakan sistem pompa. Pada dasarnya reaksi yang terjadi di dalam sel baterai sama seperti model baterai dinamis elektrolit ganda. Reaksi yang terjadi adalah proses serah terima elektron antara elektroda positif maupun negatif. Reaksi ini sering disebut sebagai reaksi reduksi-oksidasi (redoks). Karena adanya proses serah terima elektron ini akan menimbulkan beda potensial didalam sel baterai, sehingga baterai akan menimbulkan energi listrik. Salah satu contoh jenis dari baterai dinamis dengan satu elektrolit adalah baterai berbasis asam timbal.



Gambar 2.2 Skema baterai dinamis dengan satu aliran elektrolit (Krishna dkk., 2017)

Dinding pemisah atau membran pemisah tidak lagi diperlukan, sehingga dapat menghilangkan masalah-masalah yang terkait dengan membrane pemisah (Zeng dkk., 2015) dan hal ini akan berimbas pada penurunan biaya operasi alat serta meningkatkan ke ekonomisan sistem (Collins dkk., 2010).

2.3.3 Baterai dinamis berbasis asam-timbal

Baterai Asam Timbal adalah baterai yang elektrolitnya adalah larutan asam belerang (*sulfuric acid* = H_2SO_4). Didalam baterai asam, elektroda – elektroda nya terdiri dari plat – plat timah peroksida PbO_2 (*Lead Peroxide*) sebagai anoda (kutub positif) dan timah murni Pb (*Lead Sponge*) sebagai katoda (kutub negatif) (You dan Cheng, 2016).

Bila baterai dibebani maka tiap ion negatif sulfat (SO_4) akan bereaksi dengan plat timah murni (Pb) sebagai katoda menjadi timah sulfat ($PbSO_3$) sambil melepaskan dua elektron. Sedang sepasang ion hidrogen (H^+) akan beraksi dengan plat timah peroksida (PbO_2) sebagai anoda menjadi timah sulfat ($PbSO_4$) sambil mengambil dua elektron dan bersenyawa dengan satu atom hidrogen untuk membentuk air (H_2O) (Divya dan Ostergaard, 2009). Pengambilan dan pemberian atom elektron dalam proses kimia ini menyebabkan

timbulnya beda potensial listrik antara kutub – kutub sel baterai. Proses pengisian merupakan kebalikan dari proses pengosongan dimana arus listrik dialirkan yang arahnya berlawanan, dengan arus yang terjadi pada saat pengosongan. Pada proses ini setiap molekul air terurai dan tiap pasang ion hidrogen ($2H^+$) yang dekat plat negatif bersatu dengan ion negatif sulfat SO_4^- . Pada plat negatif untuk membentuk asam sulfat. Sedangkan ion oksigen yang bebas bersatu dengan tiap atom Pb pada plat positif membentuk timah peroksida PbO_3 (You dan Cheng, 2016). Secara keseluruhan reaksi yang terjadi pada kedua elektoda adalah



Baterai dapat dikatakan memiliki kualitas yang baik apabila memenuhi beberapa kriteria. Yang pertama, nilai tegangan yang dihasilkan oleh baterai cenderung sama pada saat dilakukannya proses pengisian maupun pengosongan. Apabila baterai cenderung memiliki nilai yang sama dari siklus yang sebelumnya maka penurunan performa baterai juga akan lambat. Yang kedua, nilai efisiensi baterai yang tinggi. Nilai efisiensi baterai yang tinggi menunjukkan bahwa kemampuan baterai pada saat pengosongan seimbang dengan energi yang telah masuk pada saat proses pengisian. Hal ini menunjukkan bahwa baterai hanya mengalami sedikit kehilangan energi yang dapat dikatakan baterai memiliki kualitas yang baik. Parameter efisiensi didalam baterai ada 3 yaitu efisiensi tegangan, efisiensi coulomb, dan efisiensi energi.

Nilai efisiensi tersebut dapat diungkapkan secara matematis dalam persamaan berikut.

$$\eta_V = \frac{V_{Discharge}}{V_{Charge}} \quad (2.3)$$

Efisiensi tegangan adalah rasio perbandingan nilai tegangan tengah selama proses pengosongan terhadap proses pengisian (Arenas dkk., 2017).

$$\eta_c = \frac{Q_{Discharge}}{Q_{Charge}} \quad (2.4)$$

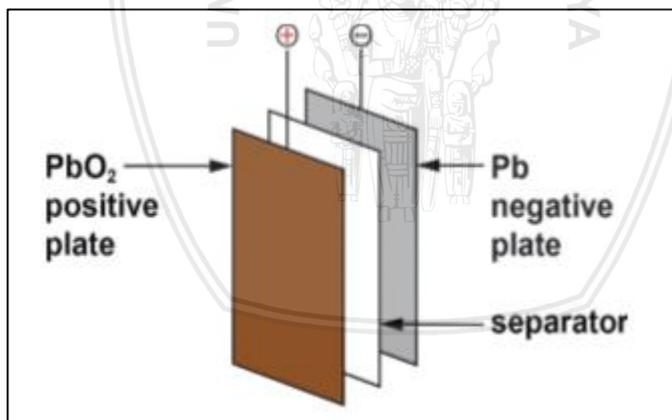
Efisiensi coulomb adalah nilai rasio muatan listrik yang disediakan oleh baterai selama pengosongan dibandingkan dengan persediaan selama pengisian (Arenas dkk., 2017).

$$\eta_E = \frac{E_{Discharge}}{E_{Charge}} \quad (2.5)$$

Sedangkan efisiensi energinya adalah rasio dari energi antara proses pengosongan dan pengisian (Leung dkk., 2017)

2.4 Elektroda Pb dan PbO₂

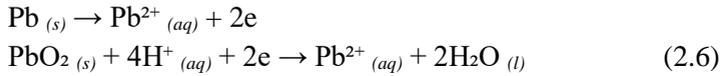
Pada semua jenis baterai, elektroda merupakan komponen terpenting selain elektrolit. Pada baterai berbasis asam timbal, elektroda berbentuk plat persegi yang terdiri dari elektroda positif dan negatif. Bahan aktif pada plat elektroda positif adalah timbal dioksida yang berwarna coklat, sedangkan pada plat elektroda negatif adalah spons-timbal yang berwarna abu-abu. Faktor-faktor yang menentukan kualitas dari suatu elektroda antara lain adalah ketebalan elektroda, banyaknya materi aktif, waktu hidup elektroda, serta konduktivitas ion.



Gambar 2.3 Bentuk elektroda sel baterai asam timbal (May dkk., 2018)

Sel-sel baterai asam-timbal terdiri dari elektroda Pb-PbO₂ yang terlarut dalam asam-sulfat. Sesuai prinsip baterai asam-timbal Pb sebagai anoda sedangkan PbO₂ sebagai katoda. Timbal dioksida

(PbO₂) memiliki konduktivitas yang tinggi (perilaku semikonduktor yang baik). Jika kedua elektroda dihubungkan akan dihasilkan potensial sel sekitar 2 volt. Saat pemakaian baterai, elektroda negatif (Pb) akan mengalami oksidasi sambil melepas elektron sedangkan elektroda positif (PbO₂) akan mengalami reduksi dengan menangkap elektron.



Selain digunakan pada baterai, timbal sering digunakan pada industri modern dalam proses pembuatan pipa air yang memiliki kualitas tahan korosi, pembuatan cat, serta campuran bahan bakar kendaraan dengan nilai oksidasi rendah seperti solar dan bensin (Herman, 2006).

2.5 Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai adalah kemampuan dari suatu baterai untuk menyimpan energi berupa listrik. Selain itu, kapasitas baterai juga dapat diartikan sebagai nilai besar total muatan yang dapat dihasilkan oleh baterai apabila disambungkan dengan suatu rangkaian listrik. Besarnya kapasitas dari baterai ini dipengaruhi oleh banyaknya bahan aktif pada plat positif dan plat negatif yang bereaksi, juga dipengaruhi oleh jumlah plat tiap-tiap sel, ukuran, dan tebal plat, kualitas serta umur dari baterai. Kapasitas energi dari baterai dinyatakan dalam Ampere jam (Ah) (Ramsey, 2001).

Nilai besar kecilnya kapasitas suatu baterai ditentukan oleh sel baterai yang ada didalamnya. Namun baterai dapat dikatakan bekerja apabila ada arus yang mengalir melalui bahan konduktor didalam sel baterai serta ada beban spesifik yang menyebabkan baterai bekerja. Kapasitas juga dapat berarti seberapa lama baterai dapat mengalirkan arus secara konstan dalam suatu periode tertentu. Jadi apabila arus yang dihasilkan besar maka durasi waktu proses akan sedikit. Namun apabila arus yang dihasilkan kecil maka durasi waktu proses pun akan lebih panjang dengan catatan kapasitas dari baterai sama. Pada saat proses pengisian (*charging*) terjadi proses penyimpanan muatan listrik pada elektroda-elektroda di dalam baterai. Jumlah maksimum muatan listrik yang dapat ditampung oleh baterai disebut sebagai kapasitas maksimum baterai yang dinyatakan dalam Ampere-jam (*Ampere-hour*). Kapasitas dari baterai dapat dinyatakan dengan persamaan dibawah ini (Ramsey, 2001).

$$Q (Ah) = I(\text{Ampere}) \times t(\text{jam}) \quad (2.7)$$

Dimana :

Q = kapasitas baterai (Ah)

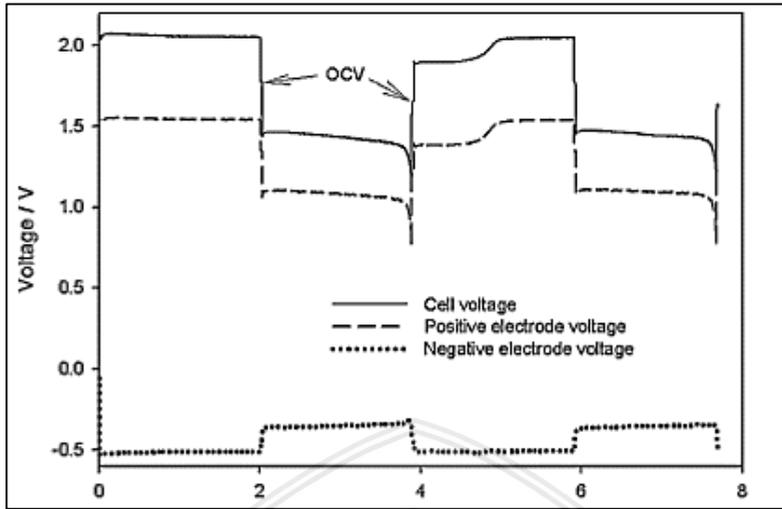
I = kuat arus (Ampere)

T = waktu (jam)

2.6 Waktu Hidup (*Lifetime*) Baterai

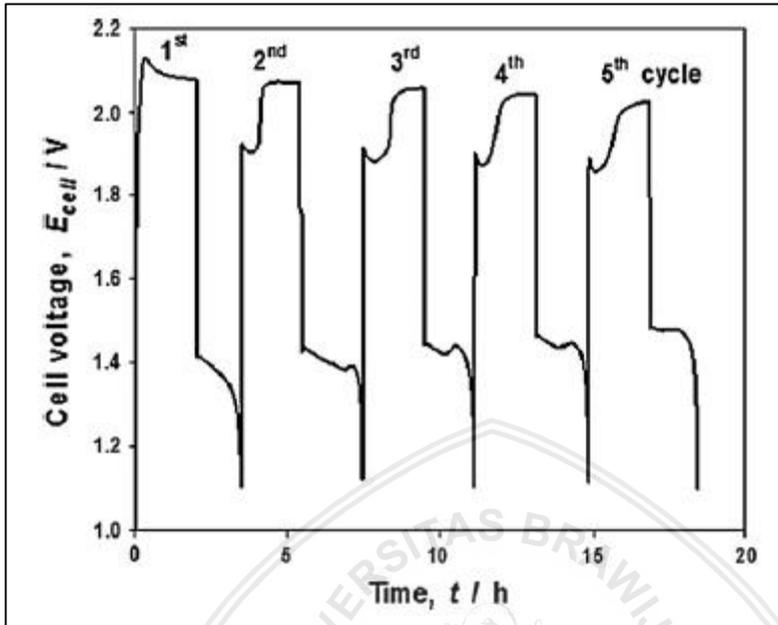
Beberapa hal yang menyebabkan sebuah baterai bisa dikategorikan sebagai baterai yang bagus diantaranya yaitu besar kapasitas baterai, efisiensi baterai, waktu pengisian daya, serta waktu hidup dari baterai. Waktu hidup atau *life time* baterai adalah suatu ukuran seberapa lama baterai dapat bertahan atau keawetan baterai dari proses pengisian dan pengosongan daya (*charging-discharging*).

Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi waktu hidup dari sebuah baterai dinamis antara lain adalah laju aliran elektrolit, konsentrasi elektrolit, volume elektrolit, luas penampang elektroda yang digunakan, dan tegangan serta arus masukan yang diberikan pada baterai (Sun dkk., 2017). Faktor-faktor ini sangat mempengaruhi waktu hidup suatu sistem baterai. Apabila salah satu faktor tersebut tidak terkontrol maka akan terjadi kegagalan baterai atau *failure system* yang akan menyebabkan baterai memiliki waktu hidup singkat atau bahkan baterai tidak dapat berfungsi.



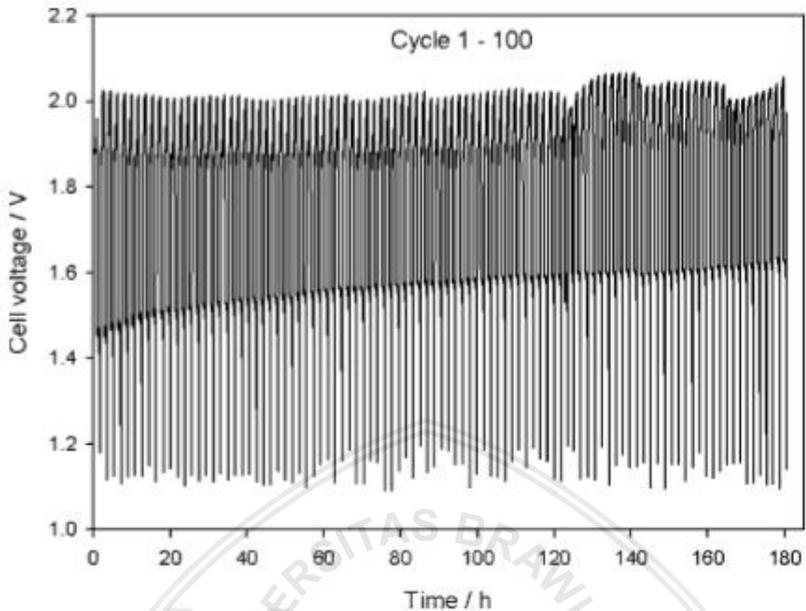
Gambar 2.4 Grafik Siklus *Charge-Discharge* Baterai (Lujano-Rojas dkk., 2016)

Performa baterai juga dipengaruhi oleh jenis material yang digunakan sebagai elektroda serta properti permukaan dari elektroda tersebut (Dufo-López dkk., 2014). Selain itu, pemilihan material sebagai elektroda juga didasarkan pada keekonomisan bahan, ketahanan bahan, serta konduktivitas bahan elektroda. Bahan yang sering digunakan sebagai elektroda adalah timbal serta grafit.



Gambar 2.5 Siklus 1-5 *Charge-Discharge* Baterai Dinamis Asam Timbal (Zhang dkk., 2011)

Salah satu cara untuk meningkatkan waktu hidup dan ketahanan baterai dapat dilakukan dengan melakukan perlakuan khusus pada saat melakukan pengisian daya. Pada saat proses pengisian daya, arus yang digunakan diatur sedemikian rupa sehingga memiliki besar yang konstan hingga baterai mencapai tegangan maksimum atau hingga *pre-set limit voltage*. Selanjutnya dilakukan perubahan dari arus konstan menjadi tegangan konstan. Hal ini dilakukan untuk menghindari perubahan oksigen dan hydrogen (*oxygen and hydrogen evolution*) (White dkk., 2016).

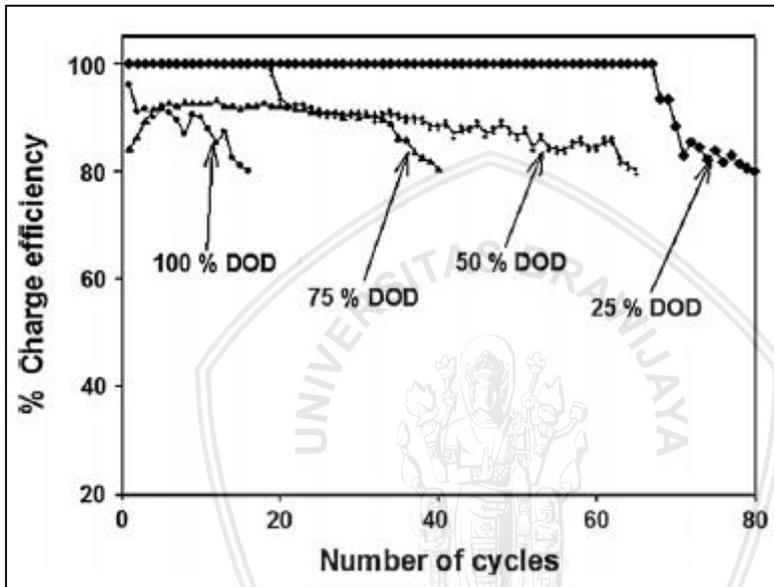


Gambar 2.6 Siklus 1-100 *Charge-Discharge* Baterai (Wills dkk., 2010)

Salah satu indikasi apabila baterai bisa dikatakan bagus adalah dari konsistensi dalam siklus pengisian-pengosongan muatan (*charge-discharge*). Apabila semakin banyak siklus yang telah dilalui namun *trendline* atau kemiringan yang dihasilkan oleh proses pengisian-pengosongan muatan (*charge-discharge*) hanya memunculkan kemiringan yang sedikit atau bahkan tidak ada sama sekali maka bisa dikatakan tidak ada *energy leaked* dan baterai dapat digolongkan kedalam baterai bagus. Namun sebaliknya apabila masih dalam beberapa siklus pengisian-pengosongan muatan (*charge-discharge*) sudah terdapat kemiringan yang cukup tajam maka bisa dikatakan baterai yang kurang bagus dan tidak akan memiliki waktu hidup yang lama. Hal ini biasa disebabkan oleh adanya kebocoran energi atau *energy leaked*.

Selain karena konsistensi dalam proses pengisian dan pengosongan, waktu hidup baterai juga dipengaruhi oleh kedalaman pengosongan (*depth of discharge/DOD*). Semakin besar nilai DOD, maka siklus hidup yang dapat dihasilkan akan memendek. Hal ini terjadi karena proses *irreversible sulphation* di kedua elektroda yang

menyebabkan degradasi material aktif di elektroda yang akan menyebabkan berkurangnya nilai kapasitas baterai. Pada penelitian sebelumnya, siklus waktu hidup yang dapat dihasilkan oleh baterai statis asam timbal sebelum mengalami kegagalan adalah sekitar 1500 siklus dengan nilai DOD 30%. Sedangkan pengaruh besar DOD terhadap banyaknya siklus waktu idup yang dapat diperoleh dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Karakteristik siklus hidup (% efisiensi pengisian terhadap banyak siklus) baterai dinamis asam timbal dengan variasi DOD (25-100%) (Zhang dkk., 2011).

Terlihat pada Gambar 2.7 bahwa banyaknya siklus yang dapat dihasilkan oleh baterai asam timbal bergantung dari nilai DOD. Semakin besar nilai DOD maka proses pembentukan material yang tidak dapat kembali (*irreversible*) akan semakin besar. Proses ini terjadi pada saat proses pengosongan. Jadi untuk memperpanjang umur baterai maka baterai harus dioperasikan dengan nilai DOD yang tidak cukup besar sehingga efisiensi baterai tidak terlalu turun sedangkan umur pakai baterai meningkat (Zhang dkk., 2011).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November 2017 sampai dengan bulan Februari 2018, bertempat di Laboratorium Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Brawijaya.

3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

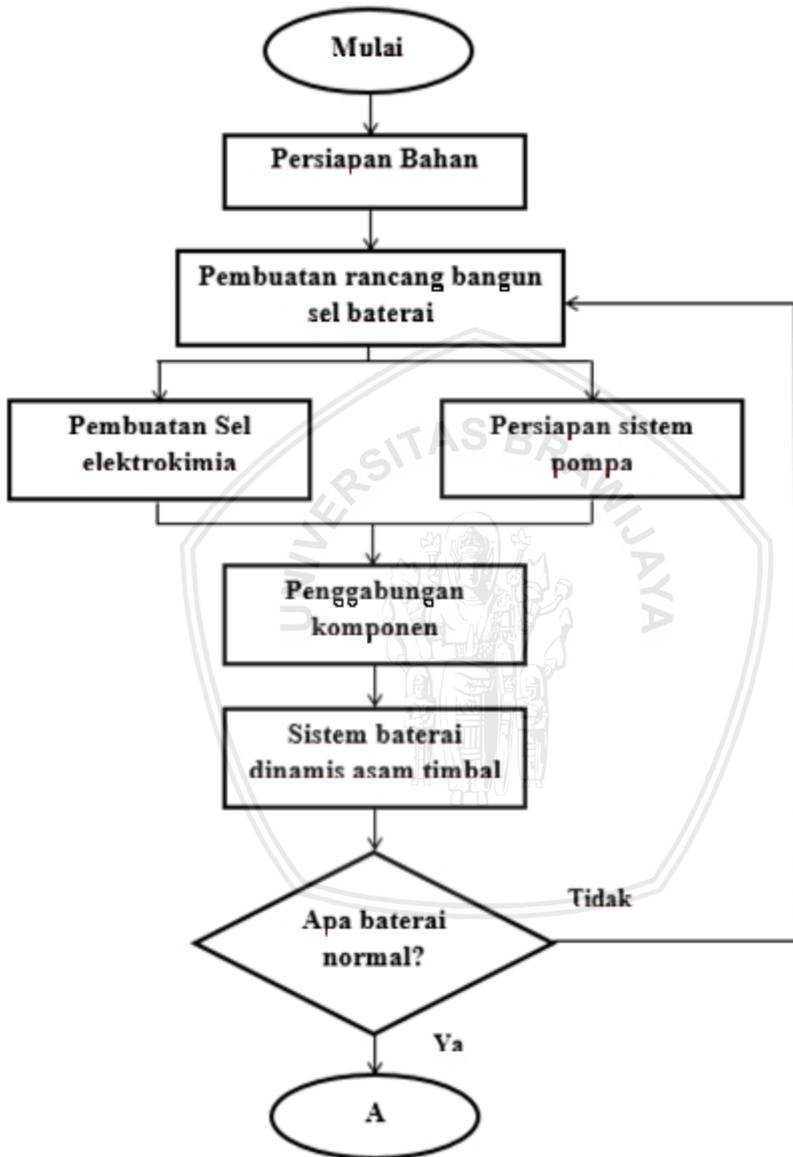
Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah :

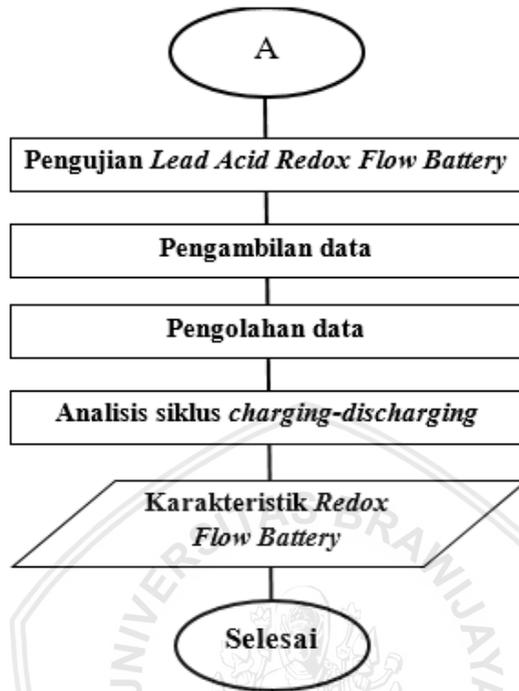
1. Seperangkat alat pengukur *charging-discharging* (*Turnigy accucell-6*),
2. *Peristaltic Pump 6V*,
3. Kaca akrilik,
4. Wadah plastik dengan volume 600 mL,
5. Mur dan baut,
6. Selang fleksibel transparan,
7. Kabel penghubung,
8. Adaptor,
9. Multimeter,
10. Solder,
11. Cutter-stripper,
12. Laptop,
13. Solder Pemanas.

Sedangkan bahan yang digunakan adalah :

1. Larutan elektrolit H_2SO_4 ,
2. Elektroda Pb dan PbO_2 ,
3. Membran separator,
4. Resin 3126 beserta katalis,
5. Lem,
6. Kertas Gosok,
7. Timah.

3.3 Tahapan Penelitian





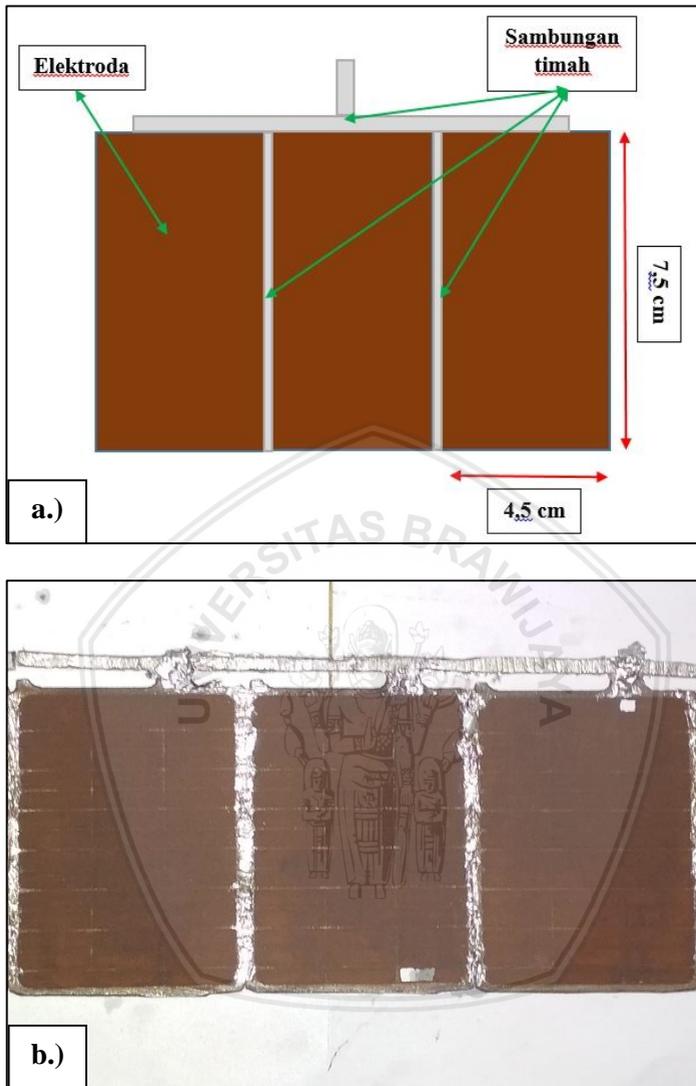
Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian

Langkah awal dalam penelitian ini dimulai dengan persiapan bahan yang akan digunakan untuk pembuatan baterai dinamis (*redox flow battery*) berbasis asam timbal. Tahap selanjutnya adalah pembuatan rancang bangun dari sistem baterai dinamis dengan menggabungkan rancangan sel elektrokimia dengan sistem pompa elektrolit. Apabila sistem sudah siap untuk digunakan, maka langkah selanjutnya adalah proses pengujian pompa elektrolit. Jika selama elektrolit dialirkan kedalam sistem baterai normal maka proses pengambilan data dapat dilakukan. Namun apabila laju elektrolit tidak normal maka proses diulang dengan pembuatan sel elektrokimia kembali. Langkah selanjutnya adalah pengambilan data baterai dinamis yang diikuti dengan proses pengolahan data. Langkah terakhir adalah proses analisa data yang telah diperoleh dari proses pengolahan data.

3.3.1 Pembuatan sel elektrokimia

Langkah awal dalam proses pembuatan sel elektrokimia dimulai dengan pembuatan wadah sel dari bahan akrilik dengan tebal akrilik 3 mm. Sel elektrokimia berbentuk balok berongga dengan lubang masukan elektrolit dibagian atas salah satu sudut wadah dan lubang keluaran elektrolit dibagian bawah sudut yang berseberangan. Bentuk dan ukuran wadah sel disesuaikan dengan luasan elektroda yang digunakan dengan ketentuan bahwa ukuran satu plat elektroda adalah $4,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$. Langkah selanjutnya adalah proses penggabungan elektroda. Elektroda yang sudah disiapkan harus digosok pada bagian permukaan samping dan ujung dari elektroda dengan kertas gosok. Hal ini dilakukan bertujuan agar elektroda memiliki permukaan bagian samping yang kasar sehingga proses penggabungan elektroda lebih mudah. Selanjutnya dilakukan proses penggabungan elektroda positif maupun negatif. Penggabungan elektroda dilakukan dengan metode penyambungan timah antar elektroda menggunakan solder pemanas. Elektroda digabung sesuai ukuran yang dibutuhkan pada penelitian ini yaitu $3 \times 4,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (3 plat) dan $5 \times 4,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (5 plat). Hasil elektroda yang telah disambung dapat dilihat pada Gambar 3.2.

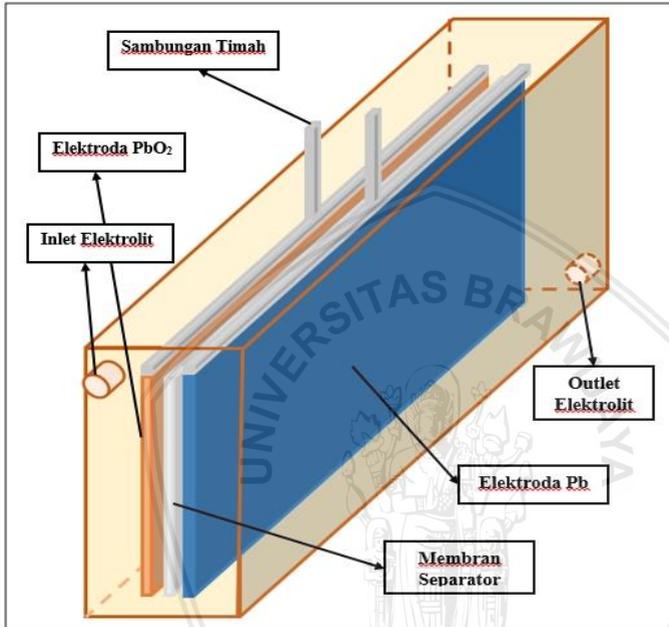




Gambar 3.2 Elektroda yang digunakan a.) desain sambungan elektroda b.) hasil penyambungan.

Setelah itu kabel digabungkan dengan elektroda dengan disolder timah. Proses selanjutnya adalah penyusunan elektroda kedalam wadah sel elektrokimia. Pada saat pemasangan elektroda

kedalam sel elektrokimia, kedua elektroda harus dipisahkan dengan jarak 3 mm dan diantara kedua elektroda dipasang sebuah membran separator. Pada penelitian ini baterai yang dibuat merupakan baterai asam-timbal sel tunggal, dimana hanya ada sepasang elektroda (positif-negatif). Sel elektrokimia telah tersusun dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 3.2.

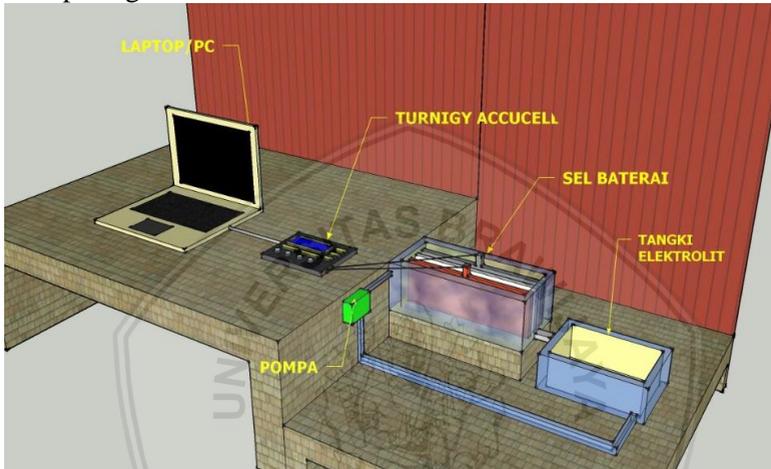


Gambar 3.3 Tampak atas susunan elektroda dalam wadah sel.

3.3.2 Pembuatan kerangka rancang bangun baterai dinamis asam-timbal.

Kerangka rancang bangun sistem baterai dinamis (*redox flow battery*) berbasis asam timbal pada penelitian ini dibuat dengan susunan sederhana, dimana tempat peletakan sel baterai diatur dengan posisi yang lebih tinggi daripada wadah elektrolit (*electrolyte chamber*). Hal ini dilakukan agar elektrolit dapat mengalir dari sel kedalam wadah elektrolit secara konstan. Selanjutnya elektrolit akan dipompa dari wadah kedalam sel elektrokimia menggunakan sistem pompa. Hal ini akan memicu elektrolit di dalam sel elektrokimia

untuk bersikulasi secara terus-menerus dengan keadaan konstan. Sel elektrokimia disambungkan dengan seperangkat alat alat pengukur *charge-discharge (Turnigy accucell-6)* menggunakan kabel penghubung. Pemasangan kabel penghubung harus disesuaikan dengan kutub negatif maupun positif dari elektroda. Laptop disambungkan dengan alat pengukur *charge-discharge (Turnigy accucell-6)* agar data hasil pengukuran dapat ditampilkan. Rangkaian sistem rancang bangun baterai dinamis pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Skema susunan rangkaian penelitian

3.3.3 Pengujian karakteristik baterai

Pengujian karakteristik dari baterai dilakukan dengan dua luasan elektroda yang berbeda yakni 3 plat elektroda dan 5 plat elektroda masing-masing sebanyak 30 siklus pengisian-pengosongan baterai. Sebelum dilakukannya pengambilan data, kutub-kutub pada baterai dihubungkan dengan alat pengukur *charging-discharging (Turnigy accucell-6)* dan alat pengukur dihubungkan dengan laptop. Pengambilan data dilakukan dengan bantuan *software chagemaster V2.02* yang telah terinstalasi pada laptop yang akan digunakan. Pengujian dilakukan dengan proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) pada baterai dinamis untuk masing-masing luasan elektroda. Pada proses pengisian, baterai diberi arus masukan sebesar 1 Ampere dengan waktu yang tidak ditentukan

(hingga baterai penuh terisi). Pada proses pengosongan, baterai akan disambungkan dengan beban spesifik sebesar 1 Ampere dengan waktu yang tidak ditentukan (hingga kondisi *cuttoff*). Pada proses pengisian, muatan listrik akan masuk kedalam baterai yang dikontrol oleh alat *Turnigy accucell-6*. Sedangkan pada proses pengosongan, baterai akan diberi beban spesifik yang dikontrol oleh *Turnigy accucell-6* untuk dapat mengeluarkan muatan dengan arus konstan sebesar 1 Ampere. Selama proses pengujian baterai didapatkan data berupa nilai tegangan, arus, dan kapasitas terhadap waktu. Langkah selanjutnya adalah analisa data yang telah diperoleh dari penelitian baterai dinamis ini.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik baterai dinamis asam timbal

4.1.1 Keadaan awal baterai dinamis asam timbal.

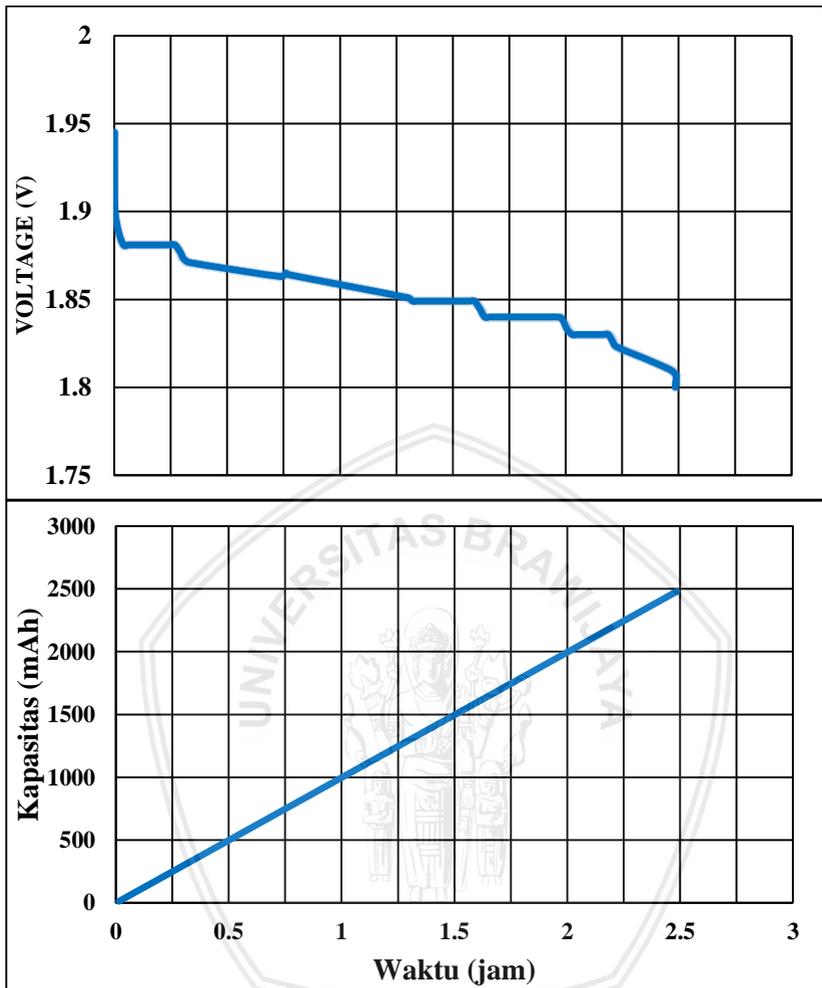
Pada keadaan awal baterai dinamis asam timbal, kedua elektroda yaitu Pb serta PbO_2 belum memiliki muatan listrik karena belum dilakukan proses pencampuran. Elektrolit yang digunakan adalah asam sulfat atau H_2SO_4 (*aq*) dengan konsentrasi sebesar 30%. Ketika elektrolit berupa asam sulfat dicampurkan maka akan terjadi reaksi spontan berupa reduksi-oksidasi (redoks) seperti persamaan 2.1 (pada bab 2) di kedua elektroda. Hasil dari reaksi tersebut akan memunculkan padatan timbal (II) sulfat pada kedua elektroda. Akibat dari reaksi tersebut timbul beda potensial pada kedua elektroda sebesar 2,08 V seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Beda potensial pada kedua elektroda ini juga disebut sebagai tegangan *open-circuit* sel baterai. Tegangan *open-circuit* baterai inilah yang dapat digunakan sebagai sumber energi listrik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa keadaan awal baterai dinamis asam timbal ini telah terbukti memiliki energi listrik yang dapat dikeluarkan.



Gambar 4.1 Nilai tegangan *open-circuit* baterai dinamis asam timbal pada keadaan awal.

Sebelum proses pengujian siklibilitas berupa pengisian dan pengosongan baterai (*charge-discharge*), dilakukan proses pengosongan (*discharge*) awal baterai. Hal ini untuk mengosongkan muatan yang terdapat pada baterai atau berkurang hingga hampir sepenuhnya kosong sebelum dilakukan proses pengujian, sehingga proses pengujian siklibilitas baterai dapat dimulai.

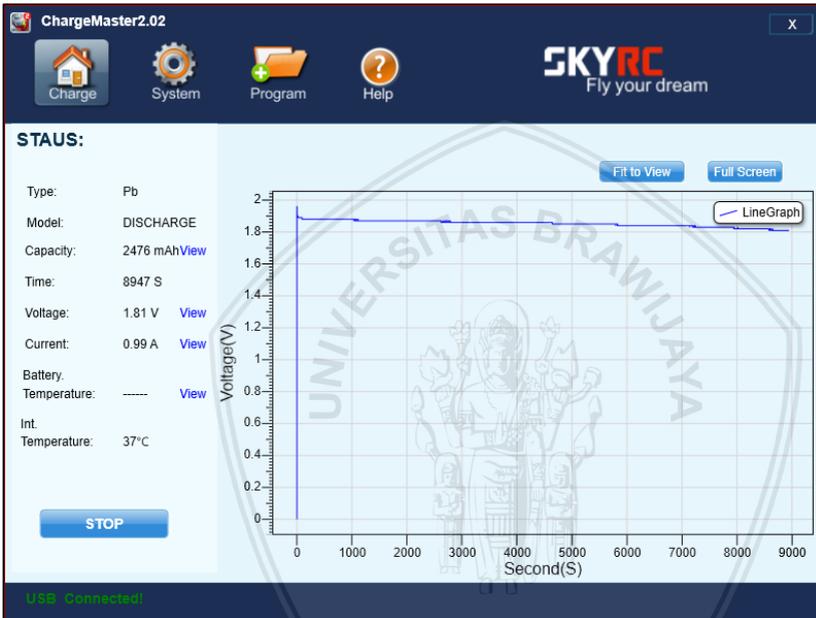
Pada proses pengosongan awal baterai dinamis disambungkan dengan suatu beban spesifik dengan arus keluaran konstan sebesar 1 A. Akibat dari pembebanan baterai dengan arus keluaran konstan, muatan listrik yang ada pada baterai akan berkurang secara konstan yang dapat ditunjukkan dengan pengurangan nilai kapasitas baterai (Gambar 4.2). Selain itu, proses pengosongan muatan baterai ini juga ditunjukkan dengan berkurangnya nilai tegangan secara perlahan pada baterai seperti pada Gambar 4.2. Proses pengosongan baterai ini akan berhenti ketika tegangan baterai telah mencapai nilai 1,8 V. Nilai ini merupakan nilai *Vcutt-off* yang telah terintegrasi pada alat *Turnigy accucell-6* dan sebagai standar *default Vcutt-off* dari baterai statis berbasis asam timbal atau baterai konvensional. Namun proses pengosongan yang dilakukan oleh alat *Turnigy accucell-6* tidak sepenuhnya selesai. Untuk baterai dinamis asam timbal, hal ini ditunjukkan oleh grafik tegangan terhadap waktu pada Gambar 2.5 dimana tegangan akhir baterai dinamis asam timbal pada keadaan *open-circuit* adalah sebesar 1,1 V (Zhang dkk., 2011). Dapat dikatakan bahwa baterai masih menyimpan sedikit muatan yang belum digunakan pada proses pengosongan tersebut. Pembatasan nilai *Vcutt-off* oleh alat *Turnigy accucell-6* dilakukan untuk melindungi dan menjaga kondisi baterai agar tidak cepat rusak.



Gambar 4.2 Grafik proses pengosongan awal baterai dinamis asam timbal a.) tegangan terhadap waktu b.) kapasitas terhadap waktu

Pada proses pengosongan awal baterai, besar nilai muatan yang telah dikeluarkan oleh baterai akan disimpan serta dibaca oleh alat *Turnigy accucell-6*. Nilai yang telah dibaca oleh alat *Turnigy accucell-6* akan diolah menjadi grafik pada piranti lunak (*software*) *Chargemaster V2.02*. Tampilan dari piranti lunak *Chargemaster V2.02* dapat dilihat pada Gambar 4.3. Nilai muatan yang telah dikeluarkan pada proses pengosongan baterai ini disebut sebagai

kapasitas baterai. Pada proses pengosongan baterai, semakin lama waktu pengosongan maka nilai kapasitas baterai yang dikeluarkan juga akan semakin besar. Hal ini dikarenakan nilai kapasitas baterai merupakan hasil perkalian antara arus pembebanan dan durasi waktu proses. Satuan besaran nilai dari kapasitas yang sering digunakan adalah *mili Ampere hour* (mAh). Pada Gambar 4.2, terlihat bahwa proses pengosongan awal baterai memerlukan waktu sebesar 2,48 jam serta dapat mengeluarkan kapasitas baterai sebesar 2476 mAh.



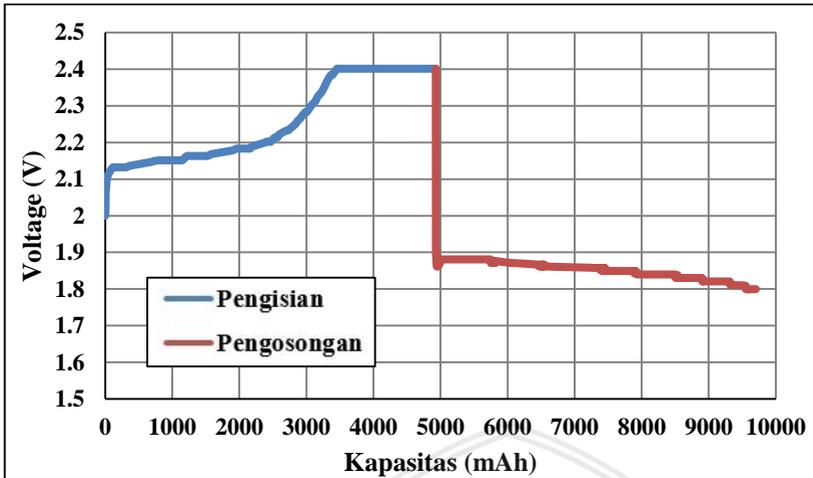
Gambar 4.3 Tampilan *software Chargemaster V2.02* pada saat proses pengosongan baterai dinamis asam timbal

Terdapat beberapa keterangan-keterangan penting pada *software Chargemaster V2.02* saat dilakukan proses pengosongan maupun pengisian baterai dinamis asam timbal. Pertama adalah keterangan status "*Type*" yang berisi informasi jenis baterai yang digunakan pada proses tersebut. Selanjutnya adalah "*Model*" yang berisi informasi status proses yang dilaksanakan, bisa berupa *Discharge* (pengosongan) maupun *Charge* (pengisian). Selain itu juga terdapat keterangan status "*Capacity*","*Time*","*Voltage*" serta

“*Current*”. *Capacity* menunjukkan besarnya jumlah muatan yang telah dikeluarkan (proses pengosongan) maupun dimasukkan (proses pengisian) pada saat proses berlangsung. *Time* menunjukkan durasi waktu proses yang telah berlangsung dalam satuan detik. *Voltage* menunjukkan besar potensial sel baterai yang terukur pada saat proses sedang berlangsung. *Current* adalah keterangan status yang menunjukkan nilai arus listrik yang mengalir pada proses yang sedang berlangsung. Selain itu juga terdapat keterangan status “*Battery Temperature*” yang menunjukkan suhu pada sel baterai serta keterangan status “*Int. Temperature*” yang menunjukkan suhu pada alat *Turnigy accucell-6*. Selain itu juga terdapat kurva grafik yang ditampilkan pada *software Chargemaster V2.02*. Kurva ini dapat menunjukkan grafik tegangan, arus, serta kapasitas terhadap waktu yang ditampilkan secara langsung tiap detik (*real-time*).

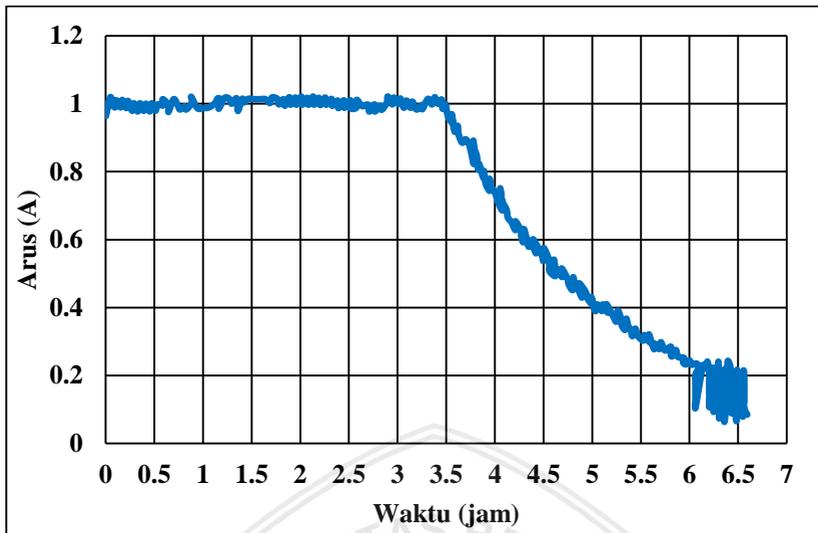
4.1.2 Karakteristik *charge-discharge* baterai dinamis asam timbal.

Karakteristik *charge-discharge* pada baterai dinamis asam timbal menggunakan sel tunggal dengan arus pembebanan sebesar 1A yang dapat dilihat pada Gambar 4.4. Pada proses pengisian (*charge*) baterai, terjadi reaksi redoks yang berkebalikan dengan reaksi redoks pada saat proses pengosongan baterai. Reaksi redoks pada proses pengisian baterai tidak bersifat spontan seperti halnya pada proses pengosongan baterai. Oleh karena itu diperlukan sumber energi berupa listrik dari luar. Arus dari sumber listrik luaran ini akan memberikan energi pada baterai untuk mengubah material timbal sulfat ($\text{PbSO}_{4(s)}$) yang ada pada kedua elektroda dan air menjadi timbal ($\text{Pb}_{(s)}$) dan timbal dioksida ($\text{PbO}_{2(s)}$) serta asam sulfat ($\text{H}_2\text{SO}_{4(aq)}$).



Gambar 4.4 Grafik tegangan terhadap kapasitas pada proses pengisian dan pengosongan baterai dinamis asam-timbal

Pada proses pengisian baterai dengan arus masukan konstan sebesar 1 A terjadi kenaikan tegangan yang cukup besar. Secara singkat tegangan baterai naik dari keadaan $V_{cut-off}$ sebesar 1,80 V menjadi 2,13 V. Selanjutnya tegangan baterai naik secara perlahan menuju 2,21 V. Pada keadaan tersebut baterai mulai terisi muatan terlihat dari nilai kapasitas yang terus bertambah seiring dengan bertambahnya nilai tegangan baterai pada proses pengisian. Kemudian nilai tegangan secara drastis naik dengan cepat menuju nilai 2,40 V. Pada saat kondisi baterai mencapai tegangan 2,40 V, baterai akan mempertahankan kondisi tersebut untuk beberapa saat. Hal ini menyebabkan arus pengisian berangsur-angsur turun dari 1A menjadi 0,2 A. Perubahan keadaan dari arus pengisian konstan menjadi tegangan konstan menunjukkan bahwa baterai sudah hampir terisi secara penuh. Selain itu, turunnya arus yang semula konstan menunjukkan reaksi redoks didalam baterai juga semakin sedikit. Semakin sedikitnya reaksi redoks dalam baterai menunjukkan bahwa reaksi pengembalian dari $PbSO_{4(aq)}$ ke $PbO_{2(s)}$ dan Pb akan berakhir. Hal ini juga dapat terlihat dari laju muatan yang masuk pada baterai saat tegangan konstan 2,4 V cenderung menurun diakibatkan oleh turunnya besar arus pengisian seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.5.

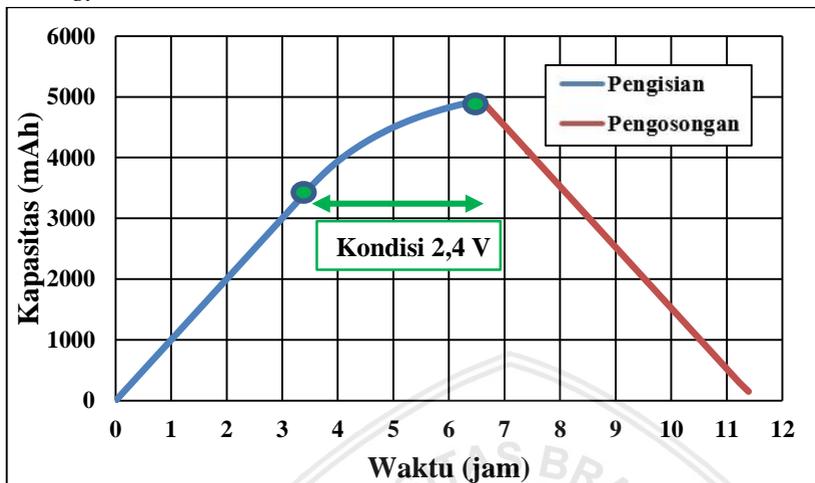


Gambar 4.5 Grafik arus terhadap waktu pada proses pengisian baterai dinamis asam-timbal

Proses pengosongan (*discharging*) baterai dinamis asam timbal dilakukan dengan menghubungkan baterai dengan beban spesifik dengan arus keluaran konstan sebesar 1A. Hal ini berakibat pada menurunnya nilai tegangan baterai secara perlahan seperti yang terlihat pada Gambar 4.4. Penurunan nilai tegangan ini juga mengindikasikan bahwa baterai dalam kondisi *open-circuit* atau tersambung dengan suatu beban spesifik sehingga terjadi proses pengosongan muatan.

Pada proses pengosongan baterai, tegangan baterai turun drastis dari nilai 2,40 V menjadi 1,98 V. Selanjutnya dalam waktu yang singkat baterai mengalami penurunan nilai tegangan dari 1,98 V menjadi 1,85 V. Namun setelah pada kondisi tersebut, nilai tegangan baterai naik kembali secara perlahan menjadi 1,89 V. Kondisi ini baterai dikatakan berada pada keadaan tegangan kerja. Ketika pada tegangan kerja, baterai secara perlahan mengalami penurunan tegangan hingga membentuk kurva hampir linear seperti yang terlihat pada Gambar 4.5. Proses pengosongan baterai berhenti ketika tegangan baterai telah mencapai $V_{cut-off}$ baterai pada nilai 1,80 V. $V_{cut-off}$ ini adalah nilai tegangan standar minimal pada

proses pengosongan yang telah diatur secara *default* pada alat *Turnigy accucell-6*.

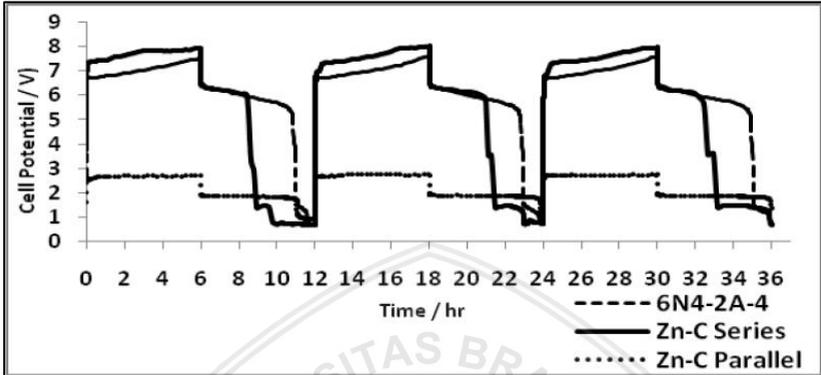


Gambar 4.6 Grafik laju muatan terhadap waktu pada proses pengisian dan pengosongan baterai asam timbal.

Pada Gambar 4.6, terlihat karakteristik pengisian dan pengosongan baterai dinamis asam timbal ditinjau dari besaran kapasitas baterai terhadap waktu. Pada proses pengisian, baterai disambungkan dengan sumber listrik luaran dengan arus masukan konstan sebesar 1A. Pada proses tersebut muatan baterai naik secara konstan dari kondisi kapasitas 0 mAh hingga 3500 mAh dalam waktu 3,5 jam. Kurva yang dihasilkan selama 3,5 jam awal proses pengisian membentuk kurva linear. Ketika tegangan baterai mencapai nilai 2,40 V (Gambar 4.5), maka arus pengisian akan berangsur turun hingga nilai 0,2 A. Hal tersebut menyebabkan kurva kapasitas yang dihasilkan mengalami perubahan kemiringan seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.6. Kapasitas total proses pengisian baterai tersebut adalah sebesar 4931 mAh dengan durasi waktu sebesar 6,60 jam.

Pada proses pengosongan, baterai disambungkan dengan beban spesifik dengan arus keluaran sebesar 1A. Pada proses tersebut, baterai mengalami penurunan jumlah muatan secara linear seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.6. Hal ini diakibatkan karena selama proses pengosongan arus keluaran baterai cenderung

konstan sehingga nilai kapasitas juga turun secara konstan. Proses pengosongan baterai berhenti apabila nilai tegangan baterai telah mencapai $V_{cut-off}$ yaitu 1,80 V. Kapasitas total proses pengosongan baterai tersebut adalah sebesar 4775 mAh dengan durasi waktu sebesar 4,47 jam.



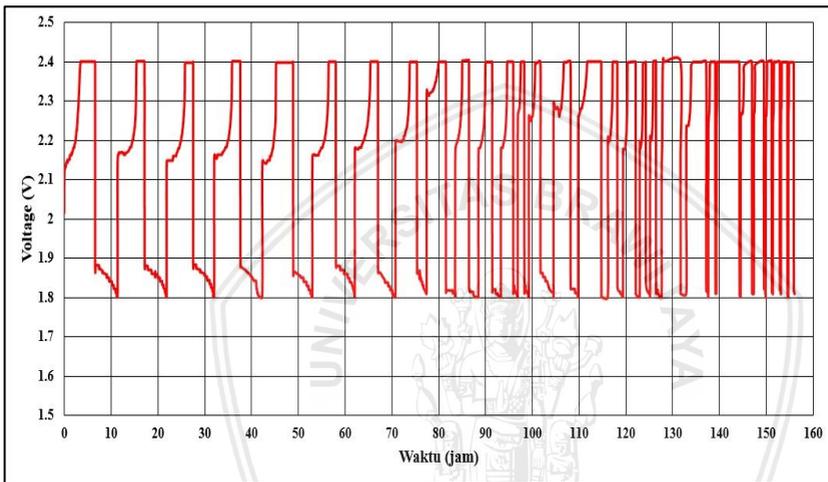
Gambar 4.7 Karakteristik baterai konvensional (model 6N4-2A-4) (Ghufron dan Kurriawan, 2017).

Apabila kurva karakteristik *charge-discharge* pada penelitian ini (Gambar 4.4) dibandingkan dengan karakteristik *charge-discharge* baterai asam timbal konvensional (Gambar 4.7) maka dari kedua gambar tersebut dapat dilihat bahwa grafik diantara keduanya sama-sama memiliki *trendline* dan karakteristik yang serupa. Hal ini dapat membuktikan bahwa sistem baterai dinamis asam timbal yang telah dibuat pada penelitian ini memiliki karakter yang serupa dengan penelitian-penelitian sebelumnya (Ghufron dan Kurriawan, 2017). Selain itu, hal ini juga dapat menunjukkan bahwa baterai asam timbal yang telah dibuat pada penelitian ini termasuk jenis *secondary battery* yang dapat dilakukan proses pengisian ulang (*rechargeable*).

4.2 Analisis siklus pengisian-pengosongan baterai dinamis luasan elektroda 202,5 cm²

Pada penelitian tentang analisis siklus *charging-discharging* baterai dinamis asam timbal, digunakan luas permukaan elektroda yang spesifik. Perlu diketahui bahwa 1 plat elektroda memiliki ukuran luas permukaan sebesar 67,5 cm². Sedangkan pada penelitian ini digunakan luasan 3 pelat elektroda dengan total luas permukaan

sebesar $202,5 \text{ cm}^2$ untuk masing-masing elektroda positif maupun negatif. Untuk selanjutnya variasi ini disebut dengan luasan 1 (LI). Baterai yang digunakan pada penelitian bersifat satu sel atau sel tunggal, sehingga baterai dinamis asam timbal pada penelitian ini hanya terdiri dari 1 pasang elektroda positif dan negatif. Total volume elektrolit yang digunakan selama proses siklibilitas baterai dinamis asam timbal ini adalah sebesar 600 ml. Laju aliran elektrolit yang masuk maupun keluar dari sel baterai adalah sebesar 9 ml/menit.



Gambar 4.8 Grafik proses pengisian-pengosongan baterai dinamis luasan LI (siklus 1-30).

Pada penelitian ini dilakukan proses pengujian siklibilitas (pengisian-pengosongan) baterai dinamis asam timbal sebanyak 30 siklus pertama baterai seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.8. Pada Gambar 4.8 terlihat bahwa karakteristik pengisian-pengosongan baterai masih berlangsung sesuai dengan karakteristik baterai asam timbal pada penelitian yang sebelumnya (Ghufron dan Kurriawan, 2017). Gambar 4.8 tersebut memperlihatkan karakteristik pengisian-pengosongan yang masih cenderung serupa dengan penelitian sebelumnya dari siklus ke-1 hingga siklus ke-11. Namun selanjutnya terjadi kondisi dimana baterai mengalami anomali pada siklus ke-12 hingga siklus ke-30. Terjadi penurunan secara drastis dari durasi waktu proses pengisian-pengosongan baterai pada siklus ke-30

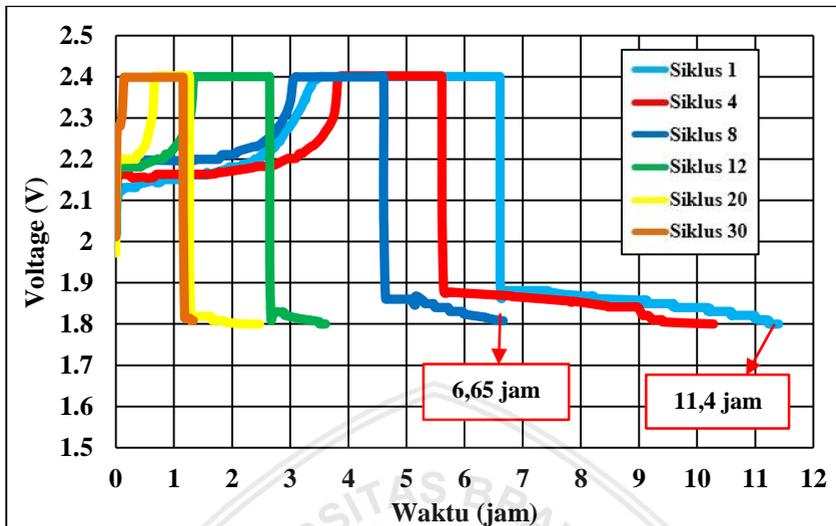
dibandingkan dengan siklus ke-1. Penurunan durasi ini juga berakibat pada penurunan jumlah kapasitas baterai yang dapat diisi dan dikeluarkan oleh sistem baterai. Berikut ini adalah Tabel 4.1 berisi data durasi waktu, kapasitas, serta arus dari siklus ke-1 hingga siklus ke-30 baterai dinamis asam timbal pada penelitian ini.

Pada Tabel 4.1 menunjukkan nilai-nilai karakteristik baterai dinamis asam timbal luasan **LI** dari siklus 1-30. t_C merupakan durasi waktu proses pengisian baterai, dan t_{DC} adalah durasi waktu proses pengosongan. I_C adalah besar arus pada proses pengisian baterai, sedangkan I_{DC} merupakan besar arus pada proses pengosongan ketika disambungkan dengan beban spesifik. C_C adalah nilai besar muatan yang telah dimasukkan kedalam baterai pada proses pengisian, dan C_{DC} adalah besar muatan yang telah dikeluarkan dari baterai pada proses pengosongan.

Pada Tabel 4.1 terlihat bahwa nilai kapasitas pengisian dan pengongan baterai pada siklus ke-1 sebesar 4931 mAh dan 4775 mAh. Pada siklus ke-2 dan seterusnya nilai kapasitas pengisian cenderung turun sebesar kurang lebih 100 mAh tiap siklus. Penurunan nilai kapasitas ini berlangsung hingga siklus ke-8. Selanjutnya nilai kapasitas turun drastis dari nilai 3736 mAh menjadi 3385 mAh pada siklus ke-9. Hal ini terjadi diakibatkan oleh keadaan baterai yang mulai terjadi penurunan performa serta kegagalan sistem (*system failure*). Menurut Bindner dkk (2005) baterai asam timbal konvensional dikatakan gagal apabila besar nilai kapasitas pengisian baterai jatuh atau turun menjadi 70-80% dari nilai kapasitas awal baterai, sehingga dapat dikatakan bahwa baterai asam dinamis asam timbal dengan luasan **LI** dalam penelitian ini mengalami kegagalan sistem setelah siklus ke-8. Kegagalan sistem baterai tidak berarti bahwa baterai rusak, namun perlu dilakukan perawatan (*maintenance*) sehingga baterai dapat kembali ke performa semula.

Tabel 4.1 Nilai karakteristik baterai dinamis asam timbal luasan *LI*

Siklus ke-	t_c (jam)	t_{DC} (jam)	I_c (A)	I_{DC} (A)	C_c (mAh)	C_{DC} (mAh)
1	6,61	4,79	0,98	1	4931	4775
2	5,77	4,71	0,98	1	4874	4683
3	5,67	4,49	0,98	1	4726	4471
4	5,60	4,66	0,98	1	4583	4652
5	6,59	4,12	0,98	1	4455	4103
6	5,01	4,07	0,98	1	4130	4056
7	4,95	3,72	0,98	1	4053	3706
8	4,60	2,05	0,98	1	3736	3576
9	4,12	1,99	0,98	1	3385	2049
10	2,95	2,01	0,98	1	2141	1991
11	2,95	1,84	0,98	1	2073	1845
12	2,64	0,97	0,98	1	1903	957
13	1,41	0,96	0,98	1	1007	950
14	2,46	2,81	0,98	1	1861	2808
15	3,62	1,61	0,98	1	2810	1414
16	4,96	1,40	0,98	1	3049	1395
17	2,03	1,22	0,98	1	1475	1213
18	2,70	0,86	0,98	1	1404	879
19	1,29	0,91	0,98	1	947	908
20	1,26	1,21	0,98	1	942	1212
21	4,04	1,12	0,98	1	2167	1119
22	4,25	0,45	0,98	1	1473	449
23	1,50	0,25	0,98	1	717	253
24	4,89	0,25	0,98	1	1391	249
25	2,42	0,42	0,98	1	1177	412
26	2,14	0,39	0,98	1	801	399
27	1,28	0,27	0,98	1	607	267
28	1,45	0,25	0,98	1	565	246
29	1,40	0,19	0,98	1	507	187
30	1,16	0,17	0,98	1	435	172



Gambar 4.9 Perbandingan grafik siklus proses pengisian-pengosongan baterai dinamis luasan LI .

Pada Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan kurva grafik proses pengisian-pengosongan baterai dinamis asam timbal dengan luasan LI pada siklus 1, 4, 8, 12, 20 dan 30. Terlihat pada siklus 1, durasi waktu proses satu siklus membutuhkan waktu sebesar 11,4 jam. Selanjutnya pada siklus 8 durasi waktu proses satu siklus membutuhkan waktu sebesar 6,65 jam. Durasi waktu siklus 8 ini lebih pendek sebesar 41,6% dari siklus ke 1. Pada siklus ke-8 baterai telah mencapai kondisi akhir hidup karena setelah siklus ke-8 kapasitas baterai sudah turun hingga $<70\%$. Hal ini menunjukkan adanya kecenderungan bahwa semakin banyak proses pengujian yang telah dilakukan, durasi waktu proses pengisian dan pengosongan (1 siklus) semakin pendek. Fenomena ini terjadi dikarenakan berkurangnya performa baterai dalam proses pengisian muatan kedalam baterai serta pengambilan muatan dari baterai yang akan mempengaruhi karakteristik pengisian-pengosongan baterai.

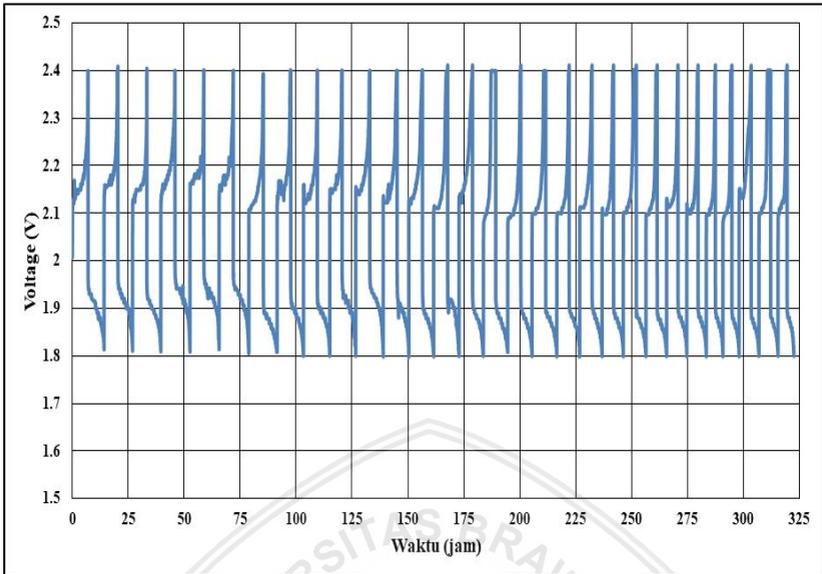
Penurunan performa baterai dapat ditandai dengan terjadinya penurunan jumlah kapasitas atau muatan yang dapat disimpan oleh baterai. Penurunan performa ini berlangsung hingga baterai mengalami kegagalan sistem (*system failure*). Kegagalan baterai

repository.ub.ac.id

dapat terjadi karena adanya fenomena reduksi dari timbal dioksida menjadi ion-ion timbal (II) yang tidak selesai secara penuh. Hal ini menyebabkan penumbuhan timbal dioksida dan timbal secara bertahap pada kedua elektroda seiring bertambahnya siklus. Akibatnya konsentrasi Pb^{2+} mengalami penurunan dan terjadi peningkatan konsentrasi proton seiring bertambahnya spesies aktif dari timbal (II) yang terakumulasi pada elektroda maupun menjadi endapan timbal dioksida yang tidak dapat larut kembali menjadi Pb^{2+} . Fenomena inilah yang dapat membuat baterai mengalami kegagalan yang diakibatkan oleh sedikitnya kandungan timbal (II) pada elektrolit maupun hubungan arus pendek (*short-circuits*) pada kedua elektroda (Oury dkk., 2012).

4.3 Analisis siklus pengisian-pengosongan baterai dinamis dengan luasan elektroda 337,5 cm²

Pada penelitian tentang analisis siklus *charging-discharging* baterai dinamis asam timbal, digunakan luasan permukaan elektroda yang spesifik. Perlu diketahui bahwa 1 plat elektroda memiliki ukuran luas permukaan sebesar 67,5 cm². Sedangkan pada penelitian ini digunakan luasan 5 pelat elektroda dengan total luas permukaan sebesar 337,5 cm² untuk masing-masing elektroda positif maupun negatif. Untuk selanjutnya variasi ini disebut dengan luasan 2 (**L2**). Baterai yang digunakan pada penelitian bersifat satu sel atau sel tunggal, sehingga baterai dinamis asam timbal pada penelitian ini hanya terdiri dari 1 pasang elektroda positif dan negatif. Total volume elektrolit yang digunakan selama proses siklus baterai dinamis asam timbal ini adalah sebesar 600 ml. Laju aliran elektrolit yang masuk maupun keluar dari sel baterai adalah sebesar 9 ml/menit.



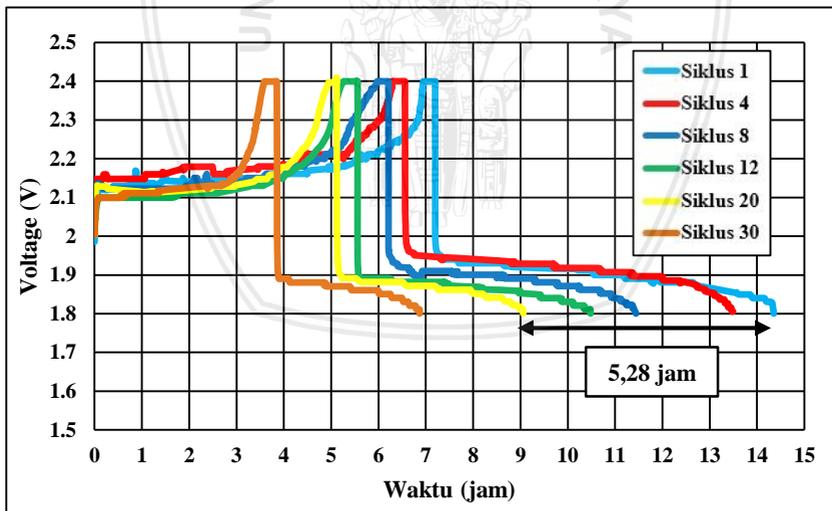
Gambar 4.10 Grafik proses pengisian-pengosongan baterai dinamis luasan $L2$ (siklus 1-30).

Pada penelitian ini dilakukan proses pengujian siklibilitas (pengisian-pengosongan) baterai dinamis asam timbal dengan luasan $L2$ sebanyak 30 siklus pertama seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.10. Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa karakteristik pengisian-pengosongan baterai masih berlangsung serupa dengan karakteristik baterai asam timbal pada baterai dinamis dengan luasan $L1$. Grafik tersebut memperlihatkan karakteristik pengisian-pengosongan yang masih normal dari siklus ke 1 hingga siklus ke 30. Namun terjadi penurunan secara drastis dari durasi waktu proses pengisian-pengosongan muatan baterai pada siklus ke 30 dibandingkan dengan siklus ke 1. Penurunan durasi ini juga berakibat pada penurunan jumlah kapasitas baterai yang dapat disimpan serta dikeluarkan dari sistem baterai. Berikut ini adalah Tabel 4.2 berisi data durasi waktu, kapasitas, serta arus dari siklus ke 1 hingga siklus ke 30 baterai dinamis asam timbal dengan luasan elektroda $L2$ pada penelitian ini.

Tabel 4.2 Nilai karakteristik baterai dinamis asam timbal luasan $L2$

Siklus ke-	t_c (jam)	t_{DC} (jam)	I_c (A)	I_{DC} (A)	C_c (mAh)	C_{DC} (mAh)
1	7,19	7,15	1	0,99	7141	7155
2	6,78	6,55	1	0,99	6678	6571
3	6,67	6,25	1	0,99	6408	6285
4	6,32	6,71	1	0,99	6380	6706
5	6,20	6,82	1	0,99	6254	6815
6	6,32	6,93	1	0,99	6346	6912
7	6,52	6,10	1	0,99	6523	6147
8	6,10	5,70	1	0,99	6102	5692
9	6,18	5,56	1	0,99	6128	5539
10	5,50	6,13	1	0,99	5712	6212
11	6,27	6,01	1	0,99	6274	5985
12	6,21	5,23	1	0,99	6167	5217
13	6,12	5,00	1	0,99	6097	4966
14	6,26	5,07	1	0,99	6229	5059
15	6,20	4,86	1	0,99	6026	4845
16	5,52	5,37	1	0,99	5459	5366
17	5,83	5,00	1	0,99	5814	4984
18	6,16	4,92	1	0,99	6149	4907
19	5,52	4,70	1	0,99	5499	4687
20	5,52	4,51	1	0,99	5421	4495
21	5,10	4,37	1	0,99	5070	4353
22	5,82	4,32	1	0,99	5812	4306
23	5,02	4,18	1	0,99	4943	4163
24	5,11	3,95	1	0,99	5117	3927
25	5,04	3,69	1	0,99	5030	3642
26	4,06	3,34	1	0,99	4038	3334
27	4,02	3,25	1	0,99	3971	3235
28	5,37	3,50	1	0,99	5375	3487
29	5,22	3,30	1	0,99	5285	3292
30	4,06	3,02	1	0,99	3965	3006

Berdasarkan tabel 4.2 terlihat bahwa nilai kapasitas pengisian dan pengosongan baterai pada siklus 1 adalah sebesar 7141 mAh dan 7155 mAh. Pada siklus ke 2 dan seterusnya nilai kapasitas pengisian turun dan stabil dalam rentang 6000-6600 mAh hingga siklus ke 15. Pada kondisi baterai telah melakukan pengujian siklibilitas hingga siklus ke 15 belum terjadi kegagalan sistem (*system failure*) karena baterai masih sanggup melakukan proses pengisian dengan besar kapasitas >70% dari kapasitas awal baterai. Selanjutnya nilai kapasitas turun drastis menjadi 4038 mAh pada siklus ke 26. Pada keadaan ini baterai dapat dikatakan mengalami kegagalan. Pada siklus ke 30, nilai kapasitas pengisian adalah sebesar 3965 mAh. Hal ini terjadi diakibatkan oleh keadaan baterai yang mulai mengalami penurunan performa serta kegagalan sistem (*system failure*), sehingga dapat dikatakan bahwa baterai asam dinamis asam timbal dengan luasan *L2* dalam penelitian ini mengalami kegagalan sistem setelah siklus ke 25. Kegagalan sistem baterai tidak berarti bahwa baterai rusak, namun perlu dilakukan perawatan (*maintenance*) sehingga baterai dapat kembali ke performa semula.

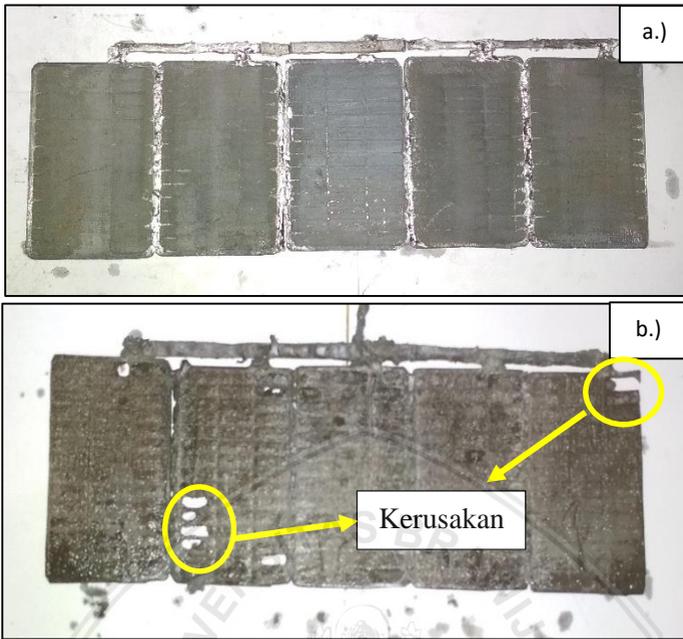


Gambar 4.11 Perbandingan grafik siklus proses pengisian-pengosongan baterai dinamis luasan *L2*.

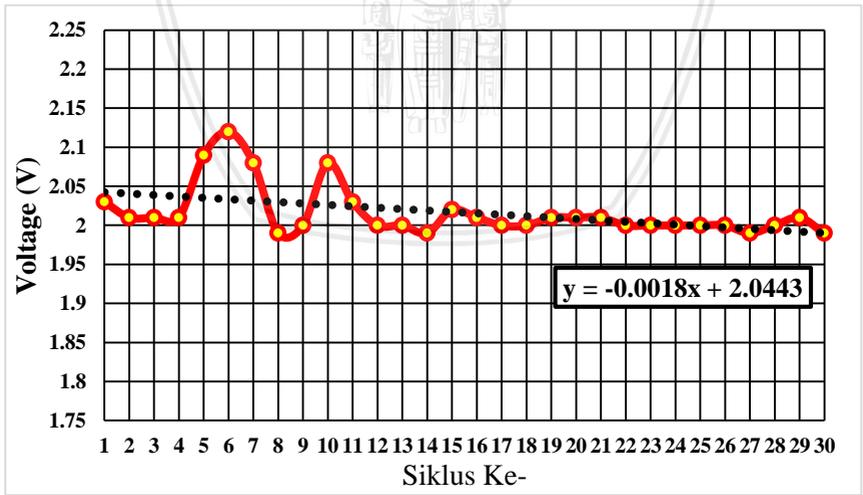
repository.ub.ac.id

Pada Gambar 4.11 menunjukkan perbandingan kurva grafik proses pengisian-pengosongan baterai dinamis asam timbal dengan luasan **L2** pada siklus 1, 6, 12, 18, 24 dan 30. Pada Gambar 4.14 terlihat bahwa semakin banyak siklus yang telah dilakukan maka durasi waktu proses akan berkurang secara signifikan. Terlihat pada siklus 1, durasi waktu proses satu siklus membutuhkan waktu sebesar 14,34 jam. Pada siklus 24 durasi waktu proses satu siklus membutuhkan waktu sebesar 9,06 jam. Durasi waktu siklus ke 24 ini lebih pendek sebesar 36,8% jam dibandingkan dengan siklus ke 1. Pada siklus ke 25 baterai telah mencapai kondisi akhir hidup karena setelah siklus ke 25 kapasitas baterai sudah turun hingga <70%. Hal ini menunjukkan adanya *trendline* atau kecenderungan bahwa semakin banyak siklus yang telah dilakukan, durasi waktu proses 1 siklus semakin pendek. Fenomena ini juga akan mempengaruhi jumlah kapasitas pengisian maupun pengosongan. Hal ini serupa dengan karakteristik baterai dinamis dengan luasan **L1**.

Sebagaimana pada baterai dinamis luasan **L1**, penurunan performa baterai dinamis **L2** dapat ditandai dengan terjadinya penurunan jumlah kapasitas atau muatan yang dapat disimpan oleh baterai. Penurunan performa ini berlangsung hingga baterai mengalami kegagalan sistem (*system failure*). Pada Gambar 4.12a terlihat kondisi elektroda Pb^{2+} sebelum dilakukan proses pengujian siklibilitas yang masih utuh. Setelah proses pengujian selama 30 siklus, kondisi elektroda Pb^{2+} mengalami kerusakan yang cukup parah (Gambar 4.12b). Hal ini ini serupa dengan baterai dinamis dengan luasan elektroda **L1** yang telah diuji.



Gambar 4.12 Kondisi elektroda Pb a.) sebelum pengujian b.) setelah pengujian 30 siklus.



Gambar 4.13 Grafik *trendline* tegangan awal proses pengosongan (V_0) baterai dinamis luasan L2.

Selain karakteristik pengisian-pengosongan baterai, performa baterai juga dapat dianalisa dari nilai tegangan awal (V_o) proses pengosongan. Pada proses pengosongan, baterai akan mengeluarkan energi berupa muatan listrik hingga nilai tegangan minimum proses pengosongan. Apabila tegangan minimum proses pengosongan telah tercapai maka baterai dapat dikatakan telah selesai melakukan proses pengosongan. Apabila proses pengosongan terus dilakukan hingga melewati batas nilai tegangan minimum akan dapat menyebabkan kerusakan pada baterai dan mengurangi kapasitas yang dapat disimpan oleh baterai pada proses pengisian. Tegangan minimum pada proses pengosongan baterai asam timbal pada penelitian ini telah ditetapkan dan di *set* secara default sebesar 1,80 V oleh alat *Turnigy Accucell 6*.

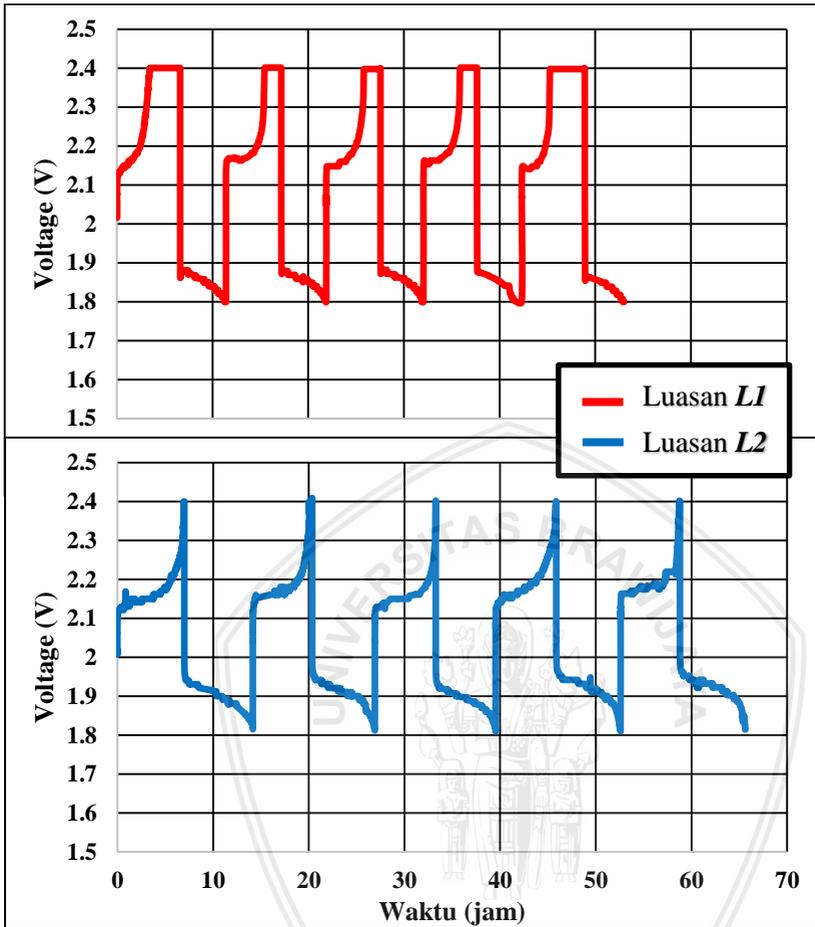
Pada Gambar 4.13 terlihat adanya kecenderungan atau *trendline* nilai tegangan awal proses pengosongan siklus 1-30 baterai dinamis luasan **L2**. *Trendline* tersebut membentuk suatu persamaan linear yang dapat digunakan untuk memperkirakan akhir dari masa hidup (*end of life*) baterai dinamis asam timbal. Kita asumsikan bahwa akhir masa hidup baterai terjadi ketika nilai tegangan awal proses pengosongan sama dengan nilai tegangan minimum baterai yaitu sebesar 1,80 V. Maka berdasarkan persamaan *trendline* tegangan awal proses pengosongan baterai dinamis asam timbal pada penelitian ini akan dapat bertahan hingga kurang lebih 137 siklus. Jumlah estimasi siklus baterai dinamis asam timbal tersebut dapat bertambah apabila nilai batas tegangan minimum yang digunakan adalah dibawah 1,8 V, namun resiko baterai mengalami kerusakan juga akan semakin besar. Selain itu, apabila baterai diberikan perlakuan proses pengosongan hingga nilai dibawah 1,8 V maka akan memperpendek umur hidup baterai.

4.4 Perbandingan baterai dinamis asam timbal luasan **L1** & **L2**

Gambar 4.14 menunjukkan grafik hubungan nilai tegangan terhadap waktu selama 5 siklus pertama pengujian siklusabilitas dengan luasan elektroda **L1** dan **L2**. Terlihat bahwa pada Gambar 4.14, grafik yang dihasilkan memiliki perbedaan durasi waktu proses dikarenakan penggunaan luasan elektroda yang berbeda. Grafik tersebut menunjukkan bahwa luasan **L2** memiliki durasi waktu proses pengosongan dan pengisian yang lebih lama daripada luasan

L1. Hal ini menunjukkan bahwa luasan elektroda akan mempengaruhi banyaknya muatan yang dapat tersimpan dalam baterai. Apabila luasan elektroda yang digunakan semakin luas, maka material aktif yang akan bereaksi dengan elektrolit juga akan semakin banyak. Hal ini menyebabkan reaksi yang terjadi didalam sel baterai juga akan semakin banyak dan akan mempengaruhi jumlah kapasitas baterai yang dapat disimpan serta dikeluarkan dari baterai. Jumlah kapasitas yang dapat disimpan maupun dikeluarkan oleh baterai akan mempengaruhi waktu proses pengisian baterai. sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar luasan elektroda yang digunakan pada baterai, maka kapasitas yang dapat tersimpan juga akan semakin besar pula. Hal tersebut juga telah dijelaskan oleh Aditya (2016) dan Long dkk (2017) bahwa semakin besar luasan elektroda pada sel baterai maka jumlah reaksi antara material aktif elektroda dan elektrolit pada baterai juga bertambah banyak dan kapasitas penyimpanan maupun pengosongan baterai akan semakin besar pula.

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa nilai tegangan tengah pada saat proses pengisian baterai (V_{MC}) dengan luasan elektroda **L1** memiliki nilai yang lebih tinggi daripada baterai dengan luasan elektroda **L2**. Nilai rata-rata V_{MC} baterai dengan luasan **L1** untuk 5 siklus pertama adalah 2,26 V. Nilai tersebut lebih tinggi sebesar 4,3% dari nilai V_{MC} baterai dengan luasan **L2** yaitu 2,16 V. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin besar luasan elektroda yang digunakan maka nilai V_{MC} juga akan semakin rendah. Semakin rendahnya nilai V_{MC} dari suatu baterai berarti kenaikan beda potensial akan semakin lambat, sehingga waktu yang dibutuhkan oleh baterai untuk mencapai nilai tegangan maksimum (V_{Max}) 2,4 V juga akan semakin lama. Karena durasi menuju kondisi V_{Max} pada proses pengisian yang semakin lama maka kapasitas muatan listrik yang dapat disimpan didalam baterai akan semakin banyak.



Gambar 4.14 Perbandingan karakteristik baterai dinamis asam timbal proses pengisian-pengosongan luasan *L1* & *L2* (siklus 1-5).

Tabel 4.3 Perbandingan nilai karakteristik baterai dinamis asam timbal luasan **L1** & **L2** (5 siklus pertama)

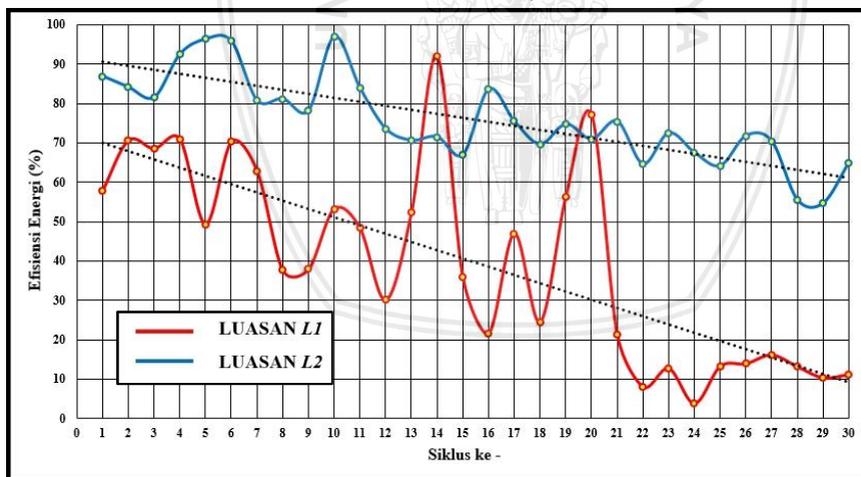
Karakteristik baterai		Siklus 1	Siklus 2	Siklus 3	Siklus 4	Siklus 5	Rata-rata
L1	V_{MC} (V)	2,36	2,18	2,18	2,2	2,39	2,26
	V_{MDC} (V)	1,85	1,85	1,85	1,84	1,85	1,84
	C_C (mAh)	4931	4874	4726	4583	4455	4714
	C_D (mAh)	4775	4683	4471	4652	4103	4537
L2	V_{MC} (V)	2,15	2,17	2,16	2,18	2,18	2,16
	V_{MDC} (V)	1,9	1,91	1,9	1,92	1,93	1,91
	C_C (mAh)	7141	6678	6408	6380	6254	6572
	C_D (mAh)	7155	6571	6285	6706	6815	6706

Berbeda halnya dengan proses pengisian, pada proses pengosongan nilai tegangan tengah (V_{MDC}) pada luasan **L2** memiliki nilai yang lebih tinggi daripada luasan **L1**. Pada luasan **L2** memiliki nilai rata-rata V_{MDC} sebesar 1,91 V untuk 5 siklus pertama. Nilai tersebut lebih tinggi 3,8 % daripada nilai V_{MDC} dari baterai dengan luasan **L1** yaitu 1,84 V. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin besar luasan elektroda yang digunakan maka nilai V_{MDC} juga akan semakin tinggi. Semakin tingginya nilai V_{MDC} dari suatu baterai berarti penurunan tegangan baterai pada proses pengosongan akan semakin lambat, sehingga waktu yang dibutuhkan oleh baterai untuk mencapai nilai tegangan minimum (V_{min}) 1,8 V juga akan semakin lama. Karena durasi menuju kondisi V_{min} pada proses pengosongan yang semakin lama maka kapasitas muatan listrik yang dapat dikeluarkan dari dalam baterai akan semakin banyak. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar luasan elektroda maka baterai dapat mempertahankan nilai tegangannya dalam waktu yang cukup lama. Lamanya baterai dalam

mempertahankan tegangannya ini dipengaruhi karena banyaknya muatan yang tersimpan pada proses pengisian. Semakin banyak muatan yang tersimpan pada proses pengisian maka proses pengosongan muatan pada baterai juga akan semakin lama.

4.5 Efisiensi energi dan kapasitas baterai dinamis asam timbal

Salah satu jenis parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas serta performa baterai adalah efisiensi baterai. Efisiensi baterai merupakan suatu nilai perbandingan dari nilai proses pengosongan terhadap proses pengisian. Penentuan dan pengukurannya nilai efisiensi baterai dibagi menjadi 3 aspek berbeda yaitu *Coulumbic efficiency (CE)*, *Voltage efficiency (VE)*, dan *Energy efficiency (EE)* yang dituliskan pada persamaan 2.3, 2.4 dan 2.5. Efisiensi tegangan (*VE*) merupakan rasio perbandingan nilai tegangan tengah antara proses pengisian dan pengosongan. Efisiensi coulomb (*CE*) merupakan rasio perbandingan banyaknya muatan yang keluar pada proses pengosongan terhadap banyaknya muatan yang tersimpan selama proses pengisian. Efisiensi energi (*EE*) merupakan hasil kali dari kedua nilai efisiensi sebelumnya ($CE \times VE$).



Gambar 4.15 Perbandingan nilai efisiensi energi pada baterai dinamis asam timbal luasan *L1* & *L2*

Pada Gambar 4.15 terlihat bahwa nilai efisiensi energi dari siklus 1-30 untuk luasan *L1* dan *L2* memiliki grafik kecenderungan

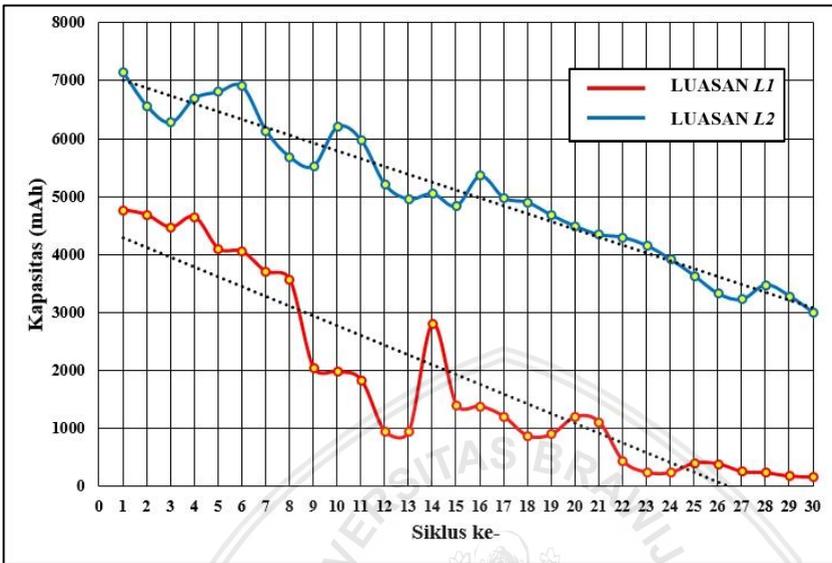
yang hampir sama. Terlihat bahwa pada luasan **L2**, nilai efisiensi energi cenderung turun seiring bertambahnya siklus yang telah terlampaui. Hal ini membuktikan bahwa semakin banyak siklus yang telah terlampaui maka performa baterai juga akan berangsur-angsur turun hingga batas baterai sudah dalam kondisi tidak layak. Pada luasan **L2**, nilai rata-rata efisiensi energi baterai yang diperoleh adalah sebesar 75,9%.

Untuk luasan **L1** juga terlihat kecenderungan nilai efisiensi energi yang hampir sama seperti luasan **L2**. Namun terjadi lonjakan nilai efisiensi energi yang besar pada siklus ke siklus 14 dan 20. Hal ini terjadi karena adanya proses *self recovery* atau mekanisme baterai untuk mengembalikan kondisi baterai seperti semula. Hal ini terjadi apabila setelah proses pengosongan muatan, baterai tidak segera diisi ulang. Akibatnya baterai memiliki waktu yang cukup untuk menyusun kembali kesetimbangannya sehingga baterai akan berangsur-angsur kembali menuju ke performa awal. Namun baterai tetap tidak akan kembali seperti kondisi performa awal baterai dikarenakan sudah dilakukan beberapa kali siklus pengisian-pengosongan yang akan mengurangi performa baterai. Nilai efisiensi energi rata-rata yang diperoleh pada luasan **L1** adalah 39,7%.

Berdasarkan Gambar 4.15 terlihat bahwa perbandingan nilai efisiensi energi untuk kedua luasan elektroda memiliki nilai rata-rata yang berbeda. Secara garis besar nilai efisiensi energi luasan **L2** memiliki nilai yang lebih tinggi daripada luasan **L1**. Hal ini terjadi karena jumlah luasan yang lebih sedikit pada **L1** dengan volume total elektrolit yang sama seperti **L2** menyebabkan elektroda banyak bereaksi. Namun hal ini justru semakin memperberat kerja elektroda sehingga banyak material aktif yang tidak dapat kembali ke elektroda dan menimbulkan endapan hitam di bagian dasar sel baterai. Oleh karena itu nilai efisiensi energi luasan **L1** lebih kecil dari luasan **L2**.

Pada Gambar 4.16 terlihat bahwa nilai kapasitas pengosongan dari siklus 1-30 untuk luasan **L1** dan **L2** memiliki grafik kecenderungan yang hampir sama. Terlihat bahwa pada luasan **L2**, nilai kapasitas cenderung turun seiring bertambahnya siklus yang telah terlampaui. Hal ini membuktikan bahwa semakin banyak siklus yang telah terlampaui maka performa baterai dalam mengeluarkan muatan juga akan berangsur-angsur turun hingga batas baterai sudah dalam kondisi tidak layak. Pada luasan **L2**, nilai rata-rata kapasitas

yang dapat dikeluarkan oleh baterai dai siklus ke-1 sampai 30 adalah sebesar 5043 mAh.



Gambar 4.16 Perbandingan kapasitas pengosongan pada baterai dinamis asam timbal luasan *L1* & *L2*

Untuk luasan *L1* juga terlihat kecenderungan nilai kapasitas pengosongan yang hampir sama seperti luasan *L2*. Namun terjadi lonjakan nilai kapasitas pengosongan yang besar pada siklus ke-14 dibandingkan dengan siklus ke-13. Hal ini terjadi karena adanya proses *self recovery* atau mekanisme baterai untuk mengembalikan kondisi baterai seperti semula sehingga baterai dapat menyimpan muatan lebih banyak daripada siklus sebelumnya. Akibatnya pada proses pengosongan, baterai mampu mengeluarkan kapasitas yang lebih tinggi dari siklus sebelumnya. Hal ini terjadi apabila setelah proses pengosongan muatan, baterai tidak segera diisi ulang. Akibatnya baterai memiliki waktu yang cukup untuk menyusun kembali kesetimbangannya sehingga baterai akan berangsur-angsur kembali menuju ke performa awal. Namun baterai tetap tidak akan kembali seperti kondisi performa awal baterai dikarenakan sudah dilakukan beberapa kali siklus pengisian-pengosongan yang akan mengurangi performa baterai. Nilai kapasitas pengosongan rata-rata yang diperoleh pada luasan *L1* adalah 1846 mAh.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dan data yang diperoleh maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Berdasarkan uji siklibilitas baterai pada arus konstan 1 A diperoleh grafik pengisian (*charging*) dimana tegangan naik secara cepat diawal pengisian dan mengalami kenaikan yang lambat setelahnya hingga tetap pada akhir pengisian dengan nilai tegangan akhir 2,4 V. Tegangan pengosongan turun drastis diawal pengosongan dan turun perlahan sampai mencapai 1,8 V. Kapasitas baterai naik secara konstan pada pengisian dan turun secara konstan pada pengosongan saat arus konstan 1 A mengalir di dalam sirkuit.
2. Berdasarkan hasil pengujian siklibilitas diketahui semakin luas ukuran elektroda diperoleh waktu hidup lebih lama. Baterai **L2** dengan luasan 337,5 cm² berhasil bertahan hingga 25 siklus sementara baterai **L1** dengan luasan 202,5 cm² berhasil bertahan hingga 8 siklus.
3. Penambahan jumlah siklus pengisian-pengosongan terbukti menurunkan performa pada baterai dinamis asam timbal. Berdasarkan hasil pengujian, dengan luasan 337,5 cm² (**L2**) diperoleh nilai kapasitas dan efisiensi energi rata-rata dari siklus ke-1 hingga 30 masing-masing sebesar 5043 mAh dan 75,9%. Sedangkan untuk luasan 202,5 cm² (**L1**) memiliki efisiensi rata-rata 39,7% dan kapasitas rata-rata sebesar 1846 mAh.

5.2 Saran

1. Hendaknya dilakukan pengujian XRD maupun SEM untuk mengetahui kandungan unsur yang terdapat pada endapan di dasar sel baterai.
2. Perlu dilakukan penelitian dengan variasi jarak antar elektroda untuk mengetahui pengaruh besar jarak terhadap reaksi redoks pada baterai dinamis.

3. Perlu dilakukannya penelitian untuk mengetahui arus efektif pengisian maupun pengosongan pada masing-masing luasan elektroda.
4. Perlu dilakukan penelitian dengan variasi besar DOD untuk mengetahui pengaruhnya terhadap penurunan performa baterai dinamis.



DAFTAR PUSTAKA

- Arenas, L. F., Ponce de León, C. dan Walsh, F. C. (2017) “Engineering aspects of the design, construction and performance of modular redox flow batteries for energy storage,” *Journal of Energy Storage*. Elsevier Ltd, 11(March), hal. 119–153. doi: 10.1016/j.est.2017.02.007.
- Bindner, H., T.Cronin, P. Lundsager dan Manwell, J. F. (2005) *Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries, Contract*. Tersedia pada: <http://130.226.56.153/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1515.pdf>.
- Collins, J., G, Kear dan X, Li . (2010a) “A novel flow battery: A lead acid battery based on an electrolyte with soluble lead(II) Part IX. Electrode and electrolyte conditioning with hydrogen peroxide,” *Journal of Power Sources*. Elsevier B.V., 195(9), hal. 2975–2978. doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.09.044.
- Collins, J., J., G, Kear dan X, Li. (2010b) “A novel flow battery: A lead acid battery based on an electrolyte with soluble lead(II) Part VIII. The cycling of a 10 cm x 10 cm flow cell,” *Journal of Power Sources*, 195(6), hal. 1731–1738. doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.09.044.
- Divya, K. dan Ostergaard, J. (2009) “Battery energy storage technology for power systems—An overview,” *Electric Power System Research*. Elsevier B.V, 79(4), hal. 511–520. doi: 10.1016/j.epsr.2008.09.017.
- Dufo-López, R., Lujano-Rojas, J. M. dan Bernal-Agustín, J. L. (2014) “Comparison of different lead-acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems,” *Applied Energy*, 115, hal. 242–253. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.11.021.
- Ghufron, M. dan Kurriawan, Pranata B. 2017. *The 7th Basic Science International Conference*. Proceedings book. 3:44-47

- repository.ub.ac.id
- Herman, D. Z. (2006) “Tinjauan terhadap tailing mengandung unsur pencemar Arsen (As), Merkuri (Hg), Timbal (Pb), dan Kadmium (Cd) dari sisa pengolahan bijih logam,” *Indonesian Journal on Geoscience*, 1(1), hal. 31–36. Tersedia pada: <http://ijog.bgl.esdm.go.id>.
- Hudaya, C. (2008) *Peranan Riset Baterai Sekunder dalam Mendukung Penyediaan Energi Bersih Di Indonesia 2025*. Korea Institute of Science and Technology.
- Knudsen, E., P, Albertus, K, Cho dan Weber, A.Z. (2015) “Flow simulation and analysis of high-power flow batteries,” *Journal of Power Sources*. Elsevier B.V, 299, hal. 617–628. doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.08.041.
- Krishna, M., Wall, L.P.J., Will, R.G.A. dan Hall, D. (2017) “Measurement of key electrolyte properties for improved performance of the soluble lead flow battery,” *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 42(29), hal. 18491–18498. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.004.
- Leung, P., Shah, A. A., Sanz, L., Fox, C. dan Mohammed, M.R. (2017) “Recent developments in organic redox flow batteries: A critical review,” *Journal of Power Sources*, 360, hal. 243–283. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.05.057.
- Li, Q., Liu, Y., S, Guo dan H, Zhou. (2017) “Solar energy storage in the rechargeable batteries,” *Nano Today*, 16, hal. 46–60. doi: 10.1016/j.nantod.2017.08.007.
- Li, Z., Weng, G., Zou, Q., Chong, G. dan Lu, Y. C. (2016) “A high-energy and low-cost polysulfide/iodide redox flow battery,” *Nano Energy*, 30(August), hal. 283–292. doi: 10.1016/j.nanoen.2016.09.043.
- Long, Q., Ma, G., Yu, Q., Li, A. dan Nan, J. (2017) “Improving the cycle life of lead-acid batteries using three-dimensional

- reduced graphene oxide under the high-rate partial-state-of-charge condition,” *Journal of Power Sources*. Elsevier B.V, 343, hal. 188–196. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.01.056.
- Lujano-Rojas, J. M., R. Dufo-Lopez dan J. Atencio-Guerra. (2016) “Operating conditions of lead-acid batteries in the optimization of hybrid energy systems and microgrids,” *Applied Energy*. Elsevier Ltd, 179, hal. 590–600. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.018.
- May, G. J., Davidson, A. dan Monahov, B. (2018) “Lead batteries for utility energy storage: A review,” *Journal of Energy Storage*. Elsevier Ltd, 15, hal. 145–157. doi: 10.1016/j.est.2017.11.008.
- Noack, J., L. Wietschel, N. Rozyyatovskaya dan K. Pinkwark. (2016) “Techno-economic modeling and analysis of redox flow battery systems,” *Energies*, 9(8). doi: 10.3390/en9080627.
- Oury, A., A. Kirchev, Y. Buitel dan E. Chainet. (2012) “PbO₂/Pb₂+cycling in methanesulfonic acid and mechanisms associated for soluble lead-acid flow battery applications,” *Electrochimica Acta*. Elsevier Ltd, 71, hal. 140–149. doi: 10.1016/j.electacta.2012.03.116.
- Ramsey, B. (2001) “Battery basics.,” *Occupational health & safety (Waco, Tex.)*, 70(11), hal. 34–36.
- Satriady, A., W. Alamsyah, A. Saad dan S. Hidayat. (2016) “PENGARUH LUAS ELEKTRODA TERHADAP KARAKTERISTIK BATERAI LiFePO₄,” *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, 6(2), hal. 43–48.
- Sun, Z., H. Cao, X. Zhang dan X. Liao. (2017) “Spent lead-acid battery recycling in China – A review and sustainable analyses on mass flow of lead,” *Waste Management*. Elsevier Ltd, 64(1), hal. 190–201. doi: 10.1016/j.wasman.2017.03.007.

Suyanta, Dr. (2013). *Redoks dan elektrokimia*. Modul PLPG Kimia. Bandung.

Tian, X., Y. Wu, P. Hou, S. Liang, S. Qu, M. Xu dan T. Zuo. (2017) "Environmental impact and economic assessment of secondary lead production: Comparison of main spent lead-acid battery recycling processes in China," *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 144, hal. 142–148. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.171.

Weber, A. Z., M. Mench, J. Meyers, P. Ross, J. Gostick dan Q. Liu. (2011) "Redox flow batteries: A review," *Journal of Applied Electrochemistry*, 41(10), hal. 1137–1164. doi: 10.1007/s10800-011-0348-2.

Wei, L., T. Zhao, L. Zheng, X. Zhou dan Y. Zheng . (2016) "Copper nanoparticle-deposited graphite felt electrodes for all vanadium redox flow batteries," *Applied Energy*. Elsevier Ltd, 180, hal. 386–391. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.134.

White, C., Deveau, J., Swan dan L. G. (2016) "Evolution of internal resistance during formation of flooded lead-acid batteries," *Journal of Power Sources*. Elsevier B.V, 327, hal. 160–170. doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.020.

Wills, R. G. A., J. Collins, D. Stratton-Campbell, C. Low, D. Pletcher dan F. Walsh. (2010) "Developments in the soluble lead-acid flow battery," *Journal of Applied Electrochemistry*, 40(5), hal. 955–965. doi: 10.1007/s10800-009-9815-4.

You, X., Ye, Q. dan Cheng, P. (2016) "Scale-up of high power density redox flow batteries by introducing interdigitated flow fields," *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Elsevier Ltd, 75, hal. 7–12. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.03.021.

Zeng, Y. K., T. Zhao, L. An, X. Zhou dan L. Wei. (2015) "A comparative study of all-vanadium and iron-chromium redox flow batteries for large-scale energy storage," *Journal of*

Power Sources, 300, hal. 438–443. doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.09.100.

Zhang, C. P., S. Sharkh, X. Li, F. Walsh, C. N. Zhang dan J. Jiang. (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.

Zhou, X. L., T. Zhao, L. An, Y. Zeng dan X. Yan. (2015) “A vanadium redox flow battery model incorporating the effect of ion concentrations on ion mobility,” *Applied Energy*, 158, hal. 157–166. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.028.





(Halaman ini sengaja dikosongkan)