



TUGAS AKHIR - TM141585

PENGARUH VARIASI *DEPTH OF DISCHARGE* TERHADAP KERUSAKAN BATERAI VRLA

IRAWAN
NRP 2114 105 036

Dosen Pembimbing
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TM141585

EFFECTS OF DEPTH OF DISCHARGE ON THE TYPE OF FAILURE VRLA BATTERY

IRAWAN
NRP 2114 105 036

Supervisor
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

Mechanical Engineering Department
Industrial Technology Faculty
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH VARIASI *DEPTH OF DISCHARGE* TERHADAP KERUSAKAN BATERAI VRLA

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

IRAWAN

NRP. 2114 105 036

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Suwarno, ST., MSc., Ph.D (Pembimbing)
NIP. 198005202005011003
2. Indra Sidharta, ST., MSc. (Penguji 1)
NIP. 198006192006041004
3. Ika Dewi Wijayanti, ST., MSc. (Penguji 2)
NIP. 198512022014042002
4. Ir. Witantvo, M.Eng.Sc (Penguji 3)
NIP. 196303141988031002

SURABAYA

Juli 2016

PENGARUH VARIASI DEPTH OF DISCHARGE TERHADAP KERUSAKAN BATERAI VRLA

Nama Mahasiswa : Irawan
NRP : 2114 105 036
Jurusan : S1 Teknik Mesin FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Suwarno, ST., MSc., Ph.D

Abstrak

Pada masa sekarang ini baterai *Valve Regulated Lead Acid (VRLA)* menjadi salah satu jenis baterai yang telah banyak beredar di pasaran. Baterai *VRLA* banyak digunakan sebagai *Uninterrupted Power Supply (UPS)* pada bidang telekomunikasi, perbankan, pengujian dan lain sebagainya. Selain itu, juga digunakan untuk media penyimpanan energi pada pembangkit listrik tenaga surya atau angin, mobil golf, *forklift* dan kursi roda. Masalah yang sering dihadapi ketika pemakaian baterai *VRLA* adalah *grid corrosion* pada elektroda positif dan *sulphation* pada elektroda negatif baterai sehingga mengakibatkan umur siklus yang relatif singkat. Umur siklus dari baterai ditentukan juga dari seberapa besar *depth of discharge (DoD)* pada setiap siklusnya.

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa baterai *VRLA* yang telah dipreparasi dua sel tiap pengujian. Baterai yang telah siap kemudian diuji menggunakan alat Autolab PGSTAT302. Pengujian dengan Autolab dimaksudkan untuk melakukan variasi *depth of discharge* mulai dari 40% selama 101 siklus dan 80 siklus, 60% selama 80 siklus, serta 80% selama 80 siklus dan 60 siklus dengan laju arus konstan yaitu 2C pada baterai *VRLA*. Skala DoD ditentukan berdasarkan penggunaan *UPS* yang cenderung pada *discharge* yang relatif besar. Selanjutnya, pengujian dilakukan dengan *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *X-Ray Diffraction (XRD)* untuk mengetahui kerusakan yang terdapat pada elektroda positif dan elektroda negatif. Dari hasil pengujian tersebut dapat ditentukan seberapa lama umur pakai baterai dan kerusakan yang terjadi pada baterai.

Semakin besar *depth of discharge* yang diaplikasikan pada baterai *VRLA* akan membuat umur siklus semakin menurun. Penurunan umur siklus terjadi karena terdapat persentase PbSO_4 (timbal sulfat) yang cukup besar pada elektroda negatif ketika dilakukan pengujian *XRD* yaitu mencapai 76%. Kemudian terjadi kenaikan rata-rata ukuran kristal timbal sulfat pada elektroda baterai seiring dengan kenaikan *DoD*, namun kristal yang paling besar ukurannya terjadi pada elektroda positif.

Kata Kunci: Autolab, baterai *VRLA*, *depth of discharge (DoD)*, *SEM*, *XRD*

EFFECTS OF DEPTH OF DISCHARGE ON THE TYPE OF FAILURE VRLA BATTERY

Student : Irawan
NRP : 2114 105 036
Major : Mechanical Engineering
Supervisor : Suwarno, ST., MSc., Ph.D

Abstract

At present this Valve Regulated Lead Acid (VRLA) batteries into one type of battery are widely used in the market. VRLA batteries are widely used as Uninterrupted Power Supply (UPS) in the field of telecommunications, banking, testing, etc. In addition, it is also used for energy storage media on a solar power plant or wind, golf cars, forklifts and wheelchairs. The problems often encountered when a VRLA battery application is corrosion grid on the positive electrode and a sulphation on the negative electrode battery reduced in a lifetime. Cycle life of batteries specified is also from how deep the depth of discharge (DoD) during each cycle.

This research was conducted with some of the VRLA battery have the preparation of two cells each testing. The battery is ready then tested using Autolab PGSTAT302N. Testing with Autolab intended to do variations of the depth of discharge ranging from 40% for 101 cycle and 80 cycle, 60% for 80 cycle, as well as 80% for 80 cycle and 60 cycle with constant current rate i.e 2C on VRLA batteries. The scale of the DoD is determined based on the use of the UPS tend to be deep in discharge. Furthermore, testing is done with the Scanning Electron Microscope (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) to know there is failure on the positive electrode and negative electrode. From the results of these tests can be determined how long lifetime battery and the failure that occurs in the battery.

The greater depth of discharge that was applied on VRLA battery will make the lifetime of declining. The drop in the

lifetime occurs because there is a percentage of PbSO₄ (lead sulfate) that is higher on the negative electrode when done testing XRD i.e. achieved a 76%. Then happened the increase in the average crystal size of lead sulfate on the battery's electrodes along with increase in DoD, but most large size crystals occur at the positive electrode.

Keywords: Autolab, depth of discharge (DoD), SEM, VRLA battery, XRD

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| Judul Tugas Akhir | i |
| <i>Title of Final Project</i> | ii |
| Lembar Pengesahan | iii |
| Abstrak | iv |
| <i>Abstract</i> | vi |
| Kata Pengantar | viii |
| Daftar Isi | ix |
| Daftar Gambar | xi |
| Daftar Tabel | xv |
| BAB 1. PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3. Batasan Masalah | 2 |
| 1.4. Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.5. Manfaat Penelitian | 3 |
| 1.6. Sistematika Penulisan | 3 |
| BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1. Baterai <i>Valve Regulated Lead Acid</i> | 7 |
| 2.2. Reaksi Kimia pada Baterai <i>Lead Acid</i> | 7 |
| 2.3. Mode Kerusakan pada Baterai <i>Valve Regulated Lead Acid (VRLA)</i> | 9 |
| 2.3.1. <i>Grid Corrosion</i> | 9 |
| 2.3.2. <i>Gas Evolution</i> | 10 |
| 2.3.3. <i>Grid Growth</i> | 10 |
| 2.3.4. <i>Sulphation</i> pada Elektroda Negatif | 11 |
| 2.3.5. <i>Water loss</i> | 11 |
| 2.3.6. <i>Incomplete Charging</i> | 12 |
| 2.3.7. <i>Overcharging</i> | 12 |
| 2.3.8. <i>Temperature Extreme</i> | 13 |
| 2.3.9. <i>Deep-cycle Operation</i> | 14 |
| 2.4. Faktor yang mempengaruhi Performa Baterai ... | 14 |
| 2.4.1. Tingkat tegangan | 14 |

| | | |
|-----------------------------|---|----|
| 2.4.2. | <i>Arus Discharge</i> | 15 |
| 2.4.3. | <i>Mode Discharge</i> | 16 |
| 2.4.4. | Temperatur <i>Discharge</i> Baterai | 17 |
| 2.5. | Dampak Parameter Operasi pada Umur Baterai .. | 18 |
| BAB 3. | METODE PENELITIAN | 21 |
| 3.1. | Bahan dan Peralatan Penelitian..... | 21 |
| 3.1.1. | Bahan Penelitian..... | 21 |
| 3.1.2. | Peralatan pengujian | 22 |
| 3.2. | Flowchart Penelitian | 23 |
| 3.3. | Karakteristik Pengujian | 25 |
| 3.3.1. | Pengujian Autolab | 25 |
| 3.3.2. | Pengujian SEM..... | 34 |
| 3.3.3. | Pengujian XRD..... | 38 |
| 3.4. | Hipotesa..... | 41 |
| BAB 4. | HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN | 42 |
| 4.1. | Hasil Pengujian dan pembahasan | 42 |
| 4.1.1. | Pengujian Autolab | 42 |
| 4.1.2. | Pengujian SEM | 52 |
| 4.1.3. | Pengujian XRD | 62 |
| 4.2. | Diskusi | 68 |
| BAB 5. | KESIMPULAN DAN SARAN | 71 |
| 5.1. | Kesimpulan | 71 |
| 5.2. | Saran..... | 71 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 73 |
| LAMPIRAN | | 74 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1. Elektroda positif dan negatif (koleksi sendiri) .. | 6 |
| Gambar 2.2. Komponen baterai <i>VRLA</i> [4]..... | 7 |
| Gambar 2.3. Reaksi saat <i>charge-discharge</i> pada baterai <i>lead acid</i> [6] | 8 |
| Gambar 2.4. Struktur lapisan korosi pada permukaan <i>grid</i> positif [6]..... | 9 |
| Gambar 2.5. Kurva karakteristik <i>discharge</i> [9] | 15 |
| Gambar 2.6. Tingkat <i>discharge</i> baterai <i>VRLA</i> [9]..... | 16 |
| Gambar 2.7. Profil <i>discharge</i> pada mode <i>discharge</i> yang berbeda. (a) Profil tegangan. (b) Profil arus. (c) Profil power[9] | 17 |
| Gambar 2.8. Efek temperatur pada kapasitas baterai[9] | 18 |
| Gambar 2.9. Efek <i>depth of discharge</i> terhadap jumlah siklus[9]..... | 19 |
| Gambar 3.1. Baterai NGS Volcano | 21 |
| Gambar 3.2. Cairan Elektrolit | 21 |
| Gambar 3.3. Multimeter | 22 |
| Gambar 3.4. <i>Flowchart</i> penelitian..... | 24 |
| Gambar 3.5. Penutupan lubang <i>valve</i> | 26 |
| Gambar 3.6. Spesimen uji Autolab | 26 |
| Gambar 3.7. Sel baterai <i>VRLA</i> untuk pengujian Autolab | 27 |
| Gambar 3.8. (a) Skala kapasitas (<i>SoC</i>). (b) Skala <i>DoD</i> berdasarkan arus. (c) Skala <i>DoD</i> berdasarkan tegangan | 28 |
| Gambar 3.9. Peralatan pengujian Autolab | 31 |
| Gambar 3.10. Penyambungan kabel untuk pengujian Autolab..... | 31 |
| Gambar 3.11. Tombol ON dan CELL ON..... | 32 |
| Gambar 3.12. Nova 1.8..... | 32 |
| Gambar 3.13. Proses pengukuran tegangan aktual baterai | 32 |
| Gambar 3.14. Tampilan <i>Chrono Charge Discharge (Galvanostatic)</i> | 33 |
| Gambar 3.15. Parameter yang dirubah | 33 |
| Gambar 3.16. Pilihan grafik yang dapat ditambahkan | 34 |

| | |
|--|----|
| Gambar 3.17. Monitor dan <i>keyboard</i> khusus SEM..... | 34 |
| Gambar 3.18. Pemotongan konektor baterai..... | 35 |
| Gambar 3.19. Satu sel baterai yang telah diambil..... | 35 |
| Gambar 3.20. Elektroda negatif dan positif yang akan dipotong | 36 |
| Gambar 3.21. (a) Peralatan <i>coating</i> (b) Penempatan spesimen ketika <i>coating</i> | 36 |
| Gambar 3.22. Alat uji SEM | 37 |
| Gambar 3.23. Proses pengambilan serbuk pada elektroda | 38 |
| Gambar 3.24. Serbuk Pb dan PbO ₂ | 39 |
| Gambar 3.25. UPS dan alat uji XRD..... | 39 |
| Gambar 3.26. Tombol power dan kunci HT | 40 |
| Gambar 3.27. <i>Sample Stage</i> | 41 |
| Gambar 4.1. Grafik <i>charge</i> pada pengujian <i>DoD</i> 40% selama 101 siklus..... | 42 |
| Gambar 4.2. Grafik <i>discharge</i> pada pengujian <i>DoD</i> 40% selama 101 siklus..... | 43 |
| Gambar 4.3. (a) <i>OCP</i> sebelum (b) <i>OCP</i> setelah pengujian <i>DoD</i> 40% selama 101 siklus.. .. | 44 |
| Gambar 4.4. Grafik <i>charge</i> pada pengujian <i>DoD</i> 40% selama 80 siklus..... | 44 |
| Gambar 4.5. Grafik <i>discharge</i> pada pengujian <i>DoD</i> 40% selama 80 siklus..... | 45 |
| Gambar 4.6. (a) <i>OCP</i> sebelum (b) <i>OCP</i> setelah pengujian <i>DoD</i> 40% selama 80 siklus.. .. | 46 |
| Gambar 4.7. Grafik <i>charge</i> pada pengujian <i>DoD</i> 60% selama 80 siklus..... | 46 |
| Gambar 4.8. Grafik <i>discharge</i> pada pengujian <i>DoD</i> 60% selama 80 siklus..... | 47 |
| Gambar 4.9. (a) <i>OCP</i> sebelum (b) <i>OCP</i> setelah pengujian <i>DoD</i> 60% selama 80 siklus. | 48 |
| Gambar 4.10. Grafik <i>charge</i> pada pengujian <i>DoD</i> 80% selama 80 siklus..... | 48 |
| Gambar 4.11. Grafik <i>discharge</i> pada pengujian <i>DoD</i> 80% selama 80 siklus..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.12. (a) <i>OCP</i> sebelum (b) <i>OCP</i> setelah pengujian <i>DoD</i> 80% selama 80 siklus..... | 50 |
| Gambar 4.13. Grafik <i>charge</i> pada pengujian <i>DoD</i> 80% selama 60 siklus..... | 50 |
| Gambar 4.14. Grafik <i>discharge</i> pada pengujian <i>DoD</i> 80% selama 60 siklus..... | 51 |
| Gambar 4.15. (a) <i>OCP</i> sebelum (b) <i>OCP</i> setelah pengujian <i>DoD</i> 80% selama 60 siklus..... | 51 |
| Gambar 4.16. Hasil uji <i>SEM</i> elektroda Pb (a) Awal. (b) <i>DoD</i> 40%; 101 siklus. (c) <i>DoD</i> 40%; 80 siklus. (d) <i>DoD</i> 60%; 80 siklus. (e) <i>DoD</i> 80%; 60 siklus. (f) <i>DoD</i> 80%; 80 siklus..... | 53 |
| Gambar 4.17. Hasil uji <i>SEM</i> elektroda PbO ₂ (a) Awal. (b) <i>DoD</i> 40%; 101 siklus. (c) <i>DoD</i> 40%; 80 siklus. (d) <i>DoD</i> 60%; 80 siklus. (e) <i>DoD</i> 80%; 60 siklus. (f) <i>DoD</i> 80%; 80 siklus..... | 55 |
| Gambar 4.18. Histogram Ukuran Kristal PbSO ₄ pada Elektroda Pb <i>DoD</i> 40%..... | 56 |
| Gambar 4.19. Histogram Ukuran Kristal PbSO ₄ pada Elektroda Pb <i>DoD</i> 40%..... | 57 |
| Gambar 4.20. Histogram Ukuran Kristal PbSO ₄ pada Elektroda Pb <i>DoD</i> 60%..... | 57 |
| Gambar 4.21. Histogram Ukuran Kristal PbSO ₄ pada Elektroda Pb <i>DoD</i> 80%..... | 58 |
| Gambar 4.22. Histogram Ukuran Kristal PbSO ₄ pada Elektroda Pb <i>DoD</i> 80%..... | 58 |
| Gambar 4.23. Histogram Ukuran Kristal PbSO ₄ pada Elektroda PbO ₂ <i>DoD</i> 40%..... | 59 |
| Gambar 4.24. Histogram Ukuran Kristal PbSO ₄ pada Elektroda PbO ₂ <i>DoD</i> 40%..... | 60 |
| Gambar 4.25. Histogram Ukuran Kristal PbSO ₄ pada Elektroda PbO ₂ <i>DoD</i> 60%..... | 60 |
| Gambar 4.26. Histogram Ukuran Kristal PbSO ₄ pada Elektroda PbO ₂ <i>DoD</i> 80%..... | 61 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.27. Histogram Ukuran Kristal PbSO ₄ pada Elektroda PbO ₂ <i>DoD</i> 80%..... | 61 |
| Gambar 4.28. Hasil uji <i>XRD</i> awal pada elektroda Pb..... | 63 |
| Gambar 4.29. Hasil uji <i>XRD</i> awal pada elektroda PbO ₂ | 63 |
| Gambar 4.30. Hasil uji <i>XRD</i> pada elektroda Pb..... | 64 |
| Gambar 4.31. Hasil uji <i>XRD</i> pada elektroda PbO ₂ | 66 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 3.1. Parameter pengujian baterai dengan variasi <i>DoD</i> . | 29 |
| Tabel 4.1. Hasil Identifikasi Senyawa pada Material Elektrod..... | 66 |
| Tabel 4.2. Hasil Identifikasi Parameter Kristal..... | 67 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi listrik adalah salah satu bentuk energi yang berperan penting bagi kemajuan peradaban manusia. Hal ini dikarenakan energi listrik dapat dengan mudah diaplikasikan maupun diubah menjadi bentuk energi lainnya, tak terkecuali disimpan dalam bentuk energi kimia.

Untuk mendukung penyediaan energi bersih, penyimpanan energi menjadi sangat penting untuk menyediakan pasokan energi yang handal dan kontinyu 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.

Hampir semua bidang memerlukan baterai sekunder sebagai sumber penyimpan dan pemasok energi listrik. Hal ini karena baterai sekunder selain dapat diisi kembali oleh muatan listrik (*rechargeable*), juga dengan mudah dapat dipindahkan dari satu tempat ke tempat lainnya (*portable*).

Salah satu jenis dari baterai sekunder adalah baterai asam timbal. Keuntungan penggunaan baterai jenis asam timbal diantaranya adalah kuat, murah, handal, dan banyaknya perusahaan pembuat baterai jenis ini di berbagai belahan dunia. Saat ini telah dikembangkan baterai asam timbal tipe *free maintenance* dimana pada sistemnya digunakan katup pengatur. Aplikasi baterai ini banyak digunakan pada industri otomotif, kelautan, telekomunikasi dan *uninterruptible power supply (UPS)* [1]

Umur baterai berhubungan langsung dengan seberapa dalam baterai digunakan pada setiap siklusnya. Jika setiap siklus hanya 10% *Depth of Discharge* maka umur baterai akan lima kali lebih lama apabila dibandingkan dengan yang digunakan pada 50% *DoD* [2]. Untuk memastikan umur dari baterai *valve regulated lead acid* diperlukan suatu pengujian berdasarkan variasi *Depth of Discharge*.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana efek variasi *depth of discharge* terhadap umur siklus pada baterai *VRLA*?
2. Bagaimana pengaruh *depth of discharge* terhadap aktif material pada elektroda negatif dan elektroda positif baterai *VRLA*?

1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan tidak terlalu luas cakupannya, maka harus digunakan beberapa batasan masalah, yaitu:

1. Hanya dilakukan pengujian *Depth of Discharge* terhadap satu merk baterai.
2. Tidak dilakukan perbandingan dengan baterai merk lainnya.
3. Pengujian dilakukan pada temperatur 25°C.
4. Jenis baterai yang digunakan adalah *Valve Regulated Lead Acid (VRLA)*.
5. Hanya menganalisa umur siklus serta kerusakan elektroda positif dan elektroda negatif kaitannya dengan variasi *DoD* pada baterai *VRLA*.
6. Tidak melakukan perbandingan desain yang berdampak terhadap umur siklus dan kerusakan baterai.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui efek *depth of discharge* terhadap umur siklus dari baterai *VRLA*.
2. Dapat menganalisa efek variasi *depth of discharge* terhadap aktif material pada elektroda negatif dan elektroda positif baterai *VRLA*.

1.5. Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini diharapkan akan memberikan manfaat bagi masyarakat dan dunia industri pada khususnya, adapun manfaat tersebut adalah:

1. Mengetahui umur siklus baterai pada beberapa *DoD* tertentu.
2. Menambah pemahaman dan efek yang ditimbulkan dari variasi *depth of discharge*.
3. Menjadi acuan penelitian mengenai baterai *VRLA*.
4. Dapat mengetahui cara memvariasikan *depth of discharge* untuk pengujian menggunakan peralatan Autolab PGSTAT302N.
5. Menambah pengetahuan tentang jenis kerusakan pada komponen baterai *VRLA*.

1.6. Sistematika Penulisan

Dalam pembahasan Laporan Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab, dengan susunan sistematika sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

BAB 1 membahas mengenai latar belakang masalah penyusunan laporan Tugas Akhir, rumusan masalah, batasan masalah yang dibahas, tujuan yang ingin didapatkan, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

BAB 2 membahas mengenai landasan pustaka, mode kerusakan baterai dan *depth of discharge*.

BAB 3 METODE PENELITIAN

BAB 3 membahas mengenai bahan penelitian, alat penelitian, *flowchart* penelitian, langkah preparasi material pengujian, proses pengujian spesimen dan hipotesa.

BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

BAB 4 berisi mengenai hasil pengujian, dan pembahasan mengenai hasil pengujian.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

BAB 5 berisi mengenai kesimpulan dan saran untuk penyempurnaan penelitian.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Baterai *Valve Regulated Lead Acid*

Baterai adalah peralatan yang dapat mengkonversi energi kimia dengan menggunakan aktif material secara langsung menjadi energi listrik melalui reaksi elektrokimia reduksi-oksidasi (redoks). Selain itu, baterai juga dapat mengkonversi energi listrik menjadi energi kimia. Energi dalam baterai dapat dengan mudah diubah menjadi energi cahaya, panas atau energi mekanik. Namun baterai tidak mampu menyimpan energi dalam jumlah yang relatif besar.

Secara umum baterai terdiri dari satu atau lebih sel yang terhubung secara seri, paralel ataupun gabungan seri-paralel, tergantung tegangan dan kapasitas yang dibutuhkan. Didalam sel terdapat beberapa bagian yang sangat penting. Berikut ini adalah bagian dari baterai:

1. Elektroda negatif (Anoda)

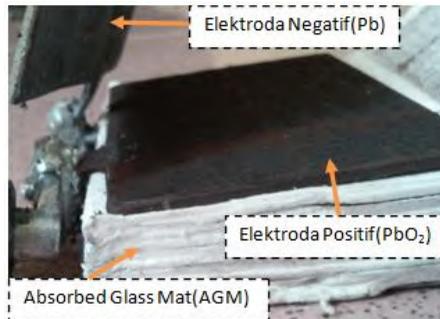
Pada elektroda negatif terjadi pelepasan elektron ke eksternal *circuit* dan elektron akan teroksidasi selama reaksi elektrokimia.

2. Elektroda positif (Katoda)

Pada elektroda positif terjadi penerimaan elektron dari eksternal *circuit* dan elektron akan tereduksi selama reaksi elektrokimia.

3. Elektrolit

Elektrolit berperan sebagai media transfer ion pada proses *charge* maupun *discharge*. Jenis elektrolit yang biasa digunakan adalah berupa larutan, seperti air dengan zat yang terlarut berupa garam, asam, alkalis untuk memberikan konduktifitas ion. [3].



Gambar 2.1. Elektroda positif dan negatif (koleksi sendiri).

4. Separator (*AGM*)

Absorbed Glass Mat berfungsi untuk menyerap larutan elektrolit dan mencegah hubungan arus pendek antara elektroda positif dan elektroda negatif pada baterai. *AGM* mempunyai pori-pori sehingga mampu mempertahankan elektrolit untuk reaksi elektrokimia secara kontinu pada aktif material. Keuntungan baterai *VRLA* menggunakan *AGM*:

- a. Bebas perawatan.
- b. Tahan terhadap kebocoran.
- c. Dapat dioperasikan dengan posisi *upright* atau *on side*.
- d. Laju evolusi gas sangat rendah.
- e. Unggul untuk *discharge* dengan laju yang tinggi atau durasi yang pendek.
- f. Tahan terhadap getaran.

Adapun kerugian yang disebabkan oleh penggunaan baterai *VRLA AGM* adalah voltase pengecasan harus dibatasi. Voltase pengecasan maksimum yang diperbolehkan sekitar 14,4 hingga 14,7 volt pada temperatur 25°C[10].

5. *Valve Regulated*

Valve Regulated terdiri dari satu arah katup yang terbuat dari bahan seperti neoprene. Ketika gas yang dihasilkan terlalu berlebih maka katup terbuka untuk

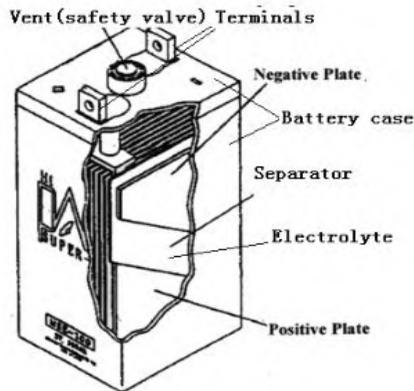
melepaskan tekanan yang berlebihan dari baterai dan menjaga tekanan gas dalam jangkauan tertentu. Selama penggunaan, katup baterai menutup untuk mencegah masuknya udara luar dan mencegah oksigen diudara agar tidak bereaksi dengan aktif material dalam elektroda negatif.

6. Terminal positif dan negatif

Bentuk terminal elektroda positif dan negatif tergantung pada jenis baterai. Pemasangan terminal dicapai dengan perekat epoxy yang kuat.

7. *Casing* baterai

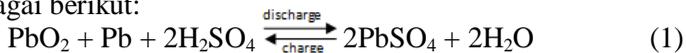
Bahan yang digunakan untuk membuat *casing* baterai adalah resin atau dapat digunakan bahan lainnya.



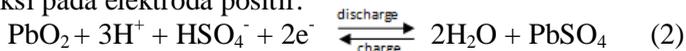
Gambar 2.2. Komponen baterai VRLA [4].

2.2. Reaksi Kimia pada Baterai *Lead Acid*

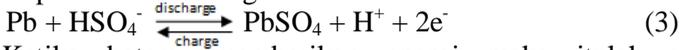
Meskipun konstruksi dan desain dari baterai VRLA agak berbeda namun reaksi kimianya tetap sama dengan baterai *lead acid*[3]. Reaksi dasar pada baterai saat *charge* dan *discharge* sebagai berikut:



Reaksi pada elektroda positif:



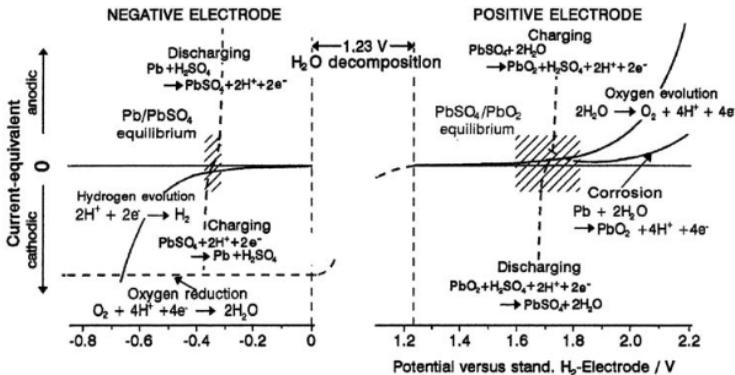
Reaksi pada elektroda negatif:



Ketika baterai memberikan energi maka itulah yang dikatakan sebagai *discharge*. Energi yang dihasilkan oleh baterai berasal dari reaksi elektrokimia antara elektroda negatif, elektroda positif dan cairan elektrolit. Selama *discharge* baterai akan menghasilkan sekitar 1 Ah dengan mengkonversi 4,5 g timbal dioksida (PbO_2), 3,9 g timbal (Pb) dan 3,7 g asam sulfat (H_2SO_4) menjadi timbal sulfat (PbSO_4) dan air (H_2O).

Charge bertujuan mengarahkan semua asam keluar dari elektroda dan kembali menjadi elektrolit (H_2SO_4). Sebuah arus searah dilewatkan melalui sel dalam arah yang berlawanan pada saat *discharge*. Manfaat penguraian asam dari elektroda yaitu meningkatkan konsentrasi asam dalam elektrolit. Ketika sel terisi penuh (*full charge*), aktif material dari elektroda positif adalah timbal dioksida (PbO_2), dan elektroda negatif adalah logam timbal (Pb). Konsentrasi asam dalam elektrolit berada dikondisi maksimum pada tahap *full charge*.

Tegangan teoritis dari setiap sel baterai *lead acid* adalah 2 volt. Dalam prakteknya, tegangan sel sedikit bervariasi sesuai dengan kapasitas (*state of charge*), temperatur sel, pengecasan, arus *discharge*, dan usia dari sel baterai [5].



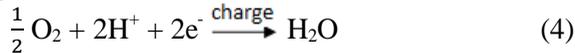
Gambar 2.3. Reaksi saat *charge-discharge* pada baterai *lead acid*[6].

2.3. Mode Kerusakan pada Baterai *Valve Regulated Lead Acid (VRLA)*

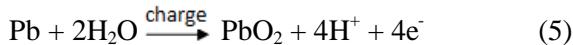
Beberapa permasalahan yang sering terjadi pada baterai *VRLA* adalah *grid corrosion*, *gas evolution*, *grid growth* dan *sulphation* pada elektroda negatif.

2.3.1. *Grid Corrosion*

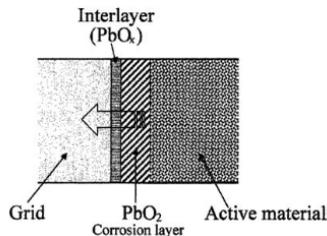
Pada baterai, aktif material dari komponen elektroda positif dan negatif akan terkena larutan elektrolit. Korosi yang terjadi di *grid* dapat menyebabkan kerusakan pada elektroda positif sehingga akan mempengaruhi umur pemakaian baterai *VRLA*. Pembentukan air (H_2O) akan mengurangi konsentrasi asam sesuai dengan persamaan 4:



Proses berkurangnya konsentrasi air dan kenaikan ion hidrogen akan terjadi pada elektroda positif. Pada elektroda positif terjadi kenaikan jumlah asam disekelilingnya dan kenaikan laju korosi. *Grid corrosion* pada elektroda positif disebabkan oleh berubahnya Pb menjadi PbO_2 pada waktu dilakukan proses *charge* menurut reaksi berikut:



PbO_2 yang dihasilkan merupakan lapisan yang cukup kokoh untuk mempertahankan Pb dari korosi yang lebih lanjut. Proses korosi akan kembali terjadi setelah *interlayer* (PbO_x) pecah. Konsekuensinya korosi terjadi secara kontinyu menuju kedalam metal dengan laju yang konstan seperti yang ditunjukkan gambar 2.4.



Gambar 2.4. Struktur lapisan korosi pada permukaan *grid* positif[6].

2.3.2. *Gas Evolution*

Gas yang dihasilkan oleh baterai *VRLA* adalah oksigen dan hidrogen. Evolusi gas sebagian besar terjadi pada permukaan elektroda dan separator (*AGM*). Gelembung gas yang menempel pada setiap permukaan elektroda akan terlihat seperti terdapat elemen pengotor sebagai dampak dari banyaknya gas hidrogen yang menempel pada elektroda. Evolusi dari gas hidrogen dan oksigen dapat merusak baterai *VRLA* selama proses *charge* dan *discharge* yang disebabkan oleh reaksi rekombinasi yang tidak efisien. Reaksi evolusi oksigen mulai terjadi pada 1,23 volt, sesuai *Standart Hydrogen Electrode (SHE)* dan selalu terdapat dua reaksi pada elektroda positif baterai *lead acid*[6].

Reaksi evolusi hidrogen kadang-kadang terjadi pada elektroda negatif pada baterai *lead acid* karena 3 sebab, yaitu:

- a) Rekombinasi yang tidak efisien
- b) Korosi pada *grid* plat positif, dan
- c) Oksidasi dari beberapa organik.

Evolusi hidrogen pada elektroda negatif secara umum lajunya lebih lambat kemudian akan keluar melalui saluran *valve* apabila tekanan terlalu berlebihan. Efek dari laju keluarnya hidrogen dan oksigen akan berdampak pada berkurangnya umur baterai. Apabila gas yang berevolusi terlalu berlebihan dapat membuat baterai *VRLA* lebih cepat kehilangan kapasitasnya (*Premature Capacity Loss*).[8]

2.3.3. *Grid Growth*

Grid pada baterai digunakan sebagai rangka dan menghantarkan arus listrik antara aktif material dari elektroda positif dengan elektroda negatif. Adanya voltase karena reaksi elektrokimia pada baterai *lead acid* akan mengakibatkan korosi *grid* elektroda positif (dimana Pb menjadi PbO_2). Produk hasil korosi (PbO_2) memerlukan volume yang lebih besar daripada Pb. Volume ekspansi ini menyebabkan gaya mekanik pada *grid* sehingga menyebabkan deformasi dan regangan. Deformasi ini disebut sebagai pertumbuhan (*growth*).

Selama kondisi awal korosi, pertumbuhan *grid* lambat bahkan tidak dapat diukur akan tetapi lajunya akan meningkat dan menjadi konstan ketika hasil korosi menjadi lebih tebal dan *grid* yang paralel lebih tipis. Baterai *VRLA* diciptakan untuk mengurangi pertumbuhan *grid*. Bagaimanapun juga, terlalu banyak korosi dengan jelas dapat menghasilkan pertumbuhan *grid*. Korosi akan mengakibatkan terjadinya kehilangan kontak antara *grid* dengan aktif material dan meningkatkan kemungkinan hubungan arus pendek hingga akhirnya menimbulkan kegagalan pada baterai[8].

2.3.4. Sulphation pada Elektroda Negatif

Salah satu mode kegagalan pada baterai *VRLA* adalah proses pembentukan sulfat yang *irreversible* pada elektroda negatif dengan diikuti kehilangan kapasitas. Terdapat dua kemungkinan penyebab ketidakmampuan balik sulfat (SO_4) pada elektroda negatif. Pertama, elektroda negatif yang secara efektif terjadi depolarisasi akibat proses rekombinasi oksigen pada baterai *lead acid*. Kedua, efek dari stratifikasi asam menyebabkan proses pembentukan asam sulfat yang *irreversible*[8].

Semakin lama proses *discharge* berlangsung maka akan menyebabkan senyawa PbSO_4 yang terbentuk pada elektroda negatif akan semakin banyak pula[11]. Dengan semakin lamanya waktu *discharge* maka *DoD* yang dapat dicapai akan menjadi lebih besar.

2.3.5. Water loss

Produksi gas hidrogen dan oksigen selama proses *overcharge* dapat menurunkan volume elektrolit. Adanya produksi gas dapat mempercepat *water loss* sehingga meningkatkan tahanan internal dari baterai. Pada akhirnya dapat menyebabkan pemanasan yang berlebihan selama proses pengisian dan akibatnya dapat meningkatkan laju kehilangan air melalui evolusi gas. Hal ini juga harus dicatat bahwa kecenderungan penguapan pada baterai sangat dipengaruhi oleh adanya kotoran.

2.3.6. *Incomplete Charging*

Jika elektroda secara terus-menerus dilakukan *undercharge* dapat mengakibatkan penurunan kapasitas penyimpanan baterai dengan cepat. *Undercharge* dapat terjadi baik karena aturan pengecasan yang salah atau akibat dari perubahan fisik baterai yang dapat mencegah elektroda mencapai kapasitas maksimal (*full charge*).

Baterai *VRLA* yang sering mengalami *undercharge* akan menyebabkan akumulasi dan pertumbuhan kristal PbSO_4 dalam aktif material yaitu pembentukan yang disebut 'sulfat keras'. Adanya sulfat keras akan mengakibatkan kesulitan untuk mengisi ulang karena elektroda Pb memiliki luas permukaan yang lebih rendah dari kondisi awal. Dengan luas permukaan berkurang berarti bahwa tahanan internal ketika *charge* menjadi lebih tinggi dan voltase saat *charge* akan terjadi kenaikan secara drastis.

Masalah selanjutnya yang dapat timbul dari *undercharge* baterai *VRLA* adalah pembentukan dendrit yang menyebabkan hubungan arus pendek antara elektroda positif dengan elektroda negatif. Jika berat jenis elektrolit berkurang secara signifikan akibat dari *overdischarge* maka akan terjadi peningkatan pH (*potential of hidrogen*) dan menimbulkan zat terlarut yang menyebabkan pertumbuhan dendrit dari elektroda. Baterai *AGM* lebih rentan terhadap kegagalan mekanisme ini daripada baterai gel sehingga penetrasi dendrit lebih mungkin terjadi melalui separator (*AGM*). Masalah lain yang terjadi ketika baterai *VRLA* dioperasikan pada *State of Charge (SoC)* rendah untuk waktu yang relatif lama adalah meningkatnya korosi pada *grid* positif[7].

2.3.7. *Overcharging*

Hal yang biasa terjadi pada baterai *VRLA* adalah kehilangan air dari cairan elektrolit selama siklus berlangsung. Beberapa hal yang akan terjadi ketika proses *overcharge*:

- a. Menghasilkan peningkatan jumlah dan ukuran jalur oksigen antara elektroda positif dengan elektroda negatif.

- b. Meningkatkan efisiensi rekombinasi oksigen dalam baterai.
- c. Akan terjadi *water loss*.

Jika baterai mengalami *overcharge* maka dapat memicu terjadinya *water loss*. Apabila *overcharge* terjadi secara terus-menerus, akhirnya elektrolit dapat mencapai nilai kritis sehingga hanya tersisa 10% dari yang awalnya tersedia. Dampak dari adanya *water loss* yaitu hambatan listrik baterai akan meningkat. Kehilangan air juga dapat terjadi oleh faktor difusi melalui *casing* dan tutup baterai. Tetapi difusi biasanya tidak terlalu signifikan terjadi pada baterai *VRLA*.

Overcharge dapat mempercepat korosi pada grid positif. Jika korosi mencapai nilai kritis (40-50% dari total *grid Pb*) maka akan mengakibatkan penurunan konduktivitas baterai pada area *grid*, lapisan korosi dan aktif material. Perlu dicatat bahwa paduan timbal-timah yang biasanya digunakan untuk *grid* positif pada baterai *VRLA* tidak mentolerir tingkat korosi yang sama pada *grid* timbal-antimoni digunakan dalam baterai *lead acid* yang biasa. Baterai *VRLA* umumnya diberikan pengecasan dikisaran 103-105% [7].

2.3.8. *Temperature Extremes*

Mode kegagalan yang paling umum dari *VRLA* baterai ketika dioperasikan pada temperatur yang tinggi adalah korosi pada *grid* positif dan penguapan elektrolit. Baterai dengan konsentrasi elektrolit yang tinggi akan lebih baik karena relatif banyak air yang akan hilang sebelum elektrolit kering sehingga berdampak pada performa baterai. Baterai gel biasanya berisi 20% lebih banyak kadar asam daripada baterai *AGM*. Untuk aplikasi temperatur tinggi harus menggunakan paduan *grid* positif baterai dengan ketahanan korosi yang tinggi. Namun perlu dipertimbangkan keseimbangan antara arus korosi pada *grid* positif dan arus *self-discharge* di elektroda negatif [7].

2.3.9. *Deep-cycle Operation*

Baterai yang elektrodanya terendam (*lead acid*) pada pengoperasiannya berada dibawah kondisi *deep cycle* umumnya akan mengalami pelunakan dan peluruhan aktif material pada elektroda positif. Masalah peluruhan jauh lebih sedikit terjadi pada baterai *VRLA* karena penggunaan *AGM* sehingga menyebabkan elektrolit terserap pada pori-pori *AGM*. Di sisi lain, peluruhan aktif material pada elektroda positif lebih sering menyebabkan kehilangan kapasitas. Degradasi (peluruhan) aktif material disebabkan oleh perubahan volume elektroda selama proses *charge* dan *discharge*. Timbal sulfat yang menempel pada elektroda positif akan meningkat selama *discharge* dan mengalami penurunan selama *charge*. Peningkatan selama *discharge* disebabkan oleh konversi timbal dioksida (PbO_2) menjadi PbSO_4 . Jika kedalaman *discharge* pada siklus ditingkatkan maka akan terjadi perluasan aktif material sehingga akan terjadi ekspansi yang semakin banyak[7].

2.4. Faktor yang mempengaruhi Performa Baterai

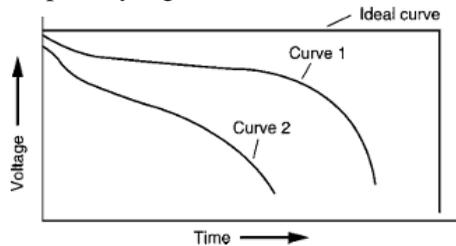
Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi karakteristik operasi, kapasitas, kinerja dan keluaran energi dari baterai. Adapun faktor tersebut adalah:

2.4.1. Tingkat tegangan

Sebagai contoh pada penggunaan baterai *lead acid*, yang mana tegangan teoritis dan *open circuit* (tidak terdapat pembebanan) adalah 2,1 V. Kemudian untuk tegangan kerja antara 1,8 hingga 2 V dan tegangan akhir sekitar 1,75 V pada kondisi *discharge*. Ketika sel baterai mengalami *discharge* maka voltase menjadi lebih rendah dari voltase teoritisnya. Perbedaan voltase diakibatkan oleh kehilangan voltase karena adanya tahanan internal pada sel baterai dan polarisasi dari aktif material selama proses *discharge*.

Pada penggunaan yang ideal, proses *discharge* baterai pada voltase teoritis terjadi sampai kapasitas sepenuhnya dimanfaatkan kemudian voltase turun. Namun pada kondisi aktual kurva

discharge dapat dilihat pada gambar 2.5. Dimana voltase awal beban *discharge* berada dibawah voltase teoritis. Terjadi penurunan voltase selama *discharge* berlangsung karena adanya peningkatan tahanan internal sel. Kurva 2 menunjukkan sel dengan tahanan internal yang lebih tinggi atau laju *discharge* yang besar sedangkan kurva 1 lebih kecil. Kenaikan tahanan internal atau arus *discharge*, penurunan voltase *discharge* ditunjukkan oleh profil yang menurun.



Gambar 2.5. Kurva karakteristik *discharge*[9].

Dampak *discharge* terhadap voltase baterai VRLA adalah kebalikan dari *charge*. Tahanan internal sel akan menyebabkan tegangan baterai menjadi turun ketika arus telah mengalir sehingga voltase selama *discharge* akan menjadi lebih kecil dari *open circuit votage (OCP)*[5]. Rumus untuk mencari voltase ketika *discharge* adalah:

$$\text{Voltase saat } discharge = OCP - (\text{Arus} \times \text{Tahanan internal}) \quad (6)$$

2.4.2. Arus *Discharge*

Apabila baterai telah mencapai tegangan *cutoff* dengan laju *discharge* yang rendah maka tegangan baterai akan meningkat dan terdapat penambahan kapasitas. Penambahan kapasitas umumnya terjadi hingga tegangan *cutoff* mencapai beban yang ringan. Sebuah metode untuk menunjukkan arus *discharge* serta *charge* dari baterai adalah tingkat C, dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut:

$$I = M \cdot C_n \quad (7)$$

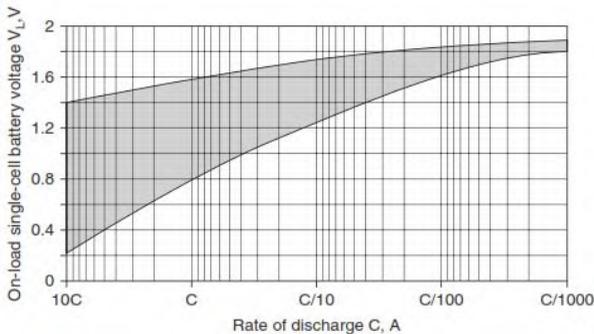
Dimana : I = arus *discharge* (A)

C = laju kapasitas dari baterai (Ah)

n = waktu (jam)

M = faktor pengkali atau pembagi C

Discharge yang dilakukan hingga 100% akan memperpendek umur baterai dan juga menurunkan kemampuan untuk menerima *charge*. Berdasarkan gambar 2.6 terlihat bahwa voltase yang menunjukkan 100% kapasitas sel baterai telah dikeluarkan adalah titik voltase yang berada pada kurva bagian atas. Kemudian kurva bagian bawah menunjukkan voltase minimum ketika dilakukan *discharge* tanpa mempengaruhi kemampuan *recharge* baterai.



Gambar 2.6. Tingkat *discharge* baterai VRLA[9].

2.4.3. Mode Discharge

Mode *discharge* pada baterai memiliki faktor yang signifikan pada performa baterai. Maka perlu dipertimbangkan mode *discharge* yang akan digunakan ketika melakukan pengujian.

Ketika dilakukan proses *discharge* hingga nilai tertentu maka baterai akan mengirimkan kapasitas yang sama dengan pembebanan. Selama *discharge* berlangsung, terdapat perbedaan arus *discharge* tergantung dari mode sehingga waktu yang digunakan akan menjadi berbeda pula. Beberapa mode *discharge* yang biasa digunakan antara lain:

1. Tahanan konstan

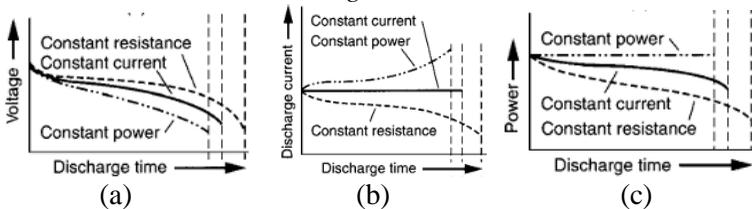
Tahanan selama pembebanan konstan sehingga arus dan voltase akan cenderung turun secara proporsional selama *discharge*.

2. Arus konstan

Arus akan tetap konstan selama *discharge* berlangsung.

3. Daya konstan

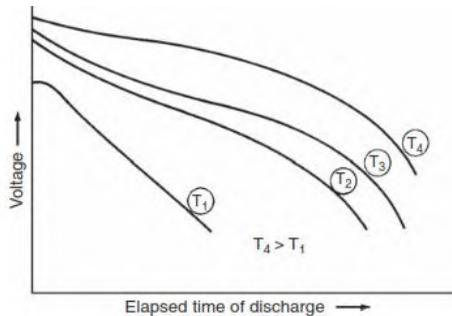
Terjadi kenaikan arus dan penurunan voltase pada baterai selama *discharge*.



Gambar 2.7. Profil *discharge* pada mode *discharge* yang berbeda. (a) Profil tegangan. (b) Profil arus. (c) Profil *power*[9].

2.4.4. Temperatur *Discharge* Baterai

Pengaruh dari temperatur baterai ketika dilakukan *discharge* dengan jelas dapat mempengaruhi kapasitas dan karakteristik voltase baterai. Hal ini disebabkan penurunan reaksi kimia dan peningkatan resistansi internal dari baterai pada temperatur yang lebih rendah. Temperatur *discharge* yang rendah tidak hanya menyebabkan pengurangan kapasitas tetapi juga meningkatkan tingkat degradasi voltase pada kurva *discharge*. Untuk mendapatkan performa baterai yang terbaik umumnya temperatur operasional antara 20°C hingga 40°C. Pada temperatur yang tinggi akan terjadi penurunan tahanan internal, peningkatan voltase *discharge* dan juga kapasitas (Ah). Namun dengan temperatur yang tinggi akan mengakibatkan peningkatan laju reaksi kimia yang cukup cepat selama proses *discharge* (*self-discharge*) yang mana akan terjadi kehilangan kapasitas secara maksimal.



Gambar 2.8. Efek temperatur pada kapasitas baterai[9].

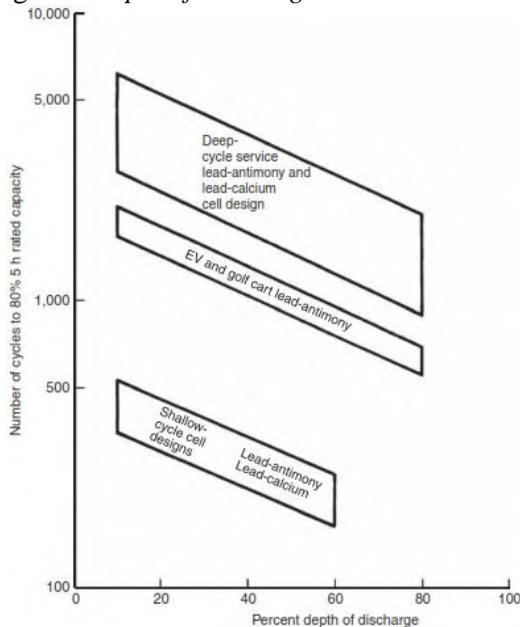
2.5. Dampak Parameter Operasi pada Umur Baterai

Parameter pengoperasian baterai mempunyai pengaruh yang sangat erat terhadap umur baterai adalah *depth of discharge*, jumlah siklus tahunan, kondisi penyimpanan dan temperatur operasi. Adapun pengaruh dari beberapa parameter tersebut adalah:

1. Peningkatan jumlah siklus operasi tahunan akan menurunkan umur pemakaian.
2. *Overcharging* akan menyebabkan peningkatan korosi pada *grid* positif, peluruhan aktif material dan memperpendek umur pakai baterai.
3. Sulfation, penurunan kapasitas dan umur pakai disebabkan oleh penyimpanan baterai dalam kondisi sel terendam larutan elektrolit. Dengan kondisi penyimpanan tersebut memungkinkan terjadi *self discharge* pada baterai.
4. Untuk mendapatkan umur baterai yang optimum diperlukan operasi *charge* dengan peralatan yang baik. Peralatan *charge* yang memadai akan meminimalisir timbulnya *overcharge* sehingga tercapai *state of charge (SoC)* yang tinggi.
5. Stratifikasi elektrolit pada sel yang cukup luas hingga level konsentrasi yang bervariasi akan mengurangi *charge* yang dapat diterima, *discharge* dan umur baterai. Asam dengan berat jenis yang tinggi akan mengendap kebagian bawah

sel sementara yang berat jenisnya lebih ringan akan berada dibagian atas sel. Selama *discharge*, larutan asam akan berada pada pori-pori plat dan permukaan akan menjadi encer.

- Umur siklus baterai akan menurun ketika terjadi peningkatan *depth of discharge*.



Gambar 2.9. Efek *depth of discharge* terhadap jumlah siklus[9].

Siklus baterai adalah setiap kali selesai melakukan *discharge* dan *recharge*. Sebagai contoh ketika melakukan *discharge* dari 100% *SoC* (*State of Charge*) sampai 20% *SoC* kemudian dikembalikan ke 100% *SoC* melalui *recharge*. Tingkat *DoD* yang sering digunakan adalah 20% dan 50%. Sehingga harus diperhatikan dengan cermat bahwa seberapa banyak siklus yang dapat dicapai ketika dilakukan *discharge* pada kedalaman tertentu.

Umur baterai berkaitan langsung dengan seberapa dalam *discharge* pada setiap siklusnya. Jika baterai dilakukan *discharge* sampai 50% maka umur baterai akan menjadi dua kali lebih lama jika dibandingkan dengan baterai yang dilakukan hingga 80% *DoD* setiap kali siklus. Apabila setiap siklus hanya 10% *DoD* maka baterai *VRLA* akan mempunyai umur siklus lima kali lebih lama daripada yang dilakukan 50% *DoD*. Pada kenyataannya, tingkat *DoD* yang sering digunakan adalah 30% hingga 40%[2].

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Bahan dan Peralatan Penelitian

3.1.1. Bahan Penelitian

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Baterai

Baterai *Valve Regulated Lead Acid (VRLA)* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu merk NGS Volcano (*Maintenance Free*) dengan seri iTZ5S 12V-3,5Ah. Pada penelitian ini hanya digunakan satu merk baterai untuk melakukan persiapan spesimen uji hingga pengujian.



Gambar 3.1. Baterai NGS Volcano.

2. Cairan Elektrolit

Untuk mengisi baterai agar terjadi reaksi elektrokimia maka diperlukan cairan elektrolit. Berat jenis dari cairan elektrolit yang digunakan adalah $1,32 \text{ g/cm}^3$.



Gambar 3.2. Cairan Elektrolit.

3. Lem Epoxy

Untuk menutup lubang saluran *valve* ketika dua sel bagian tengah baterai telah selesai dipotong maka harus dipakai lem epoxy. Penutupan dilakukan agar gas hidrogen dan oksigen tidak keluar atau masuk melewati saluran *valve* dari sel baterai yang telah terpotong.

3.1.2. Peralatan Penelitian

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Multimeter

Multimeter digunakan untuk mengukur tegangan baterai sebelum dilakukan pengujian pada Autolab PGSTAT302N.



Gambar 3.3. Multimeter.

2. Gergaji dan *Cutter*

Gergaji dan *Cutter* digunakan untuk memotong dua sel bagian tengah dari baterai ketika melakukan persiapan spesimen uji. Kemudian digunakan juga untuk memotong penutup baterai ketika akan mengambil elektroda positif dan negatif dari baterai yang telah rusak. Pengambilan elektroda tersebut ditujukan untuk melakukan pengujian terhadap kerusakan yang terjadi pada baterai.

3. Kikir

Kikir digunakan untuk merapikan bagian tengah casing baterai yang telah dipotong. Adapun tujuan merapikan bagian tersebut adalah agar lebih memudahkan pemasangan kabel ketika akan dilakukan pengujian menggunakan peralatan autolab PGSTAT302N.

4. Tang

Tang digunakan untuk mengambil elektroda dan casing bagian tengah dari baterai yang telah dipotong.

5. Gunting

Gunting digunakan untuk memotong elektroda baterai pada saat persiapan spesimen pengujian Autolab, *SEM* dan *XRD*.

6. Kain Lap

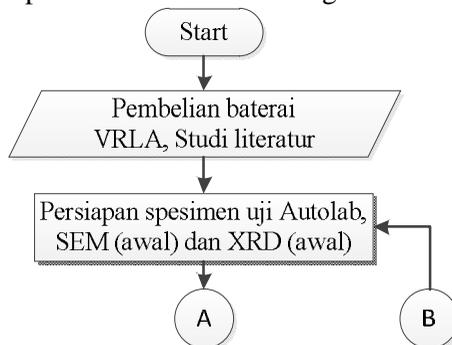
Kain lap diperlukan untuk membersihkan bagian yang kotor ketika melakukan pemotongan bagian tengah dari baterai.

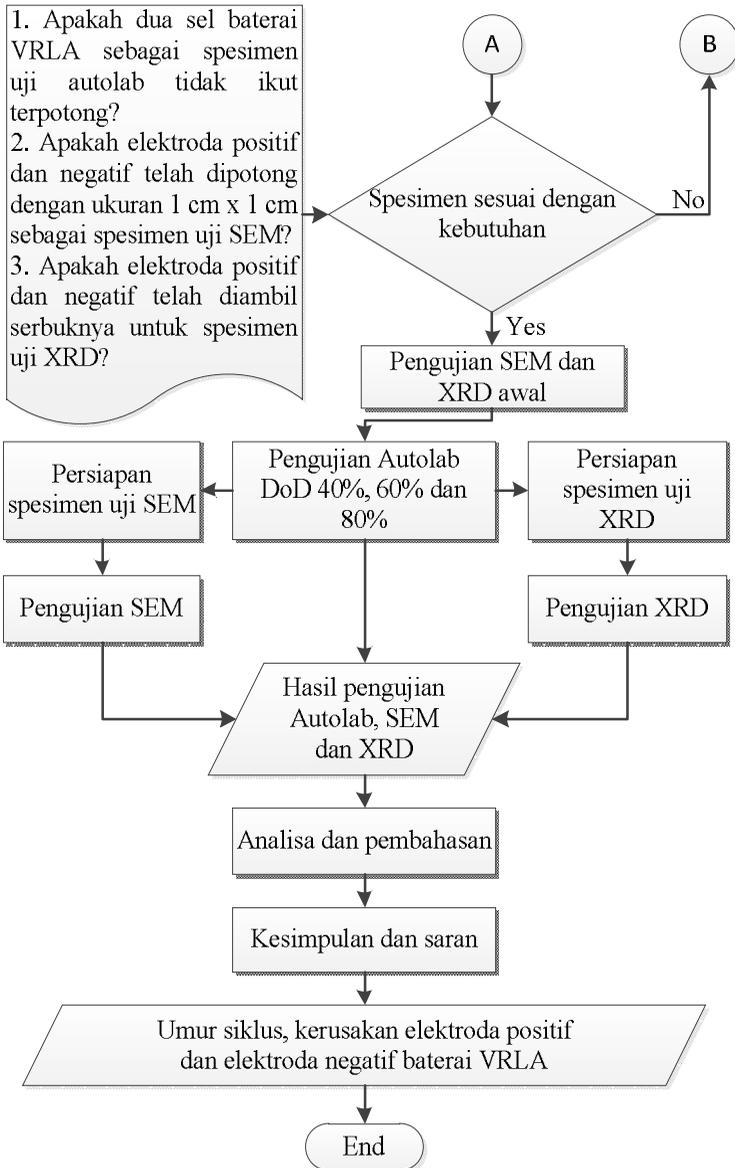
7. Pengaris

Pengaris digunakan untuk mengukur bahan uji ketika melakukan persiapan bahan pengujian *SEM*.

3.2. *Flowchart* Penelitian

Untuk melakukan penelitian tentang baterai *VRLA* maka harus dilakukan sesuai dengan urutan yang tepat. Adapun *flowchart* dari penelitian ini adalah sebagai berikut:





Gambar 3.4. *Flowchart* penelitian.

3.3. Karakteristik Pengujian

3.3.1. Pengujian Autolab

Pada penelitian ini, pengujian autolab diperlukan untuk melakukan proses *charge* dan *discharge*. Dalam proses *charge* dilakukan hingga mencapai *state of charge* 103%-105% namun ketika *discharge* dilakukan secara bervariasi. Variasi *DoD* dilakukan untuk mengetahui umur siklus dan kerusakan elektroda negatif dan elektroda positif pada baterai *VRLA* ketika dioperasikan.

Pengujian menggunakan Autolab dilakukan hingga baterai telah mengalami kerusakan. Indikasi kerusakan ketika voltase kerja baterai yang awalnya $\pm 2,14$ V setiap selnya mengalami penurunan voltase atau dapat juga ditentukan jumlah siklus yang akan digunakan pada tiap variasi *DoD* ketika akan melakukan pengujian Autolab. Dari pengujian yang telah dilakukan pada peralatan Autolab maka akan didapatkan data berupa grafik hasil pengujian. Berdasarkan grafik dan beberapa parameter lain yang telah didapatkan akan diketahui dampak variasi *DoD* terhadap kerusakan elektroda dan umur baterai.

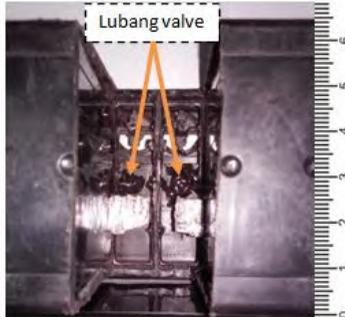
Agar dapat melakukan pengujian Autolab maka perlu melewati beberapa tahapan antara lain:

A. Persiapan bahan pengujian Autolab

Untuk menyiapkan bahan uji dilakukan dengan cara, yaitu:

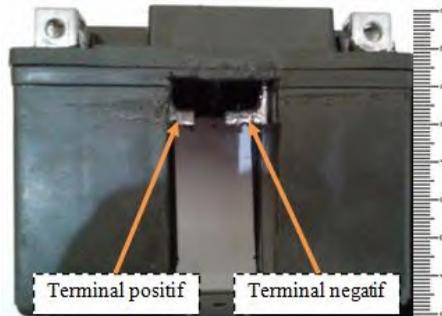
1. Memotong *casing* bagian tengah (dua sel) dari baterai *VRLA* menggunakan gergaji dan *cutter*. Ketika *casing* baterai telah terpotong maka elektroda baterai dapat diambil dengan tang. Proses pemotongan hanya dilakukan pada dua sel baterai bagian tengah sehingga harus diusahakan agar sel baterai yang berada disampingnya tidak terpotong.
2. Merapikan *casing* bagian tengah menggunakan kikir agar lebih mudah ketika melakukan pemasangan kabel untuk pengujian Autolab.
3. Membersihkan baterai menggunakan kain hingga hilang kotoran yang menempel pada bagian baterai.

4. Menutup lubang saluran *valve* yang terbuka menggunakan lem epoxy.



Gambar 3.5. Penutupan lubang *valve*.

5. Merapikan terminal positif dan negatif dari dua sel yang telah terpotong.

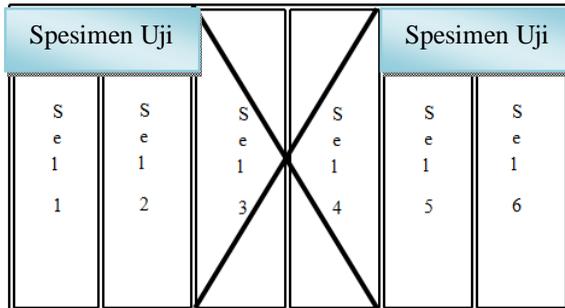


Gambar 3.6. Spesimen uji Autolab.

B. Parameter pengujian Autolab

Baterai *VRLA* yang digunakan pada awalnya masih dalam kondisi baru mempunyai 6 sel dengan voltase ± 12 V dan kapasitas 3,5 Ah. Kemudian sel ketiga dan sel keempat dilakukan pemotongan sehingga yang dijadikan spesimen pengujian pada saat pegujian Autolab adalah sel satu dengan sel dua serta sel lima dengan sel enam. Pemotongan dua sel bagian tengah baterai dilakukan karena terkendala *range* voltase yang dapat dicapai

oleh peralatan uji Autolab PGSTAT302N yaitu ± 10 V. Dengan pemotongan dua sel bagian tengah baterai maka tegangan yang terdapat pada dua sel yang dijadikan spesimen uji adalah ± 4 V. Dengan voltase baterai yang $> \pm 10$ V maka peralatan Autolab dapat digunakan untuk melakukan pengujian terhadap baterai *VRLA*.



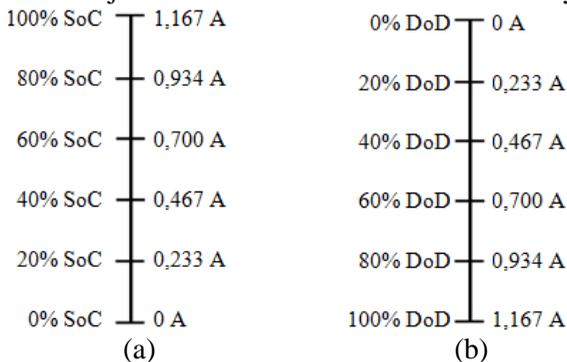
Gambar 3.7. Sel baterai *VRLA* untuk pengujian Autolab.

Pengujian Autolab pada penelitian ini akan menggunakan dua buah baterai *VRLA* untuk melakukan variasi *DoD* pada 40%, 60% dan 80%. Pemilihan variasi *DoD* berdasarkan pada peralatan *UPS*, pembangkit tenaga surya, mobil golf, kursi roda elektrik, dan *forklift* yang cenderung digunakan pada kedalaman *discharge* yang cukup besar. Kenyataannya, *DoD* yang sering digunakan adalah 40%. Pada penelitian ini juga membuktikan apakah dengan *DoD* yang besar akan mengurangi umur siklus dari baterai. Sehingga dipilih *DoD* 60% dan 80% agar sesuai juga dengan skala *DoD* vs jumlah siklus yang terdapat pada tinjauan pustaka. Namun pada penelitian ini tidak dilakukan pengujian dengan variasi *DoD* 100% dikarenakan akan semakin cepat menyebabkan kerusakan dan *Premature Capacity Loss (PCL)*. Serta peralatan Autolab yang tersedia tidak mampu apabila digunakan untuk melakukan pengujian dengan variasi *DoD* 100% dengan laju arus 2C (arus konstan).

Penggunaan mode arus konstan dikarenakan relatif mudah diterapkan pada peralatan Autolab. Kemudian untuk penentuan

parameter arus *charge* dan *discharge* perlu dilakukan perhitungan berdasarkan variasi DoD. Dilakukan *charging* pada arus konstan karena mengikuti prosedur yang digunakan pada software Nova 1.8 untuk melakukan *DoD* yaitu *Chrono charge discharge* (*Galvanostatic*). Sehingga parameter yang harus dimasukkan ketika *charge* dan *discharge* pada prosedur tersebut berupa arus.

Total spesimen uji Autolab yang harus dipersiapkan adalah 3 buah. Agar dapat menggunakan peralatan uji Autolab maka harus dihitung terlebih dahulu berapa arus yang harus dimasukkan kedalam parameter aplikasi Nova 1.8. Perhitungan arus untuk memvariasikan *depth of discharge* baterai VRLA dengan mode arus konstan pada peralatan Autolab. Perlu dilakukan pembuatan skala persentase kapasitas dari dua sel baterai (setiap spesimen uji Autolab) terlebih dahulu agar lebih memudahkan seberapa besar arus yang harus dijadikan parameter pengujian pada *DoD* tertentu. Setelah skala variasi *DoD* berdasarkan parameter arus yang digunakan telah dibuat maka dapat digunakan sebagai acuan parameter dalam melakukan pengujian awal sehingga didapatkan penurunan tegangan pada *DoD* tertentu. Data penurunan tegangan yang telah didapatkan kemudian dibuat menjadi skala agar lebih memudahkan ketika memantau kedalaman *discharge* secara langsung pada grafik maupun nilai tegangan yang ditampilkan pada peralatan uji Autolab. Cara untuk membuat skala yaitu:



Gambar 3.8. (a) Skala kapasitas (*SoC*). (b) Skala *DoD* berdasarkan arus.

Gambar 3.8 merupakan skala yang menunjukkan bahwa kapasitas penyimpanan baterai akan berkurang ketika jumlah sel dalam baterai dikurangi. Pada kondisi baterai *VRLA* masih baru mempunyai kapasitas 3,5 Ah dengan 6 sel sedangkan pada spesimen uji Autolab hanya memiliki kapasitas 1,167 Ah dengan 2 sel baterai.

Penelitian yang akan dilakukan menggunakan laju arus *DoD* dan pengisian sebesar 2C. Adapun contoh perhitungan yang dapat dilakukan yaitu:

$$\begin{aligned} I &= M \cdot C_n \\ &= \frac{1}{0,5 \text{ h}} \cdot 0,467 \text{ Ah} \\ &= 0,934 \text{ A} \end{aligned}$$

Contoh perhitungan tersebut berdasarkan pada perhitungan untuk mendapatkan parameter pengujian baterai *VRLA* dengan *depth of discharge* 40% dan waktu 0,5 jam. Karena waktu yang digunakan untuk melakukan pengujian pada beberapa variasi *DoD* adalah 0,5 jam maka laju arus *DoD* menjadi 2C.

Apabila baterai telah selesai dilakukan *discharge* kemudian baterai akan di *charge* dengan mode arus konstan dengan waktu 0,5 jam. Pengisian bertujuan mengembalikan kapasitas baterai *VRLA* sebelum dilakukan pengujian *DoD* kembali. Untuk melakukan *charge* dan *discharge* memerlukan waktu 1 jam setiap siklusnya. Pengujian variasi *depth of discharge* pada baterai akan dilakukan hingga 60, 80 dan 101 siklus. Estimasi waktu yang diperlukan untuk melakukan pengujian adalah 60 jam (2,5 hari), 80 jam (3,33 hari) dan 101 jam (4,21 hari). Tabel parameter pengujian Autolab berdasarkan variasi *DoD* adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1. Parameter Pengujian Baterai dengan Variasi *DoD*.

| No | Variasi <i>depth of discharge</i> | Laju arus (Ampere) | Waktu tiap siklus (detik) | Siklus |
|----|-----------------------------------|--------------------|---------------------------|--------|
| 1 | 40% | 0,934 | 3600 | 101 |
| 2 | 40% | 0,934 | 3600 | 80 |
| 3 | 60% | 1,4 | 3600 | 80 |
| 4 | 80% | 1,868 | 3600 | 80 |
| 5 | 80% | 1,868 | 3600 | 60 |

C. Pengujian Autolab

Dalam melakukan pengujian autolab diperlukan beberapa peralatan yang diperlukan, antara lain:

1. Autolab

Adapun spesifikasi dari alat uji autolab antara lain:

| | |
|-------------------|-------------------------|
| Tipe | : PGSTAT302N |
| Nomor seri | : AUT84992 (15/11/2011) |
| Daya | : 300 VA |
| Frekuensi | : 50-60 Hz |
| Koneksi elektroda | : 2, 3 dan 4 |
| Arus maksimum | : ± 2 A |
| Range arus | : 1 nA hingga 1 A |
| Akurasi arus | : $\pm 0,2$ % |
| Resolusi arus | : 0,0003 % |
| Range tegangan | : ± 10 V |
| Akurasi tegangan | : $\pm 0,2$ % |
| Resolusi tegangan | : $0,3 \mu\text{V}$ |
| Buatan | : Belanda |

2. Monitor

Digunakan untuk menampilkan parameter yang harus dimasukkan dan menampilkan grafik hasil pengujian.

3. *Central Processing Unit (CPU)*

Digunakan untuk melakukan proses pengiriman parameter ke alat Autolab sesuai dengan pengujian yang akan dilakukan serta mengolah hasil pengujian sehingga dapat ditampilkan grafik pada monitor.



Gambar 3.9. Peralatan pengujian Autolab.

Adapun tahapan yang harus dilewati ketika melakukan pengujian menggunakan peralatan Autolab, antara lain:

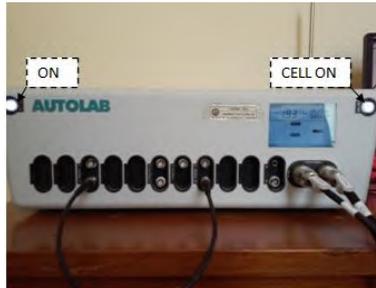
1. Menyalakan CPU dan monitor terlebih dahulu.
2. Menghubungkan kabel dari peralatan Autolab ke spesimen baterai yang telah siap dilakukan pengujian. Kabel dengan penjepit berwarna merah dihubungkan dengan terminal positif sedangkan kabel dengan penjepit berwarna hitam dihubungkan dengan terminal negatif.



Gambar 3.10. Penyambungan kabel untuk pengujian Autolab.

3. Menyalakan peralatan Autolab dengan menekan tombol ON dan CELL ON.

4.



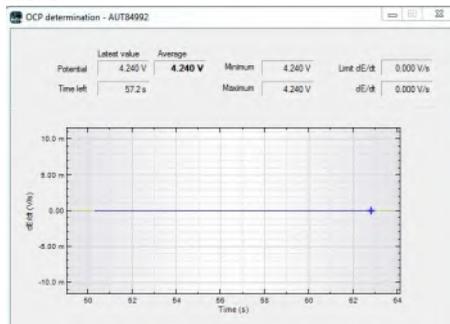
Gambar 3.11. Tombol ON dan CELL ON.

5. Membuka aplikasi Nova 1.8 yang telah terinstal untuk mengoperasikan alat uji Autolab.



Gambar 3.12. Nova 1.8.

6. Memilih *module OCP determination (time limit)* pada aplikasi Nova 1.8 untuk melakukan pengukuran voltase aktual baterai tanpa adanya pembebanan (*load*).
7. Menunggu proses pengukuran voltase baterai yang berlangsung sekitar 120 detik hingga didapatkan voltase aktual baterai.



Gambar 3.13. Proses pengukuran voltase aktual baterai.

8. Memilih *module Chrono charge discharge (Galvanostatic)* pada aplikasi Nova 1.8.

| Commands | Parameters |
|------------------------------------|---|
| Chrono charge discharge | |
| Remarks | Chrono charge discharge: no extra mo... |
| End status Autolab | |
| Signal sampler | Time, WE(1) Current, WE(1) Potential |
| Options | 0 Options |
| Instrument | |
| Instrument description | |
| Timed procedure galvanostatic | |
| Autolab control | |
| Set current | 0.000E+00 |
| Set cell | 0n |
| Wait time (s) | 5 |
| Repeat n times | |
| Number of repetitions | 10 |
| Timed procedure | |
| Set current | 0.000E+00 |
| Record signals (>1 ms) galvanos... | [5, 1] |
| Set current | 0.000E+00 |
| Record signals (>1 ms) galvanos... | [5, 1] |
| Timed procedure | |
| Set cell | 0ff |

Gambar 3.14. Tampilan *Chrono Charge Discharge (Galvanostatic)*.

9. Mengisikan parameter pengujian yang akan dilakukan pada *Chrono charge discharge (Galvanostatic)* dengan melakukan perubahan parameter pada *repeat n times*, *set current*, *duration*, dan *interval time*.

| Commands | Parameters |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Repeat n times | |
| Number of repetitions | 4 |
| Timed procedure | |
| Set current | -5.830E-01 |
| Record signals (>1 ms) galvanos... | [600, 0.1] |
| Duration (s) | 600 |
| Interval time (s) | 0.1 |
| Estimated number of points | 3600 |
| Signal sampler | Time, WE(1) Current, WE(1) Potential |
| Options | 0 Options |
| Corrected time | <.array.> [f] |
| Time | <.array.> [s] |
| WE(1) Potential | <.array.> [V] |
| WE(1) Current | <.array.> [A] |
| Index | <.array.> |
| E vs t | |
| Set current | 1.167E+00 |
| Record signals (>1 ms) galvanos... | [3600, 0.1] |
| Duration (s) | 3600 |
| Interval time (s) | 0.1 |
| Estimated number of points | 3600 |
| Signal sampler | Time, WE(1) Current, WE(1) Potential |
| Options | 0 Options |
| Corrected time | <.array.> [s] |
| Time | <.array.> [s] |
| WE(1) Potential | <.array.> [V] |
| WE(1) Current | <.array.> [A] |
| Index | <.array.> |
| E vs t | |

Gambar 3.15. Parameter yang dirubah

10. Menambahkan grafik yang ingin ditampilkan untuk hasil pengujian Autolab dengan cara klik kanan pada *Record signals (>1 ms) galvanostatic* lalu pilih add plot 

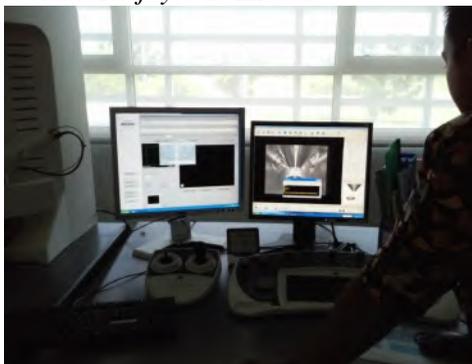


Gambar 3.16. Pilihan grafik yang dapat ditambahkan.

11. Melakukan pengujian dengan variasi *depth of discharge* mulai dari 40%, 60%, dan 80% dengan lama siklus yang telah ditentukan sebelum pengujian Autolab. Indikasi kerusakan baterai ditandai dengan tegangan baterai mengalami penurunan yang pada awalnya $\pm 4,28$ V ketika dilakukan *OCP*.

3.3.2. Pengujian SEM

SEM (Scanning Electron Microscope) adalah mikroskop elektron yang digunakan untuk menggambarkan bentuk permukaan (morfologi) dari material yang akan dianalisis. Dalam pengoperasiannya, peralatan *SEM* dioperasikan dengan sebuah monitor, *keyboard* serta *joystick* khusus.



Gambar 3.17. Monitor dan *keyboard* khusus *SEM*.

Agar dapat melakukan pengujian *SEM* maka perlu melewati beberapa tahapan, yaitu:

A. Persiapan bahan pengujian *SEM*

Untuk pembuatan spesimen uji *SEM* harus menunggu proses pengujian autolab selesai terlebih dahulu. Hal tersebut dikarenakan pengujian ini dilakukan untuk melihat dampak kerusakan yang terjadi pada elektroda baterai *VRLA*. Tahapan-tahapan yang perlu dilakukan untuk menyiapkan spesimen uji *SEM*, yaitu:

1. Memotong tutup baterai *VRLA* agar dapat mengambil elektroda yang telah mengalami kerusakan.
2. Memotong konektor antar sel baterai.



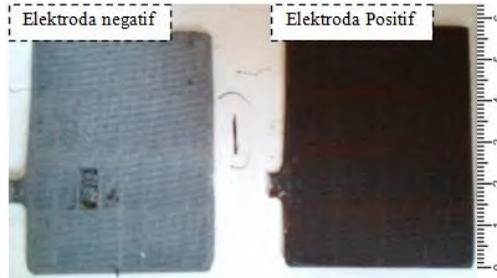
Gambar 3.18. Pemotongan konektor baterai.

3. Mengambil elektroda positif (PbO_2) dan elektroda negatif (Pb) dari salah satu sel baterai yang telah dipotong konektornya.



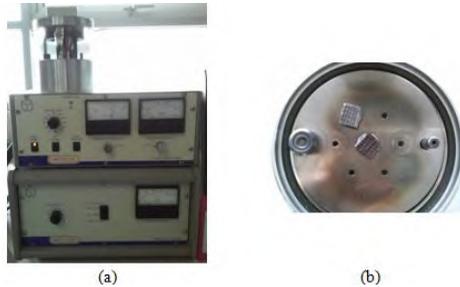
Gambar 3.19. Satu sel baterai yang telah diambil.

4. Memotong elektroda menggunakan gunting dengan ukuran 1 cm x 1 cm.



Gambar 3.20. Elektroda negatif dan positif yang akan dipotong.

5. Melakukan *coating* material sebelum dilakukan pengujian *SEM*.



Gambar 3.21. (a) Peralatan *coating* (b) Penempatan spesimen ketika *coating*.

B. Pengujian *SEM*

Spesifikasi peralatan pengujian *SEM*, antara lain:

| | |
|-----------|--|
| Nama alat | : SEM |
| Merk | : CARL ZEISS |
| Tipe | : EVO MA10 |
| No. Seri | : EVO10-09-60 |
| Voltase | : 0,2 sampai 30 kV |
| Resolusi | : 2 nm pada 30 kV (SE dan LaB6), 4,5 nm pada 30 kV (BSD-VP mode), 15 |

nm pada 30 kV (1nA, LaB6), 15 nm
 pada 1 kV (SE dan LaB6), 10 nm
 pada 3 kV (SE)
 Perbesaran : <7 sampai 1.000.000 kali
 Maks. tinggi sampel : 100 mm
 Pengerakan sampel : 5 axis
 Buatan : Inggris



Gambar 3.22. Alat uji SEM.

Untuk melakukan proses pengujian SEM maka harus menyalakan alat SEM dengan menekan tombol ON pada *box power* dan monitor. Setelah kedua alat dapat menyala, buka program SMARTSEM dan dialirkan gas hidrogen hingga tekanan maksimal 0,5 bar. Tunggu beberapa waktu sampai pintu *chamber* dapat dibuka dan segera matikan aliran gas nitrogen lalu masukkan sampel yang telah *dicoating* pada sampel *holder*. Kemudian masukkan sampel *holder* kedalam *chamber* dan pastikan pintu *chamber* tertutup rapat. Pilih posisi sampel yang akan dianalisis pada *stage navigation*. Pemilihan posisi sampel dapat dilakukan menggunakan *joystick* dan melihat tampilan pada monitor. Apabila sampel telah dipilih maka Beam dapat dinyalakan, jika posisi sampel dengan garis ternyata tidak lurus

maka posisi sampel harus diatur ulang dengan *stage initial*. Untuk melihat hasil scanning dapat dilakukan dengan klik NORMAL dan klik DETECTOR (pilih sinyal *adjust BC*, tekan off). Atur *Working Distance (WD)* saat awal 8,5 dan Magnifikasi 50 lalu mengatur sumbu Z hingga gambar dapat fokus. Klik Center dan pilih objek yang akan dianalisa lalu mengatur fokus dan magnifikasinya. Klik *Reduce* dan atur area yang dipilih kemudian mengatur fokus gambar sesuai dengan kebutuhan. Setelah memperoleh gambar maka klik Normal dan atur *speed scanning*. Jika terdapat *noise* dapat diatur menggunakan *noise reduction*. Tekan photo untuk menghentikan proses *scanning* lalu tekan *save* untuk menyimpan gambar.

3.3.3. Pengujian XRD

XRD (X-Ray Diffraction) adalah metode karakterisasi material yang pada kenyataannya paling tua namun masih sering digunakan hingga sekarang. Pengujian *XRD* digunakan untuk mengetahui struktur kristal dan tingkat kristalinitas dari spesimen uji.

Agar dapat melakukan pengujian *XRD* maka perlu melewati beberapa tahapan, antara lain:

A. Persiapan bahan pengujian *XRD*

Persiapan yang harus dilakukan ketika akan melakukan pengujian *XRD* sebagai berikut:

1. Untuk persiapan bahan uji *XRD* tahapan pertama sampai ketiga sama seperti persiapan bahan untuk pengujian *SEM-EDX*.
2. Mengambil serbuk pada elektroda negatif dan positif.



Gambar 3.23. Proses pengambilan serbuk pada elektroda.

3. Serbuk siap dilakukan pengujian.

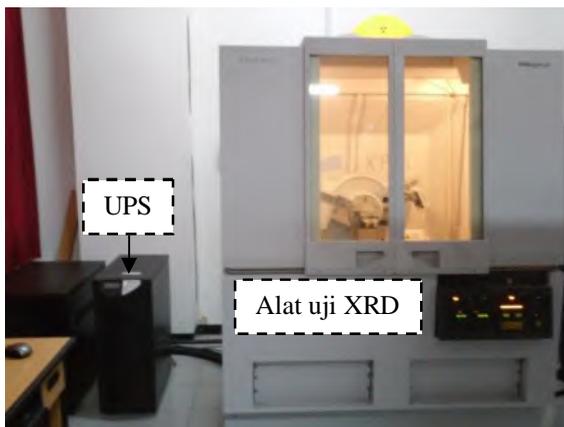


Gambar 3.24. Serbuk Pb dan PbO_2 .

B. Pengujian *XRD*

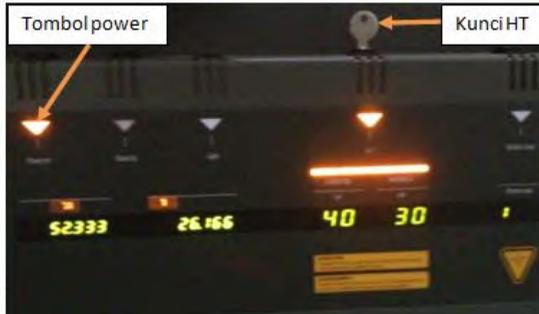
Adapun spesifikasi dari alat uji *XRD* antara lain:

| | |
|-------------------|---|
| Merk | : X'Pert PRO PANalytical |
| Ketelitian | : $\pm 0,0002^\circ$ |
| Step minimum | : $0,0002^\circ$ |
| Kecepatan memutar | : $12^\circ/\text{detik}$ |
| Range pengujian | : -40° hingga 170° |
| Ukuran sampel | : Tinggi maksimum 24 mm, berat maksimum 0,5 kg dan lebar maksimum (diameter) 4 inci |
| Buatan | : Belanda |



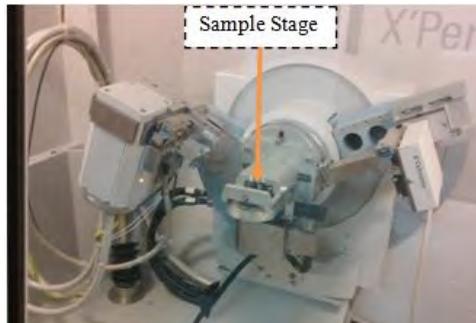
Gambar 3.25. *UPS* dan alat uji *XRD*.

Untuk melakukan pengujian *XRD*, terlebih dahulu harus menyalakan *UPS* dengan cara menaikkan saklar dibagian belakang *UPS*. Setelah *UPS* menyala maka dapat ditekan tombol ON pada panel bagian depan hingga muncul 220 V pada layar *UPS* lalu tunggu sampai tulisan *test* dan Ok muncul. Kemudian menyalakan saklar *ciller* dan *XRD* (tekan tombol power dan putar kunci HT).



Gambar 3.26. Tombol power dan kunci HT.

Ketika *UPS* dan *XRD* telah menyala selanjutnya menyalakan komputer lalu klik *software data collector*. Klik instrumen pilih *connect* lalu pilih *reflection transmission spinner* lalu akan muncul *warning* kemudian klik Ok. Setelah itu, mengatur *tension* pada 40 kV dan *current* pada 30 mA dengan cara *double* klik pada generator. Untuk menaruh sampel yang akan diuji pada *sample stage* maka tekan *double* klik pada menu *sample stage* lalu hilangkan tanda centang pada *lift up* kemudian *apply* dan letakkan sampel pada *sample stage*. Klik *measurement program* lalu pilih sudut scan yang diinginkan selanjutnya ketik nama sampel dan klik Ok.



Gambar 3.27. *Sample Stage*.

3.4. Hipotesa

Kesimpulan sementara yang dapat dibuat berdasarkan sumber referensi yang telah didapatkan adalah:

1. Dengan variasi *depth of discharge* yang mencapai 80% akan mengakibatkan umur siklus baterai lebih rendah daripada *depth of discharge* 40% dan 60%. Berkurangnya umur siklus baterai ketika DoD yang besar disebabkan oleh adanya kerusakan pada elektroda positif maupun negatif yang relatif lebih cepat.
2. Kerusakan yang dominan terjadi adalah *sulphation* dengan persentase yang bervariasi pada elektroda negatif ketika dilakukan variasi *depth of discharge*. Semakin besar DoD yang dilakukan pada setiap siklusnya maka akan mengakibatkan pembentukan PbSO_4 yang semakin meningkat sedangkan dengan DoD yang kecil maka PbSO_4 yang terbentuk akan semakin sedikit pula.
3. Kerusakan pada elektroda positif berupa *grid corrosion* yang disebabkan oleh *charging* pada mode arus konstan sehingga menyebabkan *overcharge* sekitar 103%-105% dari tegangan awal baterai.
4. Senyawa PbSO_4 berubah menjadi kristal dikarenakan adanya stratifikasi asam, terjadinya depolarisasi akibat proses rekombinasi oksigen pada baterai VRLA.

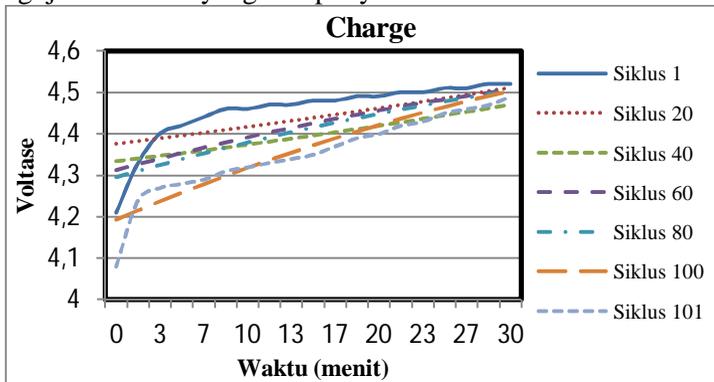
BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian dan pembahasan

4.1.1. Pengujian Autolab

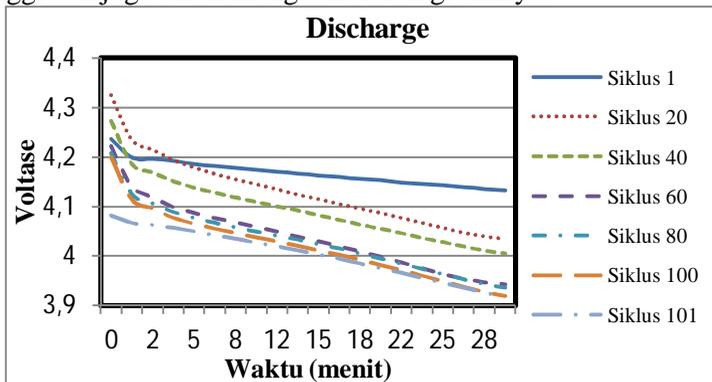
Pada pengujian Autolab PGSTAT302N, baterai VRLA yang telah dikondisikan menjadi 2 sel selanjutnya dilakukan variasi *DoD* hingga diperoleh hasil grafik. Selama pengujian Autolab berlangsung, arus *discharge* yang digunakan adalah 2C (kontan arus). Kapasitas baterai dari setiap spesimen uji sekitar 1,167 Ah. Waktu yang digunakan untuk melakukan *charge* maupun *discharge* masing-masing adalah 3600 detik. Grafik yang didapatkan adalah hasil pengujian baterai dengan variasi *DoD* 40% selama 101 siklus dan 80 siklus dengan parameter arus pengujian 0,934 A. Kemudian untuk *DoD* 60% selama 80 siklus dengan parameter arus pengujian 1,4 A. Serta *DoD* 80% selama 80 siklus dan 60 siklus dengan parameter arus pengujian 1,868 A. Perbedaan parameter arus pada setiap melakukan pengujian Autolab dikarenakan adanya perbedaan *DoD*. Adapun grafik hasil pengujian Autolab yang didapat yaitu:



Gambar 4.1. Grafik *charge* pada pengujian *DoD* 40% selama 101 siklus.

Grafik pengujian *DoD* 40% pada gambar 4.1 menunjukkan bahwa semakin bertambahnya waktu *charge* maka *internal resistance* yang berasal dari aktif material akan semakin meningkat pula sehingga menyebabkan voltase mengalami kenaikan. Terjadinya kenaikan voltase paling tinggi mencapai 4,5 V pada saat dilakukan *charge* menggunakan mode arus konstan dengan laju 2C. Seiring dengan semakin bertambahnya siklus *charge* maka akan menyebabkan kerusakan pada elektroda baterai. Hal tersebut ditunjukkan oleh profil grafik *charge* yang semakin curam seiring dengan bertambahnya siklus *charge* pada baterai VRLA.

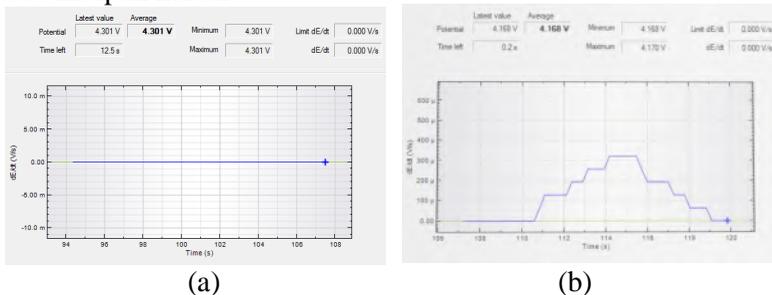
Pada gambar 4.1 menunjukkan tren grafik yang berbeda, yaitu terdapat grafik yang berbentuk kurva dan garis linear. Adapun grafik yang berupa garis linear dikarenakan oleh tambahan setelan parameter *cutoff* pada *software* Nova 1.8. Parameter *cutoff* yang dimasukkan pada pengujian *DoD* 40% bertujuan untuk membatasi voltase *charging* agar tidak terlalu tinggi dan juga untuk mengetahui tren grafiknya.



Gambar 4.2. Grafik *discharge* pada pengujian *DoD* 40% selama 101 siklus.

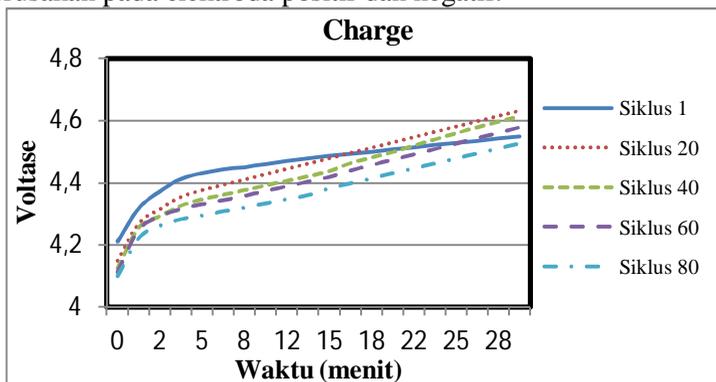
Profil grafik *DoD* 40% pada gambar 4.2 menunjukkan bahwa pada siklus pertama profil grafiknya tidak terjadi degradasi voltase yang terlalu tajam. Akan tetapi, ketika mencapai siklus 20 hingga 101 tingkat degradasi voltase yang ditunjukkan oleh profil

grafik menjadi semakin tajam. Peningkatan kemiringan grafik dapat disebabkan oleh beberapa hal, antara lain sulfation, *water loss* maupun korosi.



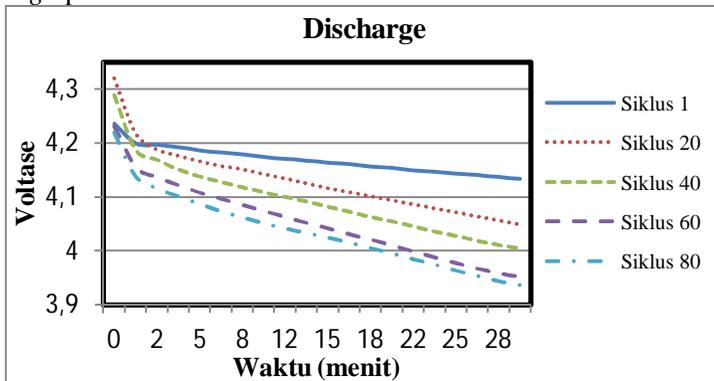
Gambar 4.3. (a) *OCP* sebelum (b) *OCP* setelah pengujian *DoD* 40% selama 101 siklus.

Pada gambar 4.3 menunjukkan hasil *OCP* dari kondisi baterai masih baru (sebelum pengujian) dan setelah dilakukan pengujian. Terlihat bahwa *OCP* yang terukur mencapai 4,301 V sebelum dilakukan pengujian. Namun *OCP* baterai mengalami penurunan hingga tersisa 4,168 V ketika dilakukan pengujian *DoD* 40% dengan arus 0,934 A selama 101 siklus. Penurunan *OCP* berkaitan erat dengan adanya penurunan kapasitas penyimpanan energi pada baterai yang disebabkan oleh kerusakan pada elektroda positif dan negatif.



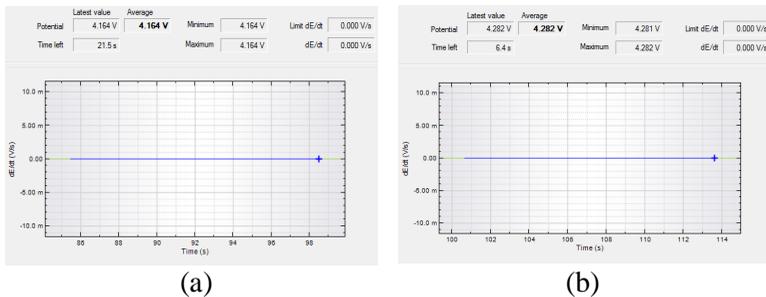
Gambar 4.4. Grafik *charge* pada pengujian *DoD* 40% selama 80 siklus.

Grafik pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa semakin bertambahnya waktu *charge* maka *internal resistance* yang berasal dari aktif material akan semakin meningkat. Adanya peningkatan *internal resistance* akan menyebabkan kenaikan voltase. Terjadinya kenaikan voltase paling tinggi mencapai 4,63 V ketika dilakukan *charge*. Seiring dengan semakin bertambahnya siklus *charge* maka akan menyebabkan kerusakan pada elektroda baterai. Hal tersebut ditunjukkan oleh profil grafik *charge* yang semakin curam seiring dengan bertambahnya siklus *charge* pada baterai VRLA.



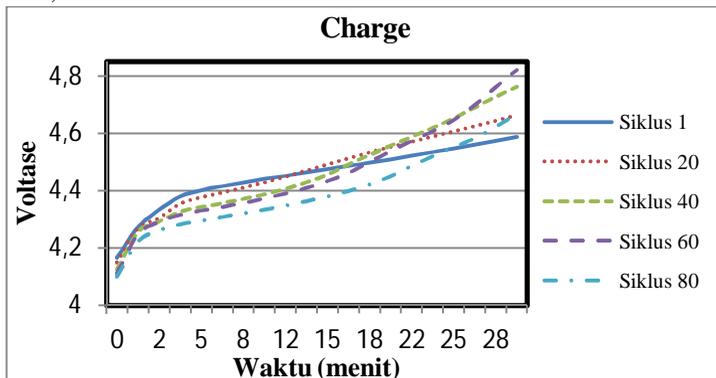
Gambar 4.5. Grafik *discharge* pada pengujian *DoD* 40% selama 80 siklus.

Profil pada gambar 4.5 menunjukkan bahwa pada siklus pertama profil grafiknya tidak terjadi degradasi voltase yang terlalu tajam. Akan tetapi, ketika mencapai siklus 20 hingga 80 tingkat degradasi voltase yang ditunjukkan oleh profil grafik menjadi semakin tajam. Peningkatan kemiringan grafik dapat disebabkan oleh beberapa hal, antara lain sulfation, *water loss* maupun korosi.



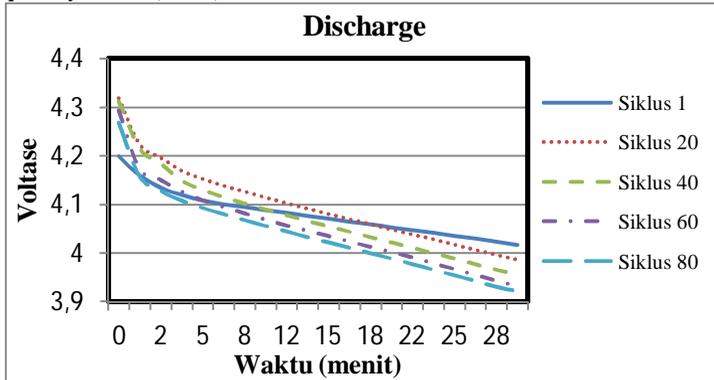
Gambar 4.6. (a) *OCP* sebelum (b) *OCP* setelah pengujian *DoD* 40% selama 80 siklus.

Pada gambar 4.6 menunjukkan hasil *OCP* dari kondisi baterai masih baru (sebelum pengujian) dan setelah dilakukan pengujian. Terlihat bahwa *OCP* yang terukur mencapai 4,282 V sebelum dilakukan pengujian. Namun *OCP* baterai mengalami penurunan hingga tersisa 4,164 V ketika dilakukan pengujian *DoD* 40% dengan arus 0,934 A selama 80 siklus. Penurunan *OCP* menunjukkan adanya penurunan kapasitas penyimpanan energi pada baterai yang disebabkan oleh kerusakan pada elektroda positif dan negatif. Bentuk kerusakan yang dapat terjadi meliputi korosi, *water loss* atau sulfation.



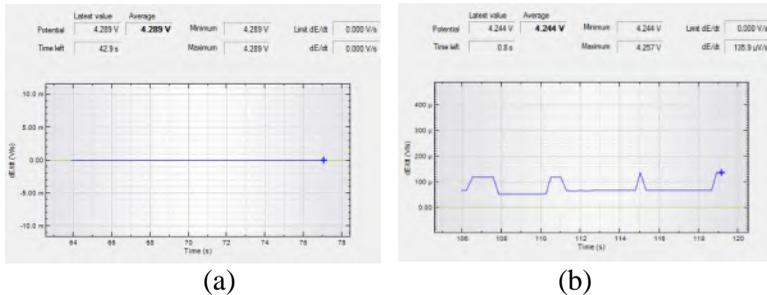
Gambar 4.7. Grafik *charge* pada pengujian *DoD* 60% selama 80 siklus.

Kenaikan voltase yang cukup signifikan pada gambar 4.7 disebabkan peningkatan tahanan internal. Adanya peningkatan tahanan internal mengindikasikan bahwa baterai *VRLA* mulai mengalami gejala kerusakan. Kerusakan dapat berupa korosi, sulfation, *water loss* dan kehilangan kontak antara grid dengan aktif material yang pada akhirnya akan menyebabkan *Premature Capacity Loss (PCL)*.



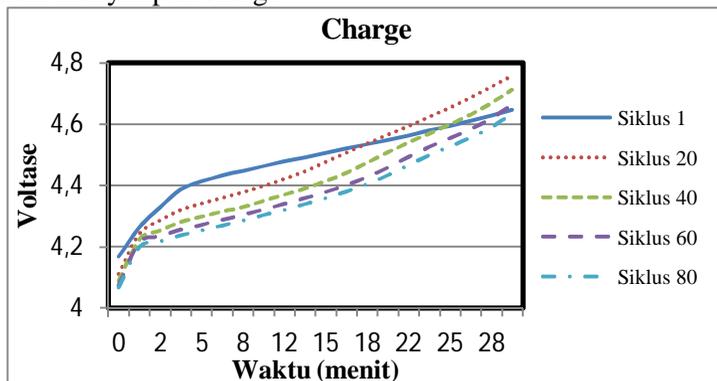
Gambar 4.8. Grafik *discharge* pada pengujian *DoD* 60% selama 80 siklus.

Grafik *discharge* pada gambar 4.8 menunjukkan bahwa terjadi penurunan kapasitas seiring dengan bertambahnya siklus pada menit ke 0 hingga 30. Penurunan kapasitas disebabkan oleh penurunan kemampuan baterai untuk menerima *charge*. Hal itu terbukti dengan semakin menurunnya voltase awal ketika dilakukan *discharge*. Kemudian terjadi penurunan voltase yang signifikan pada menit ke 16 hingga 30.



Gambar 4.9. (a) *OCP* sebelum (b) *OCP* setelah pengujian *DoD* 60% selama 80 siklus.

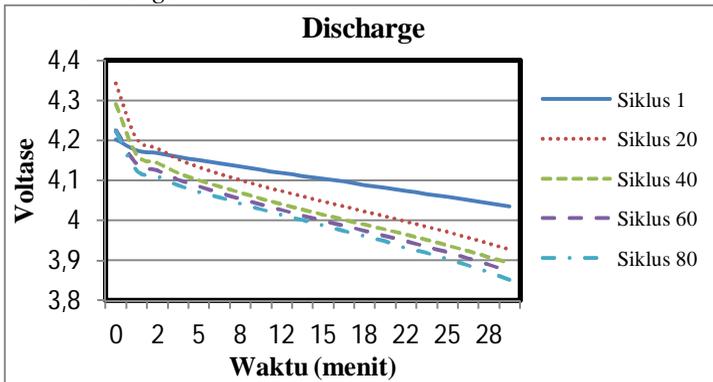
Pada gambar 4.9 terlihat bahwa *OCP* yang terukur mencapai 4,289 V sebelum dilakukan pengujian. Namun *OCP* baterai mengalami penurunan hingga tersisa 4,244 V ketika dilakukan pengujian *DoD* 60% dengan arus 1,4 A selama 80 siklus. Adanya penurunan voltase menunjukkan penurunan kemampuan baterai dalam menyimpan energi.



Gambar 4.10. Grafik *charge* pada pengujian *DoD* 80% selama 80 siklus.

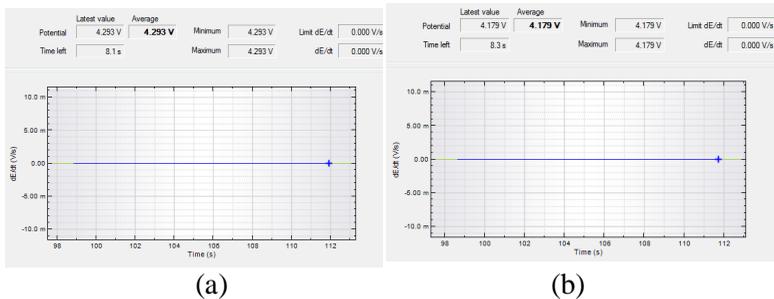
Dari gambar 4.10 menunjukkan bahwa kenaikan voltase yang cukup signifikan mulai dari siklus 20 hingga 80 disebabkan peningkatan tahanan internal. Voltase *charge* yang paling tinggi hampir mencapai 4,8 V namun hanya berlangsung selama

beberapa detik. Adanya peningkatan tahanan internal yang cukup signifikan waktu menit ke 13 hingga 30. Kemudian juga terjadi penurunan tren grafik voltase antara grafik pada siklus pertama dengan siklus yang lebih besar. Penurunan tren grafik ketika *charge* menandakan bahwa baterai *VRLA* telah mulai mengalami gejala kerusakan serta mengalami penurunan kemampuan untuk menerima *charge*.



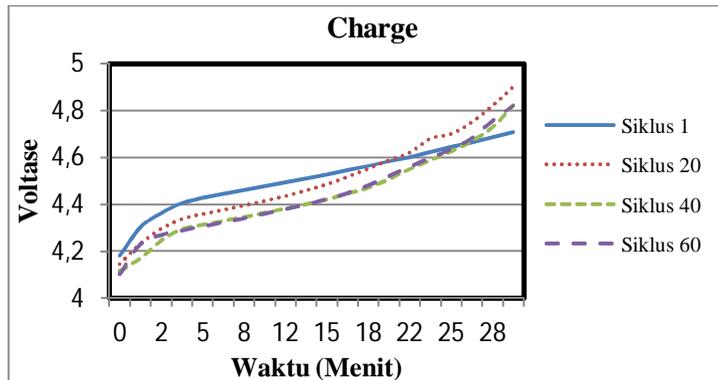
Gambar 4.11. Grafik discharge pada pengujian *DoD* 80% selama 80 siklus.

Profil grafik *DoD* 80% pada gambar 4.11 menunjukkan bahwa pada siklus pertama profil grafiknya tidak terjadi degradasi voltase yang terlalu tajam. Akan tetapi, ketika mencapai siklus 20 hingga 80 tingkat degradasi voltase yang ditunjukkan oleh profil grafik menjadi semakin tajam. Peningkatan kemiringan grafik menandakan adanya gejala kerusakan yang terjadi pada elektroda baterai. Kerusakan yang terjadi dapat disebabkan oleh faktor sulfation pada elektroda positif maupun negatif, *grid corrosion* maupun kehilangan kontak antara *grid* dengan aktif material.



Gambar 4.12. (a) *OCP* sebelum (b) *OCP* setelah pengujian *DoD* 80% selama 80 siklus.

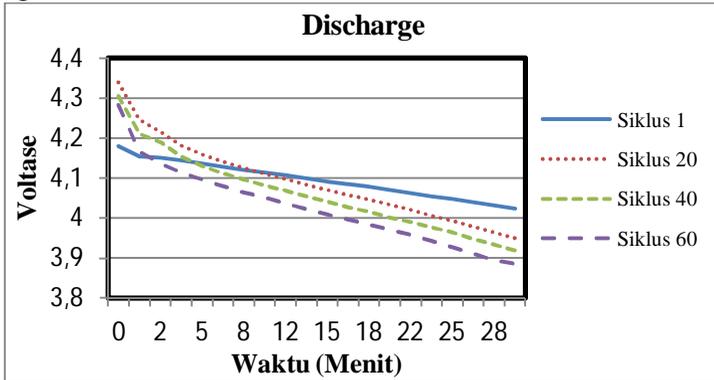
Pada gambar 4.12 terlihat bahwa *OCP* yang terukur mencapai 4,293 V sebelum dilakukan pengujian. Namun *OCP* baterai mengalami penurunan hingga tersisa 4,179 V ketika dilakukan pengujian *DoD* 80% dengan arus 1,868 A selama 80 siklus.



Gambar 4.13. Grafik *charge* pada pengujian *DoD* 80% selama 60 siklus.

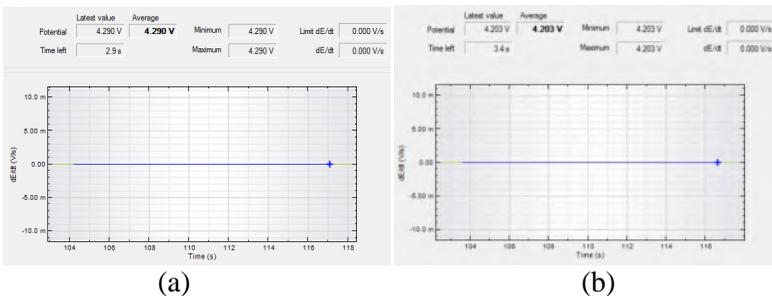
Dari gambar 4.13, kenaikan voltase yang cukup signifikan disebabkan peningkatan tahanan internal. Adanya peningkatan tahanan internal mengindikasikan bahwa baterai *VRLA* telah mulai mengalami gejala kerusakan. Kerusakan dapat berupa

korosi, sulfation, *water loss* dan kehilangan kontak antara *grid* dengan aktif material.



Gambar 4.14. Grafik *discharge* pada pengujian *DoD* 80% selama 60 siklus.

Dari gambar 4.14 dapat dilihat bahwa grafik hasil pengujian *DoD* 80% menunjukkan penurunan kapasitas baterai terjadi secara kontinyu seiring dengan bertambahnya siklus pada baterai. Penurunan kapasitas dapat dilihat per siklus maupun per 20 siklus. Berdasarkan profil grafik per 20 siklus terlihat bahwa besarnya penurunan kapasitas baterai terjadi secara hampir sama. Kesamaan penurunan dapat dilihat dari jarak yang hampir sama antara profil grafik siklus 20 dengan 40 dan juga siklus 40 dengan 60.



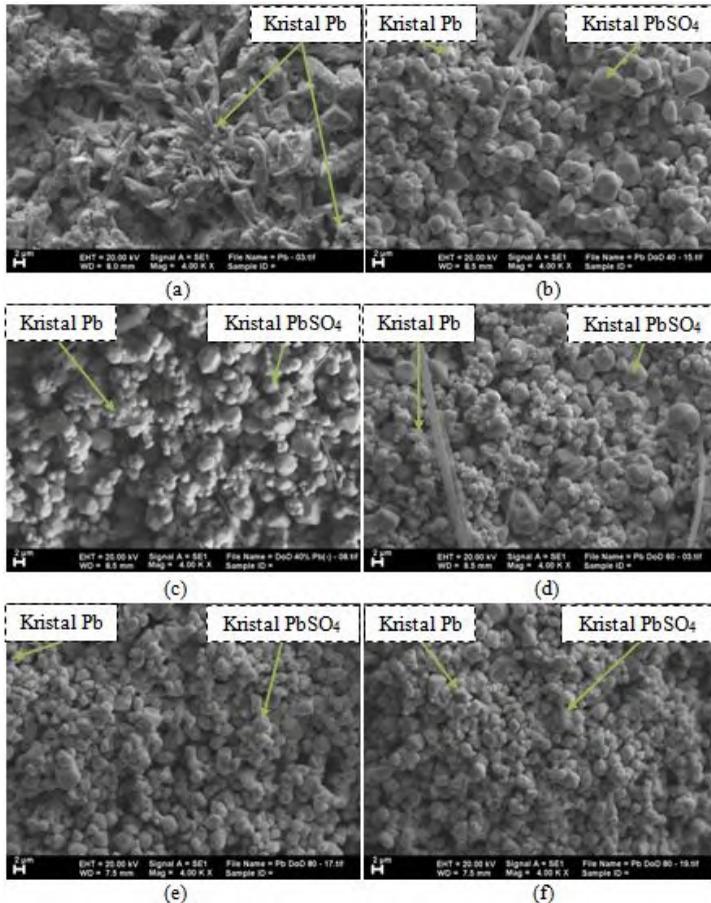
Gambar 4.15. (a) *OCP* sebelum (b) *OCP* setelah pengujian *DoD* 80% selama 60 siklus.

Pada gambar 4.15 terlihat bahwa *OCP* yang terukur mencapai 4,290 V sebelum dilakukan pengujian. Namun *OCP* baterai mengalami penurunan hingga tersisa 4,203 V ketika dilakukan pengujian *DoD* 80% dengan arus 1,868 A selama 60 siklus. Terjadinya penurunan voltase setelah dilakukan pengujian Autolab pada baterai *VRLA* menandakan adanya kerusakan pada elektroda positif maupun negatif. Kerusakan komponen baterai akan mengakibatkan penurunan kapasitas penyimpanan baterai.

4.1.2. Pengujian SEM

Berdasarkan pengujian *Scanning Electron Microscope (SEM)*, didapatkan hasil pengujian berupa morfologi dari elektoda awal (baterai baru) hingga elektroda dari baterai yang telah dilakukan variasi *DoD*. Variasi *depth of discharge* mulai dari 40% selama 101 siklus dan 80 siklus dengan parameter arus 1,868 A, 60% selama 80 siklus dengan parameter arus 1,4 A serta 80% selama 80 dan 60 siklus dengan parameter arus 1,934 A. Pengujian *SEM* dilakukan pada elektroda positif dan negatif dari baterai agar terlihat bentuk dan ukuran kristal pada permukaannya. Setelah mengalami *charge* pada terakhir kali siklus dari pengujian Autolab kemudian elektroda baterai dilakukan pengujian *SEM*. Perbesaran yang digunakan adalah 4000X untuk mendapatkan gambar kristal yang cukup jelas dan sesuai dengan perbesaran yang kebanyakan dipakai pada *textbook* tentang baterai. Dari hasil gambar pengujian *SEM* akan dilakukan pengukuran ukuran butir kristal yang tampak pada permukaan masing-masing elektroda baterai *VRLA*. Adapun hasil pengujian *SEM* yang telah didapatkan sebagai berikut:

- a. Hasil Pengujian *SEM* pada Elektroda Negatif (Pb).

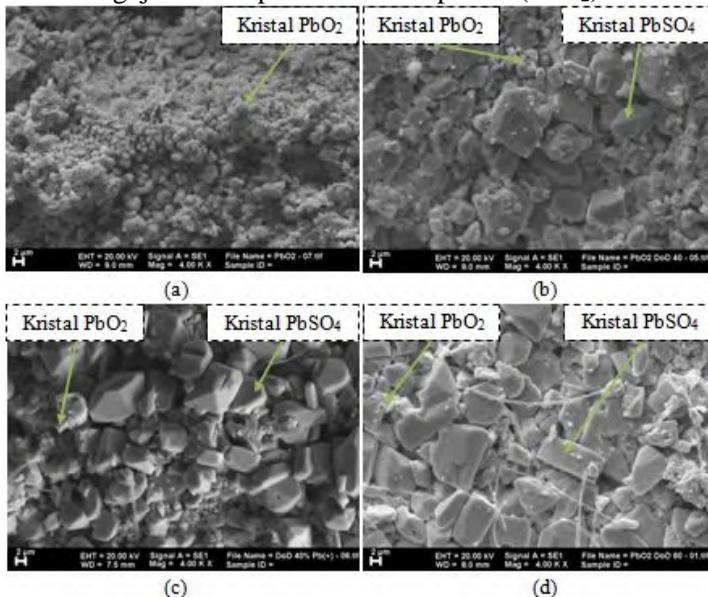


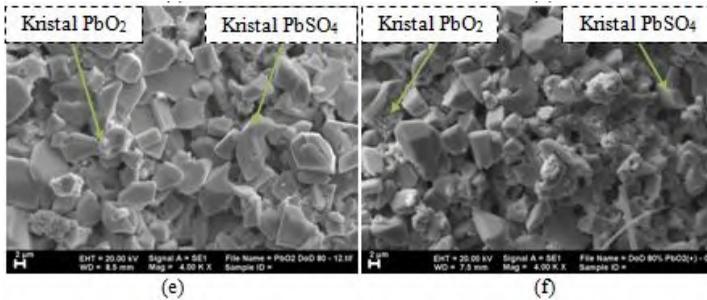
Gambar 4.16. Hasil uji SEM elektroda Pb (a) Awal. (b) *DoD* 40%; 101 siklus. (c) *DoD* 40%; 80 siklus. (d) *DoD* 60%; 80 siklus. (e) *DoD* 80%; 60 siklus. (f) *DoD* 80%; 80 siklus.

Dapat dilihat pada gambar 4.16 (a) bahwa permukaan elektroda Pb dari baterai VRLA yang masih baru hanya terdapat kristal Pb. Ketika baterai digunakan dengan kedalaman *DoD* mencapai 40%, 60% dan 80% maka akan terjadi perubahan bentuk kristal yang awalnya kristal Pb

akan menjadi kristal PbSO_4 . Pada kedalaman DoD 40% dan 60% yang ditunjukkan oleh gambar 4.16 (b), (c) dan (d), ukuran kristal yang terdapat pada permukaan elektroda negatif cenderung bervariasi. Namun tetap didominasi oleh kristal dengan ukuran yang relatif kecil. Sedangkan permukaan elektroda negatif yang dilakukan pada DoD 80%, ukuran kristal tidak terlihat banyak perbedaan yang cukup signifikan. Perbedaan variasi ukuran kristal PbSO_4 karena adanya variasi DoD (arus *charge-discharge*). Variasi ukuran kristal menandakan bahwa dengan semakin besar DoD maka akan mengakibatkan terbentuknya kristal PbSO_4 dengan ukuran yang relatif kecil pada elektroda Pb. Dengan terbentuknya kristal PbSO_4 dengan ukuran yang kecil dan hampir seragam ketika DoD 80% menandakan bahwa *sulfation* telah terjadi secara merata pada elektroda negatif.

b. Hasil Pengujian *SEM* pada elektroda positif (PbO_2)





Gambar 4.17. Hasil uji SEM elektroda PbO₂ (a) Awal. (b) *DoD* 40%; 101 siklus. (c) *DoD* 40%; 80 siklus. (d) *DoD* 60%; 80 siklus. (e) *DoD* 80%; 60 siklus. (f) *DoD* 80%; 80 siklus.

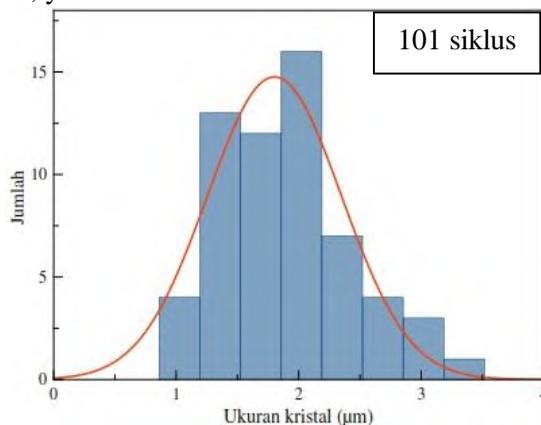
Dari gambar 4.17.(a) dapat dilihat bahwa permukaan elektroda positif pada baterai VRLA yang masih baru hanya terdapat kristal PbO₂ (*lead oxide*). Baterai yang telah dilakukan pengujian dengan variasi *DoD*, dipermukaan elektroda positif (PbO₂) akan terjadi pembentukan kristal PbSO₄ dengan bentuk yang cenderung pipih serta penampang yang cukup luas.

Dipermukaan elektroda PbO₂ dari baterai yang telah dilakukan *depth of discharge* pada kedalaman 40% mulai terbentuk kristal PbSO₄. Akan tetapi tidak semua kristal PbO₂ berubah menjadi PbSO₄ karena masih terdapat banyak kristal PbO₂ pada permukaan elektroda positif. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.17. (b) dan (c), yang mana kristal PbSO₄ yang terbentuk cenderung kasar. Berbeda halnya dengan permukaan elektroda positif yang telah dilakukan *DoD* dengan kedalaman 60% dan 80%. Pada *DoD* 60%, kristal PbSO₄ yang terbentuk menjadi semakin banyak dan terlihat semakin halus karena sebagian PbO₂ telah berubah menjadi timbal sulfat. Kemudian pada *DoD* 80% selama 60 siklus yang ditunjukkan gambar 4.17 (e), kristal timbal sulfat yang terbentuk dielektroda negatif cenderung semakin banyak dan tampak jelas. Karena hampir semua

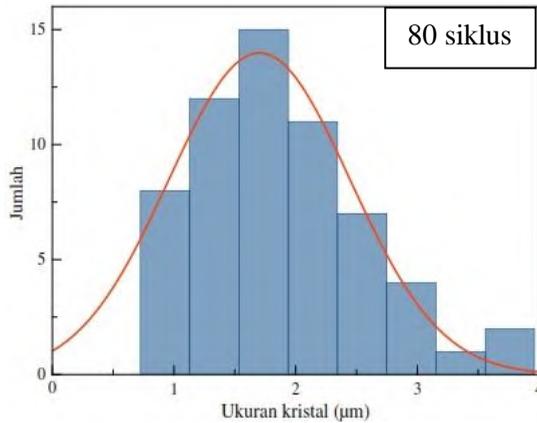
kristal PbO_2 berubah menjadi kristal PbSO_4 . Sedangkan pada *DoD* 80% selama 80 siklus yang ditunjukkan gambar 4.17 (f), kristal PbSO_4 yang terbentuk dielektroda negatif cenderung semakin banyak dan tampak lebih tebal. Penambahan ketebalan kristal PbSO_4 disebabkan oleh penumpukan kristal PbSO_4 seiring dengan bertambahnya siklus.

c. Hasil Pengukuran Kristal

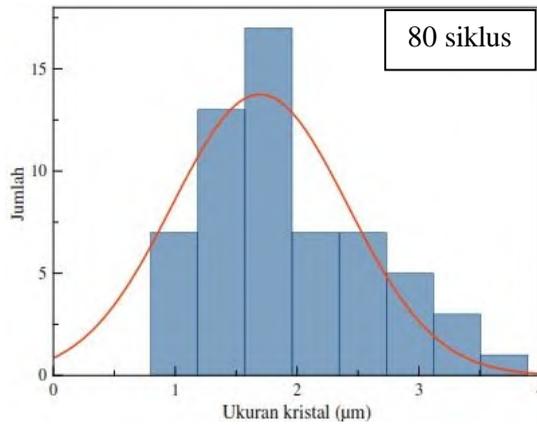
Berdasarkan hasil pengujian *SEM* pada elektroda baterai yang telah dilakukan variasi *DoD* maka perlu dilakukan pengukuran kristal PbSO_4 yang terbentuk pada permukaan elektroda positif maupun negatif. Pengukuran dilakukan untuk mengetahui rata-rata ukuran kristal yang terbentuk pada permukaan elektroda baterai. Dari rata-rata ukuran kristal dapat diketahui seberapa besar dampak variasi *DoD* terhadap kerusakan elektroda baterai. Pengukuran dilakukan pada 60 kristal PbSO_4 yang terdapat pada permukaan elektroda positif dan juga negatif. Hasil pengukuran yang telah dilakukan kemudian ditampilkan dalam bentuk histogram, yaitu:



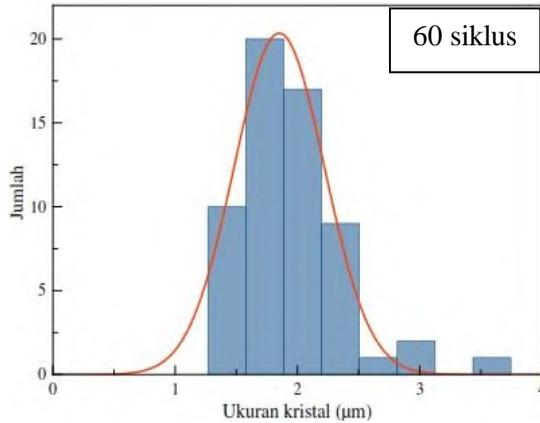
Gambar 4.18. Histogram Ukuran Kristal PbSO_4 pada Elektroda Pb *DoD* 40%.



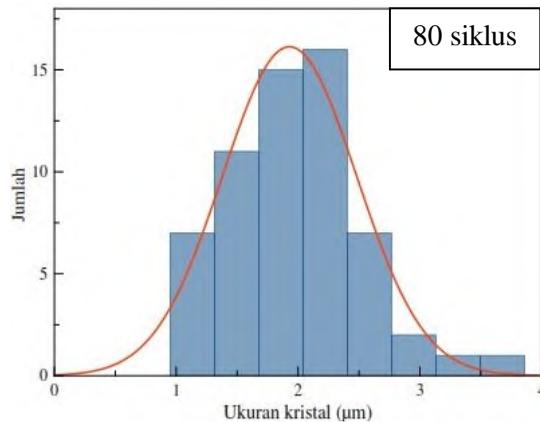
Gambar 4.19. Histogram Ukuran Kristal PbSO_4 pada Elektroda Pb *DoD* 40%.



Gambar 4.20. Histogram Ukuran Kristal PbSO_4 pada Elektroda Pb *DoD* 60%.



Gambar 4.21. Histogram Ukuran Kristal PbSO_4 pada Elektroda Pb *DoD* 80%.

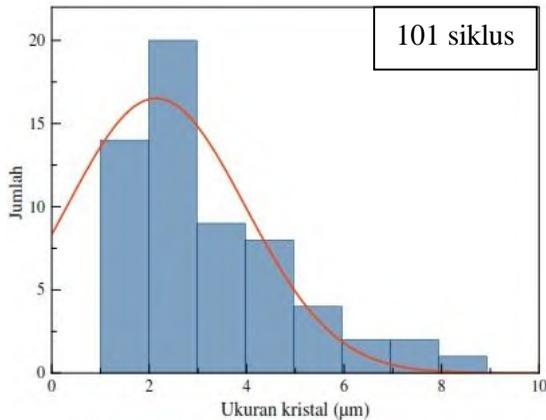


Gambar 4.22. Histogram Ukuran Kristal PbSO_4 pada Elektroda Pb *DoD* 80%.

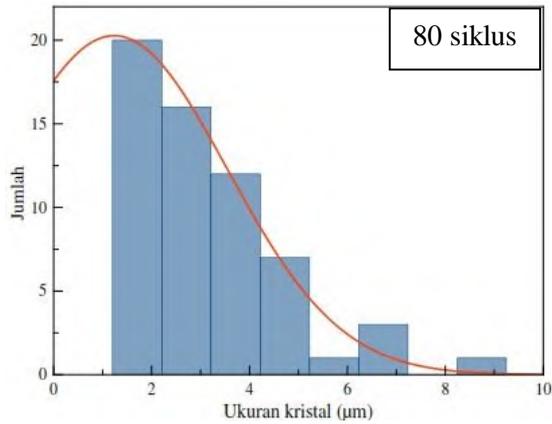
Dari gambar 4.28 hingga gambar 4.22, histogram pada elektroda Pb menunjukkan bahwa semakin besar *depth of discharge* maka rata-rata ukuran kristal PbSO_4 yang terbentuk juga akan semakin besar pula. Ukuran kristal yang semakin besar seiring dengan semakin besarnya *DoD* dapat

dilihat dari jumlah ukuran kristal. Terlihat dari histogram bahwa jumlah ukuran kristal ketika *DoD* 40% dan 60% berada dibawah jumlah ukuran ketika dilakukan *DoD* 80%. Sementara dari grafik distribusi normal menunjukkan bahwa ukuran kristal PbSO_4 ketika dilakukan *DoD* 40%, 60% dan 80% (80 siklus) memiliki rentang ukuran yang hampir sama. Namun puncak tertinggi (jumlah ukuran kristal) dimiliki oleh grafik distribusi normal dengan *DoD* 80% yaitu >15 .

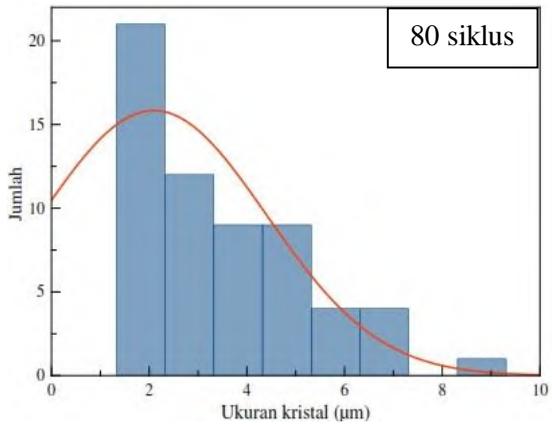
Pada elektroda negatif (Pb) ketika *DoD* 40%, rata-rata ukuran kristal PbSO_4 (data terlampir) yaitu $1,867 \mu\text{m}$ dengan 80 siklus dan $1,906 \mu\text{m}$ dengan 101 siklus lalu meningkat menjadi $1,934 \mu\text{m}$ pada *DoD* 60% dengan 80 siklus kemudian meningkat kembali hingga $1,948 \mu\text{m}$ pada *DoD* 80% dengan 60 siklus dan yang paling besar adalah $1,964 \mu\text{m}$ pada *DoD* 80% dengan 80 siklus. Dapat dikatakan bahwa semakin besar *DoD* akan menyebabkan semakin besarnya ukuran butir PbSO_4 yang terjadi pada permukaan elektroda negatif (Pb).



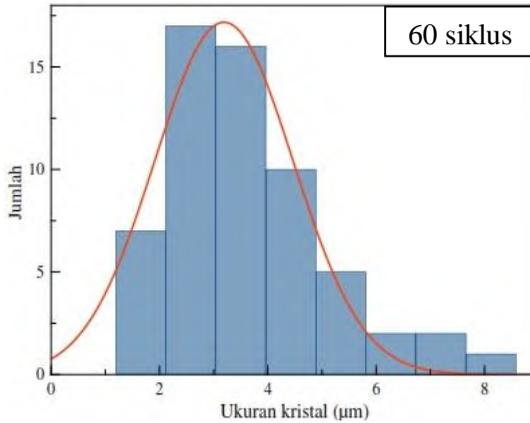
Gambar 4.23. Histogram Ukuran Kristal PbSO_4 pada Elektroda PbO_2 *DoD* 40%.



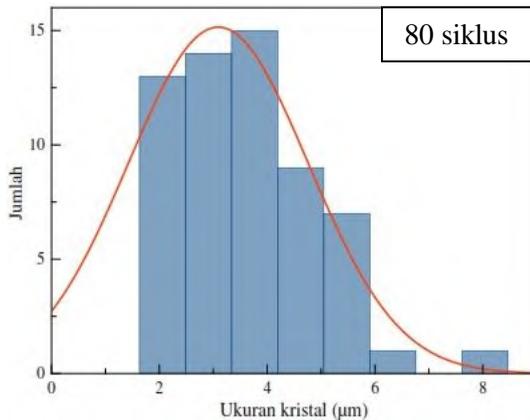
Gambar 4.24. Histogram Ukuran Kristal PbSO₄ pada Elektroda PbO₂ DoD 40%.



Gambar 4.25. Histogram Ukuran Kristal PbSO₄ pada Elektroda PbO₂ DoD 60%.



Gambar 4.26. Histogram Ukuran Kristal PbSO_4 pada Elektroda PbO_2 *DoD* 80%.



Gambar 4.27. Histogram Ukuran Kristal PbSO_4 pada Elektroda PbO_2 *DoD* 80%.

Berdasarkan gambar 4.23 hingga 4.27, data histogram elektroda PbO_2 menunjukkan bahwa jumlah ukuran kristal pada kisaran 1 hingga 8 μm lebih didominasi oleh kristal dari *DoD* 80%. Dominasi ukuran kristal dari *DoD* 80% juga terlihat pada grafik distribusi normal. Pada grafik distribusi

normal pada *DoD* 40% dan 60% terlihat rentang ukuran kristal sangat lebar namun hanya sebagian histogram yang masuk ke daerah grafik. Berbeda halnya dengan grafik distribusi normal pada *DoD* 80% yang rentang ukuran kristal agak pendek akan tetapi sebagian besar histogram masuk ke daerah grafik dan memiliki puncak grafik yang relatif tinggi. Kemudian untuk kristal PbSO_4 dari *DoD* 60% mempunyai frekuensi tertinggi pada kisaran ukuran 1,8 hingga 5 μm . Sedangkan pada *DoD* 40% hanya memiliki ukuran butir paling kecil yaitu kisaran 1 hingga 4,8 yang jumlah ukurannya paling dominan.

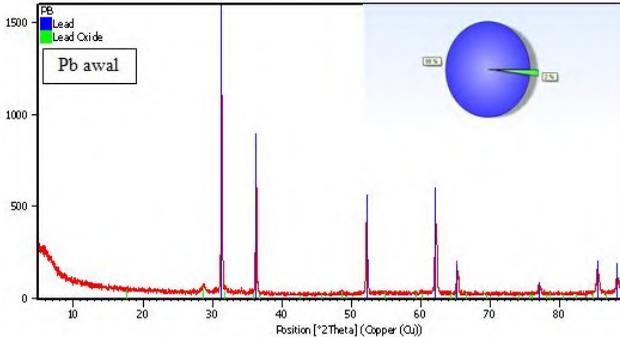
Dari rata-rata ukuran kristal (data terlampir) yang terbentuk pada elektroda positif saat *DoD* 40% adalah 3,137 μm dengan 80 siklus dan 3,213 μm dengan 101 siklus. Selanjutnya terjadi peningkatan menjadi 3,483 μm saat *DoD* 60% dengan 80 siklus dan meningkat kembali menjadi 3,620 saat *DoD* 80% dengan 60 siklus. Serta terjadi peningkatan hingga 3,641 μm saat *DoD* 80% dengan 80 siklus. Terlihat bahwa rata-rata ukuran kristal PbSO_4 yang terbentuk pada elektroda positif (PbO_2) jauh lebih besar daripada yang terbentuk pada elektroda negatif (Pb). Dengan adanya perbedaan rata-rata ukuran kristal, hal tersebut mengindikasikan bahwa elektroda positif lebih sensitif terhadap perubahan kristal yaitu kristal PbO_2 menjadi PbSO_4 pada seluruh permukaan elektroda.

4.1.3. Pengujian XRD

Pengujian *XRD* digunakan untuk mengetahui struktur kristal, senyawa, perubahan senyawa yang terdapat di aktif material elektroda. Pengujian dilakukan pada serbuk elektroda positif dan negatif dari baterai baru dan baterai yang telah dilakukan pengujian Autolab. Baterai baru dan juga baterai yang telah dilakukan pengujian Autolab pada *DoD* 40% selama 101 siklus, 60% selama 80 siklus serta 80% selama 80 siklus dan 60 siklus

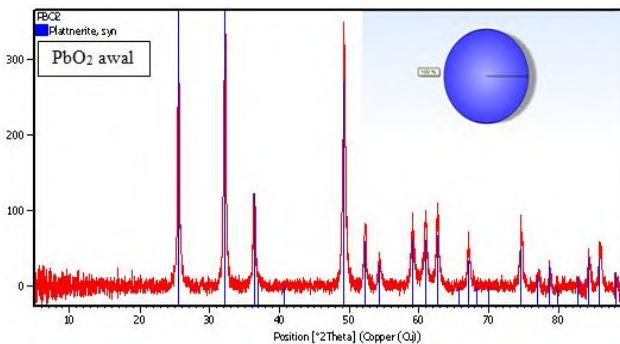
kemudian dilakukan preparasi spesimen uji *XRD*. Adapun hasil pengujian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

a. Pengujian *XRD* pada baterai baru.



Gambar 4.28. Hasil uji *XRD* awal pada elektroda Pb.

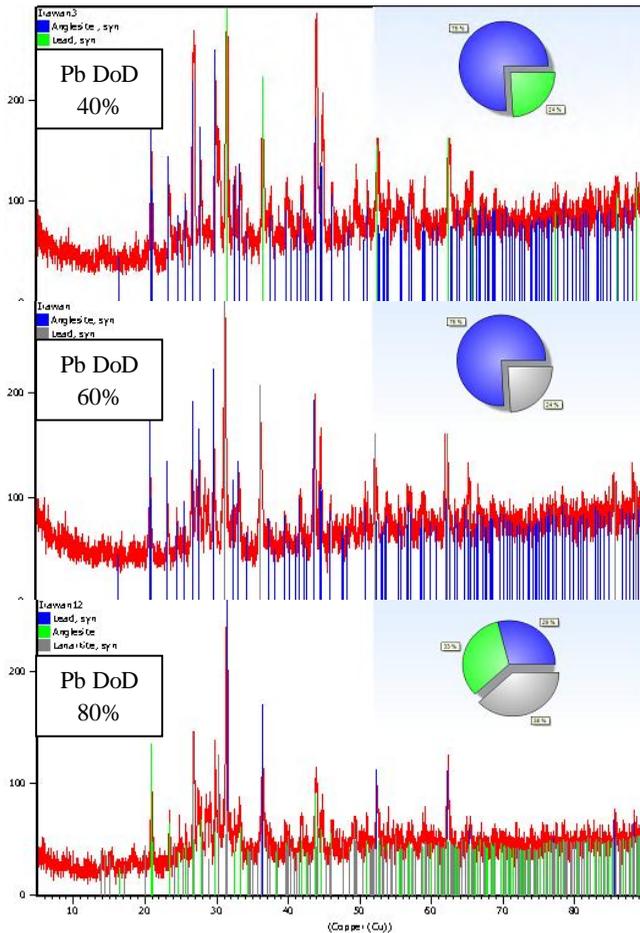
Hasil pengujian *XRD* dari elektroda negatif (Pb) baterai *VRLA* yang masih baru menunjukkan bahwa intensitas yang tinggi hanya didominasi oleh puncak *Lead* (Pb). Kemudian terdeteksi puncak *Lead Oxide* (PbO) dengan intensitas yang rendah dan persentase senyawa berdasarkan intensitas pengujian *XRD* yang cukup rendah pula. Senyawa PbO kemungkinan terbentuk karena pengaruh oksidasi ketika melakukan preparasi spesimen uji ataupun ketika proses produksi baterai *VRLA*.



Gambar 4.29. Hasil uji *XRD* awal pada elektroda PbO₂.

Hasil pengujian *XRD* dari elektroda negatif (PbO_2) baterai *VRLA* yang masih baru menunjukkan 24 puncak *Plattnerite* (PbO_2). Terbentuk *plattnerite* secara menyeluruh dispesimen pengujian dari baterai yang masih baru.

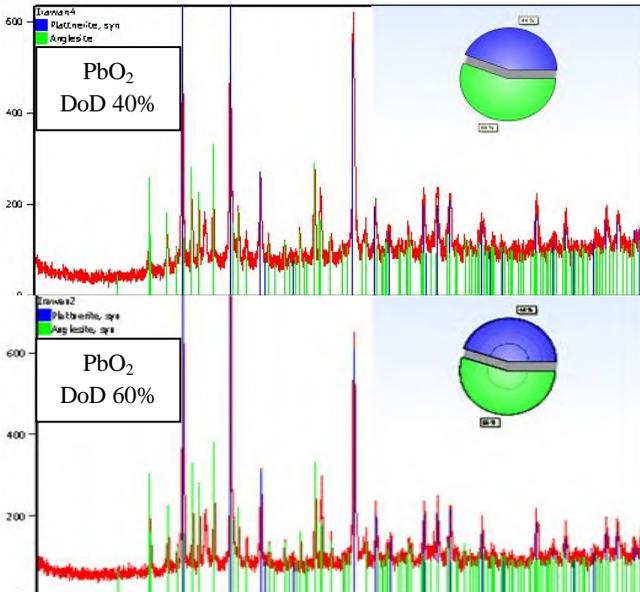
- b. Pengujian *XRD* elektroda negatif dari baterai *DoD* 40%, 60% dan 80%.

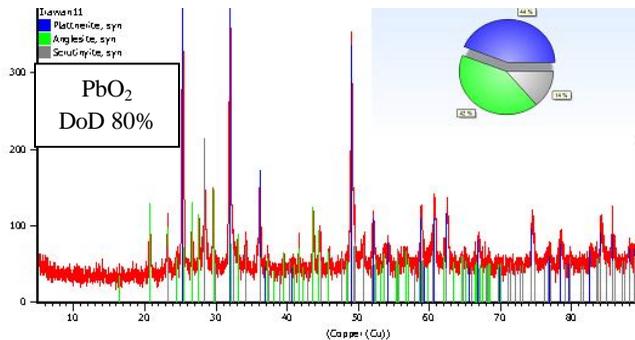


Gambar 4.30. Hasil uji *XRD* pada elektroda Pb.

Dari hasil pengujian *XRD* elektroda negatif pada spesimen yang telah dilakukan *DoD* 40% dan 60% menunjukkan bahwa intensitas PbSO_4 dari pengujian *XRD* yang terdeteksi adalah 76%. Kesamaan intensitas PbSO_4 yang terdeteksi tersebut dapat dikarenakan oleh perbedaan jumlah siklus ketika melakukan variasi *DoD*. Kemudian ketika *DoD* mencapai 80% terlihat bahwa intensitas Pb hanya 29% dan mayoritas intensitas didominasi oleh PbSO_4 serta PbO.PbSO_4 . Adapun persentase senyawa hanya berdasarkan intensitas senyawa yang terdeteksi pada spesimen uji *XRD*.

- c. Pengujian *XRD* elektroda positif dari baterai *DoD* 40%, 60% dan 80%.





Gambar 4.31. Hasil uji *XRD* pada elektroda PbO_2 .

Berdasar hasil pengujian *XRD* yang didapatkan, spesimen uji yang telah dilakukan *DoD* 40% dan 60% memiliki intensitas PbSO_4 yang terdeteksi pada elektroda positif nilainya sama yaitu mencapai 56%. Sedangkan pada spesimen yang telah dilakukan *DoD* 80% memiliki intensitas PbSO_4 42%. Namun pada *DoD* 80% terdapat juga intensitas PbO.PbSO_4 yang juga merupakan salah bentuk sulfation. Adapun persentase senyawa tersebut hanya berdasarkan intensitas senyawa yang terdeteksi pada spesimen uji *XRD*. Sehingga hasil persentase senyawa yang didapatkan tidak dapat dijadikan acuan secara mutlak.

Tabel 4.1. Hasil Identifikasi Senyawa pada Material Elektroda.

| | | <i>Depth of Discharge (DoD)</i> | | | |
|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------|-----------|-----------|
| | | 0% | 40% | 60% | 80% |
| | | - | 101 siklus | 80 siklus | 60 siklus |
| Elektroda positif | PbO_2 (tetragonal) | 1 | 0,44 | 0,44 | 0,44 |
| | PbSO_4 (orthorombic) | - | 0,56 | 0,56 | 0,42 |

| | | | | | |
|----------------------|---------------------------------------|---|------|------|------|
| | PbO ₂ (orthorombic) | - | - | - | 0,14 |
| Elektroda negatif | Pb (Cubic) | 1 | 0,24 | 0,24 | 0,29 |
| | PbSO ₄ (orthorombic) | - | 0,76 | 0,76 | 0,33 |
| | PbO.PbSO ₄ (Monoclinic) | - | - | - | 0,38 |

Dari tabel 4.1. menunjukkan bahwa PbSO₄ yang terbentuk pada elektroda negatif (Pb) ketika *DoD* 40% dengan 101 siklus dan *DoD* 60% dengan 80 siklus adalah sama. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar persentase *DoD* yang diaplikasikan pada baterai VRLA akan membuat semakin cepat terbentuknya kristal PbSO₄ sehingga pada akhirnya akan mengurangi umur siklus baterai.

Tabel 4.2. Hasil Identifikasi Parameter Kristal.

| | | <i>Depth of Discharge (DoD)</i> | | | | | |
|----------------------|-------------------|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0% | | | 40% | | |
| | | a (Å) | b (Å) | c (Å) | a (Å) | b (Å) | c (Å) |
| Elektroda positif | PbO ₂ | 4,96 | 4,96 | 3,38 | 4,96 | 4,96 | 3,39 |
| | PbSO ₄ | - | - | - | 8,48 | 5,40 | 6,96 |
| Elektroda negatif | Pb | 4,95 | 4,95 | 4,95 | 4,95 | 4,95 | 4,95 |
| | PbSO ₄ | - | - | - | 8,48 | 5,40 | 6,95 |

| | | <i>Depth of Discharge (DoD)</i> | | | | | |
|-------------------|-----------------------|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 60% | | | 80% | | |
| | | a (Å) | b (Å) | c (Å) | a (Å) | b (Å) | c (Å) |
| Elektroda positif | PbO ₂ | 4,96 | 4,96 | 3,38 | 4,96 | 4,96 | 3,38 |
| | PbSO ₄ | 6,95 | 8,47 | 5,40 | 8,48 | 5,40 | 6,96 |
| | PbO ₂ | - | - | - | 4,95 | 5,95 | 5,50 |
| Elektroda negatif | Pb | 4,93 | 4,93 | 4,93 | 4,95 | 4,95 | 4,95 |
| | PbSO ₄ | 6,95 | 8,47 | 5,40 | 6,95 | 8,48 | 5,39 |
| | PbO.PbSO ₄ | - | - | - | 13,77 | 5,70 | 7,08 |

Dari tabel 4.2 dapat diketahui bahwa timbal dioksida (PbO₂) mempunyai struktur kristal Tetragonal dengan nilai parameter a sama dengan b namun berbeda dengan c serta dengan sudut α , β dan γ adalah 90°. Timbal (Pb) mempunyai struktur kristal Kubus dengan nilai parameter a, b dan c adalah sama serta dengan sudut α , β dan γ adalah 90°. PbSO₄ mempunyai struktur kristal Orthorombik dengan nilai parameter a, b dan c adalah berbeda antara satu dengan yang lain, kemudian sudut α , β dan γ adalah 90°. Timbal oksida sulfat (PbO.PbSO₄) mempunyai struktur kristal Monoklinik dengan nilai parameter a, b dan c adalah berbeda antara satu dengan yang lain, kemudian sudut $\alpha=90^\circ$, $\beta=115,93^\circ$ dan γ adalah 90°.

4.2. Diskusi

Profil grafik *charge* akan cenderung mengalami kenaikan yang cukup signifikan disebabkan oleh meningkatnya tahanan internal dan indikasi adanya sulfation pada elektroda baterai. Kemudian profil grafik *discharge* akan cenderung menurun yang disebabkan adanya peningkatan tahanan internal, sulfation dan

stratifikasi asam. Semakin besar *depth of discharge* menyebabkan umur siklus baterai menjadi semakin pendek. *Depth of discharge* yang besar akan mempercepat proses terjadinya sulfation pada elektroda positif maupun negatif. Adapun persentase PbSO_4 yang terbentuk pada elektroda negatif (Pb) ketika *DoD* 40% dengan 101 siklus dan *DoD* 60% dengan 80 siklus adalah sama. Namun, ketika *DoD* 80% dengan 60 siklus mengalami perbedaan persentase PbSO_4 yang terbentuk pada elektroda negatif. Penentuan persentase PbSO_4 berdasarkan intensitas senyawa yang terdeteksi pada pengujian *XRD*.

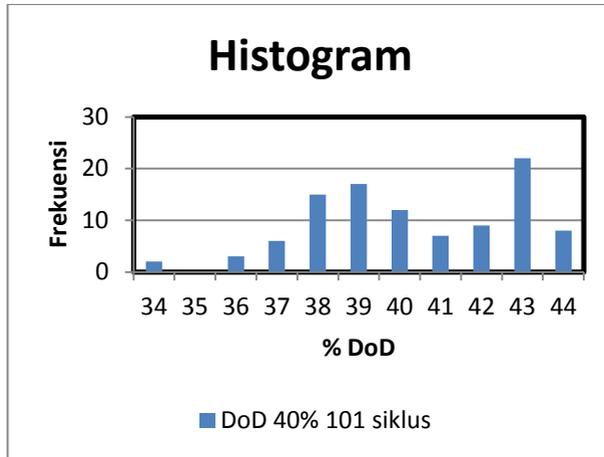
Untuk arus *discharge* maupun *charge* menyesuaikan dengan variasi *DoD*. Arus *discharge* dan *charge* ketika melakukan pengujian Autolab pada variasi *DoD* yang diteliti adalah sama. Parameter arus tersebut didapatkan berdasarkan perhitungan pada masing-masing variasi *DoD*. Semakin besar variasi *DoD* yang dilakukan pada pengujian Autolab maka parameter arusnya juga semakin besar. Parameter arus *discharge* yang diaplikasikan pada pengujian Autolab akan mengakibatkan kapasitas energi baterai berkurang. Dengan adanya kesamaan arus *discharge* dan *charge* diharapkan akan mengembalikan kapasitas energi yang telah dikeluarkan.

Berdasarkan intensitas yang terdeteksi melalui pengujian *XRD* menunjukkan bahwa pembentukan PbSO_4 paling banyak dielektroda negatif (Pb). Dengan *depth of discharge* yang terlalu besar, seperti *DoD* 80% maka memungkinkan lebih dari dua senyawa yang terbentuk. Senyawa yang dapat terbentuk pada elektroda positif yaitu PbO_2 (aktif material), PbSO_4 dan PbO_2 (produk korosi). Sedangkan senyawa yang dapat terbentuk pada elektroda negatif adalah Pb, PbSO_4 dan PbO.PbSO_4 (adanya korosi).

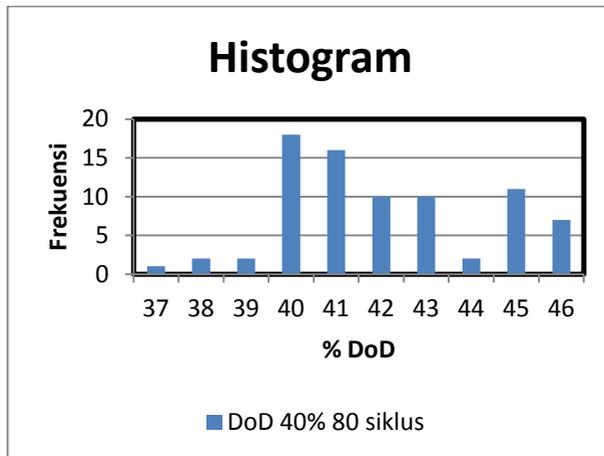
Sulfation yang terjadi pada elektroda negatif, jumlahnya lebih banyak daripada elektroda positif. Dengan *DoD* yang semakin besar akan menyebabkan ukuran kristal PbSO_4 yang terbentuk pada elektroda positif maupun negatif akan semakin besar. Namun berdasarkan rata-rata ukuran kristal yang terbentuk

menunjukkan bahwa ukuran kristal PbSO_4 pada elektroda positif lebih besar daripada elektroda negatif.

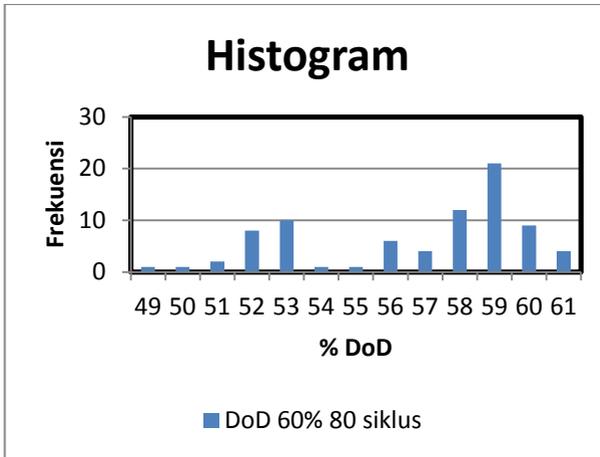
Kristal PbSO_4 yang terbentuk tidak dapat terurai ketika dilakukan *charge* pada penelitian ini. Penguraian PbSO_4 dapat dilakukan ketika belum menjadi kristal. Penyebab PbSO_4 berubah menjadi kristal adalah adanya stratifikasi asam dan terjadinya depolarisasi akibat proses rekombinasi oksigen pada baterai *VRLA*. Kristal PbSO_4 yang terbentuk akan terakumulasi seiring dengan bertambahnya siklus pada baterai. Akumulasi kristal PbSO_4 akan menyebabkan kenaikan tahanan internal dan kesulitan ketika melakukan *recharge*.



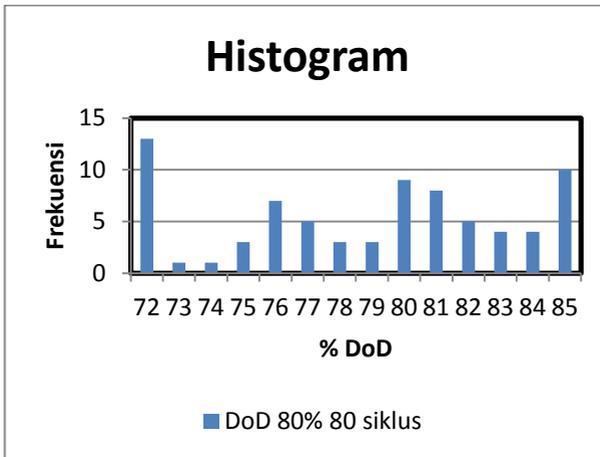
Lampiran 2. Histogram Pengujian Autolab *DoD* 40% selama 101 siklus.



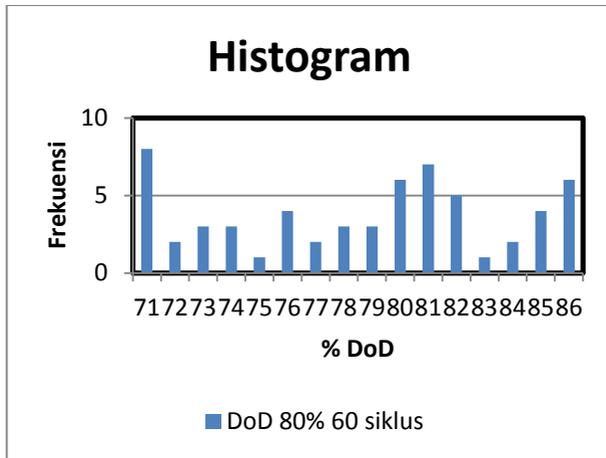
Lampiran 3. Histogram Pengujian Autolab *DoD* 40% selama 80 siklus.



Lampiran 4. Histogram Pengujian Autolab *DoD* 60% selama 80 siklus.



Lampiran 5. Histogram Pengujian Autolab *DoD* 80% selama 80 siklus.



Lampiran 6. Histogram Pengujian Autolab *DoD* 80% selama 60 siklus.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari analisa dan pembahasan yang telah dilakukan adalah:

1. Semakin besar *depth of discharge* menyebabkan umur siklus baterai menjadi semakin pendek. Karena *DoD* yang besar akan mempercepat proses terjadinya sulfation pada elektroda positif maupun negatif. Adapun PbSO_4 yang terbentuk pada elektroda negatif (Pb) ketika *DoD* 40% dengan 101 siklus dan *DoD* 60% dengan 80 siklus adalah sama. Kemudian ukuran kristal PbSO_4 yang terbentuk selalu berbanding lurus dengan *DoD*.
2. Dengan *depth of discharge* yang terlalu besar, seperti *DoD* 80% maka memungkinkan lebih dari dua senyawa yang terbentuk. Senyawa yang dapat terbentuk pada elektroda positif yaitu PbO_2 (aktif material), PbSO_4 dan PbO (produk korosi). Sedangkan senyawa yang dapat terbentuk pada elektroda negatif adalah Pb, PbSO_4 dan PbO.PbSO_4 (adanya korosi).
3. Terjadinya sulfation pada elektroda negatif dengan jumlah yang lebih banyak daripada elektroda positif. Apabila ditinjau dari ukuran kristal PbSO_4 yang terbentuk, maka rata-rata ukuran kristal PbSO_4 yang terbentuk pada elektroda positif lebih besar daripada elektroda negatif.
4. Senyawa PbSO_4 yang terbentuk dipermukaan elektroda baterai VRLA tidak dapat diuraikan melalui *charge* karena telah menjadi kristal. PbSO_4 berubah menjadi kristal dikarenakan adanya stratifikasi asam, terjadinya depolarisasi akibat proses rekombinasi oksigen pada baterai VRLA.

5.2. Saran

Saran untuk perbaikan penelitian tentang baterai adalah:

1. Kerjasama antara perusahaan dengan kampus agar semakin cepat proses pengembangan tentang baterai terutama peralatan pendukung untuk membuat elektroda baterai. Karena tidak dapat dipungkiri apabila pengembangan elektroda merupakan faktor yang paling vital untuk menambah kapasitas, ketahanan korosi dan juga umur siklus dari baterai.
2. Perlu dilakukan pembuatan *grid* baterai dari berbagai macam paduan. Kemudian, *grid* baterai dilakukan pengujian korosi menggunakan peralatan Autolab. Pengujian untuk mengetahui paduan manakah yang memiliki ketahanan korosi dan konduktifitas listrik yang paling bagus.
3. Perlu diperhatikan mengenai *interval time* pada saat pengaturan parameter pengujian Autolab dengan jumlah siklus yang cukup banyak. Karena kesalahan pengaturan parameter akan mengakibatkan *error* ketika *interval time* diatur terlalu rendah.
4. Pemasangan *Uninterrupted Power Supply (UPS)* pada peralatan pengujian Autolab agar data pengujian dengan jumlah siklus yang banyak tidak hilang ketika terjadi pemadaman listrik.
5. Lebih berhati-hati ketika melakukan preparasi terhadap baterai untuk pengujian Autolab.
6. Pastikan elektroda baterai yang akan diambil serbuknya untuk pengujian *XRD* telah benar-benar kering.
7. Ketika melakukan pengujian *SEM* terhadap spesimen uji yang telah selesai dilakukan pengujian Autolab, maka perlu dipastikan terlebih dahulu bahwa elektroda positif maupun negatif telah kering. Apabila elektroda masih basah maka tidak akan dapat dilakukan proses coating maupun pengujian *SEM*. Sehingga memerlukan beberapa waktu untuk melakukan proses pengeringan terhadap elektroda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jubaedah, E., Abdul Hamid Budiman. 2013. “Kajian Roadmap Pengembangan Energy Storage untuk Smart Grid System.” <http://repositori.bppt.go.id>. (Diakses pada tanggal 20 April 2016)
- [2] “*Battery Life Span Vs Depth of Discharge.*” <http://prismsolar.co.uk>. (Diakses pada tanggal 13 April 2016)
- [3] Reddy, T.B., David Linden, ed. *Handbook of Batteries*. 3 ed. Two Penn Plaza, New York: Mc-Graw Hill, 2002.
- [4] “*VRLA-Batteries Technical Specification.*” <http://www.opc3.co.il>. (Diakses pada tanggal 13 April 2016)
- [5] Crompton, T.R. *Battery Reference Book*. 3 ed. Great Britain: Reed Educational and Profesional Publishing, 2000.
- [6] Kiehne, H., ed. *Battery Technology Handbook*. 2 ed. Renningen-Malsheim, Germany: Expert Verlag, 2003.
- [7] Parker, C.D., D.A.J. Rand, ed, et al. *Valve-Regulated Lead-Acid Batteries*. 1 ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier B.V., 2004.
- [8] Halici, Safak. "*Development of Lead Alloys for Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries*". Middle East Technical University, 2010.
- [9] Reddy, T.B., David Linden, ed. *Linden's Handbook of Batteries*. 4 ed. Two Penn Plaza, New York: Mc-Graw Hill, 2011.
- [10] “*Discover-Energy Battery Guide.*” 2005. <http://discover-energy.com>. (Diakses pada tanggal 13 April 2016)
- [11] Tasmu. “Studi Material Elektroda Baterai *Lead Acid* Selama Penggosongan dan Pengisian Muatan.” FMIPA UI, 2013



Penulis dilahirkan di Klaten, 04 Januari 1993, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK ABA Wanglu, SDN 1 Sabranglor Klaten, MTs N Mlinjon Klaten dan SMA Muhammadiyah 1 Klaten. Sebelum lulus dari SMA tahun 2011, penulis mendaftar PBUSMAK dan diterima di Program Studi Teknik Mesin SV-UGM. Setelah lulus dari jenjang D3 Teknik Mesin UGM tahun 2014, Penulis mendaftar Program S1 Lintas Jalur

dan mengikuti serangkaian tes yang akhirnya diterima di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS pada tahun 2014 dan terdaftar dengan NRP. 2114105036.

Di Jurusan Teknik Mesin ini Penulis mengambil Bidang Studi Teknik Cor. Ketika memasuki tahap pengerjaan Tugas Akhir, Penulis lebih sering berada di Lab. Korosi untuk belajar mengenai peralatan Autolab. Selama kuliah di UGM maupun ITS, Penulis sering mengikuti kegiatan Seminar maupun kuliah umum yang diselenggarakan oleh pihak jurusan, fakultas ataupun universitas untuk menambah wawasan dan pengalaman. Selain itu, sejak tahun 2007 Penulis telah aktif diorganisasi Karang Taruna hingga sekarang.