

**REVERSIBILITAS REAKSI ELEKTROKIMIA PADA ELEKTRODA  
SUPERKAPASITOR ZEOLIT BERBASIS SILIKA SEKAM PADI YANG  
DIKALSINASI PADA SUHU 450, 550, DAN 650°C**

(Skripsi)

Oleh

**Fatia Ulfah**



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDARLAMPUNG  
2016**

## **ABSTRAK**

### **REVERSIBILITAS REAKSI ELEKTROKIMIA PADA ELEKTRODA SUPERKAPASITOR ZEOLIT BERBASIS SILIKA SEKAM PADI YANG DIKALSINASI PADA SUHU 450, 550, DAN 650°C**

**Oleh**

**Fatia Ulfah**

Telah dilakukan penelitian tentang analisis reversibilitas reaksi elektrokimia pada elektroda superkapasitor zeolit berbasis silika sekam padi yang dikalsinasi pada suhu 450, 550, dan 650°C. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh suhu kalsinasi terhadap pembentukan fasa kristal dan konstanta standar kecepatan transfer elektron ( $k_0$ ) serta hubungan pembentukan fasa kristal terhadap nilai  $k_0$ . Karakterisasi XRD zeolit K450 menghasilkan fasa kuarsa dan bohmit, zeolit K550 dan K650 menghasilkan fasa kristobalit, stishovite, dan gamma-alumina. Reaksi elektrokimia yang diuji dengan voltametri siklik pada ketiga zeolit (K450, K550, dan K650) bersifat irreversibel dengan nilai puncak oksidasi-reduksi sebesar 240-390 mV, dan nilai  $k_0$  yang berada pada orde  $10^{-9}$ . Semakin tinggi suhu kalsinasi, maka semakin tinggi pula nilai  $k_0$  yang dihasilkan. Nilai  $k_0$  ketiga zeolit pada laju ulas terbesar 1 V/s adalah 29,658; 36,398; dan 77,110 cm/s.

Kata kunci : elektrokimia, sekam padi, superkapasitor, zeolit

## ABSTRACT

### REVERSIBILITY ELECTROCHEMICAL REACTION FOR ELECTRODE ZEOLITE SUPERCAPACITOR BASED OF SILICA RICE HUSK WITH CALCINATION 450, 550, AND 650°C.

By

**Fatia Ulfah**

*Zeolite based silica rice husk has been prepared and analyzed with calcination at temperature 450, 550, and 650°C. This research was conducted to study the effect of calcination temperature in forming of crystalline phases and standard electron rate constant ( $k_0$ ). The zeolite K450 was formed quartz and bohmite phases, zeolite K550 and K650 was formed cristobalite, stishovite, and gamma-alumina phases. Electrochemical reaction of zeolite K450, K550 and K650 are irreversible. Peak potential oxidation-reduction is between 240 mV and 390 mV. The higher value of calcination, the higher value of  $k_0$ . The  $k_0$  value of zeolite K450, K550, K650 at scan rate 1 V/s are  $29,658 \times 10^{-9}$ ;  $36,398 \times 10^{-9}$ ;  $77,110 \times 10^{-9}$  cm/s respectively.*

*Key words: electrochemical, rice husk, supercapacitor, zeolite.*

**REVERSIBILITAS REAKSI ELEKTROKIMIA PADA ELEKTRODA  
SUPERKAPASITOR ZEOLIT BERBASIS SILIKA SEKAM PADI YANG  
DIKALSINASI PADA SUHU 450, 550, DAN 650°C**

**Oleh**

**FATIA ULFAH**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar  
SARJANA SAINS**

**Pada**

**Jurusan Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2016**

Judul Skripsi

: **REVERSIBILITAS REAKSI ELEKTROKIMIA PADA  
ELEKTRODA SUPERKAPASITOR ZEOLIT BERBASIS  
SILIKA SEKAM PADJANG YANG DIKALSINASI PADA  
SUHU 450, 550, DAN 650°C**

Nama Mahasiswa

: **Fatia Ulfah**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1217041016**

Jurusan

: **Fisika**

Fakultas

: **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



*[Signature]*

**Suprihatin, S.Si, M.Si.**  
NIP. 19730414 199702 2 001

*[Signature]*

**Prof. Posman Manurung, Ph.D.**  
NIP. 19590308 199103 1 001

**2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA**

*[Signature]*

**Arif Surtoto, S.Si, M.Si, M.Eng.**  
NIP. 19710909 200012 1 001

**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

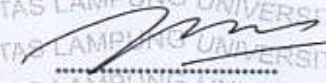
**Ketua**

**: Suprihatin, S.Si., M.Si.**



**Sekretaris**

**: Prof. Posman Manurung, Ph.D.**



**Penguji**

**Bukan Pembimbing : Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D.**



**Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**Prof. Marsito, S.Si., DEA., Ph.D.**

**NIP. 19710212 199512 1 001**



**Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 22 November 2016**

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain, dan sepanjang pengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan ini tidak benar, maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandarlampung, 28 November 2016



**Fatia Ulfah**  
NPM.1217041016

Penulis bernama lengkap Fatia Ulfah. Putri kedua dari pasangan Drs. Hamami dan Mardiah ini dilahirkan di Bandarlampung pada tanggal 15 Agustus 1994. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SDN 2 Kangkung, Sekolah Menengah Pertama di SMPN 16 Bandar Lampung, serta Sekolah Menengah Atas di SMAN 8 Bandar Lampung.

Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui SNMPTN UNDANGAN tahun 2012. Selama menempuh pendidikan, penulis pernah menjadi Asisten Praktikum Sains Dasar, Fisika Dasar I, Fisika Eksperimen, Fisika Komputasi, dan Optik. Penulis pernah aktif dalam kegiatan organisasi seperti menjadi anggota Biro Kesekretariatan dan Rumah Tangga Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) FMIPA Unila periode 2013-2014, anggota Bidang Sains dan Teknologi HIMAFI FMIPA Unila periode 2014-2015, dan Sekretaris Biro Akademik Rois FMIPA Unila tahun 2013-2014.

Penulis merupakan penerima hibah Program Kreatifitas Mahasiswa Penelitian (PKMP) tahun 2013 dengan judul “Pemanfaatan Energi Kinetik dari Hasil Alat Sepeda Statis menjadi Energi Listrik sebagai Sumber Energi Alternatif” serta “Bolang (Bahan Isolasi Panas Alang-Alang) sebagai Pendingin Ruangan” pada tahun 2014. Pada tahun 2016, penulis menyelesaikan pendidikan S1 dengan judul skripsi “Reversibilitas Reaksi Elektrokimia pada Elektroda Superkapasitor Zeolit Berbasis Silika Sekam Padi yang Dikalsinasi pada Suhu 450, 550, dan 650°C”.



## PERSEMBAHAN

*Bismillahirrohmaanirrohiim...  
Skripsi ini saya persembahkan kepada*

*Drs. Hamami dan Mardiah*

*Orangtua terbaik, pahlawan terhebat sepanjang hidup  
Yang selalu memberikan cinta dan kasih sayangnya, semangat dan doanya, serta  
pengajaran dan pendidikan terbaik*

*Istafada, S.Pd dan M. Faris Alfaizi*

*Kakak dan adik tersayang, teman belajar dan bercanda.  
Terimakasih selalu memberikan keceriaan di rumah.*

*Seluruh keluarga dan sahabat  
Yang selalu memberikan motivasi*

*Universitas Lampung  
Almamater tercinta*

## MOTTO

*“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.  
Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”  
(Q.S. Al-Insyiraah: 5-6)*

*“Sebaik-baiknya manusia adalah yang paling bermanfaat bagi  
manusia lain.”  
(H.R. At-Thabrani)*

*Sabar, syukur, semangat*

## **KATA PENGANTAR**

Segala puji bagi Allah, berkat karunia dan kemurahan-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Reversibilitas Reaksi Elektrokimia pada Elektroda Superkapasitor Zeolit Berbasis Silika Sekam Padi yang Dikalsinasi pada Suhu 450, 550, dan 650°C”.

Penulis menyadari bahwa penyajian skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan dan penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat menjadi rujukan untuk penelitian berikutnya dan menjadi tambahan ilmu pengetahuan. Aamiin.

Bandar Lampung, 25 November 2016  
Penulis,

**Fatia Ulfah**

## SANWACANA

Segala puji bagi Allah, Rabb semesta alam yang telah memberikan taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada manusia teladan sepanjang masa, Rasulullah Muhammad SAW, beserta sahabat, keluarga, dan para tabi'in yang menjadi jalan dalam terbukanya jendela ilmu pengetahuan. Dalam penyusunan skripsi ini penulis banyak mendapat bantuan dari segala pihak. Maka, pada kesempatan kali ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si. selaku Pembimbing I yang telah memberikan ilmu, motivasi, dan bimbingan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Posman Manurung, Ph.D. selaku Pembimbing II yang telah memberikan ilmu dan arahnya kepada penulis dalam menjalani penyusunan skripsi.
3. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D selaku Penguji yang telah memberikan ilmu dan bimbingannya kepada penulis.
4. Bapak Drs. Amir Supriyanto, M.Si. sebagai Pembimbing Akademik (PA) yang telah membantu dan memberikan ilmunya selama perkuliahan ini.

5. Bapak Agus Riyanto, M.Si yang telah memberikan ilmu, arahan, dan bimbingan kepada penulis dalam penelitian dan penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Arif Surtono, M.Si., M.Eng. sebagai Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam Universitas Lampung (FMIPA Unila)
7. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, M.Si. sebagai Sekretaris Jurusan Fisika FMIPA Unila.
8. Seluruh dosen fisika FMIPA Universitas Lampung beserta staf yang telah memberikan ilmu, arahan, dan bantuannya.
9. Kedua orangtua tercinta yang selalu kusebut namanya dalam doa.
10. Tim Super Zeolit (Alfi, Imas, Jeni, Mona, Rosa, Siti) yang selalu membantu, menyemangati, dan mendoakan.
11. Siti Imas Masitoh, *partner* sholehah yang telah menjadi teman berbagi dalam penelitian ini.
12. Sahabat-sahabat terbaik: Izdiha Rolina Sofa'a, Nurqori Setiawati, Alfi Hamidah.
13. Duwi Hariyanto, S.Si yang telah menjadi teman berbagi dan belajar dan pemberi semangat.
14. Teman-teman seperjuangan fisika angkatan 2012 yang selalu membantu selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi.
15. Kakak-kakak dan adik-adik tingkat fisika yang telah membantu dan menyemangati hingga tersusunnya skripsi ini.

Semoga Allah SWT membalas dengan yang lebih baik dan menjadi pemberat amal di akhirat nanti. Aamiin.

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>iii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>iv</b>
<b>HALAMAN MENGENALKAN</b> .....	<b>v</b>
<b>PERNYATAAN</b> .....	<b>vi</b>
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	<b>vii</b>
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	<b>viii</b>
<b>MOTTO</b> .....	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>x</b>
<b>SANWACANA</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xvi</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah .....	5
C. Batasan Masalah .....	5
D. Tujuan Penelitian .....	6
E. Manfaat Penelitian .....	6
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
A. Silika Sekam Padi dan Pemanfaatannya .....	7
B. Zeolit .....	8
C. Superkapasitor.....	12
D. Analisis Struktur Kristal.....	15
E. Analisis Sel Elektrokimia .....	16
F. Voltametri Siklik .....	18

<b>III. METODE PENELITIAN</b>	
A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	25
B. Bahan dan Alat Penelitian.....	25
C. Prosedur Kerja.....	26
D. Diagram Alir.....	31
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
A. Karakterisasi Menggunakan XRD.....	33
B. Karakterisasi Menggunakan Voltametri Siklik.....	35
C. Hubungan Fasa Kristal dengan Nilai Konstanta Kecepatan Elektron ( $k_0$ ).....	39
<b>V. KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
A. Kesimpulan.....	41
B. Saran.....	41
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>42</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur kimia zeolit.....	9
2. Ukuran pori zeolit yang diilustrasikan dengan model <i>oxygen-packing</i> .....	9
3. Hasil plot perangkat penyimpanan energi .....	13
4. Skema kapasitor elektrokimia lapisan ganda.....	14
5. Hamburan sinar-X pada kristal kubus .....	15
6. Susunan sel elektrokimia .....	18
7. Kurva voltamogram.....	19
8. Voltamogram siklik untuk transfer muatan .....	21
9. Skema pengukuran voltametri siklik.....	30
10. Diagram alir penelitian .....	32
11. Difraktogram XRD sampel zeolit.....	34
12. Grafik voltamogram siklik zeolit .....	37



## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi kimia sekam padi .....	7
2. Komposisi kimia abu sekam padi.....	7
3. Perbedaan mekanisme reversibel, irreversibel, dan kuasi-reversibel berdasarkan nilai $k_0$ dan $\Delta$ .....	20
4. Nilai arus puncak anodik dan katodik serta potensial puncak anodik dan katodik pada sampel zeolit K450, K550, dan K650 yang diukur dengan laju pengulasan 0,01; 0,05; 0,1; 0,5; dan 1 V/s .....	36
5. Range nilai $k_0$ pada reaksi irreversibel dari zeolit K450, K550, dan K650 pada laju pengulasan 0,01; 0,05; 0,1; 0,5 dan 1 V/s .....	38
6. Fasa zeolit dan nilai $k_0$ yang dihasilkan sampel zeolit pada suhu kalsinasi 450, 550, dan 650°C .....	39

## I. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Energi listrik merupakan energi yang sangat fundamental dalam kehidupan manusia. Perkembangan teknologi dan informasi menjadikan energi listrik sebagai parameter kemajuan suatu negara. Kemajuan teknologi saat ini melahirkan berbagai perangkat penyimpanan energi listrik (Efrhenrycx dan Surya, 2012; Nugroho, 2015) yang ditujukan untuk memudahkan penggunaan energi listrik bagi manusia, seperti energi listrik yang digunakan stabil, tersedia dalam beberapa tingkat energi, fleksibel saat digunakan, serta efisien (Hoeven, 2014). Baterai merupakan perangkat teknologi penyimpanan energi listrik secara umum. Baterai menjadi pilihan dalam perkembangan teknologi saat ini, dikarenakan baterai dapat menyimpan sejumlah energi di dalam perangkat yang relatif ringan/kecil, menyediakan berbagai level energi (Burke, 2000), serta dapat digunakan ketika dibutuhkan (Xu *et al*, 2010). Namun, rapat daya pada baterai belum dapat menjangkau tingkat yang tinggi, sehingga banyak dilakukan penelitian tentang superkapasitor untuk memperbaiki kelemahan tersebut (Kotz, 2000).

Superkapasitor adalah suatu piranti elektronik yang dapat menyimpan kapasitansi listrik yang tinggi (Burke, 2000; Gidwani *et al*, 2014). Superkapasitor atau yang dikenal dengan ultrakapasitor atau kapasitor elektrokimia memanfaatkan luas elektroda dan dielektrik elektrolisis yang tipis untuk menjangkau kapasitansi yang lebih tinggi dari kapasitor konvensional (Conway, 1999). Mekanisme penyimpanan muatan dalam superkapasitor dapat terjadi secara *Faradaic* ataupun *non-Faradaic* (Halper and Ellenbogen, 2006). Penyimpanan muatan secara *non-Faradaic* atau listrik statis terjadi karena tidak ada transfer muatan antara elektroda dan elektrolit. Sedangkan penyimpanan muatan secara *Faradaic* terjadi karena pemindahan muatan atau pertukaran ion antara elektroda dan elektrolit muatan melalui penyerapan reaksi reduksi-oksidasi (redoks) elektron (Kim, 2001; Ryu, 2002; Halper and Ellenbogen, 2006). Elektroda yang diukur melalui pengukuran arus ini akan menghasilkan reaksi sistem secara reversibel, irreversibel, ataupun kuasi-reversibel (Heinze, 1984) yang berhubungan dengan siklus hidup superkapasitor (Pandolfo and Hollenkamp, 2006).

Superkapasitor dalam kemajuan teknologi saat ini diharapkan dapat menjadi perangkat penyimpanan kapasitansi listrik dengan waktu pengosongan yang lama dan waktu pengisian yang relatif pendek (Burke, 2000). Superkapasitor memiliki keunggulan diantaranya memiliki jumlah siklus yang relatif banyak, kerapatan energi yang tinggi, kemampuan menyimpan energi yang besar, prinsip yang sederhana, dan konstruksi yang mudah (Shukla *et al*, 2000).

Superkapasitor terdiri atas pengumpul arus, separator, larutan elektrolit, dan elektroda (Halper and Ellenbogen, 2006). Superkapasitor yang mampu

menghasilkan nilai kapasitansi dan energi yang tinggi dapat dijangkau menggunakan elektroda yang berbahan konduktif seperti *rutherfordium oxide* ( $\text{RuO}_2$ ) (Miller and Simon, 2008). Namun, karena keberadaan  $\text{RuO}_2$  yang terbatas dan harganya yang cukup mahal, maka dikembangkan material lain yang lebih kompetitif untuk menggantikan  $\text{RuO}_2$  sebagai bahan elektroda superkapasitor, seperti zeolit. Zeolit yang merupakan mineral aluminasilikat berpori dengan luas permukaan yang besar (Hanudin dan Triyatmo, 2004; Barrer, 1978), memiliki berbagai kemampuan dan sifat seperti dapat menukar ion (Muresan, 2011), memiliki kadar keasaman dan stabilitas termal yang cukup tinggi (Khalifah dan Didik, 2008), serta sifat yang nonkorosif (Hari dkk, 2015). Berdasarkan sifat dan kemampuannya inilah, zeolit berpotensi sebagai bahan elektroda superkapasitor (Zhong *et al*, 2014).

Zeolit sintesis yang akan dijadikan elektroda superkapasitor ini dapat disintesis dari berbagai sumber silika, salah satunya dari limbah sekam padi (Ramchandra, 2016) dengan ketersediaannya yang melimpah di alam dan belum banyak dimanfaatkan secara maksimal. Sekam padi memiliki kandungan silika sebesar 80-90% (Faizul *et al*, 2013). Silika sekam padi mempunyai karakteristik berupa luas permukaan dan porositas yang tinggi (Kumar dkk, 2012). Dengan karakteristik yang dimiliki tersebut, maka silika sekam padi dapat diaplikasikan dalam pembuatan zeolit sebagai bahan elektroda superkapasitor.

Sintesis silika dapat dilakukan dengan berbagai metode, antara lain metode hidrotermal yang dilakukan oleh Liani (2012) untuk mensintesis zeolit X, dekomposisi uap oleh Awaji dkk (1997) dan *sol gel* yang dilakukan oleh Buckley

dan Greenblatt (1994). Namun, sintesis menggunakan metode hidrotermal dan dekomposisi uap memiliki kelemahan, seperti pada metode hidrotermal yang membutuhkan suhu tinggi dan waktu reaksi yang lama, serta pada metode dekomposisi uap yang membutuhkan biaya yang tidak murah. Dari kelemahan kedua metode tersebut, maka metode *sol gel* lebih banyak dipilih karena menggunakan biaya yang relatif murah, teknik yang sederhana, dapat homogenitas ukuran yang tinggi, distribusi ukuran yang merata dan pemantauan morfologi melalui reaksi parameter (Rahman and Padavettan, 2012).

Unjuk kerja superkapasitor seperti rapat energi sangat bergantung pada kontak antara pengumpul arus dan elektroda yang digunakan (Wu *et al*, 2004; Barmawi dkk, 2011). Material yang akan diposisikan sebagai pengumpul arus biasanya terbuat dari material konduktif, seperti tembaga (Wu *et al*, 2009), baja tahan karat (Taer dkk, 2015), serat karbon (Chiu, 2015), dan lain-lain. Pada penelitian yang akan dilakukan ini, elektroda bahan superkapasitor dibuat dengan memadukan zeolit dengan karbon aktif yang bertindak sebagai pengumpul arus sehingga dapat meningkatkan rapat energi dan nilai kapasitansi sebuah superkapasitor yang berhubungan dengan siklus hidup suatu superkapasitor (Wu *et al*, 2004; Barmawi dkk, 2011).

Dari uraian di atas, maka pada penelitian ini akan dilakukanlah pembuatan zeolit dengan mensintesis silika dari limbah sekam padi menggunakan metode *sol gel* dan dipadukan dengan karbon aktif sehingga membentuk lapisan zeolit-karbon aktif. Lapisan zeolit-karbon aktif ini dikalsinasi pada suhu 450, 550, dan 650°C. Selanjutnya dikarakterisasi menggunakan Difraksi sinar-X atau *X-Ray Diffraction*

(XRD) untuk mendapatkan struktur kristal serta voltametri siklik untuk mengetahui reversibilitas zeolit sebagai bahan elektroda superkapasitor. Penelitian ini diharapkan menghasilkan bahan elektroda superkapasitor dengan sifat elektrokimia yang reversibel melalui proses pertukaran ion yang terjadi secara *Faradaic*.

### **B. Rumusan Masalah**

Rumusan masalah yang ada dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh suhu kalsinasi terhadap pembentukan fasa kristal elektroda zeolit berbasis silika sekam padi.
2. Bagaimana pengaruh suhu kalsinasi terhadap konstanta standar kecepatan transfer elektron ( $k_0$ ) elektroda zeolit berbasis silika sekam padi.
3. Bagaimana hubungan pembentukan fasa kristal terhadap konstanta standar kecepatan transfer elektron ( $k_0$ ) elektroda zeolit berbasis silika sekam padi akibat perubahan suhu kalsinasi.

### **C. Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Larutan sol zeolit dibuat dengan pH 7.
2. Variasi suhu kalsinasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah 450, 550, dan 650°C.
3. Larutan senyawa yang digunakan adalah Kalium Hidroksida Ftalat (KHP) 0,1 M dengan elektrolit pendukung NaOH 0,1 M.

4. Analisis yang digunakan terdiri atas pengamatan karakteristik struktur kristal menggunakan XRD dan uji reversibilitas zeolit menggunakan voltametri siklik.

#### **D. Tujuan Penelitian**

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh suhu kalsinasi terhadap pembentukan fasa kristal elektroda zeolit berbasis silika sekam padi.
2. Mengetahui pengaruh suhu kalsinasi terhadap konstanta standar kecepatan transfer elektron ( $k_0$ ) elektroda zeolit berbasis silika sekam padi.
3. Mengetahui hubungan pembentukan fasa kristal terhadap konstanta standar kecepatan transfer elektron ( $k_0$ ) elektroda zeolit berbasis silika sekam padi akibat perubahan suhu kalsinasi.

#### **E. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan memiliki manfaat sebagai berikut

1. Memberikan nilai tambah pada sekam padi yang hanya menjadi limbah pertanian, sehingga dapat meningkatkan nilai guna dan manfaat di bidang teknologi.
2. Memberikan informasi pembuatan zeolit yang disintesis dari silika sekam padi dengan metode *sol gel*.
3. Sebagai sumber informasi pembuatan zeolit yang disintesis dari silika sekam padi untuk aplikasi elektroda superkapasitor.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Silika Sekam Padi dan Pemanfaatannya

Sekam padi adalah bagian kulit terluar yang membungkus butir padi, terdiri dari bagian *lemma* dan *palea* yang saling bertautan (Nugraha dan Setiawati, 2001). Adapun komposisi kimia sekam padi hasil ekstraksi dapat dilihat pada Tabel 1 dan komposisi kimia sekam padi hasil pembakaran dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi kimia sekam padi hasil ekstraksi (Sembiring dan Karo-karo, 2007)

Komposisi kimia sekam padi hasil ekstraksi	Berat (%)
SiO <sub>2</sub>	94,66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,56
CaO	0,71
Na <sub>2</sub> O	1,50
K <sub>2</sub> O	1,01
MgO	0,56

Tabel 2. Komposisi kimia sekam padi hasil pembakaran (Della *et al*, 2002)

Komposisi kimia sekam padi hasil pembakaran	Berat (%)
SiO <sub>2</sub>	94,95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26
CaO	0,54
Na <sub>2</sub> O	0,25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,94
MnO	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,74
MgO	0,90
K <sub>2</sub> O	0,16



Sekam padi yang merupakan limbah pertanian adalah sumber dari silika amorf (Dominic *et al*, 2013). Silika amorf yang disintesis hingga menghasilkan luas permukaan yang tinggi, porositas yang tinggi, nilai insulator panas yang tinggi, dan konstanta dielektrik yang sangat rendah dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, salah satunya sebagai superkapasitor (Ramchandra, 2016).

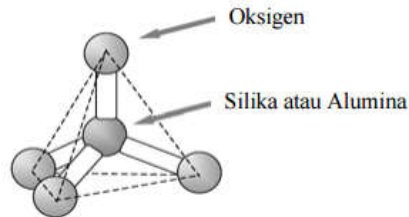
Pembuatan material sebagai penyimpanan energi listrik berhasil dilakukan oleh Hunt *et al* (1984) dengan mensintesis silikon murni dari silika sekam padi dan dibentuk menjadi pelet menggunakan karbon hitam sebagai reduktan dan sukrosa sebagai pengikat lalu direduksi di dalam tungku panas. Dalam penelitian ini diketahui bahwa abu silika sekam padi berpotensi sebagai sumber produksi *solar grade silicon*.

Penelitian lain terkait penyimpanan muatan listrik yaitu sebagai elektroda suatu perangkat telah dilakukan oleh Ju *et al* (2016) dengan mensintesis silika dan karbon sekam padi dengan proses karbonisasi sehingga menghasilkan paduan silika-karbon atau  $\text{SiO}_x/\text{C}$ .  $\text{SiO}_x/\text{C}$  ini menghasilkan kapasitansi spesifik sebesar 600 mAh/g, sehingga dalam hal ini  $\text{SiO}_x/\text{C}$  dapat menjadi elektroda performa superkapasitor (*superior electrochemical performance*).

## **B. Zeolit**

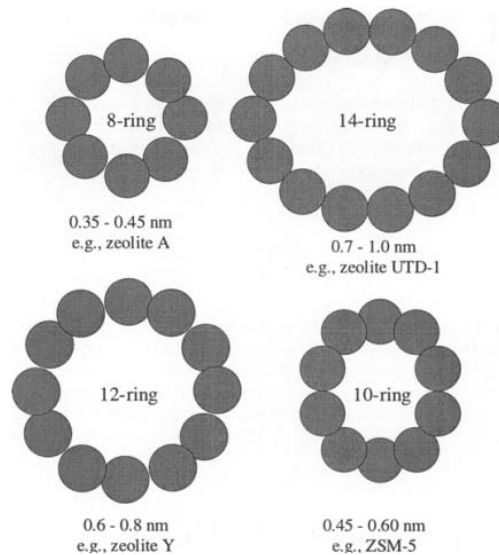
Zeolit merupakan kristalin aluminasilikat dari golongan IA dan IIA seperti natrium, pottasium, magnesium, dan kalsium. Secara kimia, zeolit memiliki formula empiris  $\text{M}_{2/n}\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot y\text{SiO}_2 \cdot w\text{H}_2\text{O}$ . Dimana y berupa bilangan bulat 2-

10, n adalah kation valensi, dan w menunjukkan kandungan air di dalam zeolit. Secara struktur, zeolit merupakan material kompleks, kristal polimer anorganik pada 3D, empat rangka tangan pada tetrahedra  $AlO_4$  dan  $SiO_4$  yang dihubungkan pada masing-masing ion oksigen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur kimia zeolit (Haag, 1984).

Dalam kebanyakan struktur zeolit, tetrahedra  $AlO_4$  dan  $SiO_4$  membentuk polyhedra sederhana seperti kubus, prisma heksagonal, atau kubus oktahedra. Sampai saat ini lebih dari 70 jenis struktur zeolit telah diketahui. Ukuran pori mereka sekitar 0,3-1,0 nm, dan volume pori sekitar 0,10-0,35 cc/g. Ukuran pori zeolit menggunakan model *oxygen-packing* yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ukuran pori zeolit yang diilustrasikan dengan model *oxygen-packing* (Bekkum, 2001).

Pada zeolit tersebut, zeolit pori kecil dengan delapan cincin berukuran diameter pori 0,30-0,45 nm yakni zeolit A; zeolit pori sedang yang dibentuk oleh 10 cincin dengan diameter pori 0,45-0,60 nm, yakni ZSM-5; zeolit pori besar dengan 12 cincin berukuran diameter 0,6-0,8 nm, yakni zeolit X dan Y dan zeolit pori sangat besar dengan 14 cincin dengan diameter pori 0,7-1,0 nm yakni UTD-1. Beberapa tipe zeolit yang sangat penting terdiri dari mineral mordenite, chabazite, erionite, dan clinoptilolite, dan sintesis zeolit tipe A, X, Y L, “Zeolon” mordenite, ZSM-5, beta, MCM-22 dan zeolit F dan W (Bekkum, 2001).

Zeolit memiliki banyak aplikasi yang telah digunakan dalam industri penyulingan minyak, sebagai detergen, dan membersihkan limbah nuklir pada saat bencana nuklir. Aplikasi baru pada bubuk zeolit adalah sebagai penghilang bau dan sebagai zat adiktif pada plastik. Pada perkembangan teknologi saat ini, zeolit diharapkan dapat menjadi peluang dalam penelitian terbaru, seperti molekul elektronik, rantai kuantum, elektroda zeolit, baterai, material optik nonlinier, dan sensor kimia (Bekkum, 2001).

Zeolit memiliki karakter berupa permukaan berpori dengan luas permukaan yang besar (Hanudin dan Triyatmo, 2004; Barrer, 1978) serta sifat yang unik, seperti kemampuan menukar ion (Muresan, 2011), memiliki kadar keasaman dan stabilitas termal yang cukup tinggi (Khalifah dan Didik, 2008) serta sifat yang nonkorosif (Hari, dkk. 2015).

Secara umum, zeolit terbagi menjadi 2 jenis, yaitu zeolit alam dan zeolit sintesis. Zeolit alam merupakan mineral aluminasilikat yang telah terbentuk di alam.

Biasanya zeolit alam mengandung banyak impuritas, pori-pori yang tidak seragam, dan kekuatan asam yang lebih sulit dikontrol. Sedangkan zeolit sintesis merupakan zeolit komersial yang strukturnya lebih teratur sehingga membentuk pori-pori yang seragam (Auerbach *et al*, 2003; Fuadi, 2012).

Pembuatan zeolit dengan memanfaatkan sekam padi sebagai sumber silika telah dilakukan oleh Khemthong *et al* (2007) yang berhasil mensintesis *low silica zeolite type X* menggunakan metode pirolisis. Selanjutnya mensintesis zeolit LSX dengan komposisi  $5,5 \text{ Na}_2\text{O} : 1,65 \text{ K}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3 : 2,2 \text{ SiO}_2 : 122 \text{ H}_2\text{O}$  menggunakan proses hidrotermal. Dengan analisis XRD diketahui bahwa zeolit ini termasuk dalam struktur faujasit yang memiliki kristalinitas yang tinggi.

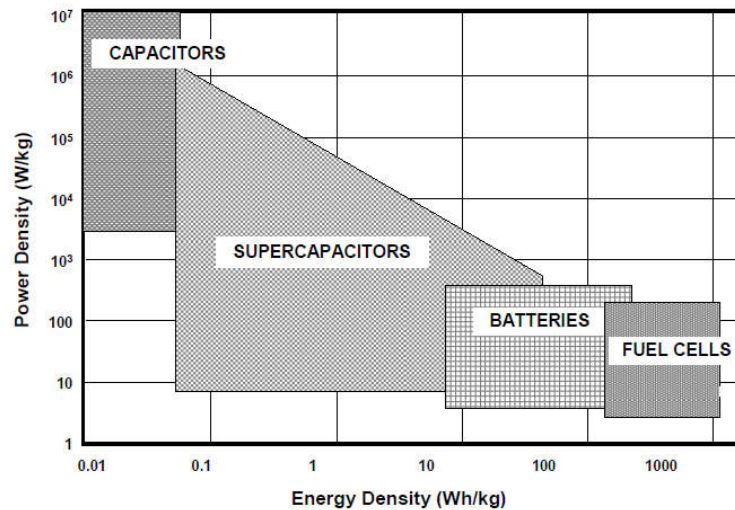
Penelitian lain juga telah dilakukan Bhavornthanayod dan Rungrojchaipon (2009) untuk mendapatkan membran zeolit A dari hasil sintesis silika sekam padi dengan perbandingan  $2\text{Na} : \text{Si}$ . Komposisi zeolit dibuat dengan  $3,1\text{Na}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3 : 1,9\text{SiO}_2 : 128\text{H}_2\text{O}$ . Dari analisis XRD menunjukkan bahwa sampel terdiri dari aluminium oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Kristalin zeolit A berhasil tumbuh pada substrat alumina dengan ukuran partikel  $2,554 \mu\text{m}$ .

Selain itu, kemampuan zeolit yang dapat menukar ion sehingga berpotensi sebagai elektroda telah diteliti oleh Muresan (2011) dengan menggunakan zeolit yang termodifikasi. Dalam penelitiannya dikemukakan bahwa elektroda dari zeolit yang termodifikasi memiliki kemampuan sifat transfer ion pada aluminosilikatnya.

### **C. Superkapasitor**

Superkapasitor atau ultrakapasitor atau kapasitor elektrokimia memanfaatkan luas permukaan yang tinggi dan dielektrik elektrolit tipis untuk menjangkau kapasitansi yang tinggi dibandingkan dengan kapasitor konvensional (Chu, 2002; Conway, 1999). Superkapasitor dibangun dengan prinsip dasar yang sama dengan kapasitor konvensional (Halper and Ellenbogen, 2006). Hal yang berbeda adalah penggabungan kedua elektroda dengan daerah permukaan yang tinggi dan dielektrik yang sangat tipis yang akan menurunkan jarak diantara kedua elektroda tersebut, sehingga akan meningkatkan kapasitansi dan energi. Superkapasitor memiliki kelebihan dibanding baterai elektrokimia dan bahan bakar sel yang memiliki rapat daya yang tinggi, waktu pengisian yang lebih pendek, dan siklus hidup yang lebih panjang. Superkapasitor terdiri atas kolektor, separator, larutan elektrolit, dan dua elektroda (Halper and Ellenbogen, 2006).

Kemajuan superkapasitor ditunjukkan pada Gambar 3. Jenis grafik ini menunjukkan variasi rapat daya pada perangkat penyimpanan energi yang diukur sepanjang garis vertikal dan rapat energi yang diukur sepanjang garis horizontal. Pada Gambar 3, terlihat bahwa superkapasitor menduduki daerah diantara kapasitor konvensional dan baterai. Walaupun memiliki kapasitansi yang lebih tinggi dibandingkan kapasitor konvensional, namun superkapasitor belum memiliki rapat energi yang tinggi dibandingkan dengan baterai dan bahan bakar sel (Kotz, 2000; Halper and Ellenbogen, 2006).



Gambar 3. Hasil plot perangkat penyimpanan energi (Kotz, 2000).

Superkapasitor memiliki dua elektroda yang tercelup pada larutan elektrolit dengan separator diantara elektroda. Elektroda dibuat dengan daerah permukaan yang luas dan dengan pori yang memiliki diameter dalam skala nanometer. Daerah permukaan bahan elektroda yang digunakan pada superkapasitor lebih besar dari elektroda yang digunakan baterai yaitu sekitar 500-2000 m<sup>2</sup>/g (Burke, 2000).

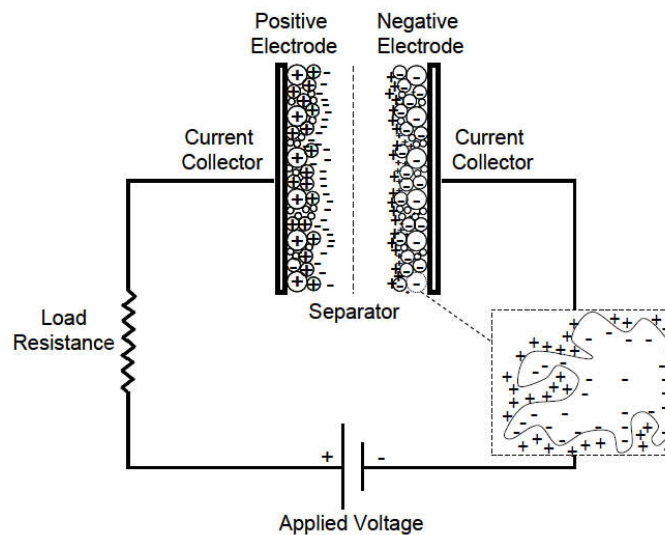
Mekanisme penyimpanan energi pada superkapasitor:

- Kapasitor kimia lapisan ganda (*Electrochemical Double-Layer Capacitor*)

*Electrochemical Double-Layer Capacitor* (ELDCs) dibangun atas 2 elektroda, elektrolit, pengumpul arus, dan separator. Gambar 4 menunjukkan skema ELDCs. Seperti kapasitor konvensional, ELDCs menyimpan muatan secara listrik statis atau *non-Faradaic*, atau tidak ada transfer muatan antara elektroda dan elektrolit. ELDCs memanfaatkan muatan elektrokimia lapisan ganda untuk

menyimpan energi. Dengan menerapkan tegangan, muatan dikumpulkan pada permukaan elektroda. Karena tidak terjadi transfer muatan antara elektrolit dan elektroda, maka tidak ada proses kimia dan komposisi muatan yang berhubungan dengan proses *non-Faradaic*. Dengan alasan inilah, penyimpanan muatan ELDCs dapat berubah dengan cepat, yang mana dapat menjangkau waktu hidup secara stabil dengan sangat tinggi (Halper and Ellenbogen, 2006).

Skema ELDCs ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema ELDCs (Halper dan Ellenbogen, 2006).

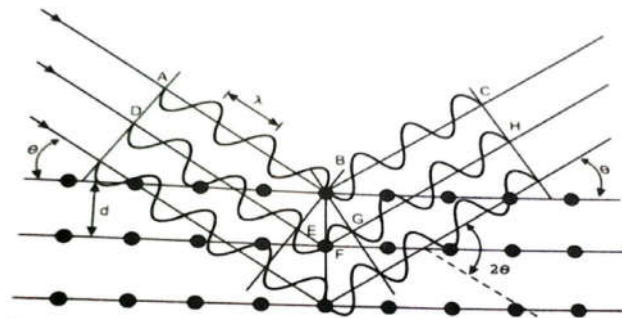
- *Pseudocapacitor*

Berbeda dengan ELDCs yang menyimpan muatan secara elektrostatik, *pseudocapacitor* menyimpan muatan secara *Faradaic* melalui pemindahan muatan antara elektroda dan elektrolit. Melalui penyerapan reaksi reduksi-oksidasi elektron dan proses *intercalation*, proses *Faradaic* memungkinkan *pseudocapacitor* untuk menjangkau kapasitansi yang tinggi dan rapat energi dibandingkan ELDCs (Kim, 2001; Ryu, 2002; Halper and Ellenbogen, 2006).

#### D. Analisis Struktur Kristal

Analisis struktur kristal pada suatu padatan dapat dilakukan menggunakan difraksi sinar-X atau *X-Ray Diffraction* (XRD). Informasi yang didapat dari XRD ini adalah fasa-fasa yang terbentuk dan informasi kristalografi. Secara prinsip, sinar-X merupakan sinar elektromagnetik dengan energi yang sangat tinggi. Energi sinar-X berkisar antara 200 eV hingga 1 MeV ( $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ). Hamburan sinar-X terjadi oleh variasi intensitas arah yang berbeda karena efek interferensi. Metode hamburan sinar-X bergantung pada panjang gelombang sinar-X yang berada pada orde nanometer. Ketika sinar-X mengenai objek, maka hamburan yang terjadi pada sinar-X dihasilkan oleh banyak atom (Warren, 2014).

Foton sinar-X adalah bentuk radiasi elektromagnetik yang dihasilkan melalui transisi orbital elektron dari keadaan energi tinggi ke rendah. Terdapat tiga fenomena dasar ini dalam pembentukan sinar-X, yaitu teknik absorpsi, yang merupakan dasar analisis radiografi; efek penyebaran, yang merupakan dasar analisis sinar-X; dan efek fluoresensi yang merupakan dasar spektrometri XRF (Jenkins, 2000).



Gambar 5. Hamburan sinar-X pada kristal kubus (Richman, 1967).



Pada Gambar 5 seberkas sinar-X yang memiliki panjang gelombang tertentu ditembakkan pada kristal dengan sudut  $\theta$ . Berkas sinar tersebut mengenai atom B pada bidang pertama dan atom F pada bidang kedua. Interferensi konstruktif terjadi jika kedua sinar-X tersebut dihamburkan sejajar yang ditempuh pada  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$ , dan seterusnya yang dapat dituliskan dengan  $n\lambda$  ( $n$  adalah bilangan bulat). Sesuai dengan hukum Bragg, persamaan difraksi seperti pada Persamaan 1

$$\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

Keterangan:

$\lambda$  = panjang gelombang radiasi

$\theta$  = sudut difraksi

$d$  = jarak antar kisi

Difraksi sinar-X dapat menyediakan informasi analisis kualitatif dan kuantitatif fasa (senyawa) yang tidak diketahui dalam suatu campuran. Secara prinsip, difraksi sinar-X dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur kandungan pada sampel untuk menghitung ukuran kristal, kristalinitas, konstanta kisi, serta analisis kualitatif dan kuantitatif lainnya (Munekawa, 1988).

### **E. Analisis Sifat Elektrokimia**

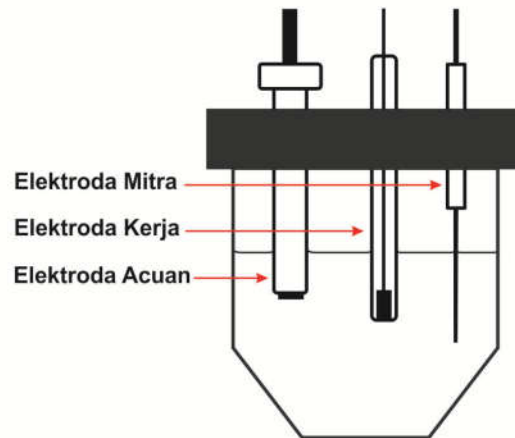
Elektrokimia adalah ilmu yang mempelajari aspek elektronik dari reaksi-reaksi kimia yang diinisiasi atau yang menghasilkan energi listrik. Dalam metode elektrokimia, reaksi kimia yang terjadi adalah transfer elektron antara permukaan elektroda dengan molekul di dalam larutan yang berpartisipasi dalam reaksi reduksi dan oksidasi. Pada umumnya suatu sel elektrokimia terdiri dari tiga jenis

elektroda yaitu elektroda kerja, elektroda acuan, dan elektroda mitra (Heinze, 1984).

Elektroda kerja adalah elektroda tempat mengamati terjadinya reaksi elektrokimia (daerah pengukuran elektrokimia), seperti arus yang dihasilkan dan fenomena yang terjadi di permukaannya. Elektroda ini umumnya terbuat dari logam, bahan semikonduktor, dan karbon. Elektroda logam yang sering digunakan adalah platina (Pt), emas (Au), dan perak (Ag). Sedangkan elektroda semikonduktor yang umum digunakan adalah Silikon (Si) dan Galium (Ga) (Heinze, 1984).

Elektroda acuan adalah elektroda yang menghasilkan potensial konstan selama waktu operasi dan relatif stabil terhadap perubahan temperatur. Elektroda acuan dapat digunakan sebagai standar pembandingan terhadap perubahan potensial pada elektroda kerja. Contoh elektroda acuan ini adalah Hg/HgCl dan Ag/AgCl (Heinze, 1984).

Elektroda mitra merupakan elektroda yang berperan sebagai tempat masuknya elektron, sehingga arus dapat dilewatkan melalui sel tanpa terlibat dalam reaksi kimia. Elektroda mitra yang biasa digunakan adalah platina (Pt) yang dapat berupa kawat lurus, kawat spiral, dan cakram (*disk*) (Heinze, 1984). Susunan elektroda-elektroda pada sel elektrokimia dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Susunan sel elektrokimia (Gosser, 1993).

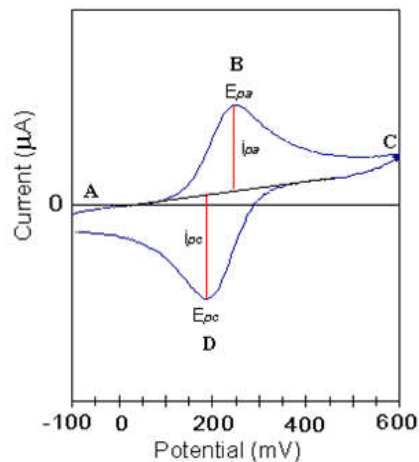
Pada sel elektrokimia, larutan elektrolit yang akan menghasilkan reaksi elektrokimia dengan elektroda harus menghasilkan arus yang tinggi. Menurut Mulyani dkk (2012), beberapa elektrolit yang biasa dipakai adalah  $\text{CoCl}_2$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{NaClO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{KOH}$ . Didapatkan hasil bahwa elektrolit  $\text{KOH}$  0,1M selain memberikan respon arus puncak yang lebih tinggi  $30 \mu\text{A}$  juga memberikan respon puncak oksidasi dan puncak reduksi.

#### F. Voltametri Siklik

Voltametri siklik adalah suatu teknik analisis kualitatif dan kuantitatif yang dapat memberikan informasi tentang hasil reaksi yang terjadi di dalam sel elektrokimia. Pada voltametri siklik respon arus diukur sebagai fungsi potensial (voltase), dimana pemberian potensial dilakukan secara bolak-balik, sehingga informasi reduksi dan oksidasi dapat teramati dengan baik. Karakteristik voltametri siklik tergantung beberapa faktor yaitu laju reaksi transfer elektron, kereaktifan elektroaktif, dan laju ulasan voltase (Gosser, 1993). Pengukuran ini menggunakan aliran laju pengulasan

yang bervariasi agar dapat melihat efek kapasitansi. Informasi yang didapat dalam karakterisasi ini adalah nilai kapasitansi, efek aliran kecepatan pada nilai kapasitansi, dan kemungkinan informasi pada hambatan/respon suatu perangkat berdasarkan bentuk dari siklus voltamogram (Korenblit, 2009).

Teknik pengukurannya dilakukan dengan cara mempolarisasikan elektroda kerja. Pengukuran ini dilakukan dengan menerapkan suatu potensial ke dalam sel elektrokimia, kemudian respon arus yang dihasilkan dari proses reaksi redoks diukur. Respon arus diukur pada daerah potensial yang telah ditentukan. Kemudian dibuat plot arus fungsi potensial yang disebut siklus voltamogram. Ulasan tegangan dengan metode voltametri siklik ini tentunya menghasilkan respon arus yang spesifik. Jika respon arus fungsi ulasan potensial ini digambarkan, maka akan berbentuk kurva voltamogram (Heinze, 1984). Kurva voltamogram dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva voltamogram (Vyas and Wang, 2010).

Keterangan:

$E_{pa}$  = potensial pada saat terbentuknya puncak anodik (V)

$E_{pc}$  = potensial pada saat terbentuknya puncak katodik (V)

$I_{pa}$  = arus pada terbentuknya puncak anodik (A)

$I_{pc}$  = arus pada saat terbentuknya puncak katodik (A)

Di dalam pengukuran voltametri siklik, terdapat 3 prinsip yang menjadi metode pengukuran secara elektrokimia, yaitu penentuan mekanisme reaksi pada elektroda, konstanta kecepatan transfer elektron, dan koefisien difusi. Sedangkan mekanisme yang terjadi pada siklik voltametri terbagi menjadi tiga jenis yaitu: reversibel, irreversibel, dan kuasi-reversibel. Ketiga perbedaan mekanisme reaksi yang terjadinya ini dapat dilihat pada beberapa parameter yang ditunjukkan pada Tabel 3 (Aristov and Habekost, 2015).

Tabel 3. Perbedaan mekanisme reversibel, irreversibel, dan kuasi-reversibel berdasarkan nilai  $k_0$  dan  $\Lambda$  (Aristov and Habekost, 2015).

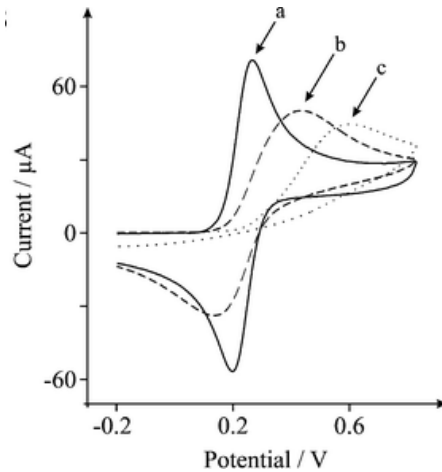
Mekanisme	Range Parameter Dimensi ( $\Lambda$ )	Range Konstanta Standar Kecepatan Elektron ( $k_0$ )
Reversibel	$\Lambda > 10$	$k_0 > 0,35 v^{1/2}$
Kuasi-reversibel	$10 > \Lambda > 10^{-2}$	$0,35 v^{1/2} > k_0 > 3,5 \cdot 10^{-4} v^{1/2}$
Irreversibel	$\Lambda < 10^{-2}$	$k_0 < 3,5 \cdot 10^{-4} v^{1/2}$

Keterangan:

$\Lambda$  = parameter dimensi

$k_0$  = konstanta standar kecepatan elektron (cm/s)

Sedangkan perbedaan ketiga mekanisme tersebut dapat dilihat pada perbedaan kurva voltamogram yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Voltamogram siklik untuk transfer muatan secara a) reversibel, b) kuasi-reversibel, c) irreversibel pada arus normal (Heinze, 1984).

#### 1) Reversibel

Reversibel terjadi ketika elektroda kinetik lebih cepat dibandingkan dengan kecepatan difusi (Fernandez, 2009). Pada sistem yang terjadi secara reversibel puncak arus  $I_p$  mengikuti Persamaan 2 (Aristov and Habekost, 2015).

$$\frac{I_{pa}}{I_{pc}} = 1 \quad (2)$$

Proses yang terjadi secara reversibel melibatkan transfer elektron dalam reaksinya. Banyaknya transfer elektron ( $n$ ) ini dapat dihitung menggunakan Persamaan 3 (Aristov and Habekost, 2015).

$$\Delta E_p = E_{pa} - E_{pc} = \frac{0,059 V}{n} \quad (3)$$

Keterangan:

$\Delta E_p$  = selisih potensial puncak (V)

$n$  = banyaknya transfer elektron

Di dalam voltametri siklik, massa transpor yang bekerja pada elektroda kerja sebagai penentuan reversibilitas yang terjadi dalam suatu reaksi dapat dihitung menggunakan Persamaan 4 (Aristov and Habekost, 2015).

$$m_{trans} = \left( \frac{\pi n F D v}{RT} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Keterangan:

$m_{trans}$  = massa transpor (cm/s)

$F$  = konstanta Faraday (96500 C/mol)

$D$  = koefisien difusi (cm<sup>2</sup>/s)

$v$  = laju pengulangan (V/s)

$R$  = konstanta Rydberg (8,314 V.C/K.mol)

$T$  = temperatur larutan (K)

Penentuan koefisien difusi dalam suatu reaksi dapat dihitung menggunakan persamaan Randles-Sevcik yang terjadi pada reaksi reversibel pada suhu 25°C yang ditunjukkan pada Persamaan 5.

$$I_p = (2,69 \times 10^5) n^{3/2} A C D^{1/2} v^{1/2} \quad (5)$$

Keterangan:

$I_p$  = arus puncak (A)

$A$  = luas efektif permukaan elektroda (cm<sup>2</sup>)

$C$  = konsentrasi (mol/cm<sup>3</sup>)

Dimana

$$I_p = I_c - I_d \quad (6)$$

Keterangan:

$I_c$  = arus pengisian (A)

$I_d$  = arus pengosongan (A)

Sedangkan nilai  $k_0$  dapat dihitung menggunakan Persamaan 7 (Klingler and Kochi, 1981).

$$k_0 = 2,18 \left( \frac{D\beta nFv}{RT} \right)^{1/2} \exp \left[ -\frac{\beta^2 nF}{RT} (E_{pa} - E_{pc}) \right] \quad (7)$$

Dimana

$$\beta = \left[ \frac{1,857 RT}{nF} \right] \frac{1}{|E_p - E_{p/2}|} \quad (8)$$

Keterangan:

$\beta$  = koefisien transfer elektron

$E_p$  = potensial puncak (V)

$E_{p/2}$  = setengah potensial puncak (V)

Adapun nilai  $|E_p - E_{p/2}|$  dapat dihitung menggunakan Persamaan 9.

$$|E_p - E_{p/2}| = 2,20 \frac{RT}{nF} = 56,5/n \quad (9)$$

Dengan memasukan Persamaan 8 ke dalam Persamaan 7, maka didapatkan nilai  $k_0$  pada Persamaan 10.

$$k_0 = 2,18 \left( \frac{DnFv}{RT} \right)^{1/2} \left( \frac{1,857 RT}{nF} \frac{1}{|E_p - E_{p/2}|} \right)^{1/2} \exp \left( - \left( \left[ \frac{1,857 RT}{nF} \right] \left[ \frac{1}{|E_p - E_{p/2}|} \right] \right)^2 \right) \frac{nF}{RT} (E_{pa} - E_{pc}) \quad (10)$$

Selain itu, nilai  $\Lambda$  dapat ditentukan dengan Persamaan 11.

$$\Lambda = k_0/m_{trans} \quad (11)$$



## 2) Irreversibel

Irreversibel terjadi ketika elektroda kinetik lebih lambat dibandingkan dengan kecepatan difusi (Fernandez, 2009).

## 3) Kuasi-reversibel

Kuasi-reversibel terjadi pada reaksi yang berada pada batas transfer elektron kinetik. Sistem ini terjadi pada pertengahan diantara sistem reversibel dan irreversibel (Fernandez, 2009).

### III. METODE PENELITIAN

#### A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juli 2016 sampai September 2016 di Laboratorium Material Fisika FMIPA Universitas Lampung, Laboratorium Fisika Dasar FMIPA Universitas Lampung, Laboratorium Instrumentasi dan Analitik Kimia FMIPA Universitas Lampung, Laboratorium Teknik Mesin Universitas Lampung, dan Laboratorium Instrumentasi Fisika Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta.

#### B. Bahan dan Alat Penelitian

##### 1. Bahan Penelitian

Bahan yang dibutuhkan pada penelitian ini berupa: akuades, sekam padi, aluminium hidroksida ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) Merck KGaA *made in Germany*, natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) Merck KGaA *made in Germany* 99%, asam nitrat ( $\text{HNO}_3$ ) 68% RP Chemical Product, dan karbon aktif.

##### 2. Alat penelitian

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini berupa: *beaker glass* Pyrex USA 80 ml, 250 ml, 500 ml, labu ukur Pyrex USA 10 ml/0,2 ml, pH indikator *strips*

Merck KGaA *made in Germany*, botol film, pipet tetes, saringan teh, plastik tekan, spatula, kertas aluminium Klinpak 8x30 cm, kertas saring, masker, *magnetic stirrer* Kenko 79-1, *magnetic hot plate stirrer* HMS-79, neraca digital Adventures Ohaus Kern ABT 220-4 4M, lesung dan alu, sarung tangan, kompor listrik, ayakan 100  $\mu\text{m}$ , penekan hidrolik Graseby Specac, tungku pembakaran Naberthem, XRD Simadzu 7000, dan potensiostat E-Corder 410.

### **C. Prosedur Kerja**

Prosedur kerja yang dilakukan pada penelitian ini dimulai dari tahap preparasi sekam padi, ekstraksi silika sekam padi, sintesis zeolit, dan proses *pressing* zeolit-karbon aktif, kalsinasi, serta uji karakterisasi menggunakan XRD dan voltametri siklik.

#### **1. Preparasi Sekam Padi**

Sekam padi yang digunakan pada penelitian berasal dari Kabupaten Lampung Tengah. Proses preparasi sekam padi yang dilakukan adalah:

1. Merendam sekam padi dengan air panas selama 6 jam.
2. Mengeringkan sekam padi yang telah dicuci di bawah terik matahari hingga kering.

#### **2. Ekstraksi Silika Sekam Padi**

Sekam padi yang telah dipreparasi selanjutnya dilakukan proses ekstraksi. Tahap ekstraksi yang dilakukan adalah:

1. Menimbang 5% NaOH sebanyak 25,25 gram.
2. Melarutkan 25,25 gram NaOH ke dalam 500 ml akuades.

3. Mencampurkan sebanyak 50 gram sekam padi dan larutan 5% NaOH ke dalam *beaker glass*.
4. Memanaskan 50 gram sekam padi dan larutan 5% NaOH di atas kompor listrik (100 W) selama 30 menit hingga mendidih.
5. Menyaring ampas sekam padi untuk memperoleh sol silika.
6. Menjenuhkan sol silika selama 24 jam.

### 3. Sintesis Zeolit

Zeolit disintesis dari campuran sol silika dan larutan aluminium hidroksida ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) agar dihasilkan larutan sodium aluminat ( $\text{NaAlO}_2$ ). Cara memperoleh larutan sodium aluminat adalah:

1. Melarutkan 5 gram aluminium hidroksida ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ke dalam 50 ml larutan 5% NaOH.
2. Mengaduk 5 gram aluminium hidroksida ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) dan 50 ml larutan 5% NaOH menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 500 rpm selama 2 jam hingga terbentuk larutan aluminium hidroksida ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ).
3. Mencampurkan larutan aluminium hidroksida ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) tersebut dengan sol silika 250 ml.
4. Mengaduk larutan aluminium hidroksida ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) dan sol silika 250 ml menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 500 rpm selama 1 jam.
5. Menetesi sedikit demi sedikit 5% asam nitrat ( $\text{HNO}_3$ ) ke dalam larutan aluminium hidroksida ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) dan sol silika 250 ml sampai netral (pH 7) sambil terus diaduk dengan kecepatan 1000 rpm selama 7 jam hingga diperoleh sol zeolit.
6. Menjenuhkan sol zeolit selama 24 jam.

7. Menyaring sol zeolit untuk memperoleh gel zeolit.
8. Mengeringkan gel zeolit di dalam oven pada suhu 110°C selama 12 jam.
9. Menggerus gel zeolit kering menggunakan lesung dan alu hingga menjadi serbuk halus.
10. Mengayak serbuk zeolit menggunakan ayakan berdiameter 100  $\mu\text{m}$ .

#### **4. Proses Penekanan**

Proses penekanan dilakukan agar sampel memiliki tingkat kompaksi yang tinggi.

Proses penekanan zeolit menggunakan penekan hidrolik dengan tekanan 10 ton.

Langkah yang dilakukan dalam proses penekanan adalah:

1. Menimbang serbuk zeolit sebanyak 0,4 gram.
2. Memasukkan sampel serbuk tersebut ke dalam cetakan baja yang berbentuk silinder dengan diameter 1,3 cm.
3. Memasukkan cetakan yang telah terisi serbuk ke dalam alat penekan.
4. Memberikan tekanan pada alat penekan seberat 10 ton.

#### **5. Kalsinasi**

Kalsinasi dilakukan menggunakan tungku pembakaran listrik. Temperatur yang digunakan adalah 450, 550, dan 650°C dengan kenaikan suhu 3°/menit dan waktu penahanan selama 3 jam. Langkah yang dilakukan dalam kalsinasi ini adalah:

1. Memasukkan sampel zeolit ke dalam tungku pembakaran.
2. Menghubungkan aliran listrik dengan tungku pembakaran.
3. Memutar saklar pada posisi “on” untuk menghidupkan tungku pembakaran.
4. Mengatur suhu yang diinginkan dengan kenaikan 3°/menit dan pada puncaknya ditahan selama 3 jam.

5. Memutar saklar pada posisi “*off*” setelah proses kalsinasi selesai.
6. Menunggu sampai tungku pembakaran sampai pada suhu ruang.
7. Mengeluarkan sampel zeolit dari tungku pembakaran.
8. Memutus aliran listrik pada tungku pembakaran.

## 6. Karakterisasi

- ***X-Ray Diffraction (XRD)***

Karakterisasi menggunakan XRD dilakukan untuk mempelajari pengaruh suhu kalsinasi terhadap struktur zeolit. Langkah-langkah yang dilakukan dalam penggunaan alat XRD adalah:

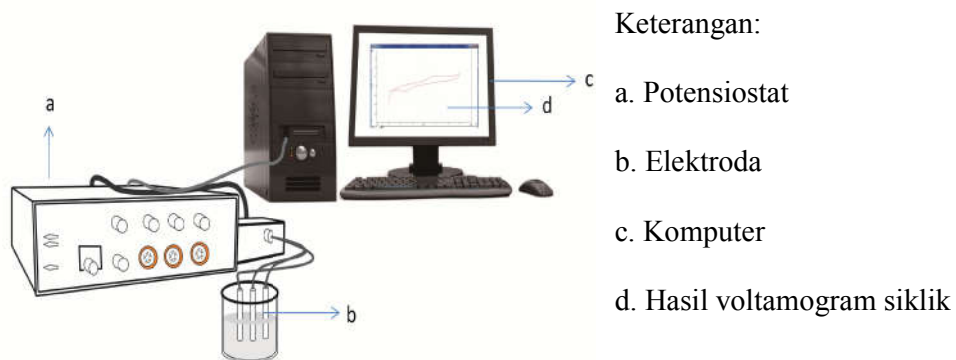
1. Menyiapkan dan merekatkan serbuk zeolit pada kaca, memasang pada tempat berupa lempeng tipis berbentuk persegi panjang (*sample holder*).
2. Meletakkan serbuk zeolit pada *sample stand* di bagian goniometer.
3. Melakukan pengukuran melalui perangkat lunak pada komputer pengontrol, meliputi penentuan mode ulasan, rentang sudut, kecepatan *scan* cuplikan, pemberian nama cuplikan, dan memberi nomor urut *file* data.
4. Mengoperasikan alat difraktometer dengan menekan perintah “*start*” pada menu komputer, dimana sinar-X akan meradiasi sampel yang terpancar dari target dengan panjang gelombang tertentu.
5. Melihat hasil difraksi pada komputer dan mencetak hasil intensitas difraksi pada sudut  $2\theta$  melalui mesin pencetak.

- **Voltametri Siklik**

Karakterisasi menggunakan voltametri siklik bertujuan untuk mendapatkan informasi hubungan elektroda kerja dengan analit dan elektrolit pendukung yang diperoleh dari pengukuran arus fungsi potensial. Langkah-langkah penggunaan voltametri siklik adalah:

1. Menyiapkan instrumen potensiostat.
2. Membersihkan semua elektroda dengan menggunakan akuades.
3. Menghidupkan saklar potensiostat, jika semua parameter bertanda hijau maka sel sudah siap digunakan.
4. Memasukkan larutan Kalium Hidroksida Ftalat (KHP) 0,1 M dan larutan elektrolit NaOH sebanyak 0,1 M dalam sel elektrolisis, serta memasang elektroda kerja (zeolit) yang telah dipadukan dengan karbon pada salah satu sisinya, elektroda anoda Ag/AgCl, dan katoda Pt dan menghubungkan ke instrumen potensiostat menggunakan penjepit buaya.
5. Mengatur jendela potensial dan laju pengulasan pada program *Edaq Echem* sehingga terbentuk voltamogram siklik.
6. Menonaktifkan instrumen potensiostat jika pengambilan data telah selesai.

Adapun skema pengukuran voltametri siklik dapat dilihat pada Gambar 9.

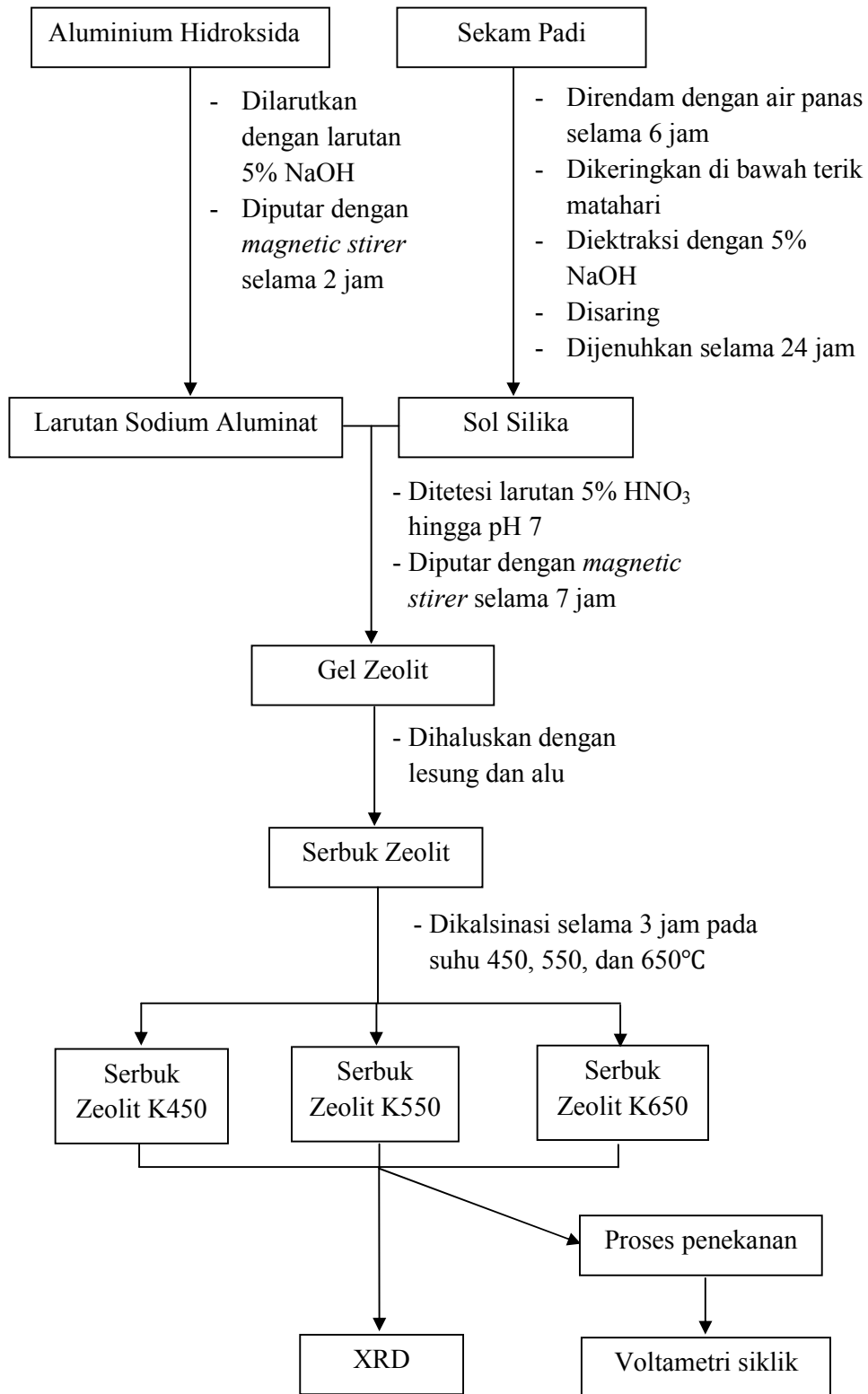


Gambar 9. Skema pengukuran voltametri siklik.

**D. Diagram Alir**

Secara garis besar tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini disajikan dalam diagram alir pada Gambar 10.





Gambar 10. Diagram alir penelitian.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Hasil uji XRD menunjukkan bahwa sampel zeolit K450 didapatkan fasa kuarsa dan bohmit, zeolit K550 dan K650 didapatkan berupa fasa kristobalit, stishovite, dan gamma-alumina.
2. Semakin tinggi suhu kalsinasi maka semakin tinggi pula nilai  $k_0$  yang dihasilkan.
3. Reaksi elektrokimia yang terjadi di dalam penelitian ini ialah bersifat irreversibel yang dapat terlihat pada bentuk kurva dengan perbedaan nilai puncak oksidasi-reduksi sebesar 240-390 mV, dan nilai  $k_0$  ketiga zeolit pada laju ulas 1 V/s adalah 29,658; 36,398; 77,110 cm/s.

### B. Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah

1. Dilakukan variasi perbandingan komposisi Si/Al agar zeolit dapat terbentuk secara optimal.
2. Variasi jenis dan konsentrasi larutan elektrolit untuk mengetahui nilai  $k_0$  yang optimal.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al'myasheva, O.V., Korytkova, E.N., Maslov, A.V., and Gusarov, V.V. 2005. Preparation of Nanocrystalline Alumina under Hydrothermal Conditions. *Inorganic Material*. Vol.41, No.5. Pp 460-467.
- Aristov, N., and Habekost, A. 2015. Cyclic Voltammetry - A Versatile Electrochemical Method Investigating Electron Transfer Processes. *World Journal of Chemical Education*. Vol.3, No.5. Pp 115-119.
- Auerbach, S., Carrado, K., and Dutta, P. 2003. *Hand Book of Zeolite Science and Technology*. Marcel Dekker Inc. New York. Pp 3-5.
- Awaji, N., Ohkubo, S., Nakanishi, T., Aoyama, T., Sugita, Y., Takasaki, K., and Komiya, S. 1997. Thermal Oxide Growth at Chemical Vapor Deposited SiO<sub>2</sub>/Si Interface during Annealing Evaluated by Difference X-Ray Reflectivity. *Appl. Phys. Lett.* Vol.71. Pp 1954-1956.
- Barmawi, I., Taer, E., dan Umar, A.A. 2011. Efek Penumbuhan Nanopartikel Platinum pada Elektroda Karbon terhadap Prestasi Superkapasitor. *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia*. Vol.11, No.1. Hal 1-5.
- Barrer, R.M. 1979. *Chemical Nomenclature and Formulation of Compositions of Synthetic and Natural Zeolite*. Pergamon Press. London. Pp 1091-1100.
- Bekkum, H.V., Flanigen, E.M., Jacobs, P.A., and Jansen, P.A. 2001. *Studies in Surface Science and Catalys: Introduction to Science and Practice 2<sup>nd</sup> Completely Revised and Expanded Edition*. Elsevier Science. Netherland. Pp 11-14.
- Bhavorntanayod, C., and Rungrojchaipon, P. 2009. Synthesis of Zeolite a Membrane from Rice Husk Ash. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. Vol.19, No.2. Pp 79-83.
- Bodisova, K., Pach, L., and Kovar, V. 2004. Influence of the Preferred Orientation of Boehmite Crystallites on  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Crystallization. *Ceramic Silikaty*. Vol.1. Pp 34-39.

- Buckley, A.M., and Greenblatt, M. 1994. *The Sol Gel Preparation of Silica Gels*. Wright and Rieman Laboratories, Rutgers. The State University of New Jersey: Piscataway. Vol.71, No.7. Pp 599-602.
- Burke, A. 2000. Ultracapacitors: Why, How, and Where is the Technology. *Journal of Power Sources*. Vol.91. Pp 37-50.
- Chiu, K.F., Su, S.H., Leu, H.J., and Huang, W.C. 2015. LiFePO<sub>4</sub>-xN<sub>y</sub> Thin Film Electrodes Coated on Carbon Fiber-Modified Current Collector for Pseudocapacitor. *Thin Solid Film*. Vol.596. Pp 34-38.
- Chu, A. and Braatz, P. 2002. Comparison of Commercial Supercapacitors and High Power Lithium-ion Batteries for Power-Assist Applications in Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Power Source*. Vol. 112. Pp 236-246.
- Conway, B.E. 1999. *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Kluwer-Plenum. New York. Pp 11-12.
- Della, V.P., Kuhn, I., and Hotza, D. 2002. Rice Husk Ash an Alternate Source for Active Silica Production. *Journal Materials Letters*. Vol.57. Pp 818-821.
- Dominic M.C.D., Begum, S.P.M., and Joseph, R. 2013. Synthesis, Characterization and Application of Rice Husk Nanosilica in Natural Rubber. *International Journal of Science, Environment, and Technology*. Vol.2, No.5. Pp 1027-1035.
- Efrhenrycx dan Surya, G.G. 2012. Konsep Produk Isi Ulang Baterai yang Ramah Lingkungan terhadap Alat Komunikasi Elektronik dapat Memudahkan Para Pemakai. *Inosains*. Vol.7, No.2. Hal 69-79.
- Faizul, C.P., Abdullah, C., and Fazlul, B. 2013. Review of Extraction of Silica from Agricultural Waste using Leaching Treatment. *Advance Material Research*. Vol.626. Pp 997-1000.
- Fernandez, L.C. 2009. Electro-Catalytic Reactions. (*Disertation*). The University of Hull. Pp 30.
- Fuadi, A.M., Musthofa, M., Harismah, K., Haryanto, dan Hidayati, N. 2006. Pembuatan Zeolit Sintetis dari Sekam Padi. *Simposium Nasional Rapi XI FT UMS*. Hal K55-K62.
- Gidwani, Bhagwani, A., and Rohra, N. 2014 Supercapacitor: The Near Future of Batteries. *International Journal of Engineering Inventions*. Vol.4, No.5. Pp 22-27.
- Gosser, D.K. 1993. *Cyclic Voltammetry: Simulation and Analysis of Reaction Mechanism*. VCH Publishers Inc. New York. Pp 31-43.

- Haag, W.O., Lago, R.M., and Weisz, P.B. 1984. The Active Site of Acidic Aluminosilicate Catalysts. *Nature*. Vol.309. Pp 589-591.
- Halper, M., and Ellenbogen, S. 2006. *Supercapacitor: A Brief Overview*. Virginia, USA: The MITRE Corporation. Pp 1-14.
- Hanudin, E., and Triyatmo, B. 2004. Improvement of Cation Exchange Capacity of Natural Zeolite with Alkali Treatments. *Jurnal Zeolit Indonesia*. Vol.3, No.1. Pp 25-29.
- Hari, B., Hendriyana, Widyastuti, E., dan Handayani, H.D. 2015. Tinjauan Pengaruh Zeolit terhadap Laju Korosi Baja Karbon dalam Medium Asam Mineral ( $H_2SO_4$ ) dan Minuman Berkarbonasi. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"; Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*. Hal 1-6.
- Heinze, J. 1984. Cyclic Voltammetry - "Electrochemical Spectroscopy". *Angewandte Chemie International Edition in English*. Vol.23, No.11. Pp 831-918.
- Hoeven, M.V.D. 2014. *Technology Roadmap Energy Storage*. International Energy Agency. Paris. Pp 6.
- Hunt, L.P., Dismukes, J.P., Amick, J.A., Schei, A., and Larsen, K. 1984. Rice Hulls as a Raw Material for Producing Silicon. *Journal of the Electrochemical Society*. Vol.131. Pp 1683-1686.
- Jenkins, R. 2000. *X-Ray Technique: Overview - Encyclopedia of Analytical Chemistry*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. Pp 13269-13288.
- Ju, Y., Tang, J.A., Zai, K., Meng, Y., Wang, C., Chen, G., Wei, Y., and Gao, Y. 2016.  $SiO_x/C$  Composite from Rice Husks as an Anode Material for Lithium-Ion Batteries. *Electrochemical Acta*. Vol.1, No.95. Pp 1-25.
- Khalifah, S.N., dan Didik, P. 2008. Sintesis dan Karakterisasi ZSM-5 Mesoporous dengan Variasi Rasio  $SiO_2/Al_2O_3$ . *Jurnal Zeolit Indonesia*. Vol.7, No.2. Hal 96-101.
- Khemthong, P., Prayoonpokarach, S., and Wittayakun, J. 2007. Synthesis and Characterization of Zeolite LSX from Rice Husk Silica. *Suranaree Journal Science Technology*. Vol.14, No.4. Pp 367-379.
- Kim, I.H., and Kim, K. B. 2001. Ruthenium Oxide Thin Film Electrodes for Supercapacitors. *Electrochemical and Solid State Letter*. Vol.4, No.5. Pp 62-64.

- Klingler, R.J., and Kochi, J.K. 1981. Electron - Transfer Kinetics from Cyclic Voltammetry, Quantitative Description of Electrochemical Reversibility. *The Journal of Physical Chemistry*. Vol.85, No.12. Pp 1731-1741.
- Korenblit, Y. 2009. Electrochemical Characterization of Ordered Mesoporous Carbide - Derived Carbon. (*Thesis*). Georgia Institute of Technology.
- Kotz, R., and Carlen, M. 2000. Principles and Applications of Electrochemical Capacitors. *Electrochemical Acta*. Vol.45, No.15. Pp 2483-2498.
- Kumar, A., Mohanta, A., Kumar, D., and Parkash, O. 2012. Properties and Industrial Applications of Rice Husk: A Review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. Vol.2. Pp 86-90.
- Le Coz, F., Arurault, L., Fountorbes, S., Vilar, V., Datas, L., and Winterton, P. 2010. Chemical Composition and Structural Changes of Porous Templates Obtained by Anodizing Aluminium in Phosphoric Acid Electrolyte. *Open Archive Toulouse Archive Ouverte*. Vol.42. Pp 227-233.
- Liani, P.H. 2012. Karakteristik Struktur dan Mikrostruktur Zeolit X yang Disintesis dari Silika Sekam Padi dan Alumina dengan Metode Hidrotermal. (*Skripsi*). Universitas Lampung.
- Miller, J.,R., and Simon, P. 2008. Fundamental of Electrochemical Capacitor Design and Operation. *The Electrochemical Social Interface*. Pp 31-32.
- Mulyani, R., Buchari, I. Noviandri, dan Ciptani. 2012. Studi Voltametri Siklik Sodium Dedocyl Benzen Sulfonat dalam Berbagai Elektroda dan Pendukung. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*. Vol.15, No.1. Hal 51-56.
- Munekawa, S. 1988. Application of X-Ray Diffraction Techniques to the Semiconductor Field. *The Rigaku Journal*. Vol.6, No.2. Pp. 31-34.
- Muresan, L.M. 2011. Zeolite - Modified Electrodes with Analytical Applications. *Journal of Pure Application Chemistry*. Vol.83, No.2. Pp 325-343.
- Nicholson, R.S. 1965. Theory and Application of Cyclic Voltammetry for Measurement of Electrode Reaction Kinetics. *Analytical Chemistry*. Vol.37, No.11. Pp 1351-1355.
- Nugraha, S., dan Setiawati, J. 2001. Peluang Agribisnis Arang Sekam. Balai Pasca Panen Pertanian. Jakarta. Hal.1-2.
- Nugroho, D.W. 2015. Studi Desain Power Bank dengan Menggunakan Panel Surya sebagai Sumber Energi Alternatif. *Jurnal Teknologi dan Informatika*. Vol.5, No.2. Hal 120-132.

- Pandolfo, A.G., and Hollenkamp, A.F. 2006. Carbon Properties and Their Role in Supercapacitors. *Journal of Power Sources*. Vol.157. Pp 11-27.
- Rahman, I.A., and Padavettan, V. 2012. Synthesis of Silica Nanoparticles by Sol-Gel: Size - Dependent Properties, Surface Modification, and Applications in Silica - Polymer Nanocomposites - A Review, Hindawi Publishing Corporation. *Journal of Nanomaterials*. Vol.2012. Pp 1-15.
- Ramchandra, P. 2016. Potential Applications of Rice Husk Ash Waste from Rice Husk Biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.53. Pp 1468-1485.
- Richman, M. H. 1967. *An Introduction to the Science of Metals*. Blaisdell Publishing Company. USA. Pp 78-79.
- Ryu, K.S., and Kim, K.M. 2002. Symmetric Redox Supercapacitor with Conducting Polyaniline Electrodes. *Journal of Power Sources*. Vol.103, No. 2. Pp 305-309.
- Sembiring, S., dan Karo-Karo, P. 2007. Pengaruh Suhu Kalsinasi terhadap Karakteristik Termal dan Mikrostruktur Silika Sekam Padi. *Jurnal Sains MIPA*. Vol.13, No.3. Pp 233-239.
- Shukla, A.K., Sampath, S., and Vijayamohanan, K. 2000. Electrochemical Supercapacitors: Energy Storage Beyond Batteries. *Current Science*. Vol.79, No. 12. Pp 1656-1661.
- Shinohara, Y., and Kohyama, N. 2004. Quantitative Analysis of Tridymite and Cristobalite Crystallized in Rice Husk Ash by Heating. *Industrial Health*. Vol.42. Pp 277-285.
- Taer, E., Mustika, W.S., Zulkifli, Syam, D.M., dan Taslim, R. 2015. Pengaruh Suhu Pengaktifan CO<sub>2</sub> terhadap Luas Permukaan Elektroda Karbon dan Sifat Kapasitansi Sel Supercapacitor dari Karet Kayu. *Prosiding Seminar Nasional Fisika Universitas Andalas*. Hal 96-100.
- Vyas, R.N., and Wang, B. 2010. Electrochemical Analysis of Conducting Polymer Thin Films. *International Journal of Molecular Sciences*. Vol.11. Pp 1956-1972.
- Warren, B.E., and Dahl, L. 2014. <http://www.accessscience.com/sci-hub/bz/content/750600>. Diakses pada tanggal 25 Mei 2016. Pukul 20.00 WIB.
- Wu, F.C., Tseng, R.L., and Hu, C.C. 2004. Physical and Electrochemical Characterization of Activated Carbon Prepared from Firewoods for Supercapacitors. *Journal Power Source*. Vol.13, No.8. Pp 351.

- Wu, H.C., Lin, Y.P., Lee, E., Lin, W.T., Hu, J.K., Chen, H.C., Wu, N.L. 2009. High Performance Carbon - Based Supercapacitor Using Al Current-Collector with Conformal Carbon Coating. *Material Chemistry and Physics*. Vol.117. Pp 294-300.
- Xu, T., Wang, W., Gordin, M.L., Wang, D., and Choi, D. 2010. Lithium-Ion Batteries for Stationary Energy Storage. *Journal of Material*. Vol.62, No.9. Pp 24-30.
- Zhong, S., Chuanxing, Z., and Dapeng, C. 2014. Zeolitic Imidazolate Framework-Derived Nitrogen-Doped Porous Carbons as High Performance Supercapacitor Electrode Materials. *International Journal Carbon*. Vol.12, No.64. Pp 1-22.