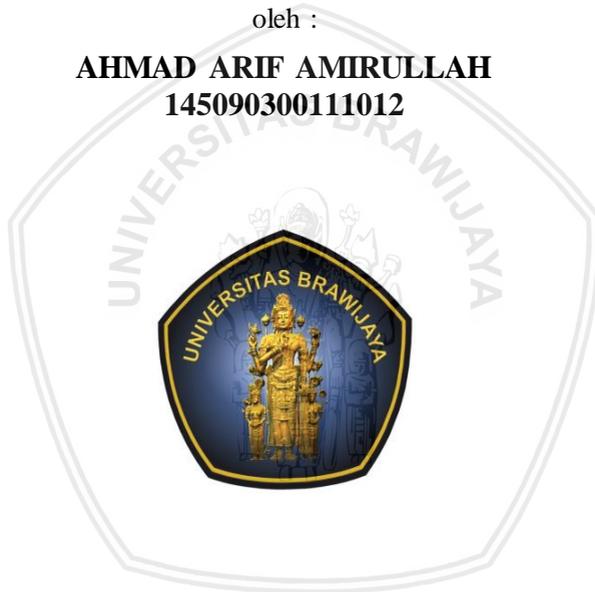


**PENGARUH PERBEDAAN LUAS PERMUKAAN
ELEKTRODA Pb-PbO₂ TERHADAP KARAKTERISTIK
BATERAI DINAMIS (*REDOX FLOW BATTERY*)
DENGAN H₂SO₄ SEBAGAI ELEKTROLIT**

SKRIPSI

oleh :

**AHMAD ARIF AMIRULLAH
145090300111012**



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

repository.ub.ac.id

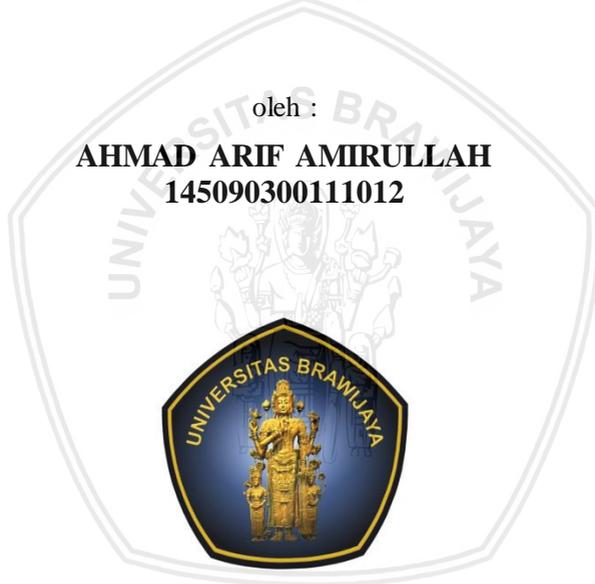
**PENGARUH PERBEDAAN LUAS PERMUKAAN
ELEKTRODA Pb-PbO₂ TERHADAP KARAKTERISTIK
BATERAI DINAMIS (*REDOX FLOW BATTERY*)
DENGAN H₂SO₄ SEBAGAI ELEKTROLIT**

SKRIPSI

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

oleh :

AHMAD ARIF AMIRULLAH
145090300111012



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

UNIVERSITAS
BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PENGARUH PERBEDAAN LUAS PERMUKAAN
ELEKTRODA Pb-PbO₂ TERHADAP KARAKTERISTIK
BATERAI DINAMIS (*REDOX FLOW BATTERY*)
DENGAN H₂SO₄ SEBAGAI ELEKTROLIT**

oleh :

AHMAD ARIF AMIRULLAH
145090300111012

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

Dr. Istirovah, S.Si.,MT
NIP.197408151999032002

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Prof.Dr.rer.nat Muhammad Nurhuda
NIP. 196409101990021001



IDENTITAS TIM PERNGUJI

Judul Skripsi : Pengaruh Perbedaan Luas Permukaan Elektroda Pb-Pbo₂ terhadap Karakteristik Baterai Dinamis (*Redox Flow Battery*) dengan H₂SO₄ sebagai Elektrolit

Nama Mahasiswa : Ahmad Arif Amirullah

NIM : 145090300111012

Program Studi S1 : Fisika

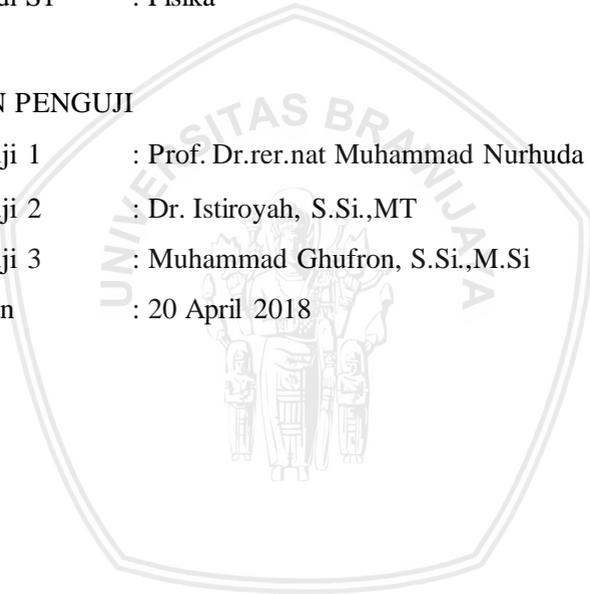
TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Prof. Dr.rer.nat Muhammad Nurhuda

Dosen Penguji 2 : Dr. Istiroyah, S.Si.,MT

Dosen Penguji 3 : Muhammad Ghufron, S.Si.,M.Si

Tanggal Ujian : 20 April 2018





LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Ahmad Arif Amirullah
NIM : 145090300111012
Jurusan : Fisika
Penulis Skripsi berjudul :

**“PENGARUH PERBEDAAN LUAS PERMUKAAN
ELEKTRODA Pb-PbO₂ TERHADAP KARAKTERISTIK
BATERAI DINAMIS (*REDOX FLOW BATTERY*) DENGAN
H₂SO₄ SEBAGAI ELEKTROLIT”**

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, 20 April 2018
Yang menyatakan,

(Ahmad Arif Amirullah)
NIM. 145090300111012



Ahmad Arif
Amirullah



082333121959



Amirullah.ahmadarif56@
gmail.com



Desa Ngasem Rt.03 Rw.06
Kec. Ngajum
Malang



Biodata

Nama	Ahmad Arif Amirullah
Tanggal Lahir	27 Juni 1996
Domisili	Malang
Agama	Islam
Status	Belum Menikah

Pendidikan

2002-2008	MI MIFTAHUL HUDA
2008-2011	SMP NU RIYADLUL QUR'AN
2011-2014	SMAN 1 GONDANGLEGI
2014-hingga	UNIVERSITAS BRAWIJAYA

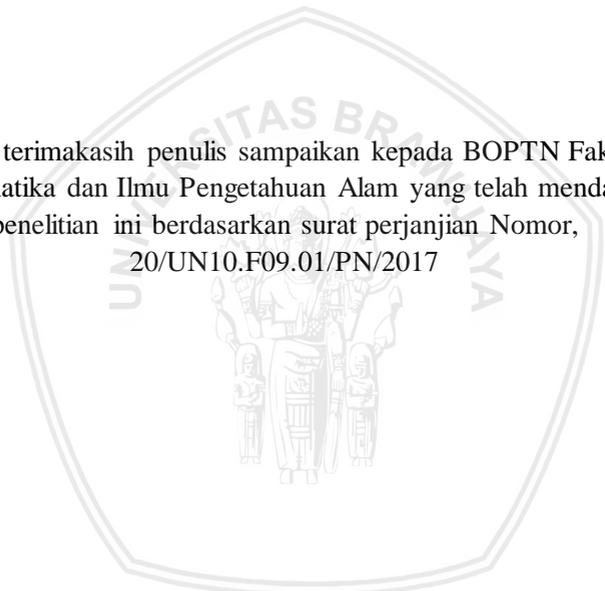
Pengalaman Organisasi

SATMENWA UB 803	Danpok 1 Anggota	2015
LOF SOBAT	Inventaris	2016

Pengalaman Kepanitiaan

HIMAFIS	Staff Keamanan PhI_Pro & PhiCO	2015
LOF SOBAT	Staff TKP Mipa League Open	2015
LOF SOBAT	Ketua Pelaksana Malam Keakraban	2016
LOF SOBAT	Ketua SOBAT Outbound	2017

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada BOPTN Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam yang telah mendanai penelitian ini berdasarkan surat perjanjian Nomor, 20/UN10.F09.01/PN/2017





repository.ub.ac.id

PENGARUH PERBEDAAN LUAS PERMUKAAN ELEKTRODA Pb-PbO₂ TERHADAP KARAKTERISTIK BATERAI DINAMIS (*REDOX FLOW BATTERY*) DENGAN H₂SO₄ SEBAGAI ELEKTROLIT

ABSTRAK

Redox Flow Battery (RFB) merupakan jenis baterai baru yang memiliki kemampuan untuk menyimpan energi yang cukup besar jika dibandingkan dengan baterai konvensional. Sistem baterai ini menggunakan pompa untuk mengalirkan elektrolit menuju sel baterai. Pada penelitian ini telah dibuat baterai dinamis (RFB) asam-timbal sel tunggal dengan variasi luasan elektroda Pb-PbO₂ sebesar (31,5x7,5) cm², (22,5x7,5) cm², dan (13,5x7,5) cm². Larutan asam sulfat (H₂SO₄) dengan konsentrasi 30% digunakan sebagai elektrolit pada baterai. Pengujian baterai dilakukan dengan metode *charge-discharge* sebanyak tiga siklus pada arus pembebanan 1 ampere yang dikontrol oleh *battery management system* (*Turnigy accucell-6*). Hasil percobaan menunjukkan bahwa kapasitas dan efisiensi baterai dinamis asam-timbal meningkat dengan bertambahnya luasnya elektroda. Berdasarkan hasil pengujian, baterai dengan ukuran elektroda (31,5x7,5) cm² memiliki kapasitas dan efisiensi energi tertinggi, masing-masing sebesar 10357 mAh dan 80,94%. Bila dibandingkan dengan baterai konvensional (elektrolit statis), kapasitas baterai dinamis lebih tinggi 869 mAh, yaitu 9488 mAh pada keadaan statis dan 10357 mAh ketika elektrolit mengalir melalui sel baterai. efisiensi energi untuk keadaan statis adalah 80,29%, lebih kecil dari keadaan dinamis dengan nilai 80,94%.

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



repository.ub.ac.id

THE EFFECT OF DIFFERENT SURFACE AREA OF Pb-PbO₂ ELECTRODE ON DYNAMIC BATTERY (REDOX FLOW BATTERY) CHARACTERISTICS WITH H₂SO₄ AS ELECTROLYTE

ABSTRACT

Redox Flow Battery (RFB) is a new type of battery that has an ability to store more energy than conventional batteries. A pump is used in the system of the battery to flow the electrolyte through the battery. In this research, single cell lead acid flow batteries (RFB) with three different electrode sizes ((31.5x7.5) cm², (22,5x7,5) cm², and (13,5x7,5) cm²) have been developed. 30% aqueous sulfuric acid is used as the electrolyte of the batteries. The battery tests were completed by a charge-discharge method for three cycles at 1 ampere load current. The tests were controlled by a battery management system (Turnigy accucell-6). Based on the experimental results, the capacity and energy efficiency of the lead acid flow battery increase along with the increasing of the electrode size. The lead-acid flow batteries have a higher capacity and energy efficiency than the conventional batteries. For the batteries with the largest electrode size, the capacity of the dynamic state (flow) battery is 10357 mAh, which is 869 mAh higher than the static state (conventional) battery's. The energy efficiency of the static state battery 80.29%, smaller than the dynamic state battery's. The dynamic state battery's energy efficiency is 80,94%.

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



KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, karena atas segala limpahan rahmat, kuasa serta inayah dan hidayah-Nya lah penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “**Pengaruh Perbedaan Luas Permukaan Elektroda Pb-PbO₂ terhadap Karakteristik Baterai Dinamis (*Redox Flow Battery*) dengan H₂SO₄ sebagai Elektrolit**”. Skripsi ini disusun berdasarkan data penelitian yang dimulai sejak Oktober 2017 hingga Januari 2018 yang didukung dengan teori dari 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 :

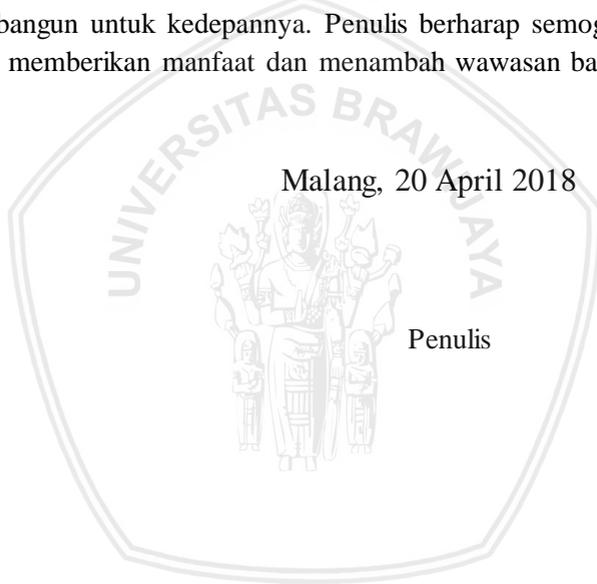
1. Kedua orang tua yang selalu memberikan dukungan baik moral maupun material dan selalu memberikan doa restu, motivasi yang tidak pernah putus dan kerja keras yang tidak mengenal asa.
2. Bapak Prof. Dr. Muhammad Nurhuda, Rer.Nat. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Brawijaya Malang.
3. Ibu Dr. Eng. Masruroh, M.Si. selaku ketua prodi Fisika.
4. Bapak Muhammad Ghufron, S.Si.,M.Si selaku dosen Pembimbing I yang senantiasa meluangkan waktu, tenaga dan pikirannya untuk memberikan arahan, motivasi dan bimbingan kepada penulis dalam proses penyelesaian skripsi ini.
5. Ibu Dr. Istiroyah, S.Si.,MT selaku dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, dukungan, kepercayaan, dan saran dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Ibu Dra. Lailatin Nuriyah, M.Si. selaku dosen pembimbing akademik atas nasehat dan dukungannya terhadap penulis.

7. Dosen-dosen jurusan fisika atas ilmu, teladan dan nasehat-nasehat bijak yang senantiasa diselipkan dalam setiap mata kuliah yang disampaikan.
8. Teman-teman seperjuangan selama ini untuk menyelesaikan penelitian Muhammad Yusmawanto, Nur Khairati, Riky Dwi Susilo, Yofinda Eka Setiawan
9. 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, 20 April 2018

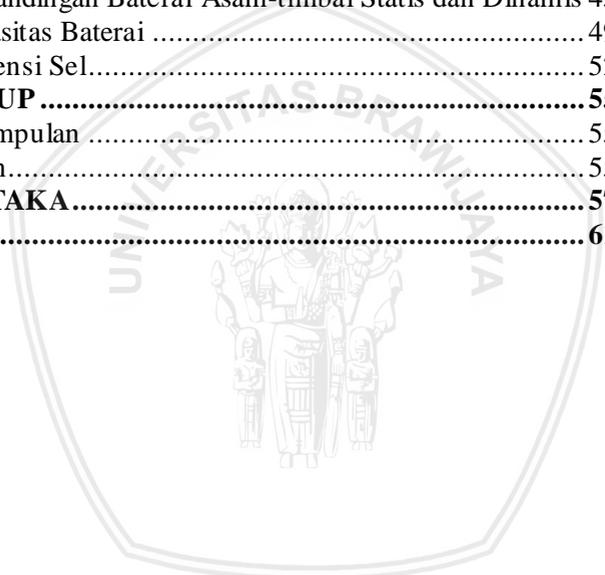
Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
LEMBAR PERNYATAAN	v
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Baterai	5
2.2 Reaksi Redoks	6
2.3 Baterai Dinamis (<i>Flow Battery</i>)	6
2.3.1 Baterai dinamis dengan dua aliran elektrolit (RFBD).....	8
2.3.2 Baterai dinamis dengan elektrolit tunggal (RFBS)	9
2.3.3 Baterai dinamis berbasis asam-timbal.....	10
2.4 Elektroda Pb dan PbO ₂	13
2.5 Elektrolit Asam Sulfat (H ₂ SO ₄).....	14
2.6 Kapasitas Baterai.....	15
2.7 Penelitian Sebelumnya	16
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	21
3.3.2 Pembuatan kerangka rancang bangun baterai dinamis asam-timbal.	23

3.3.3 Pengujian karakteristik baterai.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Karakteristik Baterai	27
4.1.1 Keadaan awal baterai.....	27
4.1.2 Karakteristik <i>charge-discharge</i> baterai asam-timbal.....	30
4.2 Perbedaan Luas Permukaan Elektroda Pb-PbO ₂ Pada Baterai Asam-timbal.....	34
4.2.1 Baterai statis asam-timbal (<i>static lead-acid battery</i>)	34
4.2.2 Baterai dinamis asam-timbal (<i>lead-acid flow battery</i>)	39
4.3 Perbandingan Baterai Asam-timbal Statis dan Dinamis	45
4.4 Kapasitas Baterai	49
4.5 Efisiensi Sel.....	52
BAB V PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA.....	57
LAMPIRAN	61



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Grafik konsumsi listrik Nasional 2011-2015	1
Gambar 2.1 Skema Baterai Dinamis (<i>flow battery</i>)	7
Gambar 2.2 Skema baterai dinamis dengan dua aliran elektrolit	9
Gambar 2.3 Skema baterai dinamis dengan satu aliran elektrolit.	10
Gambar 2.4 Skema baterai dinamis berbasis asam-timbal	11
Gambar 2.5 a) Grafik tegangan terhadap waktu saat proses charging dan discharging b) karakteristik proses discharging ...	12
Gambar 2.6 Bentuk elektroda sel.....	13
Gambar 2.7 Grafik hubungan luas elektroda terhadap kapasitas baterai Lithium-ion.....	17
Gambar 3.1 Tahapan penelitian.....	20
Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan sel elektrokimia.....	21
Gambar 3.3 Susunan elektroda dalam wadah sel	22
Gambar 3.4 Diagram alir pembuatan rancang bangun baterai	23
Gambar 3.5 Skema susunan rangkaian penelitian	24
Gambar 3.6 Diagram alir pengujian karakteristik baterai.....	25
Gambar 4.1 Tampilan <i>software chargemaster2.02</i> pada proses pengosongan baterai dinamis asam-timbal	27
Gambar 4.2 Kondisi awal baterai sebelum dilakukan pengujian.....	28
Gambar 4.3 Grafik tegangan, arus, dan kapasitas terhadap waktu pada proses pengosongan awal baterai	29
Gambar 4.4 Grafik karakteristik <i>charge-discharge</i> baterai dinamis asam timbal	31
Gambar 4.5 ilustrasi proses a) pengosongan b) pengisian	32
Gambar 4.6 Karakteristik baterai dinamis asam-timbal model Leon.....	33
Gambar 4.7 Karakteristik baterai statis asam-timbal dengan perbedaan luas permukaan elektroda Pb-PbO ₂	35
Gambar 4.8 Karakteristik baterai statis asam-timbal dengan perbedaan luas permukaan elektroda Pb-PbO ₂ selama 3 siklus.....	37
Gambar 4.9 Perbandingan nilai tegangan tengah pada baterai statis asam-timbal dengan luasan elektroda yang berbeda ...	38
Gambar 4.10 Karakteristik baterai dinamis asam-timbal dengan perbedaan luas permukaan elektroda Pb-PbO ₂	40

Gambar 4.11 Karakteristik baterai statis asam-timbal dengan perbedaan luas permukaan elektroda Pb-PbO₂ selama 3 siklus 42

Gambar 4.12 Perbandingan nilai tegangan tengah pada baterai statis asam-timbal dengan luasan elektroda yang berbeda.... 43

Gambar 4.13 Perbandingan karakteristik antara baterai asam-timbal statis dengan baterai asam timbal dinamis selama 3 siklus 46

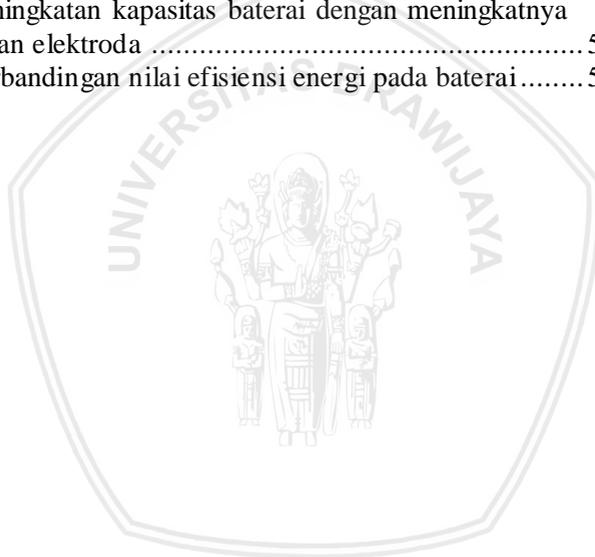
Gambar 4.14 Perbandingan nilai tegangan tengah antara baterai statis dengan baterai dinamis 47

Gambar 4.15 Perbandingan waktu pengisian-pengosongan pada baterai statis dan baterai dinamis..... 48

Gambar 4.16 Perbandingan nilai kapasitas baterai..... 50

Gambar 4.17 Peningkatan kapasitas baterai dengan meningkatnya luasan elektroda 51

Gambar 4.18 Perbandingan nilai efisiensi energi pada baterai 54



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Nilai karakterisasi baterai dinamis asam-timbal.....	32
Tabel 4.2 Penamaan variasi perbedaan luas elektroda Pb-PbO ₂	34
Tabel 4.3 Nilai karakterisasi baterai statis asam-timbal	36
Tabel 4.4 Nilai karakterisasi baterai dinamis asam-timbal.....	41
Tabel 4.5 Perbandinga nilai karakterisasi baterai asam-timbal dan dinamis	49
Tabel 4.6 Perbandingan nilai efisiensi pada baterai asam-timbal...	32





DAFTAR LAMPIRAN

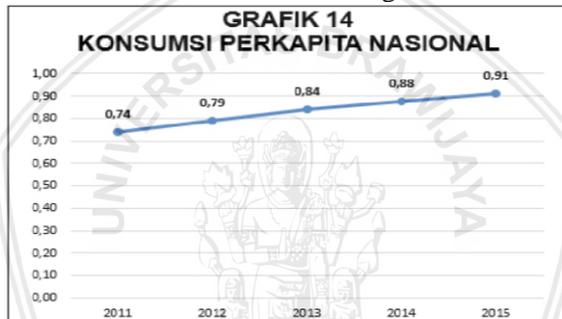
	Halaman
Lampiran 1. Alat dan Bahan	61
Lampiran 2. Sampe Elektroda	63
Lampiran 2. Sampe Elektroda setelah Pengujian	64
Lampiran 3. Sistem Baterai Dinamis dan Reaksi pada Baterai	65
Lampiran 4. Tabel hasil uji luasan $13,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$	66
Lampiran 5. Tabel hasil uji luasan $22,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$	76
Lampiran 6. Tabel hasil uji luasan $31,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$	84



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin berkembangnya zaman maka kebutuhan akan energi listrikpun akan terus meningkat. Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat dari tahun-ketahun. Kebutuhan energi listrik ini terus meningkat dari segala sektor mulai dari sektor industri, usaha, rumah tangga maupun publik. Dengan meningkatnya kebutuhan akan konsumsi listrik maka tuntutan penyediaan tenaga listrik oleh PLN juga terus meningkat. Hal ini dapat dilihat dari data konsumsi energi listrik dari tahun 2011 sampai 2015 berdasarkan data badan statistik ketenagalistrikan tahun 2016.



Gambar 1.1 Grafik konsumsi listrik nasional 2011-2015

Untuk mendukung penyediaan energi yang terus meningkat tersebut, penyimpanan energi menjadi sangat penting untuk menyediakan pasokan energi yang handal dan bertahan dalam waktu yang relatif lama. Baterai adalah sebuah sarana yang dapat menyimpan energi listrik untuk digunakan sesuai dengan keperluannya sewaktu-waktu dan dapat dipindahkan dari satu tempat ke tempat lainnya. Penyimpanan energi akan sangat diperlukan mengingat beberapa jenis sumber energi tidak dapat diandalkan selamanya. Angin tidak selamanya bertiup untuk menggerakkan turbin, cahaya matahari tidak bisa dimanfaatkan secara optimal ketika cuaca berawan atau di malam hari. Bahkan pembangkit listrik tenaga air saat ini banyak dihadapkan oleh ancaman kekeringan.

repository.ub.ac.id

Pemerintah Indonesia sendiri menargetkan penggunaan sel surya sebagai sumber energi bersih terbarukan pada tahun 2025 sebesar 800 MWp (Megawatt-peak) (PTKKE-BPPT.2013). Hal ini berarti bahwa kurang lebih 40 MWp (Megawatt-peak) pembangkit listrik tenaga surya harus dibangun pertahunnya. Rencana tersebut perlu mendapat perhatian khusus karena penggunaan teknologi sel surya pasti membutuhkan baterai sekunder sebagai tempat penyimpanan energi listriknya. *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.

Baterai dinamis yang banyak dikembangkan saat ini adalah baterai dinamis dengan satu aliran elektrolit, dimana elektrolit akan diedarkan dalam sel elektrokimia dan menimbulkan adanya reaksi redoks diantara keduanya. Salah satu jenis baterai dinamis dengan satu elektrolit adalah baterai dinamis berbasis asam-timbal (*lead-acid redoks flow battery*). Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan, baterai dinamis asam-timbal (*flow battery*) memiliki keunggulan dibandingkan dengan baterai konvensional (*accumulator*). Keunggulan tersebut dapat dilihat dari nilai efisiensi baterai. *Flow battery* (Model 6NA-2A-4) mempunyai efisiensi energi sebesar 67,9% sedangkan baterai konvensional (*accumulator*) hanya memiliki efisiensi energi sebesar 35,5%. Berdasarkan hasil tersebut terlihat jelas bahwa baterai dinamis (*flow battery*) memiliki performa yang lebih unggul jika dibandingkan dengan baterai konvensional (*accumulator*) (Ghufron dan kurriawan, 2017). Berdasarkan penelitian tersebut pada penelitian ini penulis mencoba untuk mengembangkan baterai dinamis berbasis asam timbal dengan mengidentifikasi pengaruh permukaan luasan elektroda Pb dan PbO₂ pada baterai dinamis. Sehingga diharapkan dapat memperoleh desain baterai dinamis dengan performa yang baik dan juga diharapkan dapat meningkatkan cadangan energi dalam baterai sehingga baterai

repository.ub.ac.id

dapat dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan energi yang lebih baik.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana karakteristik dari baterai dinamis asam-timbal dengan dilakukannya siklus *charging* dan *discharging* ?
2. Bagaimana pengaruh luas permukaan elektroda terhadap karakter dan performa baterai dinamis ?
3. Bagaimana pengaruh luas permukaan elektroda terhadap kapasitas dan efisiensi dari baterai dinamis dengan luasan permukaan elektroda yang berbeda ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini yaitu pengaruh luas permukaan elektroda terhadap karakteristik baterai dengan arus pembebanan, jarak elektroda, dan konsentrasi H_2SO_4 (30%) tetap serta tidak dilakukannya pengujian siklus hidup pada baterai dinamis asam-timbal.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi karakteristik dari baterai dinamis asam-timbal hasil siklus *charging* dan *discharging*.
2. Menganalisa pengaruh luas permukaan elektroda terhadap karakter dan performa baterai dinamis.
3. Menganalisa pengaruh luas permukaan elektroda terhadap kapasitas dan efisiensi dari baterai dinamis dengan luasan permukaan elektroda yang berbeda

1.5 Manfaat

1. Memperoleh desain *Flow battery* awal yang sederhana yang nantinya dapat diaplikasikan untuk menjadi baterai dengan kapasitas yang lebih besar dan sesuai dengan yang dibutuhkan.

2. Memperoleh identifikasi awal hasil pengaruh luasan elektroda terhadap sistem baterai dinamis sehingga kedepannya dapat dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan energi yang lebih baik.
3. Memperoleh data awal karakteristik *flow battery* yang dapat dianalisa dan kedepannya dapat diaplikasikan dengan system yang lebih baik.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baterai

Baterai merupakan suatu perangkat yang mengandung sel listrik yang mampu menyimpan energi yang dapat dikonversikan menjadi daya. Baterai dapat menghasilkan energi listrik melalui proses kimia. Baterai merupakan sebuah sel listrik dimana didalamnya berlangsung proses elektrokimia yang dapat berkebalikan (*reversible*) dengan efisiensinya yang tinggi. reaksi elektrokimia *reversible* adalah proses dimana didalam suatu baterai terjadi suatu perubahan energi kimia menjadi listrik (pengosongan/*discharging*) dan juga sebaliknya energi listrik menjadi energi kimia (pengisian/*charging*) dengan cara proses regenerasi dari elektroda-elektroda yang dipakai yaitu, dengan melewati arus listrik dalam arah polaritas yang berlawanan didalam sel (Webster,2009).

Baterai terdiri dari dua jenis yaitu, baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer merupakan baterai yang hanya dapat dipergunakan sekali pemakaian saja dan tidak dapat diisi ulang. Hal ini terjadi karena reaksi kimia material aktifnya tidak dapat dikembalikan. Contoh dari baterai primer adalah baterai Lithium, baterai Zinc-Carbon, baterai Silver Oxide dll. Sedangkan baterai sekunder merupakan baterai yang dapat diisi ulang, karena material aktif didalamnya dapat diputar kembali. Kelebihan dari pada baterai sekunder adalah harganya lebih efisien untuk penggunaan jangka waktu yang panjang. Contoh dari baterai jenis ini adalah baterai Ni-Cd, baterai Ni-Mh, baterai Li ion dll. Sementara itu baterai juga digolongkan menjadi baterai statis (*static battery*) dan baterai dinamis (*dynamic battery*). Salah satu contoh baterai dinamis yang banyak dikembangkan dan mampu menyimpan energi dalam jumlah yang besar yaitu baterai aliran atau *flow battery* yang merupakan pengembangan dari baterai sekunder dengan elektrolit berupa larutan yang mampu dialirkan dalam suatu wadah atau sel baterai. 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*) (Tie dan Tan,2013).

2.2 Reaksi Redoks

Reaksi redoks merupakan reaksi yang terjadi perubahan bilangan oksidasi. Reaksi redoks mencakup reaksi oksidasi dan reduksi, dimana reaksi oksidasi adalah reaksi terjadinya peningkatan bilangan oksidasi melalui pelepasan elektron. Sedangkan reaksi reduksi merupakan reaksi terjadinya penurunan bilangan oksidasi melalui penangkapan elektron (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 :



Reaksi diatas merupakan suatu persamaan umum untuk semua reaksi yang terjadi pada elektroda. Pada prakteknya, reaksi oksidasi tidak akan pernah terjadi tanpa adanya reaksi reduksi dan sebaliknya. Jadi dalam suatu sistem reaksi redoks akan terjadi perpindahan elektron dari satu ion ke ion yang lain. Adanya perpindahan elektron inilah yang menjadi dasar dalam suatu sistem elektrokimia (Suyanta,2013).

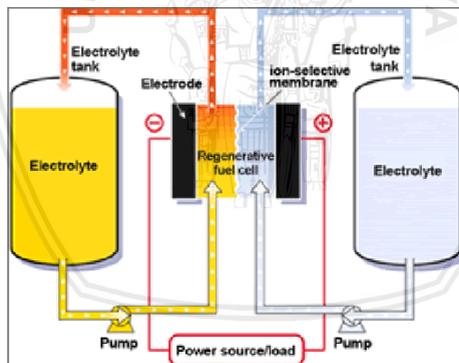
Elektroda merupakan bagian yang sangat penting dalam suatu sel elektrokimia. Elektroda ada dua, yaitu elektroda negatif (*anode*) dan elektroda positif (*katode*). Namun penetapan muatan pada anoda dan katoda sangat bergantung dari jenis sistem sel, dalam hal itu adalah sel potensial atau sel elektrolisis. Reaksi reduksi terjadi pada katoda, sedangkan oksidasi terjadi di anoda (Suyanta,2013).

2.3 Baterai Dinamis (*Flow Battery*)

Baterai dinamis merupakan baterai sekunder yang dapat diisi ulang (*rechargeable*), dimana elektrolitnya mengandung satu atau lebih larutan elektroaktif yang mengalir melalui sel elektrokimia dan mengubah energi kimia menjadi listrik. Selama proses pengoperasian, baterai akan mengalami reaksi redoks (reaksi reduksi dan oksidasi). Baterai ini mempunyai membran atau pemisah untuk mengisolasi elektrolit dalam perpindahan ion. Pada umumnya, elektrolit disimpan di tangki dan dipompa melalui sel. Baterai tipe ini

mudah dan cepat untuk diisi ulang dengan mengganti elektrolit dan secara bersamaan akan merecover material untuk pengisian energi kembali. Baterai dinamis merupakan penyimpan energi yang cukup menarik untuk sistem *grid* karena kemampuannya untuk menyimpan energi dalam jumlah yang cukup besar, mempunyai potensi *life cycle* yang panjang dan efisiensi yang tinggi. Namun demikian, teknologi ini masih dalam tahap pengembangan awal. Baterai tipe ini mempunyai kelemahan terkait proses termal dan stabilitas membran kimia dan elektrolit nya. Hal ini berdampak pada waktu pengoperasian dan umur baterainya. Selain itu banyak desain dari baterai tipe ini dapat menyebabkan *scaling*. Beberapa masalah penting seperti kebocoran, ketahanan pompa, umur sel dan pipa memerlukan perhatian yang cukup dan perlu adanya pengembangan dalam membran, desain susunan, sistem monitoring, material baru dan desain sel (Guo dkk.,2009).

Salah satu contoh baterai dinamis ini adalah baterai *Vanadium Redox*. Baterai tipe ini menyimpan energi dalam bentuk *charge ion* dalam dua tanki elektrolit yang terpisah yaitu untuk elektroda positif dan negatif seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.1 Skema Baterai Dinamis (*flow battery*)
(Guo dkk.,2009)

Teknologi baterai Vanadium redoks ini adalah salah satu jenis teknologi yang paling matang diantara teknologi baterai dinamis lainnya. Pada baterai VRB digunakan cairan vanadium sebagai elektrolitnya yang disimpan pada tangki luar yang kemudian

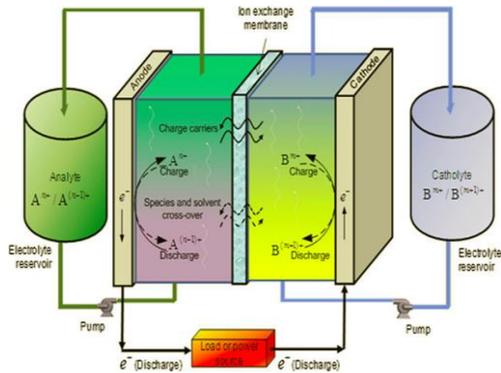
repository.ub.ac.id

dialirkan menuju *regenerative fuel cell* untuk menghasilkan listrik sebagai hasil reaksi redoks dari elektrokimianya. Kelebihan dari VRB adalah jumlah energi dapat disimpan sebanyak-banyaknya hanya dengan cara meningkatkan ukuran tangki elektrolitnya. VRB memiliki internal *discharge* yang rendah dan kerugian parasitis yang rendah pula. Siklus VRB diperkirakan sekitar 10000 siklus. Kelemahan dari VRB ini adalah kerapatan energi yang rendah sehingga masih memerlukan perbaikan pada membran dan elektrolitnya (Guo dkk.,2009).

Fitur yang paling penting dari *flow battery* adalah modularitas kekuatan mereka (kW) dan energi (kWh) yang tidak terikat satu sama lain. Sebenarnya, kekuatannya ditentukan oleh ukuran dan jumlah sel sedangkan kapasitas energi diatur oleh jumlah elektrolit yang tersimpan dalam tangki. Oleh karena itu *flow battery* dapat dioptimalkan untuk pemberian energi dan daya (Guo dkk.,2009).

2.3.1 Baterai dinamis dengan dua aliran elektrolit (RFBD)

Baterai dinamis sering disebut *redox flow battery*. Nama *redox flow battery* didasarkan pada reaksi redoks antara dua elektrolit dalam sistem. Elektrolit memiliki peranan penting dalam segala jenis baterai karena elektrolit merupakan jembatan penghubung kedua elektroda positif dan negatif. *Double elektrolite redox flow battery* merupakan sebuah desain dari baterai dinamis yang memiliki dua elektrolit yang berada dalam suatu wadah yang berbeda dimana salah satu elektrolit menjadi elektrolit positif (katolit) dan elektrolit yang lain menjadi elektrolit negatif (anolit). Kedua elektrolit ini dialirkan dari wadah masing-masing menuju suatu sel elektrokimia yang dipisahkan oleh membran separator. 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.,2010).

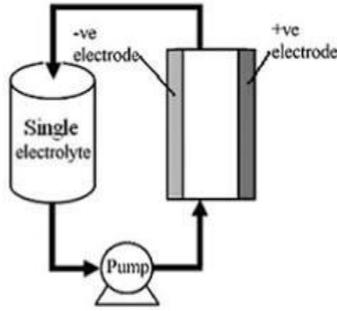


Gambar 2.2 Skema baterai dinamis dengan dua aliran elektrolit
(Zhang dkk.,2010)

Ketika kedua elektrolit dialirkan menuju suatu sel elektroda yang dipisahkan oleh membran separator maka akan timbul reaksi redoks diantara keduanya. Terjadinya reaksi redoks akan memicu terjadinya serah terima elektron dalam suatu sel elektrokimia dan akan menimbulkan beda potensial yang akan menghasilkan energi listrik dari baterai dinamis elektrolit ganda (Zhang dkk.,2010).

2.3.2 Baterai dinamis dengan elektrolit tunggal (RFBS)

Berbeda dengan *double elektrolite redox flow battery*, baterai dinamis elektrolit tunggal atau *single elektrolite redox flow battery* ini hanya menggunakan satu elektrolit dalam sebuah tabung yang diedarkan menuju ke sel elektroda. Namun secara keseluruhan proses yang terjadi didalamnya sama dengan *double elektrolite redox flow battery*. Elektrolit yang hanya satu jenis dialirkan dari wadah elektrolit menuju ke sel elektrokimia yang nantinya akan bereaksi dengan elektroda baik elektroda negatif maupun positif. Reaksi yang terjadi dalam sel elektrokimia ini juga merupakan reaksi redoks dimana terjadi serah terima elektron antar kedua elektroda yang akan menimbulkan beda potensial dan menimbulkan energi listrik. Salah satu contoh dari baterai dinamis dengan satu elektrolit yang digunakan adalah *lead-acid redox flow battery*.

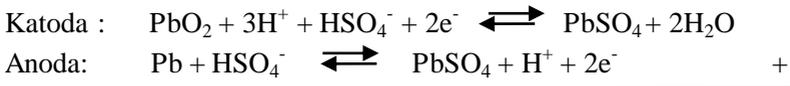


Gambar 2.3 Skema baterai dinamis dengan satu aliran elektrolit
(Jie Cheng,dkk.2013)

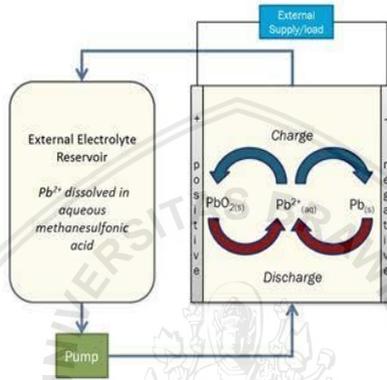
2.3.3 Baterai dinamis berbasis asam-timbal

Baterai asam-timbal terdiri dari rangkaian sel yang saling terhubung. Setiap sel terbuat dari dua Elektroda, salah satu logam timbal (Pb) dan satunya timbal oksida (PbO₂) yang ditempatkan dalam larutan asam sulfat (H₂SO₄). Baterai asam-timbal mengandung timbal dalam fase larutan (Pletcher dkk.,2004).

Suatu model dari Pletcher dkk. menggambarkan proses elektrokimia dan kinerja dari sel elektroda yang berukuran kecil (2 cm² bentuk luas elektroda) yang didasarkan pada elektrolit yang mengandung ion timbal terlarut (II) dalam larutan. Reaksi elektroda dan sel terbentuk dengan baik, pada elektroda positif. Selama pengisian, timbal (Pb) diendapkan pada elektroda negatif sementara timbal dioksida (PbO₂) diendapkan dalam elektroda positif. Sedangkan Selama pelepasan, lapisan timbal (Pb) dan timbal dioksida (PbO₂) dilarutkan kembali melalui reaksi oksidasi dan reduksi kembali ke ion timbal terlarut (II) (Pletcher dkk.,2004). Dimana reaksinya adalah :



Ketika baterai diberi beban atau saat pengosongan baterai (*discharging*) maka tiap ion negatif sulfat (SO_4) akan bereaksi dengan plat timbal murni (Pb) menjadi timbal sulfat (PbSO_4) sambil melepaskan dua elektron. Sedangkan sepasang ion hidrogen (H^+) akan bereaksi dengan plat timbal dioksida (PbO_2) menjadi (PbSO_4) sambil mengambil dua elektron dan bersenyawa dengan satu atom hidrogen untuk membentuk air (H_2O). pengambilan dan pemberian atom elektron dalam proses kimia ini menyebabkan timbulnya beda potensial listrik antar kutub sel baterai (Crompton,2000).



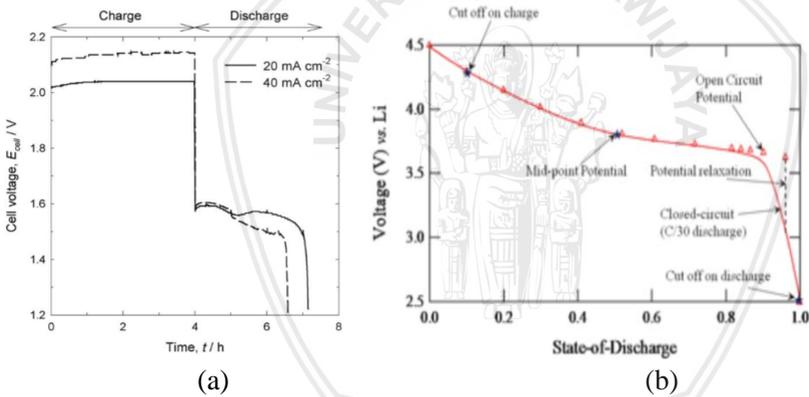
Gambar 2.4 skema baterai dinamis berbasis asam-timbal
(Portia,2010)

Sedangkan pada saat proses pengisian proses ini merupakan kebalikan dari proses pengosongan dimana arus listrik dialirkan yang arahnya berlawanan dengan arus yang terjadi pada saat pengosongan. pada saat proses ini setiap molekul air terurai dan tiap pasangan ion hidrogen (2H^+) yang dekat dengan plat negatif bersatu dengan ion negatif sulfat SO_4 untuk membentuk sulfat. Sedangkan ion oksigen yang bebas bersatu dengan tiap atom Pb membentuk ikatan timbal oksida (PbO_2) (Crompton,2000).

Sistem ini sangat berbeda dengan baterai tadisional asam-timbal karena Pb(II) sangatlah larut dalam elektrolit asam. Sistem ini juga sangat berbeda dengan baterai dinamis (*flow battery*) pada umumnya karena hanya membutuhkan satu jenis elektrolit tanpa separator atau membran yang pada umumnya digunakan dalam sistem *flow battery*. Hal ini mengurangi biaya dan kerumitan desain

dari baterai yang signifikan. Reaksi elektroda melibatkan konversi larutan menjadi fase padat selama pengisian (*charging*) dan kembali lagi pada proses pemakaian (*discharging*). Sistem ini memperkenalkan kompleksitas pada reaksi elektroda dan mungkin akan mengurangi kinerja baterai jika tumbuh kerak logam yang batas celah antar elektroda pada baterai. Pelucutan dan pengendapan timbal harus cepat dan potensial tidak berlebihan dibutuhkan. Jika potensial besar evaluasi dari hidrogen dapat mengurangi penurunan kapasitas penyimpanan (Leon dkk.,2006). Pada grafik dibawah ini menunjukkan karakteristik dari *lead-acid Redox Flow Battery* ketika mengalami proses pengisian(*charging*) dan pengosongan (*discharging*).

Pada grafik tersebut menunjukkan nilai potensial sel terhadap waktu sebagai respon dari proses pengisian dan pengosongan dari elektrolit baterai asam-timbal dalam larutan sama metasulfic pada dua arus yang berbeda.



Gambar 2.5 a) grafik tegangan terhadap waktu saat proses charging dan discharging b) karakteristik proses discharging (Leon.dkk,2006)

Kualitas dari baterai dapat dilihat dari nilai tegangan yang dihasilkan pada saat proses pengisian dan pengosongan. Kualitas dari baterai dapat dikatakan baik ketika pada saat proses pengisian maupun pengosongan nilai tegangan dari baterai menunjukkan nilai yang relatif konstan. Sedangkan kualitas dari baterai dinamis asam-timbal juga dapat dilihat dari nilai efisiensinya baik nilai efisiensi tegangan, efisiensi coulomb, maupun efisiensi energinya.

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 (Leon dkk.,2006).

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

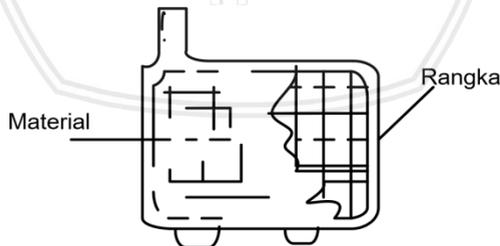
Efisiensi coulomb adalah nilai rasio muatan listrik yang disediakan oleh baterai selama pengosongan dibandingkan dengan persediaan selama pengisian (Leon dkk.,2006).

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

Sedangkan efisiensi energinya adalah rasio dari energi antara proses pengosongan dan pengisian (Leon dkk.,2006).

2.4 Elektroda Pb dan PbO₂

Pada baterai asam-timbal, elektroda merupakan suatu komponen utama dari baterai. Elektroda ini berbentuk plat yang terdiri dari plat positif dan negatif. Kualitas dari plat elektroda sangat menentukan kualitas dari suatu baterai asam-timbal, plat-plat elektroda tersebut terdiri dari rangka yang terbuat dari paduan timbal antimon yang diisi dengan suatu bahan aktif. Bahan aktif pada plat elektroda positif adalah timbal dioksida yang berwarna coklat, sedangkan pada plat elektroda negatif adalah spons-timbal yang berwarna abu-abu.

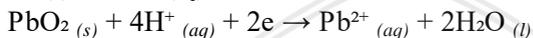
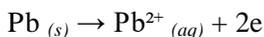


Gambar 2.6 Bentuk elektroda sel

Timbal (Pb) merupakan suatu unsur dalam tabel periodik dengan nomor atom 82 dengan lambang Pb. Lambang tersebut berasal dari bahasa latin yakni *plumbum*. Logam timbal (Pb) berbentuk padat yang tahan korosi, memiliki warna kebiru-biruan

mengkilap, lunak, memiliki kerapatan yang besar, mudah ditempa, dan memiliki titik lebur rendah sekitar 327,5°C, titik didih 1740°C, serta bersifat sebagai penghantar listrik yang baik (Cahyadi,2004).

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 mengali oksidasi sambil melepas elektron sedangkan elektroda positif (PbO₂) akan mengalami reduksi dengan menangkap elektron.



Unsur timbal digunakan dalam bidang industri modern untuk pembuatan pipa air yang tahan korosi. Timbal juga banyak digunakan sebagai pembuatan cat, baterai, dan campuran bahan bakar bensin (Herman,2006).

2.5 Elektrolit Asam Sulfat (H₂SO₄)

Asam sulfat merupakan jenis asam mineral (anorganik) yang kuat. Asam mineral ini larut dalam air pada berbandingan berapapun. Asam sulfat memiliki banyak kegunaan dan merupakan salah satu hasil produk industri kimia. Kegunaan asam sulfat yang paling utama adalah sering digunakan pada pemrosesan bijih mineral, sintesis kimia, pemrosesan air limbah dan penggilingan minyak (Winda,2012).

Asam sulfat murni yang tidak diencerkan tidak dapat ditemukan secara alamiah di bumi. Hal ini dikarenakan sifat asam sulfat yang higroskopis. Walaupun demikian, asam ini merupakan komponen utama hujan asam yang dapat terjadi karena oksidasi sulfur dioksida di atmosfer dengan keberadaan air. Sulfur dioksida merupakan produk sampingan dari pembakaran bahan bakar seperti batu bara dan minyak yang mengandung sulfur (belerang) (Winda,2012).

Asam sulfat 98% lebih stabil untuk disimpan dan merupakan bentuk asam sulfat yang paling umum. Asam sulfat 98% ini sering disebut dengan asam sulfat pekat. Asam sulfat memiliki berat

molekul 98,08 g/mol, bersifat korosif, dapat menimbulkan luka bakar bila kontak dengan kulit, mudah menguap, memiliki berat jenis 1,834 gr/cm³, titik leleh 10,49°C, titik didih 340°C, dan larut dalam alkohol 95% (Winda,2012).

2.6 Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai merupakan kemampuan dari baterai untuk menyimpan daya listrik atau besarnya energi yang dapat disimpan maupun dikeluarkan oleh baterai. Besarnya kapasitas dari baterai ini dipengaruhi oleh banyaknya bahan aktif pada plat positif dan plat negatif yang beraksi, 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) (Webster,2009).

Besar kecilnya suatu tegangan dalam baterai ditentukan oleh banyak sedikitnya sel baterai yang ada didalamnya. Meskipun demikian, arus hanya akan mengalir jika terdapat konduktor dan beban yang terhubung pada baterai. Kapasitas baterai juga menunjukkan kemampuan dari baterai untuk mengeluarkan arus (*discharging*) dalam orde waktu tertentu. Hal ini berarti sebuah kapasitas baterai dapat dikeluarkan dengan waktu yang lama jika arus yang dikeluarkan kecil dan dapat dikeluarkan dengan waktu yang singkat jika arus yang digunakan besar. Pada saat proses pengisian (*charging*) terjadi proses penimbunan muatan listrik pada baterai. Jumlah maksimum muatan listrik yang dapat ditampung oleh baterai disebut sebagai kapasitas baterai yang dinyatakan dalam ampere-jam (*ampere-hour*). Kapasitas dari baterai dapat dinyatakan dengan persamaan dibawah ini (Webster,2009).

$$Q (Ah) = I (ampere) \times t (jam) \quad (2.6)$$

Dimana :

Q = kapasitas baterai (Ah)

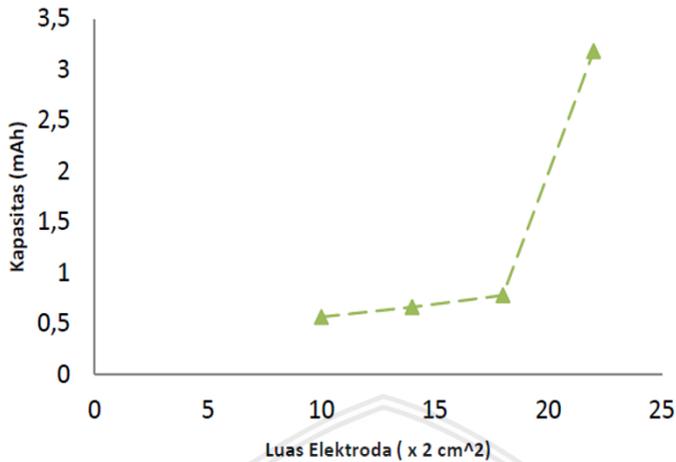
I = kuat arus (ampere)

T = waktu (jam)

2.7 Penelitian Sebelumnya

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ghufron dan Kurriawan pada tahun 2017 (Ghufron dan kurriawan, 2017), dijelaskan bahwa *flow battery* memiliki performa yang lebih unggul dibandingkan dengan baterai konvensional. Pada penelitian tersebut baterai yang digunakan menggunakan elektroda Zinc – Carbon dan H_2SO_4 sebagai elektrolit dengan susunan tiga sel. Keunggulan *flow battery* (Model 6NA-2A-4) dapat dilihat pada nilai efisiensi energi yang dihasilkan. *Flow battery* (Model 6NA-2A-4) mempunyai efisiensi energi sebesar 67,9% dengan tegangan kerja 1,73 – 7,55 V. Sedangkan baterai konvensional (*accumulator*) hanya memiliki efisiensi energi sebesar 35,5% dengan tegangan kerja 1,39 -7,96 V. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *Flow battery* (Model 6NA-2A-4) memiliki performa yang jauh lebih unggul dibandingkan dengan baterai konvensional (*accumulator*).

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Aditya (2016), dijelaskan bahwa Luasan elektroda akan mempengaruhi kapasitas baterai dalam hal ini baterai yang digunakan adalah lithium-ion dengan lithium iron phosphate ($LiFePO_4$) sebagai bahan katoda yang harganya cukup murah dan grafit (LiC_6) sebagai bahan anoda. Kapasitas baterai dinyatakan oleh banyaknya bahan aktif pada elektroda yang dapat menghasilkan energi listrik melalui reaksi elektrokimia. Semakin luas elektroda maka semakin besar kapasitas yang dihasilkan dari baterai. Penambahan luasan elektrode pada baterai lithium-ion berbasis lithium iron phosphate ($LiFePO_4$) akan menaikkan nilai kapasitas dari baterai dan juga nilai efisiensinya. Ini dibuktikan dengan empat varian luas elektroda yakni (10x2), (14x2), (18x2), dan (22x2) cm^2 .



Gambar 2.7 Grafik hubungan luas elektroda terhadap kapasitas baterai Lithium-ion (Aditya,2016)

Pada penelitian tersebut luasan elektroda dengan ukuran $(22 \times 2) \text{ cm}^2$ memiliki nilai kapasitas terbesar dibanding yang lain dengan nilai kapasitas sebesar 3,183 mAh. Hal ini dikarenakan semakin besar ukuran elektroda baterai yang digunakan artinya lebih banyak bahan aktif yang dapat menampung ion lithium dan elektron sehingga mampu menghasilkan energi listrik yang lebih besar yang terjadi karena reaksi elektrokimia. Sedangkan pada penelitian ini penulis menggunakan baterai dinamis asam-timbal untuk dilakukan pengujian terhadap karakteristik dengan perbedaan luasan elektroda sebagai parameternya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

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

3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

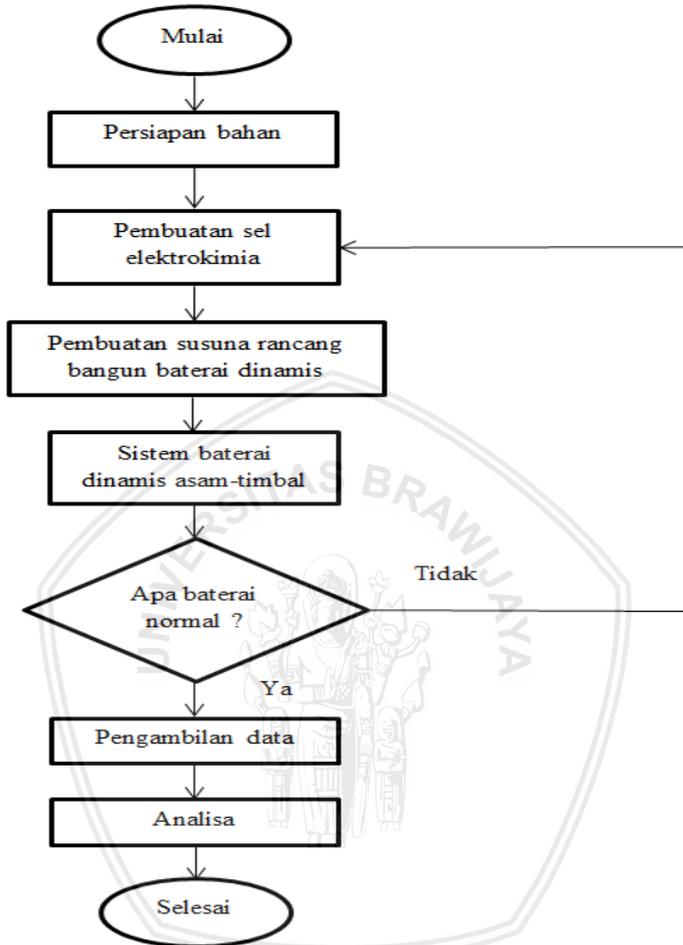
Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah :

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

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

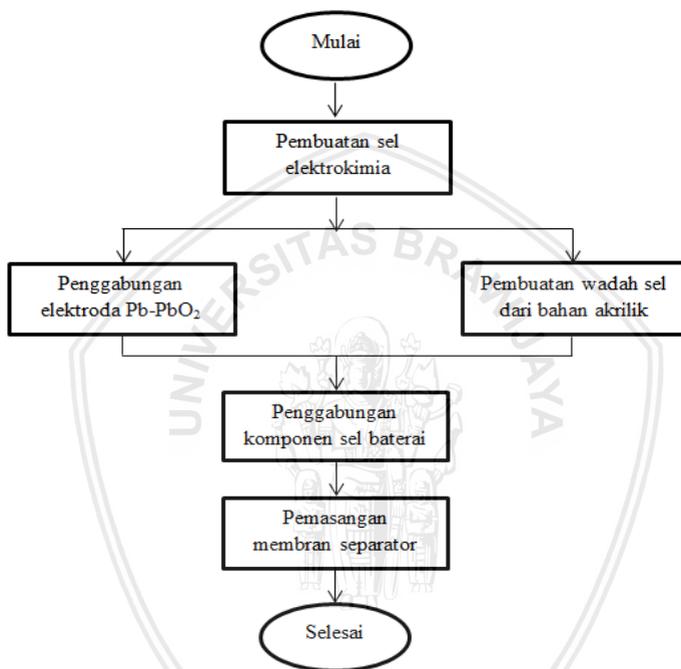


Gambar 3.1 Tahapan penelitian

Tahapan awal penelitian dimulai dengan persiapan bahan yang digunakan untuk pembuatan baterai dinamis. Proses selanjutnya yaitu dengan pembuatan rancang bangun baterai dinamis. Ketika sistem baterai sudah siap digunakan, maka dilakukan proses pengujian aliran baterai. Jika selama elektrolit dialiran baterai dalam

keadaan normal maka proses pengambilan data dapat secara langsung dilakukan. Jika baterai dalam keadaan tidak normal maka proses diulang dengan pembuatan sel elektrokimia kembali. Setelah tahapan pengambilan data baterai selesai, proses dilanjutkan dengan pengolahan data dan proses terakhir yakni analisa data.

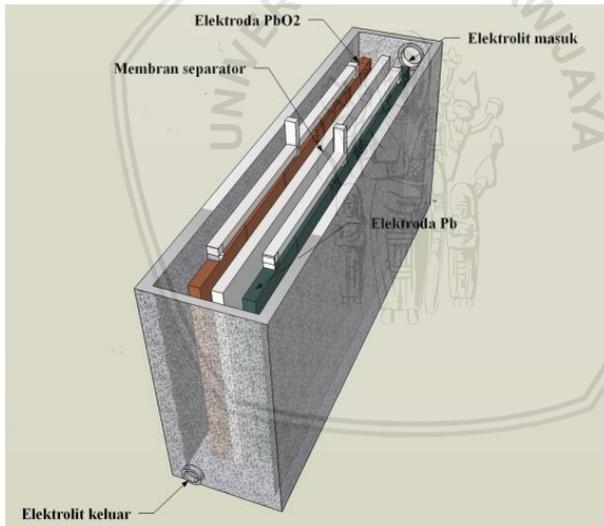
3.3.1 Pembuatan sel elektrokimia



Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan sel elektrokimia

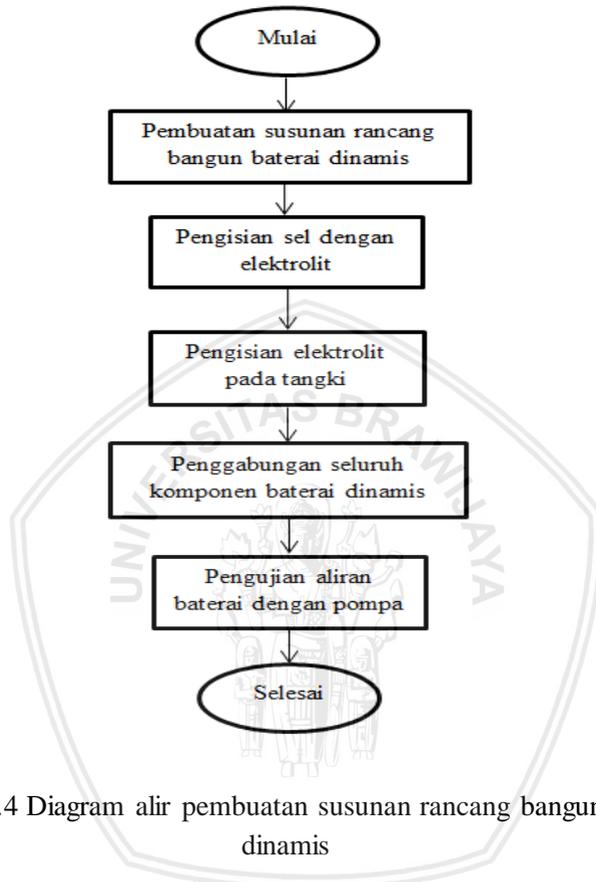
Pembuatan sel elektrokimia dimulai dengan pembuatan wadah sel dari bahan akrilik berbentuk balok dengan lubang masukan elektrolit menuju sel dibagian atas salah satu sudut dan lubang keluaran elektrolit menuju tangki elektrolit dibagian bawah sudut yang berseberangan dengan lubang masukan. Bentuk dan ukuran wadah sel disesuaikan dengan luasan elektroda yang digunakan. Perlu diketahui bahwa ukuran satu plat elektroda adalah 4,5 x7,5

cm². Pembuatan sel dilanjutkan dengan menyiapkan elektroda, kemudian bagian permukaan samping dan ujung dari elektroda dibuat kasar dengan menggosok dengan kertas gosok. Proses selanjutnya dilanjutkan dengan penggabungan elektroda baik elektroda positif maupun negatif dengan memvariasikan luasan total elektroda, masing-masing luasan permukaan sebesar (31,5x7,5 cm²) untuk penggabungan 7 elektroda, (22,5x7,5 cm²) untuk 5 elektroda, dan (13,5x7,5 cm²) untuk 3 elektroda. Setelah itu kabel digabungkan dengan elektroda dengan disolder timah. Proses selanjutnya yaitu elektroda disusun pada wadah sel sesuai desain yang akan digunakan. Pada proses pemasangan elektroda kedalam wadah sel, antara elektroda positif dan negatif terpisah dengan jarak 3 mm dan dipasangkan membran separator diantara kedua elektroda tersebut. Pada penelitian ini baterai yang dibuat merupakan baterai asam-timbal sel tunggal, dimana hanya ada sepasang elektroda (positif-negatif) seperti yang terlihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.3 Tampak atas susunan elektroda dalam wadah sel

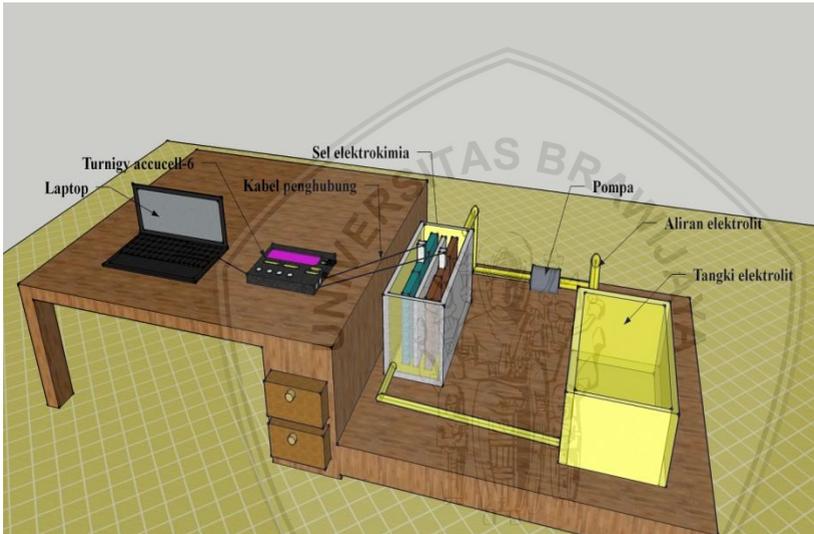
3.3.2 Pembuatan kerangka rancang bangun baterai dinamis asam-timbal.



Gambar 3.4 Diagram alir pembuatan susunan rancang bangun baterai dinamis

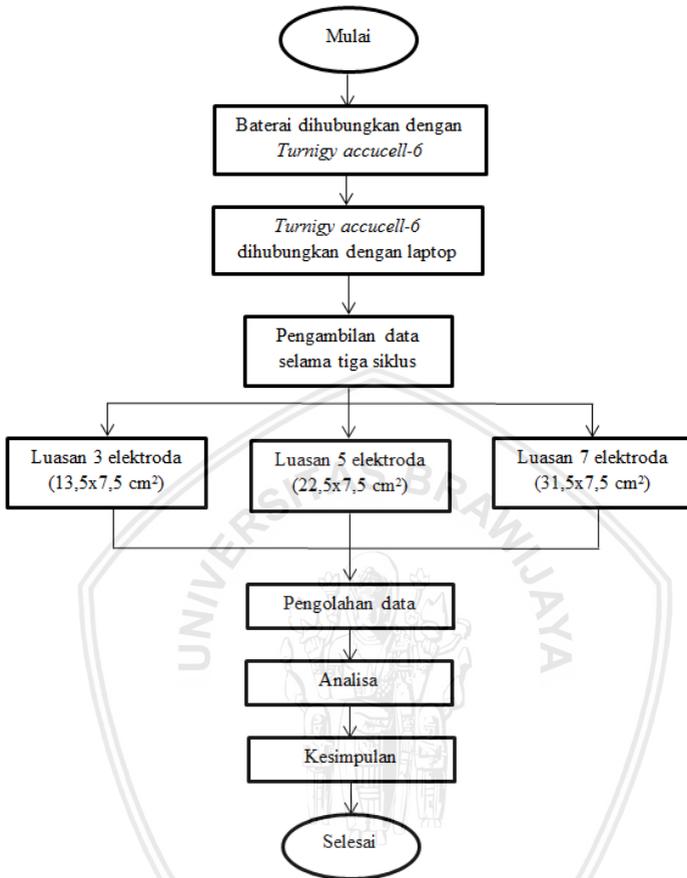
Kerangka rancang bangun *flow battery* di buat dengan susunan sederhana, dimana tempat peletakan sel diatur lebih tinggi dari wadah/tangki elektrolit, sehingga larutan elektrolit dapat dipompa dan dialirkan keatas menuju sel elektrokimia dan elektrolit akan keluar dari sel elektrokimia melalui bagian bawah. Hal ini akan memicu elektrolit di dalam sel untuk terus bersirkulasi dengan masuk dan keluarnya elektrolit secara konstan. Pompa yang digunakan membutuhkan tenaga listrik sebesar 1,5 volt dengan arus masukan $16 \mu A$. Laptop dan alat pengukur *charge-discharge* (Turnigy

accu-cell-6) diletakkan dengan posisi lebih tinggi dari wadah/tangki elektrolit dan sel elektrokimia. Hal tersebut untuk mencegah agar larutan elektrolit tidak mengenai alat elektronik jika sewaktu-waktu terjadi kesalahan. Pada saat pengambilan data akan dilakukan sel anoda dan katoda pada sel elektrokimia dihubungkan ke alat pengukur *charging-discharging* (Turnigy accu-cell-6) dengan memperhatikan bagian positif dan negatifnya, katoda (+) dan anoda (-). Selanjutnya alat pengukur *charging-discharging* (Turnigy accu-cell-6) dihubungkan dengan laptop seperti yang terlihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.5 skema susunan rangkaian penelitian

3.3.3 Pengujian karakteristik baterai



Gambar 3.6 Diagram alir pengujian karakteristik baterai

Pengujian karakteristik dari baterai dilakukan dengan dua metode yakni dinamis dan statis (sebagai pembandingan). 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 chagemaster2.02* yang telah terinstal pada laptop yang akan digunakan. Pengujian dilakukan dengan proses pengisian (*charging*)

dan pengosongan energi (*discharging*) pada baterai untuk masing-masing luasan elektroda. Proses tersebut dilakukan selama tiga siklus pada arus pembebanan 1 ampere dengan waktu yang tidak ditentukan (*charging* sampai penuh dan *discharging* sampai *cut-off*). 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 arus konstan sebesar 1 ampere. Selama proses pengujian baterai didapatkan data berupa nilai tegangan dan arus terhadap waktu. Dengan menggunakan alat pengukur *charging-discharging (Turnigy accucell-6)* dan bantuan *software chagemaster2.02* maka juga dapat diketahui nilai kapasitas yang didapatkan dan dikeluarkan selama proses pengujian. Proses selanjutnya dapat dianalisa data hasil karakterisasi baterai dari proses pengosongan energi (*discharging*) dan juga pengisian (*charging*) yang telah didapatkan.



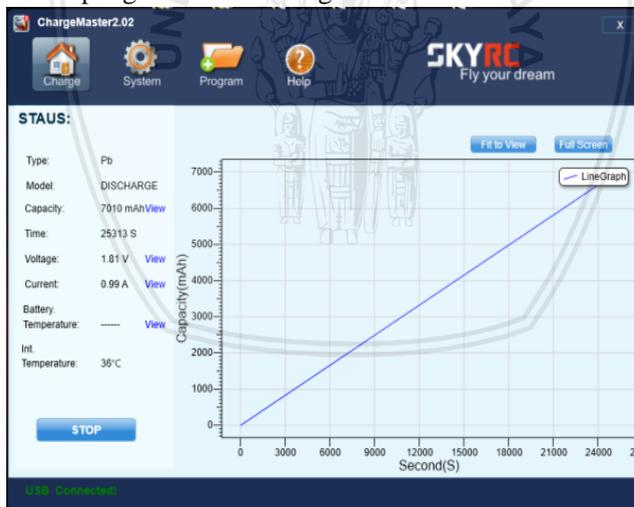
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Baterai

4.1.1 Keadaan awal baterai

Baterai yang digunakan pada penelitian ini merupakan baterai asam-timbal sel tunggal dengan elektroda Pb-PbO₂. Proses pengujian baterai asam-timbal dilakukan dengan bantuan alat *Turnigy accucell-6* yang didukung dengan *software chagemaster2.02*. Pengujian siklibilitas baterai asam-timbal dilakukan dengan proses pengisian dan pengosongan (*charge-discharge*) pada arus konstan 1 A. Pemilihan arus 1 A didasarkan karena alat *Turnigy accucell-6* yang dapat melakukan pengujian dengan rentang 0,1 sampai 2 Ampere pada proses pengosongan. Sedangkan arus efektif yang sering digunakan pada pengisian baterai asam-timbal yaitu antara 0,5 sampai 1 Ampere, sehingga untuk memudahkan pengambilan data digunakan arus konstan 1A.



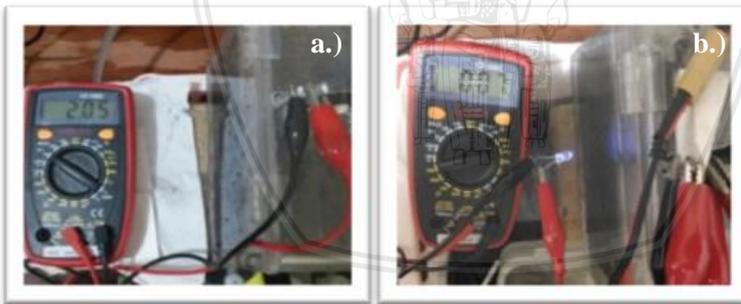
Gambar 4.1 Tampilan *software chagemaster2.02*. pada saat proses pengosongan baterai dinamis asam-timbal

Pengambilan data pengujian dilakukan dengan menjalankan *chagemaster2.02* pada komputer. Pada menu *charge*, dipilih tipe

repository.ub.ac.id

baterai Pb, mode *charge/discharge*, sel tunggal (*single cell*), dan arus pengisian-pengosongan diatur sebesar 1 Ampere. Kemudian pengujian baterai dimulai dengan diklik *start* dan akan muncul tampilan seperti gambar 4.1. Pada proses pengujian baterai asam-timbal, data yang didapatkan berupa nilai dan grafik hubungan tegangan, kapasitas, arus dan suhu baterai terhadap waktu. *Turnigy accucell-6* ini melakukan pengambilan data perdetik untuk tiap besaran baik tegangan, arus maupun kapasitas. Namun, nilai dari suhu baterai tidak dapat diukur dan diambil data karena tidak adanya kabel *temperature sensor* pada baterai.

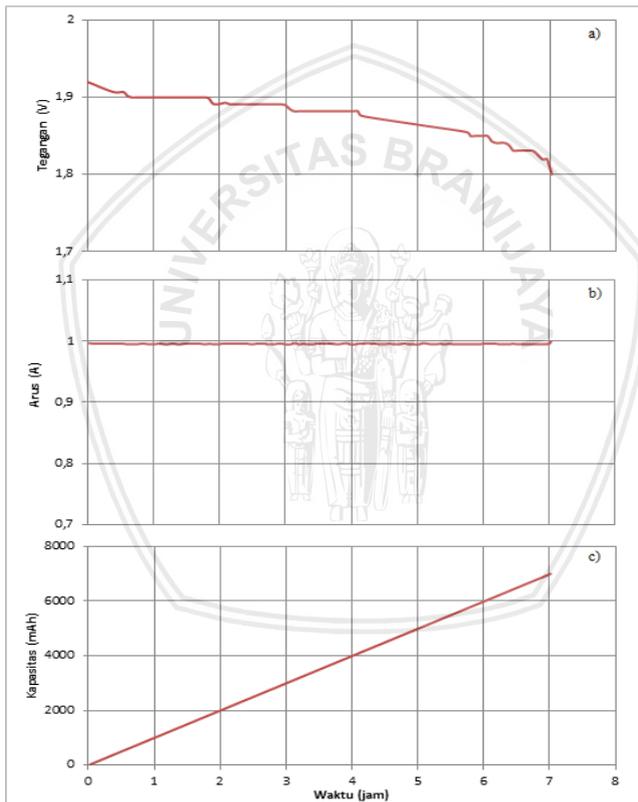
Pada keadaan awal sebelum dicampur dengan elektrolit, kedua elektroda baik Pb maupun PbO₂ tidak bermuatan. Ketika elektrolit asam (H₂SO₄) dicampurkan maka terjadi reaksi redoks yang akan membentuk PbSO₄ pada kedua elektroda sesuai persamaan 2.2. Akibat reaksi tersebut timbul potensial sel pada baterai sebesar 2,05 V yang ditunjukkan pada gambar 4.2a. Tegangan ini mampu digunakan untuk menyalakan lampu LED dan menghasilkan arus 0,07 mA seperti pada gambar 4.2b. Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa pada keadaan awal baterai digunakan, baterai telah terbukti memiliki energi listrik yang dapat dikeluarkan.



Gambar 4.2 kondisi awal baterai sebelum dilakukan pengujian a.) nilai tegangan sebelum pengujian b.) pengeluaran energi listrik dan besar arus yang dikeluarkan

Pada proses pengosongan (*discharge*) baterai dihubungkan dengan beban pada arus konstan 1A. Akibat arus yang keluar dari baterai, muatan yang tersimpan pada baterai berkurang secara konstan yang ditunjukkan dengan menurunnya tegangan (gambar

4.3a). Proses pengosongan pada baterai akan berhenti ketika tegangan baterai mencapai nilai 1,8 V yang merupakan $V_{cut-off}$ pada baterai asam-timbal. Pada dasarnya proses pengosongan muatan pada baterai dengan alat *Turnigy accucell-6* tidak sepenuhnya habis. Hal ini dikarenakan nilai tegangan yang masih menunjukkan 1,8 V dan nilai arus yang ditunjukkan pada gambar 4.3b belum mengalami penurunan hingga 0 A. Sehingga dapat diartikan baterai tersebut belum benar-benar habis digunakan. Proses pengosongan tersebut dikarenakan alat *Turnigy accucell-6* yang membatasi proses pengosongan hanya sampai tegangan *cut-off* yang tujuannya untuk melindungi dan menjaga baterai supaya tidak cepat rusak.



Gambar 4.3 Grafik tegangan, arus, dan kapasitas terhadap waktu pada proses pengosongan awal baterai asam-timbal

repository.ub.ac.id

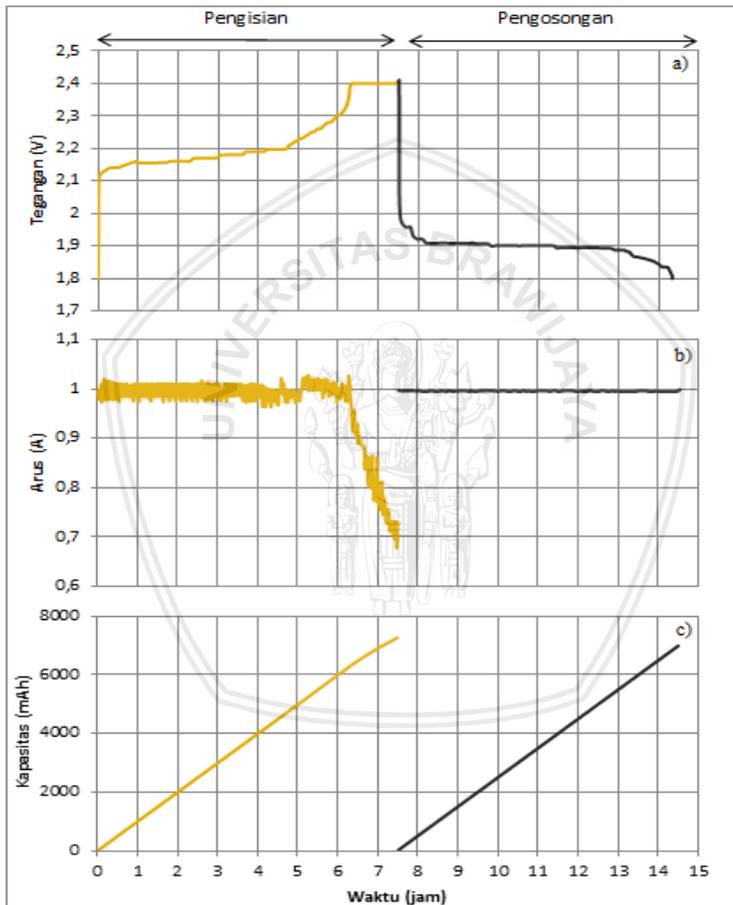
Besarnya muatan yang dikeluarkan pada proses pengosongan juga akan ditampilkan pada alat *Turnigy accucell-6* dan dibaca pada tampilan *software chargemaster2.02*. Besarnya muatan yang dikeluarkan ini disebut dengan kapasitas baterai. Pada proses pengosongan baterai, muatan yang dikeluarkan akan semakin besar seiring dengan lamanya waktu pengosongan. Selama proses pengosongan 7,03 jam, baterai mampu mengeluarkan muatan sebesar 7010 mAh (gambar 4.3c). Kenaikan nilai kapasitas yang menunjukkan kurva linear (gambar 4.3c) dikarenakan penggunaan arus konstan selama proses pengosongan baterai. Besarnya kapasitas pada baterai merupakan hasil kali dari nilai arus yang keluar terhadap waktu. Karena arus yang digunakan pada keadaan konstan 1 ampere maka nilai kapasitas ini akan naik secara konstan dipengaruhi lamanya waktu pengosongan yang terus bertambah tiap satuan detik.

Pada keadaan awal sebelum dilakukannya pengujian siklilitas, baterai telah memiliki energi yang dapat dikeluarkan (seperti yang telah dibahas sebelumnya). Hal tersebut terjadi karena adanya reaksi spontan membentuk PbSO_4 pada kedua elektroda. Sehingga untuk dapat melakukan pengujian siklus *charge-discharge*, baterai yang akan diuji harus melakukan proses pengosongan (*discharge*) awal terlebih dahulu yang selanjutnya dapat dilakukan proses pengisian (*charging*) dan proses selanjutnya.

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

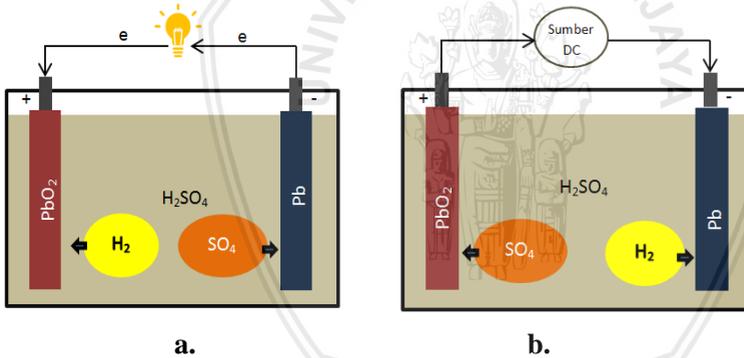
Karakteristik *charge-discharge* baterai asam-timbal sel tunggal dengan arus pembebanan 1A ditunjukkan pada gambar 4.4. Pada proses pengisian terjadi proses penyimpanan muatan pada kedua elektroda yang dibuktikan dengan bertambahnya tegangan sel baterai akibat adanya reaksi redoks yang merupakan kebalikan reaksi pengosongan. Tegangan baterai naik secara drastis dari keadaan *cut-off* 1,80 V menjadi 2,14 V. Kenaikan tegangan secara cepat ini disebut lompatan awal beda potensial yang menunjukkan impedansi baterai. Setelah kenaikan secara drastis, tegangan akan naik secara perlahan selama 5 jam. Hal ini menunjukkan besar arus yang masuk mempengaruhi besar kurva beda potensial. Tegangan akan naik dengan cepat menuju tegangan 2,40 V selama 1,5 jam, dan diikuti tegangan yang cenderung konstan pada keadaan 2,40 V selama 1 jam yang menunjukkan baterai akan terisi penuh. Sedangkan arus

pengisian akan cenderung konstan selama 6,5 jam dan akan mulai menurun dari 1,0 A menjadi 0,69 A setelah mencapai tegangan 2,40 V selama 1 jam. Hal ini menunjukkan bahwa ketika baterai akan terisi penuh maka nilai arus yang semula konstan akan terus turun (Gambar 4.4b) karena reaksi redoks didalam baterai akan semakin sedikit. Semakin sedikitnya reaksi redoks dalam baterai menunjukkan bahwa reaksi pengembalian dari $PbSO_4$ ke PbO_2 dan Pb akan berakhir (Gambar 4.5b) sesuai persamaan 2.4.



Gambar 4.4 Grafik karakteristik *charge-discharge* baterai Dinamis asam-timbal

Pada proses pengosongan baterai, kedua elektroda akan diberi beban spesifik. Akibat proses pengosongan ini ditandai dengan menurunnya tegangan sel baterai yang ditunjukkan pada Gambar 4.4a. Terjadinya reaksi kimia pada proses pengosongan baterai ditunjukkan dengan terbentuknya gelembung Hidrogen (gas H_2) pada kutub positif (lampiran 3) seperti yang diilustrasikan pada gambar 4.5a. Pada saat proses pengosongan baterai dengan arus pembebanan 1 A, tegangan baterai turun secara signifikan dari 2,40 V menjadi 1,95 V kemudian akan turun secara perlahan membentuk kurva mendekati linear. Kurva ini menunjukkan bahwa baterai berada pada tegangan kerjanya. Tegangan kerja baterai pada Gambar 4.4a ditunjukkan berada pada rentang 1,88 V hingga 1,95 V. Tegangan baterai mulai turun secara signifikan setelah melewati 1,88 V yang menunjukkan bahwa baterai telah melewati tegangan kerjanya. Proses pengosongan baterai berhenti ketika tegangan mencapai *cut-off* pada nilai 1,80 V yang menunjukkan baterai telah mencapai tegangan minimal pengosongan oleh alat *Turnigy accucell-6*. Nilai dari pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1.

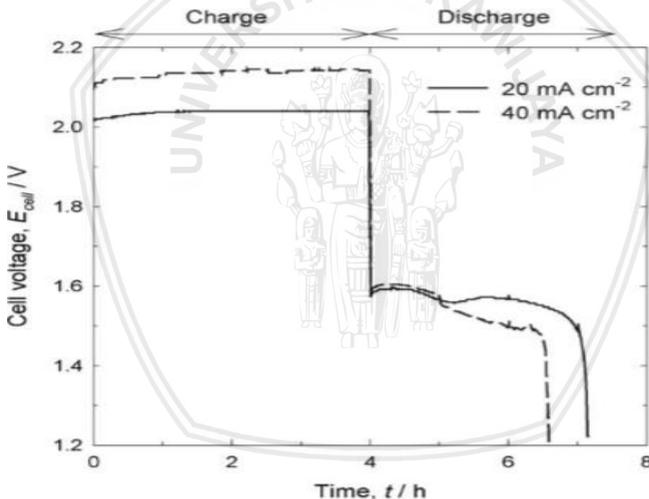


Gambar 4.5 ilustrasi pada proses a.) Pengosongan b.) Pengisian

Tabel 4.1 Nilai karakterisasi baterai dinamis asam-timbal

Proses	V_{awal} (V)	V_{tengah} (V)	V_{akhir} (V)	$V_{open\ circuit}$ (V)	I (A)	C (mAh)
Pengisian	2,07	2,19	2,41	2,22	0,96	7285
Pengosongan	1,99	1,90	1,80	1,95	0,99	6824

Pada proses pengujian karakteristik *charge-discharge* baterai dinamis asam timbal didapatkan nilai-nilai penting hasil karakteristik baterai tersebut (Tabel 4.1). Tegangan awal (V_{awal}) merupakan nilai tegangan pada detik pertama pengujian baik pengisian maupun pengosongan. Tegangan tengah (V_{tengah}) merupakan nilai tegangan dari setengah lama pengujian (V pada $t/2$) baik pengisian maupun pengosongan. Tegangan akhir merupakan nilai tegangan pada keadaan penuh (*full-charge*) pada pengisian dan tegangan *cut-off* pada proses pengosongan. Tegangan *open circuit* ($V_{open\ circuit}$) merupakan nilai beda potensial pada baterai ketika keadaan rangkaian terbuka setelah pengujian, baik pada pengisian maupun pengosongan. Sedangkan nilai arus yang tercantum merupakan nilai rata-rata selama proses pengujian dan kapasitas merupakan nilai dari banyaknya muatan yang dikeluarkan selama proses pengosongan baterai.



Gambar 4.6 Karakteristik baterai dinamis asam-timbal model leon (Leon.dkk,2006)

Jika gambar 4.4a dibandingkan dengan gambar 4.6 maka dari kedua gambar tersebut dapat dilihat bahwa grafik diantara keduanya sama-sama memiliki tren dan karakter yang sama dengan satu siklus *charge-discharge*. Hal ini menunjukkan bahwa baterai dinamis

asam-timbal yang telah dibuat pada penelitian ini memiliki karakter yang hampir sama dengan penelitian-penelitian sebelumnya (Leon.dkk,2006) dan juga membuktikan bahwa baterai yang dibuat pada penelitian ini tergolong baterai sekunder yang dapat diisi ulang (*rechargeable*).

4.2 Perbedaan Luas Permukaan Elektroda Pb-PbO₂ Pada Baterai Asam-timbal

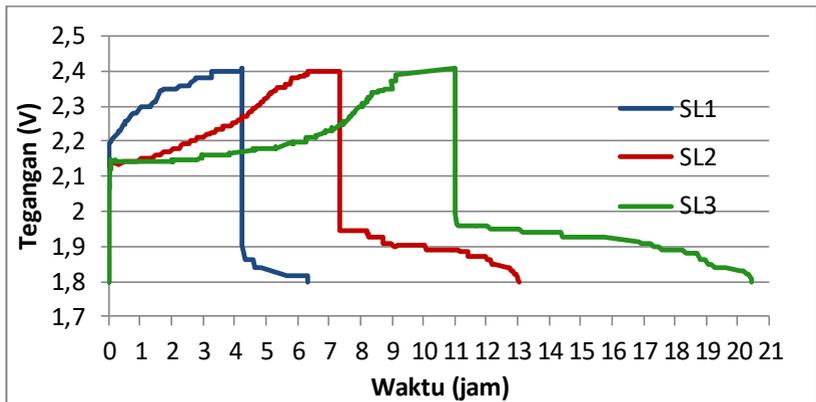
Pada penelitian tentang perbedaan luas permukaan elektroda Pb-PbO₂ digunakan tiga variasi dengan luasan permukaan elektroda yang berbeda. Perlu diketahui bahwa 1 plat elektroda berukuran 4,5x7,5 cm², dimana pada variasi 1 (**L1**) digunakan 3 plat elektroda dengan luasan 13,5x7,5 cm², variasi 2 (**L2**) digunakan 5 plat elektroda dengan luasan 22,5x7,5 cm², dan variasi 3 (**L3**) digunakan 7 plat elektroda dengan luasan 31,5x7,5 cm². Perbandingan dari ketiganya dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Penamaan variasi perbedaan luas elektroda Pb-PbO₂

Luasan elektroda	L1 (13,5x7,5 cm ²)	L2 (22,5x7,5 cm ²)	L3 (31,5x7,5 cm ²)
Statis	SL1	SL2	SL3
Dinamis	DL1	DL2	DL3

4.2.1 Baterai statis asam-timbal (*static lead-acid battery*)

Baterai statis asam-timbal merupakan jenis baterai yang sangat umum digunakan saat ini. Baterai jenis ini juga sering disebut dengan baterai asam-timbal konvensional yang sering digunakan untuk aplikasi otomotif. Pengujian baterai statis asam-timbal sel tunggal ini dilakukan selama tiga siklus *charging-discharging*.



Gambar 4.7 karakteristik baterai statis asam-timbal (*static lead-acid battery*) dengan perbedaan luas permukaan elektroda Pb-PbO₂

Gambar 4.7 menunjukkan grafik hubungan antara nilai tegangan terhadap waktu pada pengujian siklus *charge-discharge* baterai statis asam timbal dengan luasan yang telah disebutkan sebelumnya. Grafik tersebut menunjukkan bahwa pada proses pengisian baterai, *SL3* (warna hijau) memiliki waktu paling lama jika dibandingkan dengan *SL2* (warna merah) dan *SL1* (warna biru). Selama satu siklus pengisian, *SL3* memiliki waktu pengisian 10,9 jam. Sedangkan *SL2* memiliki waktu pengisian 3,6 jam lebih pendek dari *SL3* yakni 7,3 jam dan *SL1* memiliki waktu pengisian paling pendek yakni 4,2 jam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar luasan elektroda baik Pb maupun PbO₂ maka waktu yang dibutuhkan agar baterai dalam keadaan penuh (mencapai 2,4 Volt) akan semakin lama. Hal ini dikarenakan bahwa semakin besar luasan elektroda maka elektroda akan dapat menyimpan muatan semakin banyak untuk memenuhi ruang yang semakin luas. Hal tersebut juga dijelaskan oleh Hong-Keun Kim (2017) dan Aditya (2016) yang menjelaskan bahwa semakin besar luasan suatu sel pada baterai maka baterai dapat menyimpan muatan semakin banyak yang ditunjukkan dengan semakin besarnya nilai kapasitas yang dihasilkan selama proses pengujian.

Banyaknya muatan yang tersimpan selama proses pengisian akan mempengaruhi proses pengosongan muatan pada baterai yang akan semakin lama. Hal ini dibuktikan dengan grafik *SL3* (warna

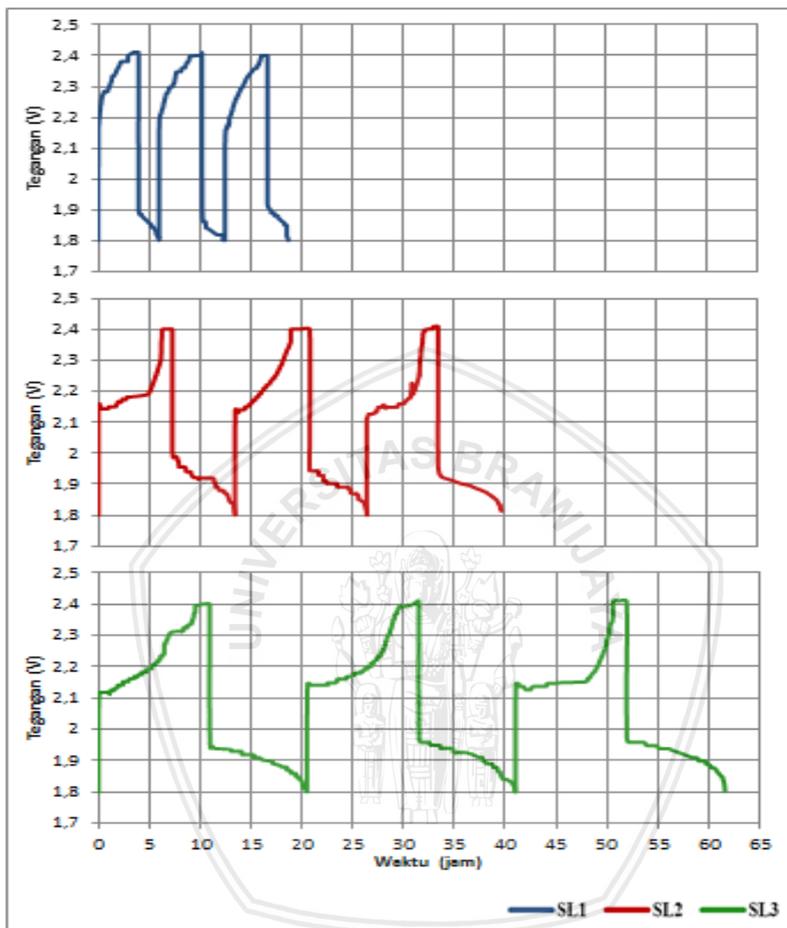
hijau) paling lama dibandingkan dengan *SL2* (warna merah) dan *SL1* (warna biru). Dimana *SL3* memiliki waktu pengosongan 9,6 jam. Sedangkan *SL2* memiliki waktu pengosongan 3,8 jam lebih pendek dari *SL3* yakni 5,8 jam dan *SL1* memiliki waktu pengosongan paling pendek diantara ketiganya yakni 2,1 jam. Nilai dari ketiganya dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Nilai karakterisasi baterai statis asam-timbal

Baterai statis asam-timbal		Siklus ke-1	Siklus ke-2	Siklus ke-3	Rata-rata
<i>SL1</i>	$V_{\text{tengah charge}}$ (V)	2,35	2,34	2,32	2,34
	$V_{\text{tengah discharge}}$ (V)	1,85	1,82	1,87	1,85
	I (A)	0,99	0,99	0,99	0,99
	t_c (s)	14306	15286	15165	14919
	t_d (s)	7273	7421	7359	7351
	C (mAh)	2029	2067	2057	2051
<i>SL2</i>	$V_{\text{tengah charge}}$ (V)	2,19	2,21	2,16	2,19
	$V_{\text{tengah discharge}}$ (V)	1,90	1,89	1,89	1,89
	I (A)	0,99	0,99	0,99	0,99
	t_c (s)	26256	26446	25256	25986
	t_d (s)	22326	21776	22515	22206
	C (mAh)	6313	6052	6285	6217
<i>SL3</i>	$V_{\text{tengah charge}}$ (V)	2,20	2,18	2,15	2,18
	$V_{\text{tengah discharge}}$ (V)	1,90	1,92	1,92	1,91
	I (A)	0,99	0,99	0,99	0,99
	t_c (s)	39332	39551	39332	39405
	t_d (s)	33478	34073	34891	34147
	C (mAh)	9307	9466	9692	9488

Gambar 4.8 menunjukkan grafik hubungan antara nilai tegangan terhadap waktu pada proses pengujian *charge-discharge* baterai statis asam-timbal selama tiga siklus pengujian. Grafik tersebut menunjukkan bahwa *SL1* (warna biru) memiliki nilai yang hampir sama untuk setiap siklusnya baik nilai tegangan dan waktu pengisian-pengosongan. Hal yang sama terjadi juga pada *SL2* (warna merah) dan *SL3* (warna hijau). Selama tiga siklus pengujian, *SL3* memiliki waktu pengujian paling lama jika dibandingkan dengan *SL2* dan *SL1*. Hal ini memperkuat bukti bahwa semakin besar luasan elektroda maka semakin besar pula baterai dapat menyimpan energi. Gambar 4.8 juga dapat menjelaskan bahwa baterai yang

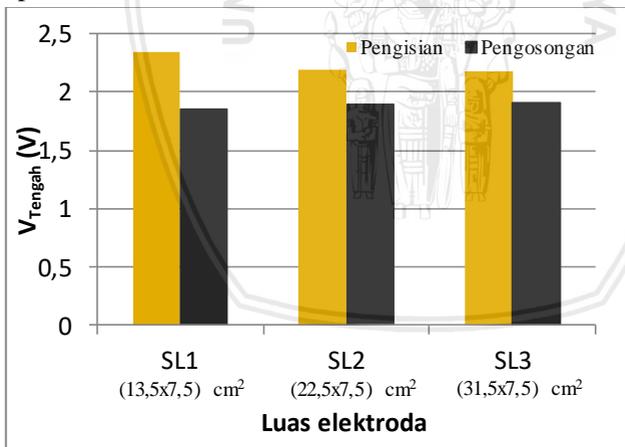
digunakan merupakan baterai yang dapat diisi ulang (*rechargeable*) yang dibuktikan dengan ketiga siklus yang relatif sama.



Gambar 4.8 karakteristik baterai statis asam-timbal (*static lead-acid battery*) dengan perbedaan luas permukaan elektroda Pb-PbO₂ selama 3 siklus.

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa nilai tegangan tengah (V_{middle}) pada proses pengisian lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan tengah (V_{middle}) pada proses pengosongan. Hal ini jelas terjadi karena pada proses pengisian, arus listrik akan mengalir

masuk pada baterai. Akibatnya terjadi proses penyimpanan muatan yang akan menaikkan nilai tegangan pada baterai. Sedangkan pada proses pengosongan, baterai akan diberi beban spesifik dengan arus konstan 1A. Akibat arus yang keluar, muatan yang tersimpan pada baterai akan berkurang secara konstan yang mengakibatkan menurunnya tegangan pada baterai. Pada proses pengisian baterai selama tiga siklus, tegangan tengah (V_{middle}) **SL3** memiliki nilai terendah dibandingkan dengan **SL2** dan **SL1**. Sedangkan **SL1** memiliki tegangan tengah (V_{middle}) dengan nilai paling tinggi (Tabel 4.3). Jika diambil rata-rata dari ketiga siklusnya, pada keadaan awal proses pengisian **SL3** memiliki nilai tegangan 2,08 V lebih kecil 1,2% dari **SL1** dengan nilai tegangan 2,11 V. Sedangkan **SL2** memiliki nilai tegangan 2,09 V lebih kecil 0,8% dari **SL1** yakni 2,11 V. Hasil tersebut mendukung nilai dari tegangan tengah (V_{middle}) pada proses pengisian yang menjelaskan bahwa semakin besar luasan elektroda pada baterai maka nilai tegangan tengah-nya (V_{middle}) akan semakin rendah. Rendahnya nilai tegangan tengah (V_{middle}) dari suatu baterai dikarenakan kenaikan beda potensial yang lambat pada proses pengisian. Akibatnya untuk mencapai nilai 2,4 V (baterai dalam keadaan penuh) akan semakin lama.



Gambar 4.9 perbandingan nilai tegangan tengah (V_{middle}) pada baterai statis asam-timbal dengan luasan elektroda yang berbeda

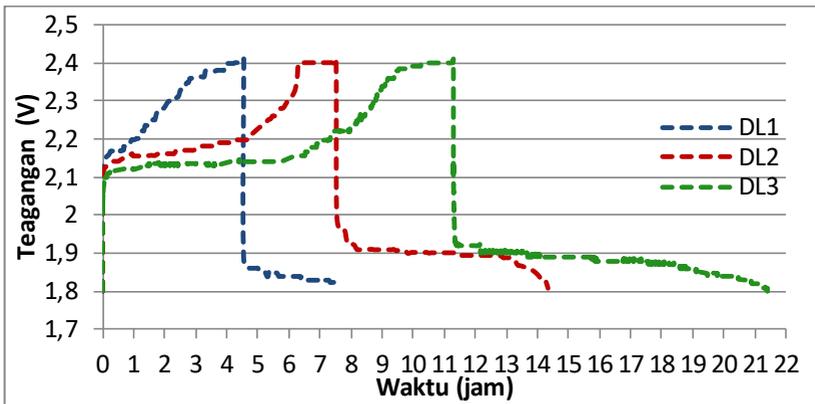
Berbeda halnya pada proses pengosongan (Gambar 4.9), **SL3** memiliki nilai tegangan tengah (V_{middle}) tertinggi dibandingkan **SL1**

dan *SL2*. Sedangkan *SL1* memiliki nilai tegangan tengah (V_{middle}) dengan nilai terendah (Tabel 4.3). Jika diambil rata-rata dari ketiga siklusnya, pada keadaan awal proses pengosongan *SL3* memiliki nilai tegangan awal tertinggi dengan nilai 1,99 V. Sedangkan *SL2* memiliki nilai 1,6% lebih rendah dibandingkan *SL3* dengan nilai tegangan awal 1,95 V dan *SL1* memiliki nilai tegangan 5% lebih rendah dari *SL3* yakni 1,87 V. Hasil tersebut juga mendukung nilai dari tegangan tengah (V_{middle}) pada proses pengosongan yang menjelaskan bahwa semakin besar luasan elektroda pada baterai maka nilai tegangan tengah-nya (V_{middle}) akan semakin tinggi. Tingginya nilai tegangan tengah (V_{middle}) pada proses pengosongan dikarenakan penurunan beda potensial yang lambat pada baterai. Akibatnya untuk mencapai keadaan tegangan *cut-off* (1,8 V) akan semakin lama. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar luasan elektroda maka baterai dapat mempertahankan nilai tegangan kerjanya dalam waktu yang cukup lama. Lamanya baterai dalam mempertahankan tegangannya ini dipengaruhi karena banyaknya muatan yang tersimpan pada proses pengisian. Sehingga proses pengosongan muatan pada baterai juga akan semakin lama.

Selama tiga siklus pengujian *charge-discharge*, ketiga variasi luasan baik *SL1* (warna biru), *SL2* (warna merah) dan *SL3* (warna hijau) menunjukkan bahwa masing-masing baterai masih dalam keadaan normal. Hal tersebut dilihat dari kecenderungan nilai yang hampir sama untuk tiap-tiap siklusnya. Ditunjukkan dengan nilai tegangan tengah (V_{middle}) yang relatif sama, arus pengujian yang masih dalam keadaan konstan, waktu pengisian-pengosongan yang hampir sama untuk tiap siklusnya, dan kapasitas yang hampir sama untuk tiap siklusnya.

4.2.2 Baterai dinamis asam-timbal (*lead-acid flow battery*)

Pada baterai dinamis asam-timbal ini elektrolit H_2SO_4 disimpan dalam tangki elektrolit dan akan dipompa mengalir melalui sel elektrokimia. Pengujian baterai dinamis asam-timbal sel tunggal ini dilakukan selama tiga siklus *charging-discharging* dengan laju aliran elektrolit 9 ml/menit.



Gambar 4.10 karakteristik baterai dinamis asam-timbal (*lead-acid flow battery*) dengan perbedaan luas permukaan elektroda Pb-PbO₂

Gambar 4.10 menunjukkan grafik hubungan antara nilai tegangan terhadap waktu pada pengujian siklus *charge-discharge* baterai dinamis asam timbal dengan luasan yang telah disebutkan sebelumnya. Grafik tersebut menunjukkan bahwa pada proses pengisian baterai, **DL3** (warna hijau putus-putus) memiliki waktu paling lama jika dibandingkan dengan **DL2** (warna merah putus-putus) dan **DL1** (warna biru putus-putus). Selama satu siklus pengisian, **DL3** memiliki waktu pengisian 11,3 jam. Sedangkan **DL2** memiliki waktu pengisian 3,8 jam lebih pendek dari **DL3** yakni 7,5 jam dan **DL1** memiliki waktu pengisian paling pendek yakni 4,5 jam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar luasan elektroda baik Pb maupun PbO₂ maka waktu yang dibutuhkan agar baterai dalam keadaan penuh (mencapai 2,4 Volt) akan semakin lama. Hal ini dikarenakan bahwa semakin besar luasan elektroda maka elektroda akan dapat menyimpan muatan semakin banyak untuk memenuhi ruang yang semakin. Hal tersebut juga dijelaskan oleh Hong-Keun Kim (2017) dan Aditya (2016) yang menjelaskan bahwa semakin besar luasan suatu sel pada baterai maka baterai dapat menyimpan muatan semakin banyak yang ditunjukkan dengan semakin besarnya nilai kapasitas yang dihasilkan selama proses pengujian.

Banyaknya muatan yang tersimpan pada proses pengisian maka akan mempengaruhi proses pengosongan pada baterai yang

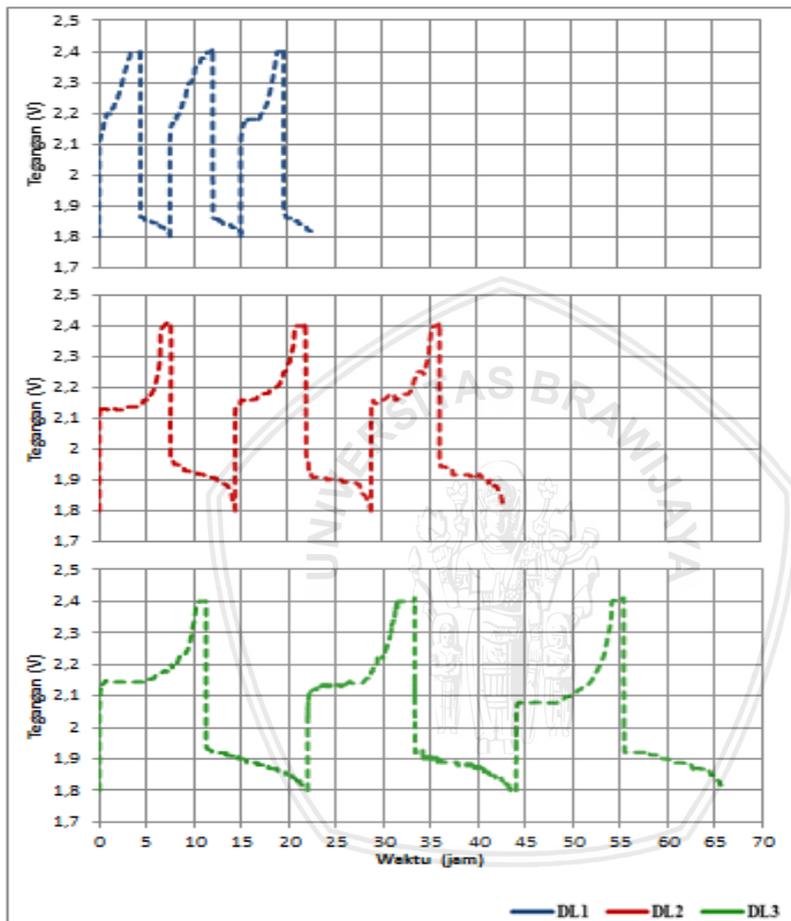
akan semakin lama. Hal ini dibuktikan dengan grafik **DL3** paling lama dibandingkan dengan **DL2** dan **DL1**. Dimana **DL3** memiliki waktu pengosongan 10,5 jam. Sedangkan **DL2** memiliki waktu pengosongan 3,7 jam lebih pendek dari **DL3** yakni 6,8 jam dan **DL1** memiliki waktu pengosongan paling pendek diantara ketiganya yakni 3,1 jam. Nilai dari ketiganya dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Nilai karakterisasi baterai dinamis asam-timbal

Baterai dinamis asam-timbal		Siklus ke-1	Siklus ke-2	Siklus ke-3	Rata-rata
DL1	$V_{\text{tengah charge}}$ (V)	2,26	2,28	2,20	2,25
	$V_{\text{tengah discharge}}$ (V)	1,84	1,84	1,85	1,84
	I (A)	0,99	0,99	0,99	0,99
	t_c (s)	15758	16365	16375	16166
	t_d (s)	10976	10954	10697	10876
	C (mAh)	3057	3079	2981	3039
DL2	$V_{\text{tengah charge}}$ (V)	2,14	2,19	2,17	2,17
	$V_{\text{tengah discharge}}$ (V)	1,88	1,89	1,89	1,89
	I (A)	0,99	0,99	0,99	0,99
	t_c (s)	27128	27069	26064	26754
	t_d (s)	24555	24554	24224	24444
	C (mAh)	6912	6824	6729	6822
DL3	$V_{\text{tengah charge}}$ (V)	2,15	2,10	2,10	2,12
	$V_{\text{tengah discharge}}$ (V)	1,91	1,90	1,90	1,90
	I (A)	0,99	0,99	0,99	0,99
	t_c (s)	40577	40662	40907	40715
	t_d (s)	37520	36401	37367	37096
	C (mAh)	10442	10214	10416	10357

Gambar 4.11 menunjukkan grafik hubungan antara nilai tegangan terhadap waktu pada proses pengujian *charge-discharge* baterai dinamis asam-timbal selama tiga siklus pengujian. Grafik tersebut menunjukkan bahwa **DL1** (warna biru putus-putus) memiliki nilai yang hampir sama untuk setiap siklusnya baik nilai tegangan, waktu pengisian-pengosongan. Hal yang sama juga terjadi juga pada **DL2** (warna merah putus-putus), dan **DL3** (warna hijau putus-putus). Selama tiga siklus pengujian, **DL3** memiliki waktu pengujian paling lama jika dibandingkan dengan **DL2** dan **DL1**. Hal ini memperkuat bukti bahwa semakin besar luasan

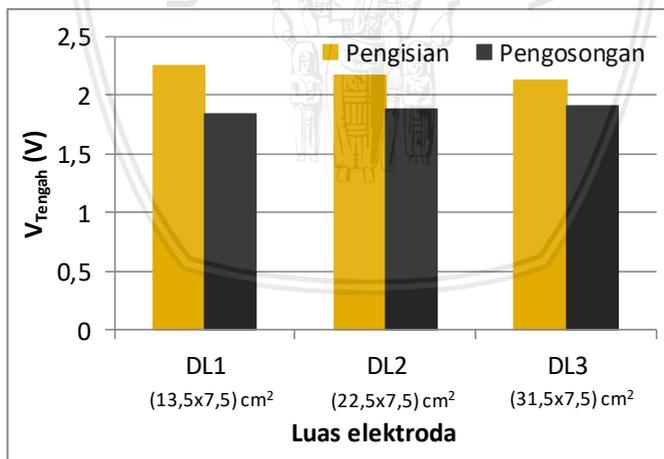
elektroda maka semakin besar pula baterai dapat menyimpan energi. Gambar 4.11 juga dapat menjelaskan bahwa baterai yang digunakan merupakan baterai yang dapat diisi ulang (*rechargeable*) yang dibuktikan dengan ketiga siklus yang relatif sama.



Gambar 4.11 karakteristik baterai dinamis asam-timbal (*lead-acid flow battery*) dengan perbedaan luas permukaan elektroda Pb-PbO₂ selama 3 siklus

Gambar 4.12 menunjukkan bahwa nilai tegangan tengah (V_{middle}) pada proses pengisian lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan tengah (V_{middle}) pada proses pengosongan. Hal ini jelas terjadi karena pada proses pengisian, arus listrik akan mengalir

masuk pada baterai. Akibatnya terjadi proses penyimpanan muatan yang akan menaikkan nilai tegangan pada baterai. Sedangkan pada proses pengosongan, baterai akan diberi beban spesifik dengan arus konstan 1A. Akibat arus yang keluar, muatan yang tersimpan pada baterai akan berkurang secara konstan yang mengakibatkan menurunnya tegangan pada baterai. Pada proses pengisian baterai selama tiga siklus, tegangan tengah (V_{middle}) **DL3** memiliki nilai terendah dibandingkan dengan **DL2** dan **DL1**. Sedangkan **DL1** memiliki tegangan tengah (V_{middle}) dengan nilai paling tinggi (Tabel 4.4). Jika diambil rata-rata dari ketiga siklusnya, pada keadaan awal proses pengisian **DL3** memiliki nilai tegangan 2,03 V lebih kecil 2,9% dari **DL1** dengan nilai tegangan 2,10 V. Sedangkan **DL2** memiliki nilai tegangan 2,07 V lebih kecil 1,2% dari **DL1** yakni 2,10 V. Hasil tersebut mendukung nilai dari tegangan tengah (V_{middle}) pada proses pengisian yang menjelaskan bahwa semakin besar luasan elektroda pada baterai maka nilai tegangan tengahnya (V_{middle}) akan semakin rendah. Rendahnya nilai tegangan tengah (V_{middle}) dari suatu baterai dikarenakan kenaikan beda potensial yang lambat pada proses pengisian. Akibatnya untuk mencapai nilai 2,4 V (baterai dalam keadaan penuh) akan semakin lama.



Gambar 4.12 perbandingan nilai tegangan tengah (V_{middle}) pada baterai dinamis asam-timbal dengan luasan elektroda yang berbeda

repository.ub.ac.id

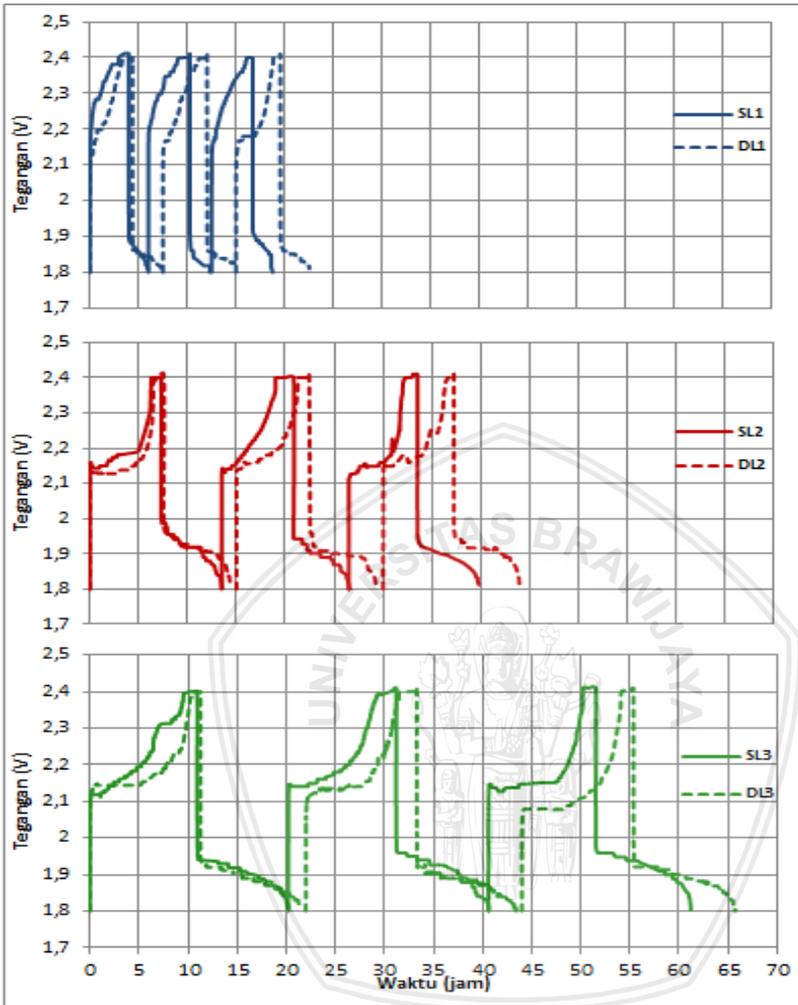
Berbeda halnya pada proses pengosongan (Gambar 4.12), **DL3** memiliki nilai tegangan tengah (V_{middle}) tertinggi dibandingkan **DL1** dan **DL2**. Sedangkan **DL1** memiliki nilai tegangan tengah (V_{middle}) dengan nilai terendah (Tabel 4.4). Jika diambil rata-rata dari ketiga siklusnya, pada keadaan awal proses pengosongan **DL3** memiliki nilai tegangan awal tertinggi dengan nilai 1,96 V. Sedangkan **DL2** memiliki nilai 0,9% lebih rendah dibandingkan **DL3** dengan nilai tegangan awal 1,94 V dan **DL1** memiliki nilai tegangan 4,1% lebih rendah dari **DL3** yakni 1,86 V. Hasil tersebut juga mendukung nilai dari tegangan tengah (V_{middle}) pada proses pengosongan yang menjelaskan bahwa semakin besar luasan elektroda pada baterai maka nilai tegangan tengah-nya (V_{middle}) akan semakin tinggi. Tingginya nilai tegangan tengah (V_{middle}) pada proses pengosongan dikarenakan penurunan beda potensial yang lambat pada baterai. Akibatnya untuk mencapai keadaan tegangan *cut-off* (1,8 V) akan semakin lama. 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. Sehingga proses pengosongan muatan pada baterai juga akan semakin lama.

Selama tiga siklus pengujian *charge-discharge*, ketiga variasi luasan baik **DL1** (warna biru putus-putus), **DL2** (warna merah putus-putus) dan **DL3** (warna hijau putus-putus) menunjukkan bahwa masing-masing baterai masih dalam keadaan normal. Hal tersebut dilihat dari kecenderungan nilai yang hampir sama untuk tiap-tiap siklusnya. Ditunjukkan dengan nilai tegangan tengah (V_{middle}) yang relatif sama, arus pengujian yang masih dalam keadaan konstan, waktu pengisian-pengosongan yang hampir sama untuk tiap siklusnya, dan kapasitas yang hampir sama untuk tiap siklusnya.

4.3 Perbandingan Baterai Asam-timbal Statis dan Dinamis

Berbeda halnya dengan baterai statis asam-timbal, pada baterai dinamis asam-timbal ini elektrolit H_2SO_4 disimpan dalam tangki elektrolit dan akan dipompa mengalir melalui sel elektrokimia. Baterai dinamis asam-timbal (*lead-acid flow batteries*) merupakan jenis baterai baru yang memanfaatkan aliran elektrolit dalam sel elektrokimia. Secara umum, baterai dinamis memiliki kemampuan yang cukup diandalkan karena mampu menyimpan energi listrik lebih lama dibanding baterai yang umum digunakan sekarang ini. Hal tersebut dibuktikan pada perbandingan antara kedua jenis baterai statis dan dinamis (gambar 4.13).

Gambar 4.13 menunjukkan Grafik hubungan nilai tegangan terhadap waktu selama tiga siklus pengujian *charge-discharge* dengan luasan elektroda yang berbeda pada kedua jenis baterai. Grafik tersebut menunjukkan bahwa baik pada baterai statis maupun dinamis, semakin besar luasan suatu elektroda maka proses pengisian dan pengosongannya akan semakin lama pula. Hal ini menunjukkan bahwa luasan elektroda akan mempengaruhi banyaknya muatan yang dapat tersimpan dalam baterai. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar luasan elektroda maka muatan yang tersimpan dalam baterai akan semakin besar. Hal tersebut juga dijelaskan oleh Hong-Keun Kim (2017) dan Aditya (2016) yang menjelaskan bahwa semakin besar luasan suatu sel pada baterai maka baterai dapat menyimpan muatan semakin banyak yang ditunjukkan dengan semakin besarnya nilai kapasitas yang dihasilkan selama proses pengujian. Grafik pada gambar 4.13 juga menunjukkan bahwa baik baterai dinamis maupun statis merupakan baterai yang dapat diisi ulang dengan dapat dilakukannya pengisian dan pengosongan dalam setiap siklusnya.

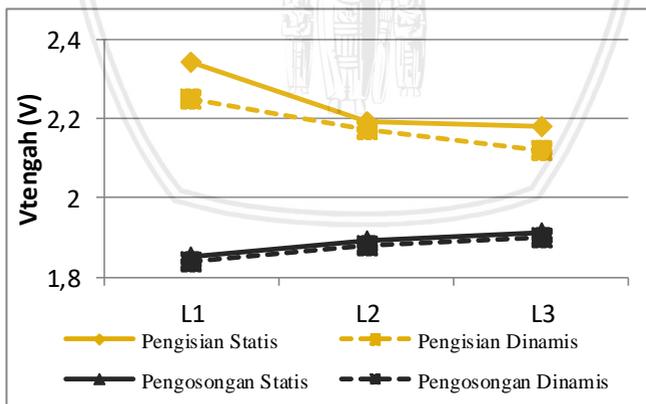


Gambar 4.13 Perbandingan karakteristik antara baterai asam-timbal statis dengan baterai asam timbal dinamis selama 3 siklus pada arus pembebana 1 ampere

Grafik pada gambar 4.13 menunjukkan terdapat perbedaan tegangan tengah antara baterai statis asam-timbal dan baterai dinamis asam-timbal. Perbedaan pertama terlihat pada proses pengisian baterai, nilai tegangan tengah pada baterai dinamis akan cenderung lebih rendah dari nilai tegangan baterai statis. Perbedaan antara

baterai statis dan baterai dinamis juga dapat terlihat pada proses pengosongan, dimana baterai dinamis asam timbal memiliki waktu pengosongan yang lebih lama dari baterai statis asam-timbal.

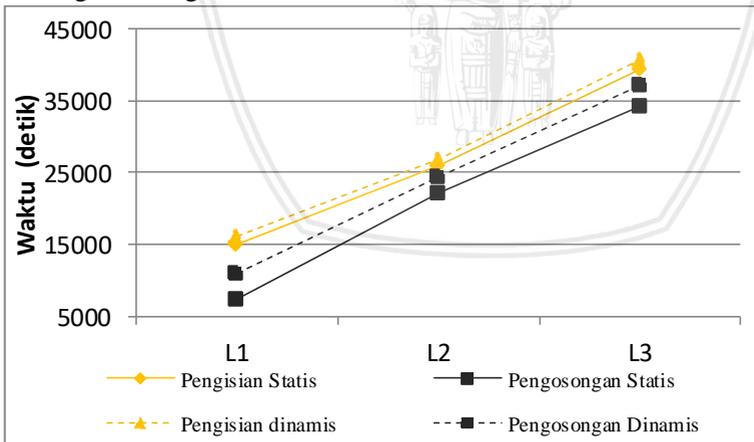
Perbedaan pertama antara baterai dinamis dan baterai statis dapat dilihat pada gambar 4.14 yang menunjukkan nilai tegangan tengah (V_{middle}) antara kedua jenis baterai. Jika diambil rata-rata dari ketiga siklus-nya, pada proses pengisian nilai tegangan awal **DL1** (warna biru putus-putus) lebih rendah 0,4% dari **SL1** (warna biru penuh) yakni 2,11 V pada **SL1** dan 2,10 V pada **DL1**. Sedangkan nilai tegangan awal **DL2** (warna merah putus-putus) lebih rendah 0,8% dari **SL2** (warna merah penuh) dan **DL3** (warna hijau putus-putus) memiliki nilai tegangan awal lebih rendah 2,1% dari **SL3** (warna hijau penuh). Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada keadaan awal, tegangan baterai dinamis selalu lebih rendah daripada baterai statis. Hal ini mendukung nilai tegangan tengah (V_{middle}) baterai dinamis yang menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan baterai statis asam-timbal (Tabel 4.5). Rendahnya nilai tegangan tengah (V_{middle}) dari baterai dinamis dikarenakan elektrolit yang mengalir melalui sel elektrokimia. Reaksi redoks akan terus bergantian dari suatu titik elektroda karena elektrolit yang mengalir, sehingga menyebabkan kenaikan nilai tegangan yang tidak konstan dan cenderung lebih lambat dari baterai statis.



Gambar 4.14 Perbandingan nilai tegangan tengah (V_{middle}) antara baterai asam-timbal statis dengan baterai asam timbal dinamis pada proses pengisian dan pengosongan

Pada proses pengosongan, nilai tegangan tengah (V_{middle}) pada kedua baterai menunjukkan hal yang sama seperti pada proses pengisian. Dimana tegangan tengah (V_{middle}) baterai dinamis menunjukkan nilai lebih rendah dibandingkan baterai statis. Namun perbedaan tegangan tengah (V_{middle}) dari kedua baterai tersebut sangatlah kecil. Perbedaan yang sangat mencolok terlihat dari lama waktu pengosongan diantara kedua baterai.

Pada proses pengosongan, baterai dinamis asam-timbal memiliki waktu pengosongan energi yang jauh lebih lama dibandingkan dengan baterai statis asam-timbal. Jika dibandingkan dengan lama pengisiannya, baterai dinamis asam-timbal memang lebih lama dibandingkan baterai statis asam-timbal, namun perbedaan keduanya sangatlah kecil dilihat (gambar 4.15). Lebih lamanya proses pengosongan baterai dinamis ini menunjukkan bahwa baterai memiliki tegangan kerja yang relatif lebih lama dibandingkan dengan baterai statis. Proses pengosongan yang lebih lama ini dikarenakan reaksi redoks antara elektroda dan elektrolit akan terus bergantian yang disebabkan elektrolit yang mengalir melalui sel, sehingga akan memicu semakin banyaknya muatan yang dikeluarkan. Dengan demikian dapat diketahui bahwa baterai dinamis asam-timbal memiliki cadangan energi yang lebih besar jika dibandingkan dengan baterai statis asam-timbal.



Gambar 4.15 perbandingan waktu pengisian-pengosongan pada baterai statis dan baterai dinamis

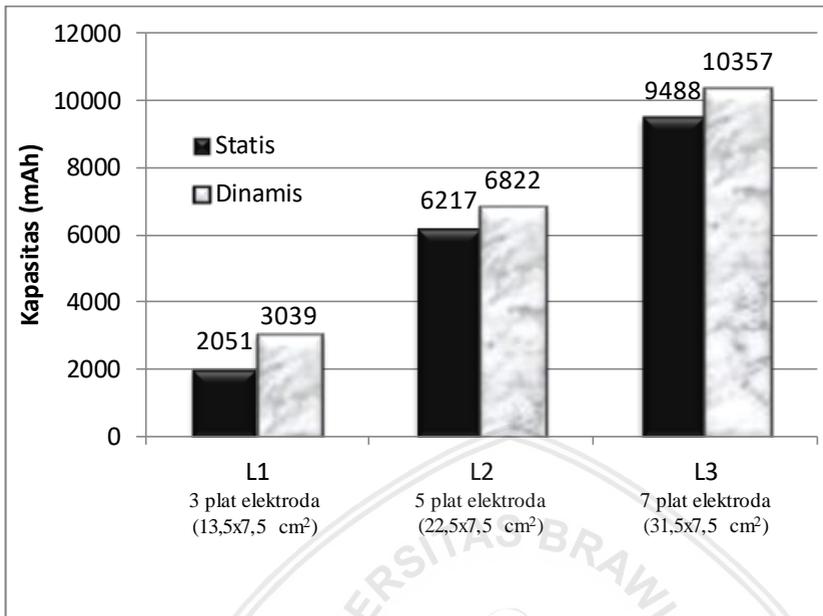
Selama tiga siklus pengujian (gambar 4.13) menunjukkan bahwa **DL3** memiliki selisih waku pengosongan 4,5 jam lebih lama dari **SL3**. Sedangkan **DL2** memiliki selisih 4,2 jam lebih lama dari **SL2** (0,3 jam lebih rendah dari **DL3**) dan **DL1** memiliki selisih 3,8 jam lebih lama dari **SL1** (0,4 jam lebih rendah dari **DL2**). Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar luasan elektroda maka akan mendukung performa dari baterai dinamis asam-timbal yang semakin tinggi. Perbandingan diantara kedua baterai juga dapat dilihat dari Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Perbandingan nilai karakterisasi baterai asam-timbal statis dan dinamis

Perbandingan Baterai asam-timbal Statis-dinamis		<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>
<i>Statis</i>	$V_{\text{tengah charge}}$ (V)	2,34	2,19	2,18
	$V_{\text{tengah discharge}}$ (V)	1,85	1,89	1,91
	I (A)	0,99	0,99	0,99
	t_c (s)	14919	25986	39405
	t_d (s)	7351	22206	34147
	C (mAh)	2051	6217	9488
<i>Dinamis</i>	$V_{\text{tengah charge}}$ (V)	2,25	2,17	2,12
	$V_{\text{tengah discharge}}$ (V)	1,84	1,89	1,90
	I (A)	0,99	0,99	0,99
	t_c (s)	16166	26754	40715
	t_d (s)	10876	24444	37096
	C (mAh)	3039	6822	10357

4.4 Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai merupakan kemampuan untuk menyimpan besarnya muatan listrik atau besarnya energi yang dapat disimpan maupun dikeluarkan oleh baterai (Suyanta,2013). Kapasitas baterai dapat dihitung dari besarnya arus yang dikeluarkan terhadap lamanya waktu yang dibutuhkan selama proses pengosongan baterai. Oleh karena itu satuan dari kapasitas baterai dinyatakan dalam Ampere-jam (Ah) bukan dalam bentuk satuan muatan listrik coulomb (C) atau farad (F).

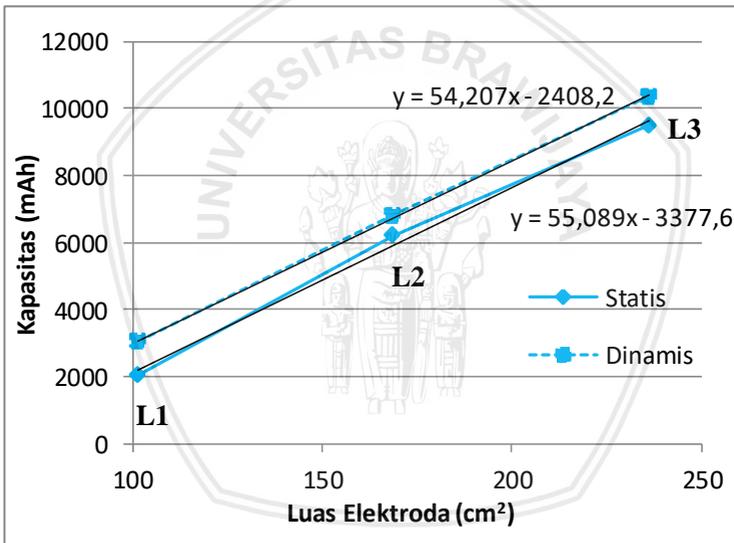


Gambar 4.16 perbandingan nilai kapasitas baterai

Gambar 4.16 menunjukkan besarnya nilai kapasitas untuk masing-masing luasan elektroda baik pada baterai statis maupun baterai dinamis. Baterai statis asam-timbal sel tunggal dengan luasan elektroda $13,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L1**) mampu memiliki kapasitas baterai sebesar 2051 mAh. Pada percobaan dengan luasan berbeda yakni $22,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L2**) atau 1,67 kali luasan mula-mula ternyata baterai mampu menyimpan muatan sebesar 6217 mAh. Nilai ini 203% lebih besar jika dibandingkan dengan **L1**. Sedangkan ketika luasan elektroda ditingkatkan menjadi $31,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L3**), hasil percobaan menunjukkan peningkatan kapasitas baterai hingga 362% dari kapasitas luasan **L1**. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa peningkatan luasan elektroda mampu meningkatkan kapasitas dari baterai.

Pada baterai dinamis asam-timbal sel tunggal, baterai dengan luasan elektroda $13,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L1**) mampu memiliki kapasitas baterai sebesar 3039 mAh. Pada percobaan dengan luasan berbeda yakni $22,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L2**) atau 1,67 kali luasan mula-mula ternyata baterai mampu menyimpan muatan sebesar 6822 mAh. Nilai ini

125% lebih besar jika dibandingkan dengan *L1*. Sedangkan ketika luasan elektroda ditingkatkan menjadi 31,5x7,5 cm² (*L3*), hasil percobaan menunjukkan peningkatan kapasitas baterai hingga 241% dari kapasitas luasan *L1*. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa peningkatan luasan elektroda mampu meningkatkan kapasitas dari baterai. Pada kedua jenis baterai baik baterai statis maupun dinamis, semakin besar luasan elektroda pada baterai maka kapasitas baterai untuk menyimpan daya listrik akan semakin besar. Hal tersebut juga dijelaskan oleh Hong-keun kim (2017) dan Aditya (2016) yang menjelaskan bahwa semakin besar luasan suatu sel pada baterai maka baterai dapat menyimpan muatan semakin banyak yang ditunjukkan dengan semakin besarnya nilai kapasitas yang dihasilkan selama proses pengujian.



Gambar 4.17 Peningkatan kapasitas baterai dengan meningkatnya luasan elektroda

Jika dibandingkan antara baterai statis asam-timbal dengan baterai dinamis asam-timbal (gambar 4.16 dan 4.17), baterai dinamis lebih unggul daripada baterai statis. Hal ini dikarenakan baterai dinamis asam-timbal memiliki kapasitas yang lebih besar dari baterai statis. *L1* baterai dinamis memiliki kapasitas 988 mAh lebih besar

repository.ub.ac.id

dari baterai statis. Sedangkan **L2** baterai dinamis memiliki kapasitas 605 mAh lebih besar, dan **L3**-nya memiliki kapasitas 869 mAh lebih besar dari baterai statis. Lebih besarnya kapasitas dari baterai dinamis asam-timbal ini dipengaruhi karena elektrolit terus mengalir pada sel elektrokimia sehingga reaksi untuk membentuk PbSO_4 dan H_2O pada suatu titik elektroda juga akan lebih banyak. Banyaknya reaksi yang terjadi pada sel elektrokimia ini akan mempengaruhi banyaknya muatan yang akan dikeluarkan.

4.5 Efisiensi Sel

Efisiensi baterai merupakan suatu parameter untuk mengukur seberapa bagus kualitas dan performa dari suatu baterai. Efisiensi dari baterai merupakan perbandingan dari suatu nilai pada pengosongan terhadap nilai pengisiannya. Pengukuran nilai efisiensi didasarkan pada tiga aspek yaitu *Voltage efficiency (VE)*, *Coulombic efficiency (CE)*, dan *Energy efficiency (EE)* sesuai persamaan 2.3, 2.4, dan 2.5.

Efisiensi tegangan (*VE*) merupakan rasio perbandingan nilai tegangan tengah antara proses pengisian dan pengosongan. Pada baterai statis asam-timbal sel tunggal, baterai dengan luasan elektroda $13,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L1**) memiliki nilai efisiensi tegangan 79,03%. Pada percobaan dengan luasan berbeda yakni $22,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L2**) atau 1,67 kali luasan mula-mula ternyata efisiensi baterai naik 7,61% menjadi 86,64%. Ketika luasan elektroda ditingkatkan lagi menjadi $31,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L3**), hasil percobaan menunjukkan peningkatan efisiensi tegangan hingga 87,90%. Sedangkan pada baterai dinamis asam-timbal memiliki karakter efisiensi tegangan yang hampir sama, dimana nilai efisiensi terus meningkat seiring dengan peningkatan luasan elektroda pada baterai. Nilai efisiensi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Efisiensi coulomb (*CE*) merupakan rasio perbandingan banyaknya muatan yang keluar pada proses pengosongan terhadap banyaknya muatan yang tersimpan selama proses pengisian. Pada baterai statis asam-timbal sel tunggal, baterai dengan luasan elektroda $13,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L1**) memiliki nilai efisiensi coulomb 49,27%. Pada percobaan dengan luasan berbeda yakni $22,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L2**) atau 1,67 kali luasan mula-mula ternyata efisiensi baterai naik 36,18% menjadi 85,45%. Ketika luasan elektroda ditingkatkan lagi

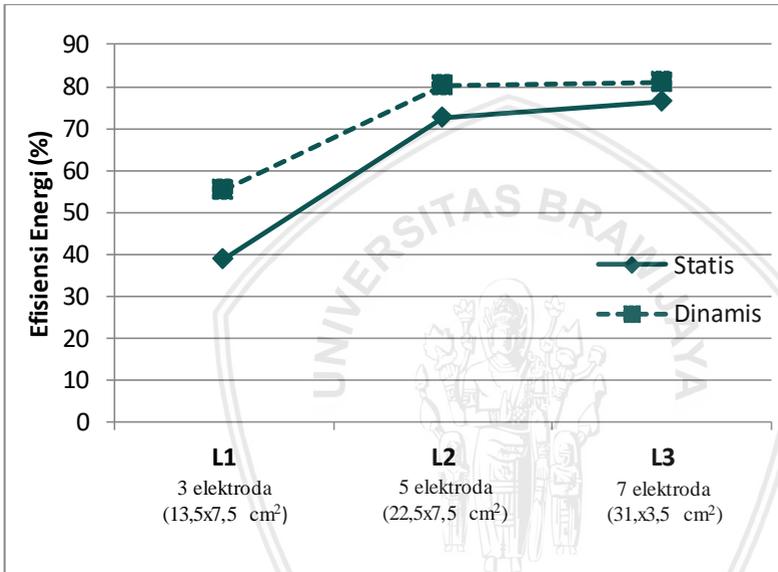
menjadi $31,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L3**), hasil percobaan menunjukkan peningkatan efisiensi coulomb hingga 86,66%. Sedangkan pada baterai dinamis asam-timbal memiliki karakter efisiensi coulomb yang hampir sama, dimana nilai efisiensi terus meningkat seiring dengan peningkatan luasan elektroda pada baterai. Nilai efisiensi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Efisiensi energi (*EE*) merupakan hasil kali dari kedua nilai efisiensi sebelumnya (*CE_xVE*). Pada baterai statis asam-timbal sel tunggal, baterai dengan luasan elektroda $13,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L1**) memiliki nilai efisiensi energi sebesar 38,97%. Pada percobaan dengan luasan berbeda yakni $22,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L2**) atau 1,67 kali luasan mula-mula ternyata efisiensi baterai naik 35,14% menjadi 74,11%. Ketika luasan elektroda ditingkatkan lagi menjadi $31,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L3**), hasil percobaan menunjukkan peningkatan efisiensi energi hingga 76,20%. Sedangkan pada baterai dinamis asam-timbal memiliki karakter efisiensi coulomb yang hampir sama, dimana nilai efisiensi terus meningkat seiring dengan peningkatan luasan elektroda pada baterai. Nilai efisiensi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Berdasarkan ketiga nilai efisiensi telah didapatkan maka dapat diketahui bahwa semakin besar luasan elektroda baik pada baterai statis maupun dinamis, maka nilai efisiensi pada baterai akan semakin tinggi. Semakin tinggi nilai efisiensi pada baterai maka kualitas dan performa dari baterai semakin baik. Pada ketiga luasan elektroda yang telah disebutkan, baterai dengan luasan elektroda $22,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L2**) dan $31,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L3**) memiliki rentang nilai efisiensi energi yang cukup kecil yakni sebesar 1,26% pada baterai statis dan 0,65% pada baterai dinamis. Namun jika **L2** dibandingkan dengan dengan **L1** ($13,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$), rentang nilai efisiensi energi diantara keduanya cukup besar yakni sebesar 35,14% pada baterai statis dan 25,07% pada baterai dinamis. Hal ini menunjukkan bahwa pada luasan elektroda terkecil (**L1**) rasio pengosongan lebih kecil dibandingkan dengan proses pengisian. Artinya pada luasan elektroda $13,5 \times 7,5 \text{ cm}^2$ (**L1**), baterai memiliki tingkat kehilangan energi yang cukup besar jika dibandingkan **L2** dan **L3**. Perbandingan ketiganya dapat dilihat pada gambar 4.18.

Tabel 4.6 Perbandingan nilai efisiensi pada baterai asam-timbal

Perbandingan nilai efisiensi Baterai asam-timbal		L1	L2	L3
<i>Statis</i>	VE (%)	79,03	86,64	87,90
	CE (%)	49,27	85,45	86,66
	EE (%)	38,97	74,11	76,20
<i>Dinamis</i>	VE (%)	82,05	87,85	88,83
	CE (%)	67,27	91,37	91,11
	EE (%)	55,22	80,29	80,94



Gambar 4.18 Perbandingan nilai efisiensi energi pada baterai

Jika dibandingkan antara baterai statis asam-timbal dengan baterai dinamis asam-timbal, nilai efisiensi baik CE, VE maupun EE (Tabel 4.6) dari baterai dinamis asam-timbal lebih tinggi dari baterai statis asam-timbal. Lebih tingginya nilai efisiensi dari baterai dinamis asam-timbal menunjukkan bahwa baterai dinamis asam-timbal lebih unggul dari segala aspek jika dibandingkan dengan baterai statis asam-timbal.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

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

1. Telah berhasil dibuat baterai dinamis asam-timbal dengan jenis baterai sekunder yang mampu diisi dan dikosongkan (*charge-discharge*) dengan rentang tegangan kerja rata-rata sebesar 1,88 – 1,95 V pada arus pembebanan 1 A.
2. Penigkatan luas elektroda berhasil meningkatkan performa dari baterai dinamis asam-timbal. Dimana semakin besar luasan elektroda maka baterai dapat mempertahankan tegangan kerjanya (1,88 – 1,95 V) dalam waktu yang cukup lama pada arus pembebanan 1 A. Berdasarkan hasil pengujian, performa **L3** (31,5x7,5 cm²) lebih baik dari **L2** (22,5x7,5 cm²) lebih baik dari **L1** (13,5x7,5 cm²).
3. Penambahan luas elektroda dapat menaikkan nilai kapasitas dan efisiensi baterai dinamis asam-timbal. Berdasarkan hasil pengujian, dengan luasan 31,5x7,5 cm² (**L3**) diperoleh nilai kapasitas dan efisiensi energi tertinggi masing-masing sebesar 10357 mAh dan 80,94%.

5.2 Saran

1. Hendaknya dilakukan pengujian pada luasan elektroda 18x7,5 cm² (luasan diantara **L1** dan **L2**) dan 27x7,5 cm² (luasan diantara **L2** dan **L3**) untuk mengetahui kecenderungan karakteristik dari keduanya.
2. Perlu dilakukannya penelitian untuk mengetahui arus efektif pengisian maupun pengosongan pada masing-masing luasan elektroda.
3. Perlu dilakukann penelitian dengan variasi jarak antar elektroda untuk mengetahui pengaruh besar jarak terhadap reaksi redoks pada baterai dinamis.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR PUSTAKA

- B. Li, J.-b. Guo, X.-k. Lai, and D. Hui. Study on grouping technology of Redox Flow Battery.in Transmission & Distribution Conference & Exposition: *Asia and Pacific*. 2009. pp. 1-4.
- Badan Statistik Ketenagalistrikan. 2016. *Statistik Ketenagalistrika 2015. Edisi 29*. Direktorat Jendral Ketenagalistrikan Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- C.P. Zhang, S.M. Sharkh, X.Li,Walsh,C.N. Zhang. The Performance of a soluble lead-acid flow battery and its comparison to a static lead-acid battery. *Energy Conversion and Management*. 2011. 52(2011)3391-3398
- De León CP, Frías-Ferrer A, González-García J, Szánto DA, Walsh FC. Redox flow cells for energy conversion. *J Power Sources*. 2006. 160:716–32.
- Ghufron, M. dan Kurriawan, Pranata B. 2017. *The 7th Basic Science International Conference*. Proceedings book. 3:44-47
- Herman, D. 2006. Tinjauan terhadap tailing mengandung unsur pencemaran As, Hg, Pb, dan Cd. *Jurnal Geologi Indonesia*: 31-36
- Huiqi Wang, Ying li, Yanzhong, Jianmin, Shengliang. Three-dimension B-doped porous carbon framework anchored with ultrasmall PbO/Pb nanocrystal for lithium storage. *Ceramics International*. 2017. 43:12442-12451
- Hong-Keun Kim, Charn-Jung Kim, Chang-Wan Kim, Kyu-Jin Lee. 2017. Numerical Analysis of Accelerated Degradation in Large Lithium-ion Batteries. *Computers and Chemical Engineering*, doi

- Jie Cheng, Chen Gao, Yue-Hua Wen, Jun-Qing Pan, Yan Xu, Gao-Ping Cao. Performance Improvement of the all-lead Redox Flow Battery in Fluoroboric Acid Electrolyte. *Journal of Energy Science (IJES)*. volume 3 issue 3 June 2013
- Jubaedah, Euis dan Abdul, Budiman H. 2013. *Kajian Roadmap Pengembangan Energy Storage untuk Smart Grid System*. Pusat Teknologi Konversi dan Konservasi Energi-Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
- Madiba, Portia. 2010. *Electrolyte for Redox Flow Battery System*. Republik of South Africa : Portia Madiba inc.
- Pletcher, D. and R. Wills, A novel flow battery: A lead acid battery based on an electrolyte with soluble lead(ii) Part II. Flow cell studies. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2004. 6(8): p. 17791785
- S. F. Tie and C. W. Tan. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 82-102, 2013.
- Santriady, aditya. Pengaruh luas permukaan elektroda terhadap karakteristik baterai LiFePO_4 . *Jurnal Material dan energi indonesia*. 2016. vol 06, No.02(2016)43-48
- Suyanta, Dr. 2013. *Redoks dan elektrokimia*. Modul PLPG Kimia. Bandung
- T. R. Crompton MSC, BSic. 2000, *Battery Reference Book Third Edition*. Copyright Licensing Agency Ltd, 90. Tottenham Court Road, London, England W1P 9HE.

- Winda, Mei Darwati. 2012. *Pabrik asam sulfat dengan proses double contact absorber*. Universitas Pembangunan Nasional "Veteran". Surabaya
- Webster. 2009. *Battery basics*. Gears educational system, LLC. Massachusetts
- X. Zhang, Y. Wei, S. Xu, and Y. Zhang. Optimization design of allvanadium redox flow battery energy storage system. in Electricity Distribution (CICED).2010 China International Conference on, 2010, pp. 1-4.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

