



TESIS - SK142502

**PENGARUH PENAMBAHAN SUKROSA TERHADAP  
MIKROPOROSITAS DAN KEMAMPUAN ADSORPSI  
CO<sub>2</sub> KARBON TERTEMLAT ZEOLIT-X**

**IBNU MUHARIAWAN RESTUAJI  
NRP. 1414 201 034**

**DOSEN PEMBIMBING  
NURUL WIDIASTUTI, M.Si., Ph.D.**

**PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN KIMIA FISIK  
JURUSAN KIMIA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**



---

THESIS - SK142502

**EFFECT OF VARIOUS AMOUNT OF SUCROSE ON  
THE MICROPOROSITY OF ZEOLITE-X  
TEMPLATED CARBON AND CO<sub>2</sub> ADSORPTION  
CAPACITY**

**IBNU MUHARIAWAN RESTUAJI  
NRP. 1414 201 034**

**SUPERVISOR  
NURUL WIDIASTUTI, M.Si., Ph.D.**

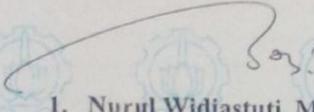
**MAGISTER PROGRAM  
EXPERTISE FIELD OF PHYSICAL CHEMISTRY  
CHEMISTRY OF DEPARTMENT  
FACULTY MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Sains (M.Si)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

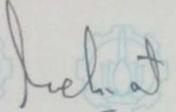
Oleh :  
Ibnu Muhariawan Restuaji  
NRP. 1414 201 034

Tanggal Ujian : 31 Mei 2017  
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh :

  
1. Nurul Widiastuti, M.Si, Ph.D.  
NIP. 19710425 199412 2 001

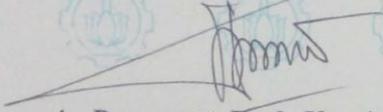
(Pembimbing)

  
2. Lukman Atmaja, M.Si, Ph.D.  
NIP. 19610816 198903 1 001

(Penguji)

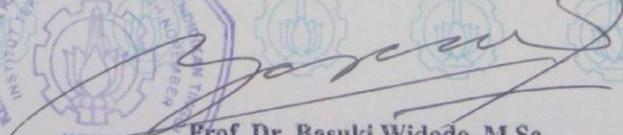
  
3. Dr. Fehimah Martak, M.Si  
NIP. 1966 0703 199102 2 001

(Penguji)

  
4. Dr. rer.nat. Fredy Kurniawan, M.Si  
NIP. 19740428 199802 1 001

(Penguji)

Dekan  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

  
Prof. Dr. Basuki Widodo, M.Sc.  
NIP. 19650605 198903 1 002

**PENGARUH PENAMBAHAN SUKROSA TERHADAP  
MIKROPOROSITAS DAN KEMAMPUAN ADSORPSI CO<sub>2</sub> KARBON  
TERTEMLAT ZEOLIT-X**

Nama Mahasiswa : Ibnu Muhariawan Restuaji  
NRP : 1414 201 034  
Pembimbing : Nurul Widiastuti, M.Si., Ph.D

**ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis karbon tertemplat zeolit-X (KTZ-X) yang memiliki struktur teratur, mikroporositas tinggi dan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> tinggi dengan dilakukan variasi penambahan sukrosa. Rasio massa sukrosa/zeolit-X yang digunakan adalah 0,5; 0,75; 1 dan 1,25. Hasil analisis menunjukkan bahwa KTZ dengan rasio massa sukrosa/zeolit-X 0,5 berhasil mereplika negatif struktur zeolit-X, yang dikonfirmasi pada  $2\theta = 6^\circ$  dan mikrograf SEM dengan morfologi menyerupai kristal oktahedral zeolit-X. KTZ-X 0,5 juga menunjukkan mikroporositas tertinggi dengan ukuran pori rata-rata 2,55 nm dan volume mikropori 0,149 cm<sup>3</sup>/g. Hasil uji adsorpsi CO<sub>2</sub> dengan metode gravimetri pada suhu 30 °C dan tekanan 1 bar menunjukkan KTZ-X 0,5 memiliki kapasitas adsorpsi tertinggi mencapai 33,55 %berat. KTZ-X 0,75; 1; dan 1,25 memiliki kapasitas adsorpsi masing-masing mencapai 3,82; 27,23; dan 26,48 %berat. Hasil ini menunjukkan adanya pengaruh penambahan sukrosa terhadap mikroporositas dan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> pada KTZ-X.

**Kata kunci** : Sukrosa, karbon tertemplat zeolit-X, adsorpsi karbon dioksida

# **EFFECT OF VARIOUS AMOUNT OF SUCROSE ON THE MICROPOROSITY OF ZEOLITE-X TEMPLATED CARBON AND CO<sub>2</sub> ADSORPTION CAPACITY**

Name : Ibnu Muhariawan Restuaji  
Student Identity Number : 1414 201 034  
Supervisor : Nurul Widiastuti, M.Si., Ph.D

## **ABSTRACT**

The aim of this research is to synthesis zeolite-X templated carbon (ZTC-X) with an ordered structure, a high microporosity and a high CO<sub>2</sub> adsorption capacity at various amount of sucrose. The mass ratio of sucrose/zeolite-X was varied at 0.5; 0.75; 1; and 1.25. The results shows that ZTC-X, with the mass ratio of sucrose/zeolite-X 0.5, possess an ordered negative replica structure of zeolite-X. It was confirmed by XRD peak at  $2\theta = 6^\circ$  and the image of SEM shows that particles have an octahedral crystal structure like zeolite-X. Besides, the ZTC-X 0.5 exhibits higher microporosity, according to average pore size of 2.55 nm and micropore volume of 0.149 cm<sup>3</sup>/g. The ZTC-X 0.5 also has a higher CO<sub>2</sub> adsorption capacity (33,55 wt%) by gravimetric method. Meanwhile, The CO<sub>2</sub> adsorption capacity of ZTC-X 0.75; 1; and 1.25 are 2.82; 27.23; and 26.48 wt%, respectively. It indicates that the various amount of sucrose effecting a microporosity and CO<sub>2</sub> adsorption capacity of ZTC-X.

**Keywords :** *Sucrose, zeolite-X templated carbon, Carbon dioxide adsorption*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penyusun dapat menyelesaikan penulisan tesis yang berjudul **“PENGARUH PENAMBAHAN SUKROSA TERHADAP MIKROPOROSITAS DAN KEMAMPUAN ADSORPSI CO<sub>2</sub> KARBON TERTEMLAT ZEOLIT-X”** ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penyusunan tesis ini dapat terselesaikan tentunya tidak lepas dari bantuan berbagai pihak yang telah memberikan saran, dukungan dan nasehat. Pada kesempatan ini secara khusus penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada semua pihak yang telah berkenan membantu, baik secara moril ataupun materil, untuk itu penulis sangat berterima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Nurul Widiastuti, M.Si, Ph.D, selaku dosen pembimbing, atas segala upaya dalam membimbing dengan sabar, mengarahkan, memberikan logika berpikir, serta memberikan bekal ilmu yang sangat bermanfaat selama penulis melakukan penelitian hingga terselesaikannya penulisan tesis ini
2. Prof. Mardi Santoso, Ph.D, selaku Kaprodi Magister Kimia ITS
3. Prof. Didik Prasetyoko, M.Sc, selaku Ketua Departemen Kimia FMIPA–ITS
4. Dr. Ir. Susianto, DEA, selaku Kepala Laboratorium Studi Energi dan Rekayasa LPPM-ITS
5. Dr. Djoko Hartanto, MS., selaku Kepala Laboratorium Kimia Material dan Energi
6. Bapak dan Ibu Dosen Departemen Kimia FMIPA–ITS atas bekal ilmu, nasehat dan motivasi yang telah diberikan selama ini
7. Analis Laboratorium Studi Energi dan Rekayasa Material LPPM-ITS
8. Bapak dan Ibu tercinta, serta adek dan keluarga besar atas dukungan, motivasi, serta doa yang senantiasa dipanjatkan selama ini
9. Teman-teman KF 2014 (Romaya, Mada, Matius dan Anggita), teman-teman C27 (Anang, Echy, Totok, Reza, Zamzam) yang selalu memberikan dukungan
10. Teman-teman S1,S2,S3 Kimia FMIPA-ITS, teman-teman tim riset yang selalu memberi semangat, Rika, Triyanda, Arini, Intan, Puspita, Rachma, Masrul serta semua pihak yang telah memberi dukungan dan membantu dalam penyelesaian penyusunan tesis ini

Penulis menyadari bahwa masih banyak terdapat kekurangan dalam penulisan tesis ini. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis dan semua pihak.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar belakang .....	1
1.2 Permasalahan .....	4
1.3 Tujuan .....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
2.1 Karbon dioksida .....	7
2.2 Pemisahan Gas CO <sub>2</sub> .....	10
2.3 Material Adsorpsi.....	11
2.4 Zeolit-X.....	14
2.5 Material Karbon .....	16
2.6 Karbon Tertemplat Zeolit .....	17
2.7 Sukrosa.....	19
2.8 Metode Sintesis Karbon Tertemplat Zeolit.....	20
2.8.1 Sintesis Zeolit-X Sebagai Templat.....	20
2.8.2 Impregnasi Prekursor Karbon pada Templat Zeolit .....	21
2.8.3 Karbonisasi Templat .....	22
2.8.4 Penghilangan Templat .....	22
2.9 Karakterisasi .....	23
2.9.1 X-Ray Diffraction (XRD).....	23
2.9.2 Scanning Electron Microscope (SEM).....	25

2.9.3 Transmission Electron Microscope (TEM).....	26
2.9.4 Thermogravimetric Analysis (TGA).....	27
2.9.5 Analisis Adsorpsi Gas N <sub>2</sub> .....	28
2.10 Penentuan Kapasitas Adsorpsi CO <sub>2</sub> .....	29
2.11 Kinetika Adsorpsi.....	29
2.11.1 Kinetika Orde Satu Semu.....	30
2.11.2 Kinetika Orde Dua Semu.....	30
2.11.3 Difusi Intra Partikel.....	31
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	<b>33</b>
3.1 Alat dan Bahan .....	33
3.1.1 Alat.....	33
3.1.2 Bahan.....	33
3.2 Prosedur Kerja.....	33
3.2.1 Sintesis Zeolit-X.....	33
3.2.2 Sintesis Karbon Tertemplat Zeolit-X.....	34
3.2.3 Karakterisasi.....	35
3.2.3.1 XRD.....	35
3.2.3.2 SEM.....	35
3.2.3.3 TEM.....	36
3.2.3.4 TGA.....	36
3.2.3.5 Isotermal adsorpsi-desorpsi Gas N <sub>2</sub> dengan metode BET.....	36
3.2.4 Penentuan Kapasitas Adsorpsi-Desorpsi Gas CO <sub>2</sub> .....	37
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>39</b>
4.1 Sintesis dan Karakterisasi Karbon Tertemplat Zeolit-X.....	39
4.1.1 Pengaruh Rasio Massa Sukrosa/Zeorlit-X Terhadap Struktur KTZ-X.....	44
4.1.2 Pengaruh Rasio Massa Sukrosa/Zeorlit-X Terhadap Morfologi dan Karakterisasi TEM KTZ-X.....	45
4.1.3 Pengaruh Rasio Massa Sukrosa/Zeorlit-X Terhadap Kestabilan Termal KTZ-X.....	48
4.1.4 Pengaruh Rasio Massa Sukrosa/Zeorlit-X Terhadap Sifat	

Permukaan KTZ-X.....	49
4.2 Pengujian Kapasitas Adsorpsi-Desorpsi CO <sub>2</sub> pada KTZ-X .....	57
4.2.1 Adsorpsi CO <sub>2</sub> pada KTZ-X.....	57
4.2.2 Desorpsi CO <sub>2</sub> pada KTZ-X.....	60
4.2.3 Model Kinetika Adsorpsi KTZ-X.....	61
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	65
5.1 Kesimpulan .....	65
5.2 Saran.....	66
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	67
<b>LAMPIRAN</b> .....	77

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sumber aktivitas yang menghasilkan emisi gas CO <sub>2</sub> dunia sepanjang tahun 2011.....	7
Gambar 2.2	Emisi gas CO <sub>2</sub> dari bahan bakar fosil yang dihasilkan selama 6 dekade terakhir.....	8
Gambar 2.3	Tiga konsep pendekatan teknologi penangkap dan penyimpanan CO <sub>2</sub> .....	9
Gambar 2.4	Pembentukan struktur kerangka zeolit faujasit (X dan Y).....	15
Gambar 2.5	Struktur kerangka super ( <i>supercage</i> ) zeolit-X.....	15
Gambar 2.6	Skema sintesis KTZ yang mereplika struktur negatif zeolit.....	17
Gambar 2.7	Struktur sukrosa (2-O-( $\alpha$ -D-Glukopiranosil)- $\beta$ -D-fruktofuranosida).....	19
Gambar 2.8	Pola XRD zeolit 13X dan karbon tertemplat zeolit-X dengan sumber karbon Furfuril alkohol pada variasi laju pemanasan (5, 10 dan 15 °C/menit).....	24
Gambar 2.9	Mikrograf SEM (a) zeolit 10X dan (b) karbon tertemplat zeolit 10X.....	25
Gambar 2.10	Skema komponen TEM .....	26
Gambar 2.11	Kurva TGA zeolit 13X; komposit zeolit/karbon (FA-ztc-co) dan karbon tertemplat zeolit (FA-ztc1).....	27
Gambar 2.12	Skema uji adsorpsi gas dengan gravimetri.....	29
Gambar 2.13	Kurva orde satu semu .....	30
Gambar 2.14	Kurva orde dua semu .....	31
Gambar 2.15	Kurva difusi intra partikel .....	32
Gambar 3.1	Rangkaian alat metode gravimetri, (a) proses adsorpsi CO <sub>2</sub> dan (b) proses desorpsi CO <sub>2</sub> .....	38
Gambar 4.1	Padatan putih zeolit-X setelah proses hidrotermal .....	39
Gambar 4.2	Pola XRD zeolit-X standar JCPDS No.00-038-0237 (a) dan zeolit-X hasil sintesis (b).....	40
Gambar 4.3	Mikrograf SEM zeolit-X.....	40

Gambar 4.4	Padatan KTZ-X setelah pencucian dengan asam .....	42
Gambar 4.5	Pola XRD (a) zeolit-X; (b) komposit karbon/zeolit-X sebelum dicuci dengan asam; dan (c) KTZ-X .....	42
Gambar 4.6	Kurva TGA (---) dan DSC (---) KTZ-X .....	43
Gambar 4.7	Pola XRD KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25 .....	44
Gambar 4.8	Mikrograf SEM : (a) zeolit-X; (b) KTZ-X 0,5; (c) KTZ-X 0,75; (d) KTZ-X 1; (e) KTZ-X 1,25 dan mikrograf TEM : (f) KTZ-X 0,75; (g) KTZ-X 1; (h) KTZ-X 1,25 .....	47
Gambar 4.9	Kurva TGA KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25.....	48
Gambar 4.10	Grafik isothermal adsorpsi-desorpsi gas N <sub>2</sub> pada KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25.....	50
Gambar 4.11	Mekanisme adsorpsi-desorpsi gas N <sub>2</sub> pada permukaan mesopori KTZ-X .....	51
Gambar 4.12	Mekanisme adsorpsi gas N <sub>2</sub> pada permukaan mikropori KTZ-X .....	52
Gambar 4.13	Diagram batang hubungan rasio penambahan sukrosa/zeolit dengan luas permukaan KTZ-X .....	53
Gambar 4.14	Distribusi ukuran pori dengan permodelan BJH karbon tertemplat zeolit-X .....	54
Gambar 4.15	Distribusi ukuran pori permodelan HK : KTZ-X 0,5 (■); KTZ-X 0,75 (●); KTZ-X 1 (▲); dan KTZ-X 1,25 (▼) .....	55
Gambar 4.16	Diagram batang hubungan antara rasio massa sukrosa/zeolit dengan ukuran pori rata-rata KTZ-X .....	56
Gambar 4.17	Grafik adsorpsi CO <sub>2</sub> pada KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25 .....	58
Gambar 4.18	Grafik desorpsi CO <sub>2</sub> pada KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25 .....	61
Gambar 4.19	Plot model kinetika orde satu semu KTZ-X.....	62
Gambar 4.20	Plot model kinetika orde dua semu KTZ-X .....	64
Gambar 4.21	Plot model kinetika difusi intra partikel KTZ-X .....	64

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik adsorben material pori; a) luas permukaan ( $S_{\text{BET}}/\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ), b) diameter pori (nm), c) kapasitas adsorpsi (mmol/g) .....	12
Tabel 2.2	Kapasitas adsorpsi $\text{CO}_2$ pada beberapa jenis zeolit ; a = luas permukaan ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) ; b = volume total pori ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) ; c = kapasitas adsorpsi $\text{CO}_2$ (mmol/g) ; T = suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ) ; p = tekanan (bar).....	13
Tabel 2.3	Kemampuan adsorpsi gas karbon dioksida material karbon berpori.....	18
Tabel 2.4	Karakter permukaan karbon tertemplat zeolit dengan sukrosa sebagai prekursor karbon.....	20
Tabel 4.1	Sifat struktur permukaan KTZ-X hasil analisis isothermal adsorpsi gas $\text{N}_2$ dengan metode BET .....	53
Tabel 4.2	Hasil adsorpsi $\text{CO}_2$ KTZ-X .....	58
Tabel 4.3	Perbandingan kemampuan adsorpsi $\text{CO}_2$ dari beberapa material ..	59
Tabel 4.4	Hasil desorpsi $\text{CO}_2$ KTZ-X pada suhu $30^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 1 atm ..	61
Tabel 4.5	Parameter kinetika adsorpsi $\text{CO}_2$ dengan berbagai model .....	63

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Skema Kerja.....	77
	1. Sintesis Zeolit-X.....	77
	2. Sintesis Karbon Tertemplat Zeolit-X.....	78
	3. Uji Adsorpsi-Desorpsi CO <sub>2</sub> .....	79
Lampiran B	Perhitungan Larutan Sintesis Zeolit-X.....	80
	1. Komposisi bahan.....	80
	2. Rasio komposisi molar dari zeolit-X.....	80
	3. Perhitungan massa yang dibutuhkan pada masing-masing bahan.....	80
Lampiran C	Data Difraktogram XRD Zeolit-X.....	83
Lampiran D	Data Difraktogram Zeolit-X Standar JCPDS 038-0237.....	84
Lampiran E	Data Difraktogram Komposit Karbon/Zeolit-X.....	85
Lampiran F	Difraktogram KTZ-X 0,5.....	86
Lampiran G	Difraktogram KTZ-X 0,75.....	87
Lampiran H	Difraktogram KTZ-X 1.....	88
Lampiran I	Difraktogram KTZ-X 1,25.....	89
Lampiran J	Data TGA KTZ-X.....	90
Lampiran K	Data Isotermal Adsorpsi-Desorpsi N <sub>2</sub> KTZ-X.....	92
Lampiran L	Pengujian Adsorpsi-Desorpsi CO <sub>2</sub> KTZ-X .....	94

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) merupakan salah satu penyebab munculnya masalah gas lingkungan terutama efek rumah kaca (*greenhouse gas effect*). Gas CO<sub>2</sub> yang teremisi dan terakumulasi dalam lapisan atmosfer menyebabkan pemanasan global, perubahan iklim, dan naiknya permukaan air laut (Kenarsari dkk., 2013). International Panel on Climate Change memprediksi bahwa hingga tahun 2100, gas CO<sub>2</sub> yang teremisi dalam atmosfer mencapai 570 ppm, akan menyebabkan kenaikan suhu global sekitar 1,9 °C dan peningkatan permukaan air laut hingga 38 m (Yang dkk., 2008). Emisi gas CO<sub>2</sub> umumnya berasal dari penggunaan bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam yang berlebih. Beberapa aktivitas yang memanfaatkan bahan bakar fosil sebagai sumber energi antara lain transportasi, pembangkit listrik dan panas, industri manufaktur, industri komersil dan rumah tangga. Aktivitas tersebut banyak menghasilkan emisi gas CO<sub>2</sub> yang dapat mencemari udara dan lapisan atmosfer.

Teknologi penangkap dan penyimpan CO<sub>2</sub> (*CO<sub>2</sub> capture and sequestration*) merupakan teknologi yang paling banyak dikembangkan untuk mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub>. Teknologi ini meliputi beberapa metode yaitu absorpsi, adsorpsi, membran dan kriogenik. Menurut Jacobson, (2008) metode absorpsi pada teknologi penangkap dan penyimpan CO<sub>2</sub> menggunakan prinsip reaksi antara gas CO<sub>2</sub> dan pelarut kimia seperti mono-, di-, tri-amin, di-isopropanol amin. Reaksi ini menghasilkan ikatan kimia yang sangat kuat antara molekul gas CO<sub>2</sub> dan pelarut. Berbeda dengan metode adsorpsi, dimana molekul gas CO<sub>2</sub> yang ditangkap berinteraksi secara fisisorpsi atau kemisorpsi terhadap permukaan adsorben padat seperti silika, zeolit atau karbon aktif (Choi dkk., 2009). Proses seleksi dan pemisahan molekul CO<sub>2</sub> pada metode membran ada beberapa tipe yaitu difusi, adsorpsi, *molecular sieve* dan transport ionik. Sedangkan prinsip pemisahan pada kriogenik yaitu kompresi dan pendinginan gas

alir, sehingga didapatkan CO<sub>2</sub> dalam kondisi cair dan kemurnian yang tinggi (Yang dkk., 2008).

Metode absorpsi dan kriogenik banyak digunakan dalam industri untuk meminimalisir emisi gas CO<sub>2</sub>. Salah satu metode absorpsi yang sering digunakan adalah *liquid sorbent* dengan Monoetanol amin (MEA) sebagai pelarut. Kelebihan utama *liquid sorbent* MEA adalah memiliki kemampuan absorpsi CO<sub>2</sub> mencapai 90% (Leung dkk., 2014). Namun regenerasi pelarut MEA membutuhkan konsumsi energi yang tinggi dan biaya besar. Selain itu, MEA termasuk pelarut organik yang sulit untuk didegradasi dan bersifat korosif terhadap lingkungan (Mondal dkk., 2012). Sedangkan pada kriogenik didapatkan CO<sub>2</sub> dengan kemurnian yang tinggi, namun proses ini memerlukan peralatan yang tidak sederhana dan biaya besar. Refrigerator diperlukan untuk kompresi dan pendinginan gas alir agar didapatkan CO<sub>2</sub> cair (Kenarsari dkk., 2013).

Membran dan adsorpsi merupakan metode yang sederhana dan tidak memerlukan biaya yang besar. Namun kemampuan penangkap CO<sub>2</sub> pada membran relatif lebih rendah dibandingkan tiga metode lain dan kemurnian CO<sub>2</sub> yang dihasilkan juga rendah. Selain itu efektifitas membran akan berkurang bila konsentrasi CO<sub>2</sub> pada gas alir kurang dari 20% (Mondal dkk., 2012). Sedangkan pada metode adsorpsi, meskipun kemampuan pemisahan CO<sub>2</sub> lebih rendah dibandingkan absorpsi dan kriogenik tetapi prosesnya berjalan secara reversibel dan tidak membutuhkan energi besar. Selain itu, waktu penyerapan berlangsung relatif cepat dan kemurnian CO<sub>2</sub> yang didapatkan mencapai 95% (Choi dkk., 2009). Oleh karena itu, pada penelitian ini adsorpsi dipilih sebagai metode untuk teknologi penangkap dan pemisahan gas CO<sub>2</sub>.

Adsorpsi merupakan metode alternatif untuk menangkap CO<sub>2</sub>. Pada adsorpsi terjadi proses penyerapan yang melibatkan interaksi antara molekul adsorbat dengan permukaan adsorben padat. Pada adsorpsi gas CO<sub>2</sub>, dibutuhkan adsorben dengan laju adsorpsi dan desorpsi yang cepat, kapasitas adsorpsi besar, mudah diregenerasi, stabil, dan kondisi operasinya mudah. Kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> suatu padatan dipengaruhi oleh sifat pori material tersebut. Beberapa material berpori yang telah dikembangkan sebagai adsorben antara lain silika, metal

organic framework (MOF), zeolit, dan karbon (Cuéllar-Franca dan Azapagic, 2015). Beberapa penelitian menunjukkan zeolit dan karbon lebih banyak digunakan sebagai adsorben karena lebih mudah diregenerasi, kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> tinggi, stabil, kondisi operasinya mudah dan biaya relatif terjangkau. Zeolit dan karbon dapat digunakan sebagai adsorben pada kondisi tekanan rendah dan suhu ruang (Bonenfant dkk., 2008).

Zeolit adalah material aluminosilikat yang memiliki struktur pori kerangka dengan ukuran pori sekitar 0,5 – 1,2 nm. Zeolit memiliki dua tipe pori yaitu mikropori (<2 nm) dan mesopori (2-50 nm) (Chester dan Derouane, 2009). Zeolit merupakan adsorben padat yang memiliki porositas tinggi. Diantara beberapa tipe lain, zeolit tipe X menunjukkan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> yang relatif tinggi yaitu sekitar 4 – 6 mmol/g (Wardani, 2014). Kemampuan adsorpsi zeolit-X dipengaruhi oleh porositasnya yang tinggi dan struktur pori yang teratur. Namun, luas permukaan zeolit relatif lebih rendah dibandingkan dengan adsorben lain seperti karbon. Karbon memiliki luas permukaan yang tinggi sekitar 400 – 1000 m<sup>2</sup>/g. Alabadi dkk., (2015) melaporkan bahwa karbon aktif yang dijadikan adsorben gas CO<sub>2</sub> memiliki luas permukaan hingga 1294 m<sup>2</sup>/g dan kapasitas adsorpsi sekitar 3,3 mmol/g. Karbon juga memiliki kemampuan regenerasi yang lebih baik dibandingkan zeolit (Chue dkk., 1995). Namun struktur pori karbon tidak teratur dan porositasnya rendah. Oleh karena itu, muncul gagasan untuk menjadikan zeolit sebagai templat pada karbon agar didapatkan material karbon dengan luas permukaan yang besar, struktur pori yang teratur, porositas dan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> yang tinggi.

Beberapa penelitian terdahulu telah melakukan sintesis karbon tertemplat zeolit dengan berbagai metode. Metode sintesis karbon tertemplat zeolit antara lain pirolisis, *chemical vapour deposition* (CVD), impregnasi dan metode *two-step* (Barata-Rodrigues dkk., 2003; Su dkk., 2004; Chen dkk., 2007). Impregnasi merupakan salah satu metode yang paling sederhana, mudah dan tidak membutuhkan peralatan yang rumit. Pada impregnasi, prekursor karbon ditambahkan dalam templat dan dipolimerisasi dengan cara pemanasan.

Kemudian suhu dinaikkan hingga sekitar 1000 °C untuk proses karbonisasi dan templat dihilangkan dengan pencucian menggunakan asam (Guan dkk., 2009).

Prekursor karbon yang digunakan dalam penelitian ini adalah sukrosa. Guan dkk., (2009) melakukan sintesis karbon tertemplat zeolit dengan sukrosa sebagai prekursor. Hasilnya menunjukkan karbon hasil templat memiliki luas permukaan spesifik 1500 m<sup>2</sup>/g, volume mikropori 60% dari volume pori total. Sukrosa digunakan sebagai prekursor karena memiliki *yield* karbon yang tinggi, ketersediaan cukup melimpah dan secara ekonomis lebih terjangkau dibandingkan prekursor karbon lain seperti furfural alkohol, asetronitril atau propilena.

Komposisi rasio prekursor karbon dan zeolit yang digunakan merupakan faktor yang sangat berpengaruh dalam sintesis karbon tertemplat zeolit. Kyotani dkk., (1997) melakukan sintesis karbon tertemplat zeolit-Y dengan metode CVD menggunakan rasio karbon/zeolit (g/g) 0,5 dan menghasilkan luas permukaan sekitar 1430 m<sup>2</sup>/g serta volume mikropori 0,57 cm<sup>3</sup>/g. Su dkk., (2004) mensintesis komposit furfural alkohol/zeolit NH<sub>4</sub>Y dengan rasio 4,5 menggunakan metode impregnasi dan CVD. Sintesis tersebut menghasilkan material karbon tertemplat dengan luas permukaan 1270 m<sup>2</sup>/g dan volume mikropori sekitar 0,579 cm<sup>3</sup>/g. Sedangkan Kayadoe, (2013) melakukan sintesis karbon tertemplat zeolit-NaY menggunakan variasi rasio karbon/zeolit 0,5 - 1,25 dengan teknik impregnasi sederhana. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa dengan rasio 1,25 menghasilkan luas permukaan sekitar 1560 m<sup>2</sup>/g dan volume mikropori 0,70 cm<sup>3</sup>/g. Berdasarkan studi literatur di atas, komposisi rasio pada rentang 0,5 – 2 menghasilkan luas permukaan dan volume mikropori yang tinggi. Namun, apabila rasio karbon/zeolit dinaikkan (>2) justru menurunkan luas permukaan dan volume mikroporinya. Oleh karena itu, pada penelitian ini rasio karbon/zeolit sekitar 0,5 – 1,25 digunakan untuk menghasilkan material dengan luas permukaan dan volume mikropori yang tinggi.

## **1.2. Permasalahan**

Karbon tertemplat zeolit-X merupakan material yang berpotensi untuk adsorpsi gas CO<sub>2</sub>. Berdasarkan bahasan di atas, faktor yang menentukan tingginya

kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> adalah luas permukaan dan mikroporositas. Oleh karena itu, pada penelitian ini dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

- a. Variasi rasio massa sukrosa/zeolit-X perlu ditentukan untuk mengetahui rasio massa yang tepat dalam menghasilkan karbon tertemplat zeolit-X dengan struktur yang teratur, volume mikropori yang tinggi dan ukuran pori yang kecil.
- b. Kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> pada karbon tertemplat zeolit-X perlu ditentukan, sehingga dapat diketahui korelasi antara mikroporositas dan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> karbon tertemplat zeolit-X.
- c. Bagaimana menentukan model kinetika adsorpsi CO<sub>2</sub> karbon tertemplat zeolit-X.

### **1.3. Tujuan**

Penelitian ini bertujuan untuk :

- a. Menentukan rasio massa sukrosa/zeolit-X yang dapat menghasilkan karbon dengan struktur yang lebih teratur, volume mikropori yang tinggi dan ukuran pori yang kecil.
- b. Mengetahui korelasi antara mikroporositas dan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> pada karbon tertemplat zeolit-X, yang telah disintesis dengan variasi rasio massa sukrosa/zeolit-X, dengan uji adsorpsi pada suhu 30 °C dan tekanan 1 atm.
- c. Menentukan model kinetika adsorpsi CO<sub>2</sub> pada karbon tertemplat zeolit-X

### **1.4. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini dilakukan dengan harapan dapat memberikan sumbangsih berupa pengetahuan tentang perkembangan adsorben dalam teknologi penangkap dan penyimpan gas CO<sub>2</sub>. Sintesis karbon tertemplat zeolit-X dengan variasi penambahan sukrosa diharapkan dapat dijadikan sebagai adsorben dalam mengatasi masalah pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh gas CO<sub>2</sub>. Selain itu, dengan adanya penelitian ini akan memberikan peluang bagi peneliti lain

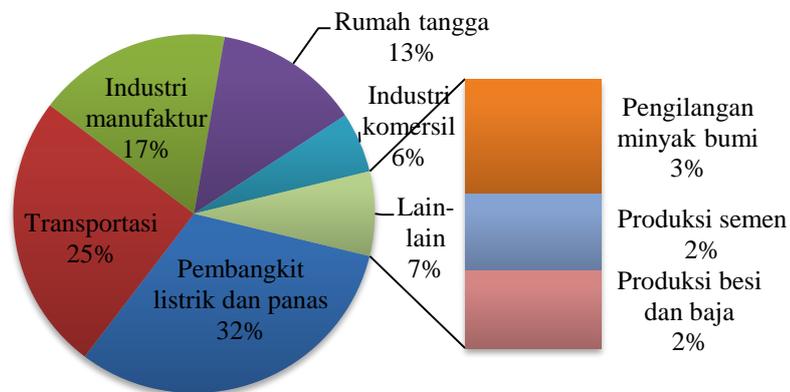
dalam mengembangkan dan meningkatkan kemampuan material karbon teremplat zeolit-X sebagai adsorben gas CO<sub>2</sub>.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Karbon dioksida

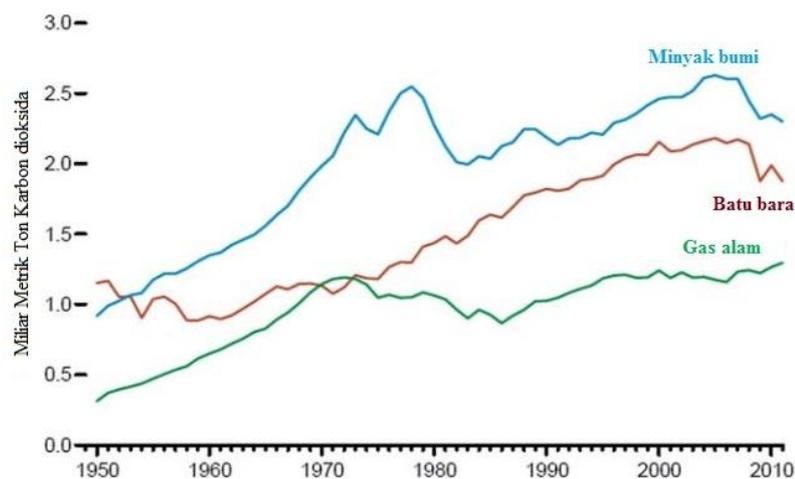
Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) adalah salah satu gas yang terdapat pada lapisan atmosfer bumi dengan konsentrasi total sekitar 0,033% atau 330 ppm (IEA, 2013). Secara umum, gas ini diperoleh dari pembakaran arang atau karbon yang terkandung dalam bahan bakar fosil dan disosiasi asam karbonat (IEA, 2013). Pembakaran bahan bakar fosil atau hidrokarbon yang dilakukan pada suhu tinggi akan menghasilkan gas karbon monoksida ( $\text{CO}$ ). Bila pembakaran dilakukan dengan intensitas besar dan waktu yang lama, gas karbon monoksida ( $\text{CO}$ ) akan bereaksi dengan oksigen ( $\text{O}_2$ ) membentuk gas karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ).

Sumber emisi gas  $\text{CO}_2$  banyak dihasilkan dari aktivitas masyarakat, diantaranya aktivitas pembangkit listrik dan panas, transportasi, industri manufaktur, rumah tangga, industri komersil, pengilangan minyak bumi, industri semen, industri besi dan baja (Bouzalakos dan Mercedes, 2010). Gambar 2.1., menunjukkan persentase aktivitas yang dapat menghasilkan  $\text{CO}_2$ . Aktivitas tersebut tidak bisa dilakukan tanpa adanya sumber energi dunia. Sampai saat ini sumber energi dunia yang paling utama adalah bahan bakar fosil. Batu bara dan minyak bumi menjadi sumber energi fosil yang paling banyak digunakan (Kenarsari dkk., 2013).



Gambar 2.1. Sumber aktivitas yang menghasilkan emisi gas  $\text{CO}_2$  dunia sepanjang tahun 2011 (IEA, 2013)

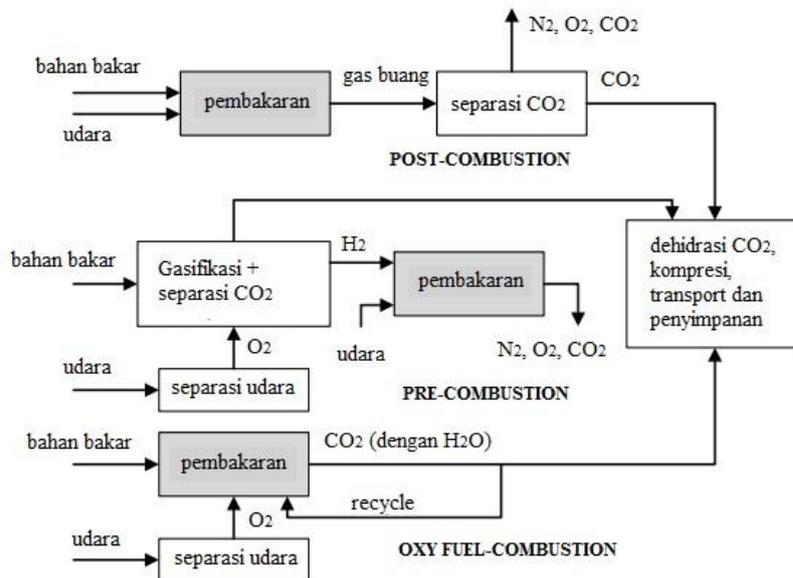
Penggunaan minyak bumi dan batu bara sebagai sumber energi utama memberikan dampak bagi lingkungan, salah satunya adalah produksi gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Emisi gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan selama proses penggunaan dan produksi energi fosil (minyak bumi, batu bara dan gas alam), ditunjukkan pada Gambar 2.2, menimbulkan masalah serius bagi lingkungan. Tingginya konsentrasi CO<sub>2</sub> yang terperangkap dalam atmosfer dapat menyebabkan polusi udara dan efek rumah kaca (*Greenhouse Gas Effect*) (Bouzalakos dan Mercedes, 2010). Terjadinya efek rumah kaca berimbas pada iklim yang akan mengalami pergeseran, suhu bumi bertambah tinggi, dan permukaan air laut semakin naik (Jacobson, 2008). Oleh karena itu, dibutuhkan suatu cara untuk mengurangi tingginya emisi gas CO<sub>2</sub>. Salah satunya adalah dengan menggunakan teknologi penangkap dan penyimpanan CO<sub>2</sub>.



Gambar 2.2. Emisi gas CO<sub>2</sub> dari bahan bakar fosil yang dihasilkan selama 6 dekade terakhir (Kenarsari dkk., 2013)

Teknologi penangkap dan penyimpanan CO<sub>2</sub> atau CCS (*CO<sub>2</sub> Capture and Sequestration*) dibedakan menjadi tiga konsep pendekatan yaitu *pre-combustion*, *post-combustion*, dan *oxy fuel-combustion*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. *Pre-combustion* adalah konsep penangkap CO<sub>2</sub> dari gas sintesis (*syngas*). Gas sintesis dihasilkan dari proses reaksi bahan bakar fosil dengan udara atau oksigen. Gas tersebut kemudian dikonversi dan menghasilkan CO<sub>2</sub> yang kemudian ditangkap dan disimpan. *Post-combustion* merupakan konsep yang digunakan untuk menangkap CO<sub>2</sub> dari gas hasil pembakaran bahan bakar fosil. Hasil

pembakaran berupa gas campuran beberapa senyawa, salah satunya  $\text{CO}_2$ , yang kemudian dipisahkan dan ditangkap dari partikulat lain seperti  $\text{NO}_x$  dan  $\text{SO}_x$ . Sedangkan *oxy fuel-combustion* adalah konsep penangkap  $\text{CO}_2$  dengan menggunakan oksigen murni untuk pembakaran bahan bakar fosil. Pembakaran tersebut menghasilkan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ , dimana  $\text{CO}_2$  akan ditangkap dengan proses kondensasi air. Prinsip pemisahan gas  $\text{CO}_2$  memegang peran penting pada proses ketiga konsep tersebut.  $\text{CO}_2$  dipisahkan dan ditangkap dari sistem gas buang hasil pembakaran atau gasifikasi agar tidak lepas ke atmosfer dan mencemari lingkungan.



Gambar 2.3. Tiga konsep pendekatan teknologi penangkap dan penyimpan  $\text{CO}_2$  (Pires dkk., 2011)

Ketiga konsep teknologi penangkap dan penyimpan  $\text{CO}_2$  memiliki kelebihan dan kelemahan masing-masing. Pada *pre-combustion*, bahan bakar fosil diubah menjadi gas sintesis melalui reaksi gasifikasi dengan udara atau oksigen. Gas sintesis yang terdiri dari karbon monoksida, hidrogen dan sedikit metana diubah pada reaktor konverter. Perubahan tersebut bertujuan untuk menghasilkan gas dengan komponen utamanya adalah karbon dioksida dan hidrogen dalam konsentrasi yang tinggi.  $\text{CO}_2$  ditangkap dan disimpan, sedangkan  $\text{H}_2$  digunakan sebagai komponen bahan bakar. Kelebihan konsep *pre-combustion* adalah mampu menangkap  $\text{CO}_2$  dalam konsentrasi yang sangat tinggi karena adanya proses gasifikasi dan konversi gas. Namun proses *pre-combustion* ini lebih rumit, kurang

efisien serta membutuhkan biaya operasional yang besar. Sedangkan konsep *oxy fuel-combustion* lebih sederhana dibandingkan dengan *pre-combustion*. Kelebihan *oxy fuel-combustion* adalah mampu menangkap CO<sub>2</sub> pada konsentrasi yang tinggi dan tidak menghasilkan partikulat NO<sub>x</sub> (berbahaya bagi lingkungan) pada sistem gas buangnya. Akan tetapi proses ini membutuhkan energi yang besar untuk memisahkan oksigen murni dari udara yang nantinya digunakan sebagai gas pembakar. Selain itu, dibutuhkan biaya operasional yang besar untuk mendukung kinerja sistem pemisahannya. Sementara pada *post-combustion*, proses pemisahan gas CO<sub>2</sub> dilakukan setelah proses pembakaran bahan bakar fosil. Konsep ini lebih sering digunakan untuk aplikasi penangkap dan penyimpan CO<sub>2</sub> karena prosesnya yang sederhana dan tidak memerlukan biaya yang besar. Industri batu bara, pembangkit listrik dan panas, serta pengilangan minyak merupakan beberapa contoh industri yang menggunakan konsep *post-combustion* dalam mereduksi emisi gas CO<sub>2</sub>. Meskipun sederhana dan murah, selektivitas CO<sub>2</sub> pada *post-combustion* lebih rendah dibandingkan dua konsep sebelumnya. Adapun teknik pemisahan yang digunakan pada konsep *post-combustion* antara lain absorpsi, adsorpsi, membran dan kriogenik.

## **2.2 Pemisahan Gas CO<sub>2</sub>**

Teknologi penangkap dan penyimpan CO<sub>2</sub> dengan konsep *post-combustion* lebih sering digunakan dalam industri karena banyak industri yang memanfaatkan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama (*power plant*). Konsep tersebut digunakan untuk memisahkan gas CO<sub>2</sub> dan pengotor (seperti NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, atau Hg) dari gas buang yang mengarah ke atmosfer. Adapun metode yang digunakan dalam proses pemisahan CO<sub>2</sub> antara lain absorpsi, kriogenik, membran dan adsorpsi.

Absorpsi merupakan metode yang sering digunakan dalam proses pemisahan gas CO<sub>2</sub> (Pires dkk., 2011). Proses absorpsi CO<sub>2</sub> menghasilkan ikatan yang sangat kuat, sehingga dibutuhkan energi yang besar untuk regenerasi pelarut absorbennya (Lepaumier dkk., 2010). Hal ini menjadi problem utama metode absorpsi karena semakin banyak konsumsi energi, semakin besar biaya yang dibutuhkan (Kothandaraman, 2010). Konsumsi energi yang tinggi juga dijumpai pada metode

kriogenik. Meskipun menghasilkan *recovery* CO<sub>2</sub> yang sangat tinggi (>95%), proses destilasi kriogenik pada suhu rendah dan tekanan yang tinggi membutuhkan energi sekitar 6-10 MJ/kgCO<sub>2</sub> (Brunetti dkk., 2010; Mondal dkk., 2012; Leung dkk., 2014). Berbeda dengan metode membran dan adsorpsi yang lebih efisien energi, dimana masing-masing hanya membutuhkan 0,5-6 MJ/kgCO<sub>2</sub> dan 2-3 MJ/kgCO<sub>2</sub> (Brunetti dkk., 2010 dan Mondal dkk., 2012).

Leung dkk, 2014 dalam review studi literturnya menjelaskan bahwa kondisi operasi metode adsorpsi relatif lebih mudah dibandingkan metode lainnya. Berbeda dengan membran dan kriogenik yang sangat tergantung pada konsentrasi CO<sub>2</sub> yang akan dipisahkan. Proses adsorpsi berjalan secara reversible dan efisiensi pemisahannya tinggi (>85%). Disamping itu, absorbennya dapat digunakan kembali dan tidak memerlukan konsumsi energi yang besar seperti pada absorpsi (Mondal dkk., 2012). Meskipun batas kemurnian metode adsorpsi masih dibawah absorpsi dan kriogenik, namun proses operasinya tidak memerlukan waktu yang lama. Adsorpsi CO<sub>2</sub> dengan material berpori seperti silika berpori dan zeolit memiliki selektivitas CO<sub>2</sub> yang tinggi dan tidak memerlukan energi yang besar (Lee dan Park, 2015). Oleh karena itu, pada penelitian ini adsorpsi digunakan sebagai metode untuk menangkap dan memisahkan gas CO<sub>2</sub>.

### **2.3 Material Adsorpsi**

Metode adsorpsi umumnya menggunakan material-material berpori sebagai agen pengadsorp partikel gas CO<sub>2</sub>. Material berpori digunakan sebagai adsorben karena memiliki luas permukaan yang tinggi dan struktur pori terbuka (Kenarsari dkk., 2013). Pada proses adsorpsi, interaksi antara molekul gas dan permukaan material berpori adalah fisisorpsi (van der Waals) atau kemisorpsi (ikatan kovalen) (D'Alessandro dkk., 2010). Beberapa material berpori yang memiliki karakteristik sebagai adsorben gas CO<sub>2</sub>, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.1, antara lain karbon (Choi dkk., 2009; D'Alessandro dkk., 2010; Wang dkk., 2011), silika mesopori (Chalal dkk., 2015; Chew dkk., 2010; Wang dkk., 2011), MOF (*Metal Organic Framework*) (Milward dan Yaghi, 2005; D'Alessandro dkk., 2010; Kenarsari dkk., 2013), COF (*Covalent Organic Framework*) (Furukawa dan

Yaghi, 2009), dan zeolit (Bonenfant dkk., 2008;Díaz dkk., 2008; Hedin dkk., 2013).

Tabel 2.1 Karakteristik adsorben material pori; a) luas permukaan ( $S_{\text{BET}}/\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ), b) diameter pori (nm), c) kapasitas adsorpsi (mmol/g)

Material Pori		a ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	b (nm)	c (mmol/g)	Kondisi		Pustaka
					Tekanan (bar)	Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )	
Silika mesopori	MCM-41	1230	11,7	2,3	1	20	(Belmabkhout dan Sayari, 2009)
	SBA-15	498	8	0,2	1	75	(Liu dkk., 2011)
Karbon	Karbon aktif	1294	1,96	3,3	1	25	(Alabadi dkk., 2015)
Zeolit	NaX	534	0,66	4,0	1	25	(Li dkk., 2013)
	13X	726	28	3,5	1	20	(Lee dkk., 2002)
MOF	MOF-177	4500	1,12	33,5	32	25	(Milward dan Yaghi, 2005)
	Mg-MOF-74	1174	1,02	8,61	1	25	(Bao dkk., 2011)
COF	COF-102	3620	1,2	27	55	25	(Furukawa dan Yaghi, 2009)

Adsorpsi partikel gas  $\text{CO}_2$  dapat berlangsung dengan atau tanpa ikatan kimia, yang biasa disebut dengan interaksi kemisorpsi. Sedangkan adsorpsi fisika berlangsung dengan melibatkan interaksi fisorpsi antara permukaan adsorben dan gas  $\text{CO}_2$ . Kernarsari dkk, 2010 menjelaskan bahwa material berpori seperti zeolit, silika mesopori, dan karbon adalah material yang digunakan sebagai adsorben untuk adsorpsi fisika. Sedangkan MOF dan COF merupakan adsorben kemisorpsi.

Salah satu material zeolit yang banyak dikembangkan sebagai adsorben gas CO<sub>2</sub> adalah zeolit-X. Diantara beberapa zeolit yang pernah dikembangkan, zeolit-X memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi (4 – 6 mmol CO<sub>2</sub>/g), seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2. Selain itu, zeolit-X memiliki selektivitas yang tinggi terhadap CO<sub>2</sub>, sehingga proses adsorpsinya berjalan lebih cepat dan kemurnian tinggi. Zeolit-X memiliki volume pori sekitar 0,36 cm<sup>3</sup>/g dan luas permukaan sekitar 482 – 723 m<sup>2</sup>/g, memungkinkan untuk menangkap CO<sub>2</sub> dengan kapasitas adsorpsi yang tinggi (Wardani, 2014).

Tabel 2.2 Kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> pada beberapa jenis zeolit ; a = luas permukaan (m<sup>2</sup>/g) ; b = volume total pori (cm<sup>3</sup>/g) ; c = kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> (mmol/g) ; T = suhu (°C) ; p = tekanan (bar)

Jenis Zeolit		a (m <sup>2</sup> /g)	b (cm <sup>3</sup> /g)	c (mmol/g)	Kondisi adsorpsi		Pustaka
					T (°C)	p (bar)	
Zeolit alam	Zeolit NaA	528	0,33	1,25	25	1	(Siriwardane dkk., 2003)
	Zeolit 4A	22,8	0,03	0,80	25	1	
Zeolit A	Zeolit CaA	397	0,15	1,19	50	0,6	(Yi dkk, 2012)
	Zeolit 5A	384	0,32	1,2	60	0,6	(Deng dkk., 2012)
Zeolit β	Zeolit β	574	0,23	1,76	30	1	(Xu dkk., 2009)
	Zeolit β-MEA	209	0,19	1,39	30	1	
	Zeolit K-β	446	0,41	2,73	25	1	(Yang dkk., 2010)
	Zeolit Na-β-Melamin	263	0,14	3,70	25	1	(Ahmad dkk., 2013)
Zeolit X	Zeolit NaX	527	0,36	4,98	25	1	(Walton dkk., 2006)
	Zeolit Li-X	659	0,30	4,50	25	1	
	Zeolit 13X monolit	723	0,36	6,62	0	1	(Akhtar dkk., 2012)
	Zeolit K-13X	482	0,24	3,41	0	1	(Zhao dkk., 2007)
Zeolit Y	Zeolit NaY	723	0,35	4,90	30	1	(Shao dkk., 2009)
	Zeolit NaY-TEPA	402	0,20	2,83	30	1	(Lee dkk., 2013)
Zeolit MFI	ZSM-5	312	0,14	2,50	30	1	(Pham dkk., 2014)
	H-ZSM-5	307	0,13	2,59	22	1	(Harlick dan Tezel, 2004)
Zeolit lain	Zeolit BEA	395	0,21	2,40	30	1	(Pham dkk., 2014)
	Zeolit CHA	572	0,27	3,50	30	1	
	Zeolit FER	282	0,13	2,50	30	1	
	Zeolit STT	411	0,19	3,25	30	1	

Seperti ditunjukkan Tabel 2.1, MOF dan COF memiliki luas permukaan yang besar dan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> yang tinggi dibandingkan adsorben lain.

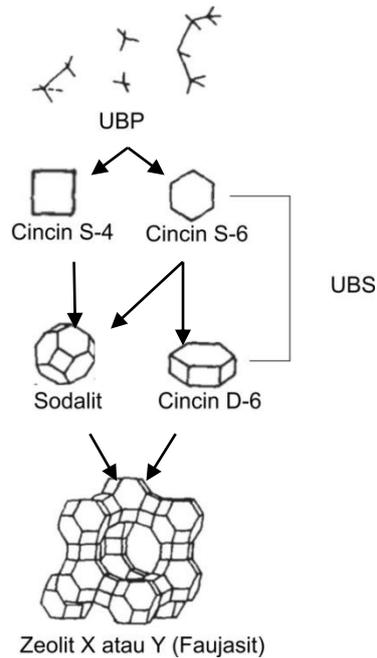
Sifat adsorpsi MOF dan COF adalah adsorpsi kimia (kemisorpsi) yang cenderung kuat, sehingga membutuhkan tekanan yang besar (sekitar 30 - 50 bar) untuk meningkatkan kapasitas adsorpsinya (Furukawa dan Yaghi, 2009). Sedangkan zeolit-X dan material karbon tidak membutuhkan tekanan besar dan bisa dilakukan pada suhu ruang karena sifat adsorpsinya adalah adsorpsi fisik (fisisorpsi). Milward dan Yaghi, (2005) menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi MOF lebih rendah dibandingkan zeolit-X dan material karbon pada tekanan 1 bar serta suhu ruang (25 °C). Oleh karena itu, pada penelitian ini zeolit-X dan material karbon dipilih sebagai material pori yang digunakan sebagai adsorben dalam proses adsorpsi gas CO<sub>2</sub>.

## 2.4 Zeolit-X

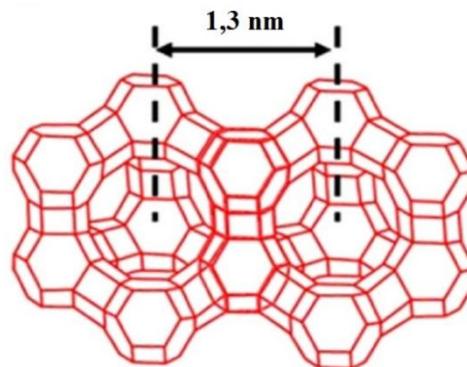
Zeolit-X merupakan salah satu jenis zeolit faujasit selain zeolit-Y. Secara umum, zeolit ini memiliki struktur pori sangkar dan bingkai dengan rumus empiris  $[(Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+)_{29}(H_2O)_{240}][Al_{58}Si_{134}O_{384}]$ . Zeolit-X merupakan material mikropori silika rendah (*low-silica*) dengan rasio Si/Al sekitar 1-1,5. Struktur zeolit-X terdiri dari sangkar sodalit yang dihubungkan oleh 12 cincin atom oksigen dengan luas diameter pori 7,4 Å dan luas diameter rongga (*cavity*) dalam sekitar 12 Å. Rongga tersebut tersusun atas sepuluh rangka sodalit yang saling terhubung membentuk heksagonal (Chester dan Derouane, 2009).

Secara umum, zeolit terdiri dari kerangka TO<sub>4</sub> tetrahedral yang tiap sudutnya saling terhubung membentuk kerangka tiga dimensi. Kerangka atom T merupakan atom Si, Al, atau P dan merupakan struktur utama kerangka zeolit. Setiap atom T berikatan dengan empat atom oksigen, dimana setiap atom oksigen menghubungkan dua atom T. Dua tetrahedral yang saling terhubung membentuk struktur kerangka utama yang disebut unit bangun primer (UBP). Unit bangun primer akan saling berkoordinasi dan membentuk kerangka unit bangun sekunder (UBS). Satu tipe kerangka dapat membentuk beberapa unit bangun sekunder (UBS). Beberapa UBS dapat membentuk cincin tunggal, ganda dan unit kompleks. Sebagai contoh, kerangka zeolit LTA terdiri dari lima tipe unit bangun sekunder yang meliputi 4, 8, 4-2, 4-4 dan 6-2 unit. Sedangkan pada zeolit faujasit (X, Y, ZSM) terdiri dari unit bangun sekunder meliputi cincin 6, 8 (tunggal), dan

cincin 6-6 (ganda) (Chester dan Derouane, 2009). Gambar 2.4 menunjukkan secara sederhana proses pembentukan kerangka zeolit-X.



Gambar 2.4. Pembentukan struktur kerangka zeolit faujasit (X atau Y) (Byrappa dan Yoshimura, 2013)



Gambar 2.5. Struktur kerangka super (*supercage*) zeolit-X (Lee dkk., 2007)

Kerangka (framework) zeolit-X disusun oleh rangka sodalit yang saling dihubungkan oleh 6-6 cincin ganda. Rangka sodalit membentuk rongga (*cavity*) yang cukup besar dan biasa disebut *supercage*. Pada *supercage* terdapat 12 cincin tiga-dimensional yang membentuk struktur pori dimana ukuran diameter rongga dalam sebesar 1,3 nm dan diameter *supercage* sebesar 0,7-0,8 nm (Lee dkk., 2007) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Dengan karakter pori tersebut, kemampuan aksesibilitas zeolit-X dimanfaatkan untuk aplikasi penyerapan dan

penyimpanan gas. Khusus untuk penyerapan gas CO<sub>2</sub>, zeolit-X memiliki kemampuan adsorpsi yang sangat bagus karena molekul gas CO<sub>2</sub> memiliki diameter kinetik sebesar 0,33 nm.

## 2.5 Material Karbon

Material karbon merupakan material berpori yang menunjukkan beberapa karakteristik seperti luas permukaan yang besar, volume pori yang tinggi, sifat kimia yang kuat dan stabilitas mekanik atau termal yang bagus. Selain itu dapat diaplikasikan juga untuk media penyimpan gas seperti metana, hidrogen, dan karbon dioksida.

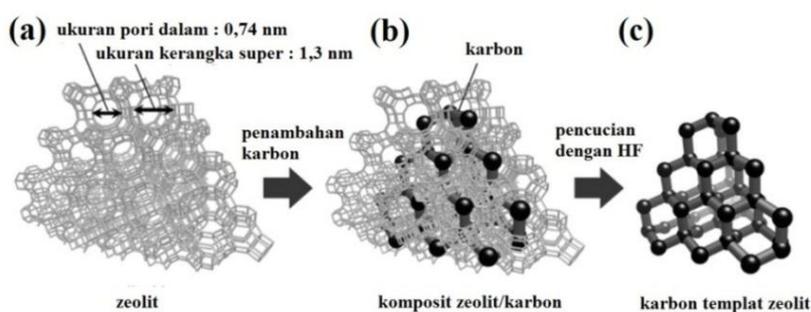
Aplikasi penyimpan material karbon terhadap gas karbon dioksida dipengaruhi oleh karakteristik tekstural seperti distribusi ukuran pori, keteraturan pori dan luas permukaan. Struktur pori material karbon memiliki tiga tipe pori yaitu mikropori, mesopori dan makropori. Dengan struktur pori tersebut, Samanta dkk., (2011) melaporkan karbon berpori dengan luas permukaan dan distribusi ukuran mikropori menunjukkan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> sekitar 3,23 mmol/g pada suhu kamar dan tekanan 1 bar. Saha dan Deng, (2010) pada penelitiannya menggunakan karbon mesopori dengan luas permukaan karbon sebesar 798 m<sup>2</sup>/g, diameter pori sebesar 62,6 Å dan kapasitas adsorpsi gas CO<sub>2</sub> mencapai 1,5 mmol/g. Cinke dkk., (2003), melaporkan *single-walled* karbon nanotube yang digunakan sebagai material pengadsorpsi CO<sub>2</sub>, memiliki luas permukaan sebesar 1587 m<sup>2</sup>/g, volume mikropori 0,28 cm<sup>3</sup>/g dan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> mencapai 2,07 mmol/g.

Menurut Alabadi dkk., (2015) adsorben karbon memiliki luas permukaan yang relatif tinggi yaitu 1294 m<sup>2</sup>/g dan kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> pada tekanan 1 bar sekitar 3,3 mmol CO<sub>2</sub>/g. Dibandingkan dengan adsorben lain seperti zeolit, kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> material karbon relatif lebih rendah. Hal ini karena porositas dan keteraturan pori material karbon lebih rendah dibandingkan zeolit. Chue dkk., (1995), membandingkan kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> karbon aktif dan zeolit 13X pada suhu 288 K serta tekanan 1 bar. Hasilnya menunjukkan kapasitas adsorpsi karbon aktif sekitar 2,5 mmol/g dan zeolit 13X sekitar 4,5 mmol/g. Oleh karena itu, untuk meningkatkan kemampuan adsorpsinya, material karbon

biasanya ditemplat dengan material berpori lain yang memiliki porositas tinggi, seperti zeolit.

## 2.6 Karbon Tertemplat Zeolit

Zeolit merupakan material aluminosilikat yang memiliki kristalinitas tinggi dengan struktur pori teratur dan porositas tinggi. Zeolit memiliki struktur berpori yang relatif stabil, meskipun tanpa adanya molekul pengisi pori seperti molekul pelarut dan kation organik (Sakintuna dan Yurum, 2005). Dengan struktur mikropori tiga dimensional, zeolit memiliki kemampuan selektivitas dan adsorpsi yang bagus terhadap molekul gas seperti  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  dan  $CH_4$  (Ducrot-Boisgontier dkk., 2010). Namun, luas permukaan zeolit lebih kecil dibandingkan material berpori lain. Karbon merupakan material berpori yang memiliki luas permukaan besar, struktur porinya kurang teratur dan kapasitas adsorpsinya rendah (Nishihara dan Kyotani, 2012). Oleh sebab itu, kedua jenis material tersebut dapat digabungkan untuk menghasilkan material karbon tertemplat zeolit (KTZ) atau *zeolite templated carbon* (ZTC) (Youn dkk., 2011; Konwar dan De, 2015; Parmentier dkk., 2013).



Gambar 2.6. Skema sintesis KTZ yang mereplika struktur negatif zeolit (Nishihara dan Kyotani, 2012)

Pada sintesis karbon tertemplat zeolit, karbon secara teratur masuk ke dalam kerangka nano zeolit. Faktor yang sangat penting dalam sintesis material ini adalah pemilihan templat zeolit dan prekursor karbon yang digunakan. Pada sintesis karbon tertemplat zeolit, ukuran pori zeolit harus selebar mungkin agar karbon dapat masuk ke dalam pori dan memperkuat kerangka karbon templat saat zeolit dicuci dengan larutan asam. Zeolit dengan 12 cincin atom oksigen seperti zeolit FAU (X dan Y), zeolit  $\beta$ , zeolit L dan mordenit, menunjukkan kapasitas

pori yang sesuai untuk diisi oleh karbon. Selain itu, untuk menghasilkan material karbon tertemplat zeolit dengan kerangka pori yang teratur, templat zeolit yang digunakan harus memiliki kerangka mikropori tiga-dimensional. Sejauh ini, hanya templat zeolit FAU, zeolit  $\beta$ , dan EMT yang dapat menghasilkan material karbon tertemplat dengan struktur pori yang teratur dan regular.

Tabel 2.3 Kemampuan adsorpsi gas karbon dioksida material karbon berpori

Material karbon	Suhu adsorpsi (° C)	Tekanan (bar)	a (m <sup>2</sup> /g)	b (cm <sup>3</sup> /g)	c (mmol/g)	Pustaka
Karbon Aktif	30	1	942	0,41	2,1	Plaza dkk., 2011
Karbon amorf	26	8	637	0,58	10,63	Jimenez dkk., 2012
Karbon fishbone	26	8	202	0,62	6,60	Jimenez dkk., 2012
Karbon aktif ribbon	26	8	310	0,64	3,77	Jimenez dkk., 2012
Karbon aktif	25	1	1300	0,6-0,8	3,23	Samanta dkk., 2011
Karbon mesopori	25	1	798	0,873	1,5	Saha dan Deng, 2010
CMS	30	1	2470	0,866	2,43	Burchell dkk., 1997
SWNT	35	1	1587	0,28	2,07	Cinke dkk., 2003

a. Luas permukaan/S<sub>BET</sub> karbon berpori (m<sup>2</sup>/g)

b. Volume mikropori (cm<sup>3</sup>/g)

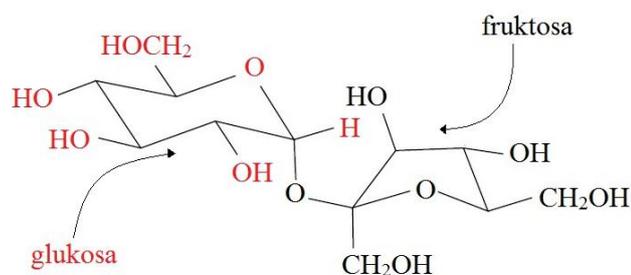
c. Kapasitas adsorpsi gas CO<sub>2</sub> (mmol/g)

Dalam aplikasi penyerapan gas seperti CO<sub>2</sub>, zeolit FAU (X dan Y) lebih banyak digunakan sebagai templat pada material karbon tertemplat zeolit, karena zeolit FAU memiliki volume mikropori sekitar 0,20 – 0,36 cm<sup>3</sup>/g, luas permukaan 400 – 723 m<sup>2</sup>/g, dan porositas tinggi (Nishihara dan Kyotani, 2012). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi gas CO<sub>2</sub> pada zeolit-Y mencapai 2,8 – 4,9 mmol/g (Shao dkk., 2009; Lee dkk., 2013). Sedangkan pada zeolit-X, kapasitas adsorpsi gas CO<sub>2</sub> mencapai 3,41 – 6,62 mmol/g (Zhao dkk., 2007; Walton dkk., 2006; Akhtar dkk., 2012). Oleh karena itu pada penelitian ini, digunakan zeolit-X sebagai templat material karbon untuk aplikasi adsorpsi CO<sub>2</sub>.

Pembuatan karbon tertemplat zeolit (KTZ) memerlukan prekursor karbon seperti furfural alkohol (Masika dan Mokaya, 2013), asetonitril (Alam dan Mokaya, 2011), maupun sukrosa (Guan dkk., 2009). Furfural alkohol banyak digunakan pada penelitian sebelumnya sebagai prekursor karbon karena menghasilkan material karbon dengan luas permukaan yang tinggi. Sukrosa atau gula dapur juga dapat digunakan sebagai prekursor menggantikan furfural alkohol dan asetonitril karena kelimpahannya di alam dan harganya lebih murah dibandingkan dua prekursor tersebut. Sehingga, pada penelitian ini digunakan sukrosa sebagai prekursor karbon yang akan ditemplat dengan zeolit-X untuk menghasilkan material karbon untuk adsorpsi CO<sub>2</sub>.

## 2.7 Sukrosa

Sukrosa merupakan karbohidrat disakarida yang terbentuk dari D-glukosa dan D-fruktosa. Struktur D-Glukosa dan D-fruktosa bergabung membentuk ikatan glikosida pada posisi anomerik (Carey, 2000), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Sukrosa memiliki bentuk fisik berupa padatan kristal berwarna putih dan rasa yang manis (Rippe dan Angelopoulos, 2013). Sukrosa juga merupakan senyawa organik dengan kelimpahan tinggi sehingga banyak digunakan sebagai gula dapur.



Gambar 2.7. Struktur sukrosa (2-O-( $\alpha$ -D-Glukopiranosil)- $\beta$ -D-fruktofuranosida)

Sukrosa merupakan prekursor karbon dengan *yield* karbon yang cukup tinggi, ukuran molekul yang tidak terlalu besar dan kelarutan dalam air besar. Selain itu, prekursor sukrosa dapat menghasilkan luas permukaan dan volume mikropori yang tinggi. Klepel dkk., 2007 menunjukkan sukrosa yang ditemplat dengan zeolit-Y menghasilkan material dengan luas permukaan sekitar 1650 m<sup>2</sup>/g dan volume mikropori sebesar 0,95 cm<sup>3</sup>/g. Guan dkk., (2009) pada penelitiannya menunjukkan karbon tertemplat zeolit dengan sukrosa sebagai prekursor

menghasilkan luas permukaan sekitar 1500 m<sup>2</sup>/g dan volume mikropori sebesar 0,78 cm<sup>3</sup>/g.

Tabel 2.4 Karakter permukaan karbon tertemplat zeolit dengan sukrosa sebagai prekursor karbon

No	Prekursor Karbon	Zeolit	Luas permukaan (m <sup>2</sup> /g)	Volume mikropori (cm <sup>3</sup> /g)	Pustaka
1	Sukrosa	NH <sub>4</sub> Y	1500	0,78	Guan dkk., 2009
2	Sukrosa	NaY	1752	0,48	Su dkk., 2005
3	Sukrosa	HY	1650	0,95	Klepel dkk., 2007

## 2.8 Metode Sintesis Karbon Tertemplat Zeolit

Beberapa penelitian telah menunjukkan metode sintesis karbon tertemplat zeolit diantaranya adalah pirolisis (Song dkk., 2013; Rodriguez-Mirasol dkk., 1998), *chemical vapour deposition* (CVD) (Barata-Rodrigues dkk., 2003; Matsuoka dkk., 2005; Yang dkk., 2006a; Kim dkk., 2013), impregnasi (Guan dkk., 2009; Su dkk., 2004; Cai dkk., 2014; Valero-Romero dkk., 2014), *vapour phase deposition* (VPD) (Chen dkk., 2007), *nanocasting* (Cai dkk., 2014) dan metode *two-step* atau gabungan karbonisasi dan *chemical vapour deposition* (CVD) (Ma dkk., 2000). Diantara beberapa metode tersebut, impregnasi merupakan metode yang paling sederhana, mudah dan tidak memerlukan peralatan yang rumit. Tahapan sintesis karbon tertemplat zeolit dengan metode impregnasi meliputi :

### 2.8.1 Sintesis Zeolit-X Sebagai Templat

Prinsip dasar sintesis zeolit-X meliputi tahap pembentukan gel, proses hidrotermal dan kristalisasi zeolit. Proses pembentukan gel terjadi saat pencampuran larutan sumber alumina dan sumber silika dengan adanya alkali hidroksida atau basa organik (Georgiev dkk., 2009 dan Yani dkk., 2013). Proses hidrotermal diikuti kristalisasi zeolit dengan naiknya suhu, tekanan konstan dan waktu tertentu. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk sintesis zeolit-X seperti sintesis zeolit-X dari abu layang ampas tebu (Purnomo dkk., 2012), sedangkan

Zhang dkk., (2013a), sintesis zeolit-X dari natrium aluminat ( $\text{NaAlO}_2$ ), natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) dan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).

Kondisi sintesis zeolit akan mempengaruhi pori yang terbentuk dalam kerangka zeolit. Pada saat tahap pembentukan gel, perbandingan molar Si/Al harus diperhatikan karena akan menentukan struktur dan komposisi zeolit. Penelitian sebelumnya untuk sintesis zeolit-X menggunakan perbandingan Si/Al yaitu  $\text{Si/Al} \leq 2$  (Payra dan Dutta, 2003). Selain perbandingan molar Si/Al, ada beberapa faktor lain yang mempengaruhi sintesis zeolit seperti saat pembentukan gel diusahakan  $\text{pH} > 10$  atau berada dalam kondisi basa medium. Selain itu, suhu saat proses hidrotermal serta waktu yang dibutuhkan untuk kristalisasi zeolit juga akan mempengaruhi sintesis. Kristalisasi zeolit-X dapat dilakukan pada suhu  $90^\circ\text{C}$  -  $110^\circ\text{C}$  (Zhang dkk., 2013b).

### **2.8.2 Impregnasi Prekursor Karbon pada Templat Zeolit**

Proses impregnasi cairan dilakukan untuk memasukkan prekursor karbon pada struktur pori zeolit (Rodriguez-Mirasol dkk., 1998). Proses impregnasi diawali dengan proses pengeringan templat zeolit dalam atmosfer nitrogen untuk menghilangkan kontaminan yang terperangkap pada zeolit (Su dkk., 2004), kemudian dilanjutkan impregnasi prekursor karbon pada zeolit hasil sintesis. Sebelum melakukan impregnasi, sukrosa dilarutkan dalam asam sulfat encer (0,35 M). Penggunaan asam sulfat dengan konsentrasi yang lebih besar atau bahkan pekat menghasilkan pembentukan karbon hitam secara cepat dalam waktu beberapa detik, sehingga tidak memungkinkan proses pencetakan karbon di dalam pori zeolit. Sedangkan penggunaan asam sulfat encer menjadikan larutan sukrosa dapat mencapai seluruh bagian pori zeolit dan pembentukan karbon dapat terjadi di dalam pori-pori zeolit saat proses karbonisasi, sehingga diharapkan karbon yang dihasilkan memiliki karakteristik struktural zeolit.

Keteraturan struktur zeolit sebagai templat secara teoritis dapat ditransferkan pada struktur karbon. Namun kemampuan transfernya sangat dipengaruhi tingkat pengisian prekursor karbon di dalam saluran zeolit (Su dkk., 2004). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Kayadoe, (2013), menyebutkan rasio penambahan sukrosa : zeolit yaitu 12,5:10 mampu menghasilkan karbon dengan

karakteristik luas permukaan, volume pori serta prosentase karbon yang dihasilkan paling tinggi. Selain itu rasio sukrosa : karbon (12,5:10) mampu menghasilkan karbon dengan derajat grafitisasi paling rendah yang menunjukkan sebagian besar karbon mengisi pori zeolit membentuk karbon amorf dengan struktur berpori yang sangat berpotensi digunakan sebagai adsorben (Anggarini, 2013). Berdasarkan penelitian tersebut, maka dalam penelitian ini digunakan variasi rasio impregnasi antara sukrosa : zeolit sekitar 0,5 – 1,25.

### **2.8.3 Karbonisasi Templat**

Karbonisasi pada karbon tertemplat zeolit dilakukan dengan memanaskan zeolit yang telah diimpregnasi dengan larutan sukrosa pada suhu tinggi dan dialiri gas N<sub>2</sub>. Selama proses karbonisasi, karbon terdekomposisi di dalam saluran pori zeolit, sehingga karbon mereplikasi struktur zeolit. Selain itu, pada tahapan ini beberapa material volatil dilepas dari bahan dasar karbon dan secara bersamaan membentuk pori. Setelah proses karbonisasi diperoleh komposit zeolit/ karbon.

Proses karbonisasi pada karbon tertemplat zeolit dipengaruhi suhu karbonisasi, waktu karbonisasi, kecepatan kenaikan suhu, dan kondisi lingkungan karbonisasi (Ducrot-Boisgontier dkk., 2010). Su dkk., 2004, melakukan karbonisasi pada karbon tertemplat zeolit dengan variasi suhu karbonisasi 600 – 1100 °C. Hasil yang diperoleh menunjukkan pada suhu karbonisasi 600 °C luas permukaan karbon hanya 708 m<sup>2</sup>/g, sedangkan pada suhu 800 °C luas permukaan meningkat mencapai 1750 m<sup>2</sup>/g, namun pada suhu karbonisasi yang terlalu tinggi terjadi kerusakan struktur zeolit sehingga karbon tidak dapat mencetak morfologi zeolit. Hal sama terjadi pada penelitian Rohmah, (2013) yang menyatakan pada suhu karbonisasi lebih tinggi dari 800 °C mampu menghasilkan luas permukaan tinggi, namun disertai dengan meningkatnya pori berukuran meso yang tidak cocok digunakan sebagai penyimpan hidrogen. Berdasarkan data literatur di atas, pada penelitian ini karbonisasi dilakukan pada suhu 800 °C.

### **2.8.4 Penghilangan Templat**

Komposit zeolit/ karbon yang dihasilkan setelah karbonisasi selanjutnya dicuci dengan asam kuat untuk menghilangkan *framework* zeolit. Templat zeolit

dihilangkan untuk menghasilkan material karbon berpori dengan struktur menyerupai zeolit (Yang dkk., 2007).

*Framework* zeolit terdiri dari satuan tetrahedral  $\text{SiO}_4^{4-}$  dan  $\text{AlO}_4^{5-}$  yang saling terhubung membentuk kerangka jaringan tiga dimensi dengan atom oksigen sebagai penghubung (Moore dan Smart, 1993). Berdasarkan hal tersebut, maka pencucian untuk menghilangkan zeolit dapat dilakukan dengan HF untuk menghilangkan silika (Su dkk., 2004) dan HCl untuk menghilangkan alumina (Yang dkk., 2006b). Pencucian dengan HF diikuti dengan pembilasan dengan air destilat panas untuk menghilangkan sisa HF, sedangkan pencucian dengan HCl dilakukan dengan refluks pada suhu  $60\text{ }^\circ\text{C}$  untuk mengekstrak alumina secara sempurna.

Manggiasih, (2013) menyatakan penggunaan HF dengan konsentrasi rendah dapat memutus ikatan Si-O-Al pada kerangka zeolit, namun tidak mampu menghilangkan Si-O secara sempurna. Proses pencucian yang kurang sempurna dapat menyebabkan *blocking* sisa Si-O, sehingga luas permukaan karbon berpori menurun. Berdasarkan hal tersebut dalam penelitian ini dilakukan pencucian dengan HF dan HCl konsentrasi tinggi.

## 2.9 Karakterisasi

### 2.9.1 X-Ray Diffraction (XRD)

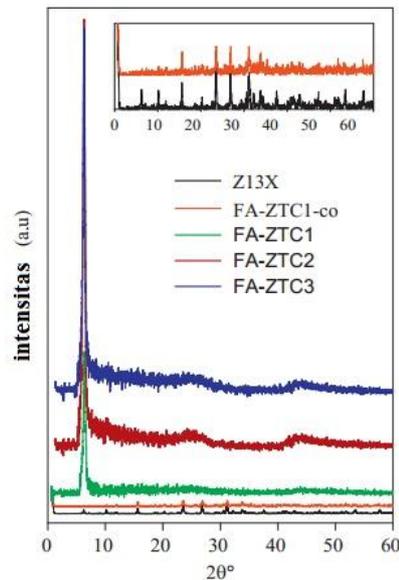
Teknik difraksi sinar-X atau X-Ray Diffraction (XRD) merupakan teknik analisis yang digunakan untuk mengetahui fasa kristal, kestabilan fasa, penentuan struktur pori dan mengetahui pembentukan suatu produk hasil sintesis. Prinsip dari XRD yaitu sinar-X yang ditembakkan mengenai permukaan sampel yang dianalisis mengakibatkan terjadinya transisi elektron hingga dihasilkan emisi sinar pantul yang dapat terdeteksi oleh detektor dan muncul pola-pola difraktogram yang menunjukkan kristalinitas sampel (Klug dan Alexander, 1974). Hukum Bragg merumuskan secara matematis persyaratan agar berkas sinar-X yang dihamburkan merupakan berkas difraksi.

$$n \lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta \quad (2.1)$$

dimana :

$\lambda$  = panjang gelombang sinar-X yang digunakan

- $d_{hkl}$  = jarak antar bidang dengan indeks miller hkl  
 $n$  = orde pembiasan yang berupa bilangan bulat mulai dari 1  
 $\theta$  = sudut difraksi sinar-X yang terjadi



Gambar 2.8. Pola XRD zeolit 13X dan karbon tertemplat zeolit-X dengan sumber karbon Furfuril alkohol pada variasi laju pemanasan (5, 10 dan 15 °C/menit) (Masika dan Mokaya, 2013)

Sinar-X yang dipakai pada umumnya adalah radiasi Cu- $K_{\alpha}$  dengan panjang gelombang 1,54 Å. Berkas sinar radiasi Cu  $K_{\alpha}$  ini jika mengenai bidang kristal suatu padatan, maka bidang kristal akan membiaskan sinar-X yang memiliki panjang gelombang yang sama dengan jarak antar kisi dalam kristal tersebut. Sinar-X yang dibiaskan akan ditangkap oleh detektor dan diterjemahkan sebagai fungsi sudut refleksi  $2\theta$  atau puncak-puncak difraksi. Puncak difraksi yang didapatkan dari pengukuran, kemudian dicocokkan dengan standar difraksi sinar-X yang ada di database JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*). Melalui prinsip tersebut, instrumen XRD dapat digunakan untuk mengetahui letak atom atau ion dalam susunan kristal, sehingga dapat mengidentifikasi struktur kristal (Skoog dkk., 2007).

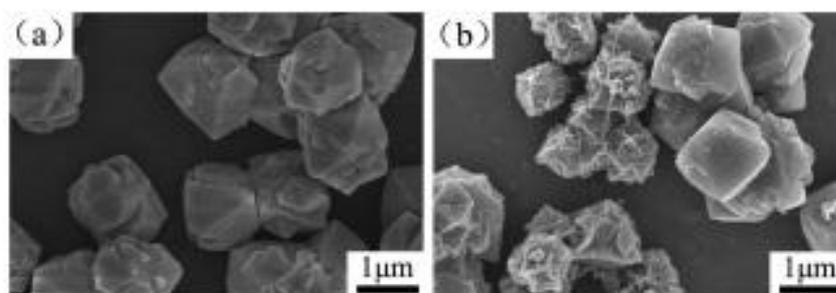
Karakterisasi XRD pada karbon tertemplat zeolit-X pernah dilakukan oleh Masika dan Mokaya, (2013). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8., semua sampel hasil sintesis menunjukkan puncak yang sama dengan puncak zeolit 13X

pada  $2\theta = 6,3^\circ$ . Hal ini menunjukkan bahwa impregnasi karbon tertemplat zeolit-X dengan prekursor karbon furfural alkohol telah berhasil. Keteraturan struktur pori karbon tertemplat zeolit tersebut menunjukkan kesamaan dengan zeolit-X berdasarkan database JCPDS zeolit 13X. Oleh karena itu, pada penelitian ini XRD juga digunakan untuk mengetahui pembentukan karbon tertemplat zeolit-X setelah proses impregnasi dan pencucian.

### 2.9.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

*Scanning Electron Microscope* (SEM) merupakan teknik analisis yang bertujuan untuk mengetahui morfologi bentuk permukaan padatan. Prinsip yang digunakan pada analisis ini adalah penembakan sinar elektron pada permukaan padatan dengan energi kinetik sebesar 1-25 kV. Penembakan tersebut menghasilkan refleksi elektron sekunder yang kemudian diperkuat sinyalnya dan amplitudonya ditampilkan dalam gradasi gelap - terang pada layar monitor CRT (*Cathode Ray Tube*). Pada layar monitor CRT gambar morfologi permukaan dapat diamati dan ditentukan.

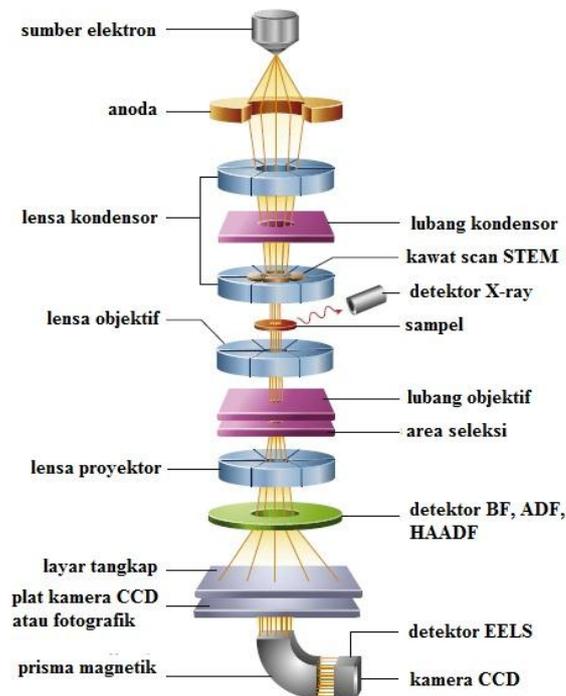
Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Cai dkk., (2013) telah mensintesis karbon tertemplat zeolit-X dan berhasil menganalisis morfologi permukaannya. Tampak pada Gambar 2.9., struktur permukaan zeolit 10X dan karbon tertemplat zeolit 10X. Mikrograf SEM tersebut menunjukkan kesamaan struktur permukaan zeolit 10X dan karbon tertemplat zeolit 10X yang berbentuk gumpalan kristal besar. Berdasarkan hal tersebut, pada penelitian ini SEM digunakan untuk mengamati ciri mikrostruktur zeolit-X dan karbon tertemplat zeolit-X.



Gambar 2.9. Mikrograf SEM (a) zeolit 10X dan (b) karbon tertemplat zeolit 10X (Cai dkk., 2014)

### 2.9.3 Transmission Electron Microscope (TEM)

*Transmission electron microscope* (TEM) merupakan teknik yang digunakan untuk mengkarakterisasi mikrostruktur material dengan kemampuan resolusi yang tinggi. Informasi mengenai morfologi, struktur kristal dan cacat (*defect*), fasa kristal dan komposisi mikrostruktur dapat diperoleh melalui kombinasi optikal elektron (resolusi mencapai  $2,4 \text{ \AA}$ ), difraksi elektron dan kemampuan *small probe* ( $20 \text{ \AA}$ ) (Karlsson, 2016). Skema instrumen TEM ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Skema komponen TEM (Inkson, 2016)

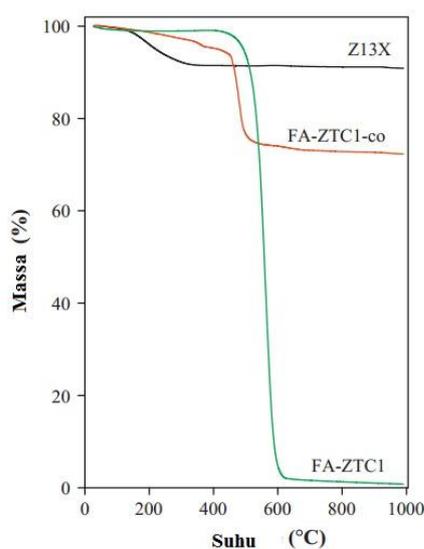
TEM menggunakan energi elektron *beam* yang tinggi dan ditransmisikan ke sampel untuk mencitrakan dan menganalisis mikrostruktur material dengan resolusi skala atomik. Elektron difokuskan dengan lensa elektromagnetik dan membentuk pencitraan yang ditangkap pada layar tangkap atau plat kamera CCD. Pada bagian tersebut, resolusi optik dibatasi aberasi pada lensa elektromagnetik sekitar  $1 - 2 \text{ \AA}$  (Somani dan Umeno, 2007). Resolusi yang tinggi menunjukkan pencitraan mikroskopik kisi kristal sebagai pola pengganggu antara *beam* yang tertransmisi dan yang terdifraksi. Sehingga mikrograf yang teramati berupa garis dan celah, berbentuk butiran antarmuka. Pencitraan bidang gelap/terang (*dark or bright field*) yang dioperasikan pada perbesaran *intermediate* dan kombinasi

difraksi elektron memberikan informasi tentang morfologi, fasa kristal, dan *defect* pada material.

Pada karbon nanomaterial, TEM merupakan instrumen yang dapat mengidentifikasi secara tepat fasa material dan membedakan fasa yang memiliki kesamaan. Sebagai contoh dalam membedakan karbon *nanotube* dan karbon *nanofiber*. Karakteristik karbon *nanotube* yang memiliki struktur *defect* dapat dibedakan secara jelas terhadap karbon *nanofiber* yang memiliki struktur zig-zag atau kiral (Pawlyta, 2013). Sedangkan pada karbon tertemplat zeolit, mikrograf TEM menunjukkan fasa material dengan karakteristik butiran dan celah teratur (Nishihara dan Kyotani, 2012).

#### 2.9.4 Thermogravimetric Analysis (TGA)

Kestabilan termal material padatan dianalisis dengan teknik analisis termogravimetrik (TGA). Teknik ini menggunakan prinsip penentuan hilangnya massa suatu materi karena dekomposisi yang disebabkan adanya pengaruh suhu. Masika dan Mokaya, (2013) melakukan analisis termogravimetrik pada material karbon tertemplat zeolit-X. Gambar 2.11., menunjukkan kurva TGA pada zeolit 13X, karbon tertemplat zeolit-X dan komposit karbon/zeolit. Kurva tersebut menunjukkan adanya massa hilang karbon tertemplat zeolit-X hingga 10% pada rentang suhu 180 – 350 °C.



Gambar 2.11. Kurva TGA zeolit 13X; komposit zeolit/karbon (FA-ztc-co) dan karbon tertemplat zeolit (FA-ztc1) (Masika dan Mokaya, 2013)

Hal itu berkaitan dengan hilangnya massa air yang terkandung dalam materi. Setelah mengalami dekomposisi massa, zeolit akan menunjukkan kestabilan termal pada suhu 1000 °C. Analisis TGA tersebut menunjukkan proses pembentukan karbon tertemplat zeolit-X telah berhasil, dimana karbon menunjukkan berat residu sekitar <2% pada 620 °C dan menandakan karbon telah bebas dari zeolit. Sehingga berdasarkan hal tersebut, pada penelitian ini digunakan analisis TGA untuk mengetahui proses pembentukan karbon pada pori zeolit saat proses karbonisasi.

### 2.9.5 Analisis Adsorpsi Gas N<sub>2</sub>

Analisis adsorpsi gas N<sub>2</sub> merupakan suatu metode analisis struktur pori pada permukaan material padatan. Prinsip kerja analisis ini adalah adsorpsi isotermal gas N<sub>2</sub> yang dialirkan pada permukaan material padatan. Adsorpsi isotermal melibatkan gas N<sub>2</sub> sebagai adsorbat dan material padatan sebagai adsorben dan dilakukan pada suhu konstan serta tekanan vakum. Pada kondisi ini gas lebih mudah teradsorpsi pada permukaan material padatan.

Material berpori seperti karbon tertemplat zeolit biasanya dianalisis struktur porinya dengan menggunakan gas N<sub>2</sub> yang bersifat inert. Untuk menentukan luas permukaan spesifik padatan, digunakan persamaan BET (*Brunauer-Emmett-Teller*). Isotermal BET mengikuti bentuk persamaan di bawah ini:

$$\frac{P}{n(P_0 - P)} = \frac{1}{n_m - c} + \frac{c - 1}{n_m - c} \frac{P}{P_0} \quad (2.2)$$

$P/P_0$  merupakan tekanan uap relatif,  $n$  merupakan jumlah mol yang teradsorpsi pada tekanan  $P$ ,  $n_m$  merupakan kapasitas lapisan *monolayer* dalam mol, dan  $c$  merupakan konsentrasi kesetimbangan. Luas permukaan spesifik dalam isotermal BET dapat dihitung melalui persamaan :

$N$  adalah bilangan avogadro,  $V_m$  merupakan volume gas teradsorpsi per

$$S_{\text{BET}} = \frac{V_m}{22400} N \cdot a_m \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\text{g} \quad (2.3)$$

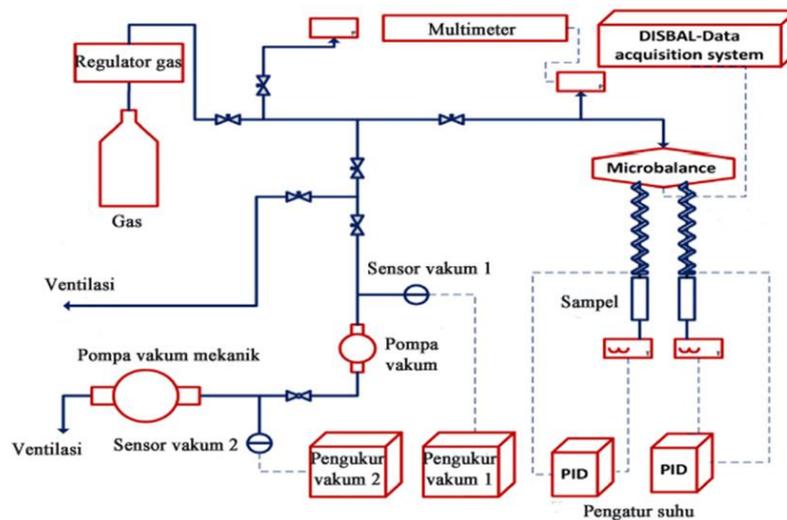
gram adsorben, dan  $a_m$  merupakan luas permukaan adsorben ( $\text{nm}^2$ ) per molekul. Luas permukaan spesifik biasanya ditentukan dengan adsorpsi nitrogen saat 77 K

menggunakan luas molekular nitrogen sebesar 0,162 nm<sup>2</sup> (Bansal dan Goyal, 2005).

## 2.10 Penentuan Kapasitas Adsorpsi CO<sub>2</sub>

Penentuan kapasitas adsorpsi gas CO<sub>2</sub> pada karbon tertemplat zeolit-X dilakukan secara gravimetri dengan pengukuran massa sampel pada setiap interval waktu tertentu. Pengukuran gravimetri dinyatakan dalam %berat seperti pada Persamaan 2.4.

$$\% \text{ berat} = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2.4)$$



Gambar 2.12. Skema uji adsorpsi gas dengan gravimetri (Falahati dan Barz, 2013)

Dimana  $m_t$  adalah massa sampel setelah adsorpsi gas CO<sub>2</sub> sedangkan  $m_0$  adalah massa sampel awal. Metode pengukuran kapasitas adsorpsi gas secara gravimetri yang pernah dilakukan oleh Falahati dan Barz, (2013) menggunakan peralatan *microbalance* yang disambungkan pada monitor (*DISBAL-Data acquisition system*) untuk mengetahui perubahan berat yang terjadi, regulator gas, pengatur suhu, pengatur tekanan gas yang disambungkan dengan multimeter, pengatur tekanan pompa vakum dan pompa vakum.

## 2.11 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi digunakan untuk mengamati proses adsorpsi gas pada material berpori. Model kinetika adsorpsi yang dapat digunakan antara lain orde

satu semu, orde dua semu, dan difusi intra partikel. Penentuan model kinetika adsorpsi dilakukan dengan menguji kurva hasil adsorpsi pada ketiga model tersebut. Model kinetika yang sesuai dengan pengujian adsorpsi ditentukan berdasarkan nilai koefisien korelasi yang paling besar diantara ketiga model.

### 2.11.1 Kinetika Orde Satu Semu

Umumnya orde satu semu digunakan untuk menggambarkan adsorpsi yang ditentukan dengan persamaan berikut :

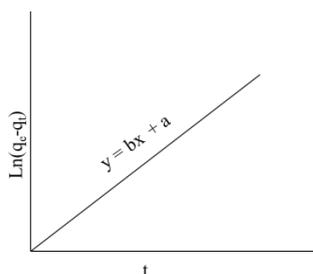
$$\frac{dq_t}{dt} = k_f(q_e - q_t) \quad (2.5)$$

Dengan  $q_t$  (mmol/g) adalah jumlah adsorbat yang diserap pada waktu  $t$  (menit),  $q_e$  (mmol/g) adalah kapasitas adsorpsi pada saat kesetimbangan dan  $k_f$  (menit<sup>-1</sup>) yaitu konstanta laju orde satu semu. Persamaan 2.5 dapat diintegrasikan lebih lanjut dengan kondisi mula-mula  $q_t = 0$  pada  $t = 0$  dan  $q_t = q_t$  pada  $t = t$ , sehingga didapatkan persamaan berikut :

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_f t \quad (2.6)$$

(Gunawan, 2014)

Apabila  $\ln(q_e - q_t)$  diplotkan terhadap  $t$ , maka akan diperoleh kurva linear dengan  $\ln q_e$  sebagai intersep dan  $k_f$  atau  $k_i$  sebagai slopnya. Secara umum, grafik orde satu semu dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Kurva orde satu semu

### 2.11.2 Kinetika Orde Dua Semu

Penentuan adsorpsi dapat ditentukan dengan menggunakan model orde dua semu dengan persamaan berikut :

$$\frac{dq_t}{dt} = k_s(q_e - q_t)^2 \quad (2.7)$$

Dimana  $k_s$  (g/mg menit) adalah konstanta laju orde dua semu,  $q_t$  (mg/g) adalah jumlah adsorbat yang diserap pada waktu  $t$  (menit),  $q_e$  (mg/g) adalah kapasitas adsorpsi kesetimbangan. Persamaan 2.7 dapat diintegrasikan lebih lanjut dengan kondisi mula-mula  $q_t = 0$  pada  $t = 0$  dan  $q_t = q_t$  pada  $t = t$ , sehingga didapatkan persamaan berikut :

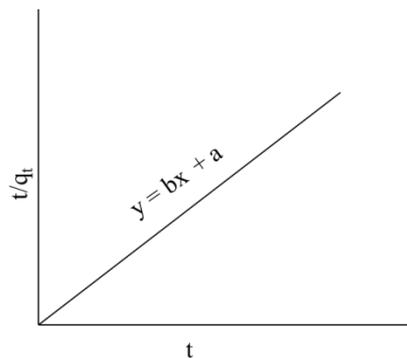
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_s q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.8)$$

Laju adsorpsi awal,  $h$  (mg/g menit) sedangkan  $t \rightarrow 0$  dapat dituliskan sebagai berikut :

$$h = k_s q_e^2 \quad (2.9)$$

Nilai dari  $k_s$ ,  $q_e$  dan  $h$  dapat ditentukan melalui slope dan intersep berdasarkan data eksperimen dari plot grafik antara  $\frac{t}{q_t}$  versus  $t$  (Gunawan, 2014).

Secara umum, grafik orde dua semu tertera pada Gambar 2.14.



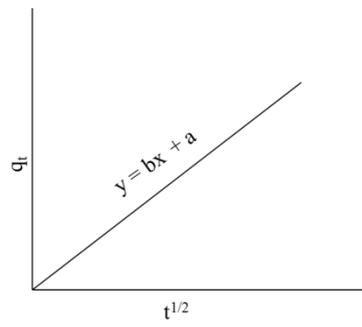
Gambar 2.14. Kurva orde dua semu

### 2.11.3 Difusi Intra Partikel

Persamaan model difusi intra partikel digunakan untuk menentukan proses adsorpsi yang terjadi pada material berpori dan dinyatakan sebagai berikut :

$$q_t = k_{id} t^{1/2} + C \quad (2.10)$$

Dengan  $t$  (menit) adalah waktu. Apabila  $q_t$  diplotkan terhadap  $t^{1/2}$ , maka akan didapatkan grafik linear dengan slop yang berupa nilai  $k_{id}$  ( $\text{mmol g}^{-1} \text{ menit}^{-0.5}$ ) yang merupakan konstanta laju difusi intra partikel dan nilai  $C$  yang merupakan intersep dari persamaan garis lurus menyatakan ketebalan dari batas lapisan (Gunawan, 2014). Secara umum grafik dari difusi intra partikel tertera pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Kurva difusi intra partikel

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Alat dan Bahan**

##### **3.1.1 Alat**

Peralatan yang digunakan untuk sintesis karbon tertemplat zeolit-X dengan variasi penambahan rasio sukrosa/zeolit-X antara lain botol dan gelas plastik (*polipropilena*), reaktor hidrotermal (*autoclave stainless steel*), *tubular furnace*, oven, alat refluks, *hot plate-stirer*, pengaduk magnetik, pengukur pH, kertas saring. Sedangkan instrumen yang digunakan untuk karakterisasi antara lain *X-Ray Diffraction (XRD) (X'pert pro PANalytical)*, *Scanning Electron Microscope (SEM) (Zeiss Evo MA and LS Series)*, *Transmission Electron Microscopy (TEM) (JEM-1400)*, *Thermogravimetric Analysis (TGA) (METTLER STAR<sup>o</sup>)* dan isothermal adsorpsi-desorpsi N<sub>2</sub> dengan metode *Brenauer-Emmet-Teller (BET) (Micromeritics ASAP 2020)*, dan pengukuran kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan peralatan gravimetri yang terdiri dari timbangan analitik, tabung *furnace*, pompa vakum, *mass flow control (MFC)*, tabung gas CO<sub>2</sub> dan sampel *holder*.

##### **3.1.2 Bahan**

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain padatan natrium aluminat (NaAlO<sub>2</sub>), larutan natrium silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), air demineralisasi, pelet NaOH (99% p.a), sukrosa (98%, Fluka), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98% p.a), gas N<sub>2</sub> *high purity (HP) (99,99% N<sub>2</sub>)*, HCl (37%, SAP), HF (48%, p.a), dan gas CO<sub>2</sub>.

#### **3.2 Prosedur Kerja**

##### **3.2.1 Sintesis Zeolit-X**

Pada penelitian ini sintesis zeolit-X dilakukan dengan perbandingan molar 4 Na<sub>2</sub>O : 0,2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : SiO<sub>2</sub> : 200 H<sub>2</sub>O. Proses sintesis terdiri atas beberapa tahap. Tahap pertama, diambil pelet NaOH dan dilarutkan dengan air demineralisasi dalam botol propilena. Larutan tersebut dibagi menjadi dua bagian untuk dicampurkan dengan NaAlO<sub>2</sub> dan larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Masing-masing campuran

diberi nama, (A) untuk campuran NaOH/NaAlO<sub>2</sub> dan (B) untuk campuran NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Kedua campuran tersebut diaduk dengan kecepatan konstan dan suhu ruang selama 10 menit. Setelah itu, kedua larutan (A dan B) dicampur dan diaduk dengan kecepatan konstan pada suhu ruang selama 3 jam.

Setelah pengadukan 3 jam, larutan dimasukkan ke dalam reaktor hidrotermal (*autoclave stainless steel*) untuk dilakukan proses hidrotermal pada suhu 100 °C selama 24 jam. Zeolit-X hasil proses hidrotermal dicuci dengan air demineralisasi hingga pH 8, selanjutnya dikeringkan pada suhu 100 °C selama 24 jam.

### **3.2.2 Sintesis Karbon Tertemplat Zeolit-X**

Pada penelitian ini, sintesis material karbon tertemplat zeolit dilakukan menggunakan sukrosa sebagai prekursor karbon dan zeolit-X sebagai material templat dari hasil sintesis sesuai dengan prosedur pada subbab 3.2.1. Proses sintesis material karbon dengan templat zeolit-X terdiri atas tiga tahapan yaitu impregnasi sukrosa pada zeolit-X, karbonisasi material, dan pencucian untuk menghilangkan templat (Su dkk., 2004; Masika dan Mokaya, 2013; Musyoka dkk., 2014).

Pada tahap impregnasi zeolit-X dengan sukrosa, dilakukan proses *degassing* terlebih dahulu. Sebanyak 10 g zeolit-X ditempatkan pada holder *stainless steel* dan dimasukkan ke dalam *tubular furnace*. Kondisi *degassing* diatur pada suhu 200 °C selama 4 jam dengan dialiri gas nitrogen. Hal tersebut dilakukan agar lingkungan pada *tubular furnace* dijaga dalam atmosfer nitrogen. Setelah proses selesai, suhu *tubular furnace* akan berangsur turun secara otomatis hingga suhu ruang dan kondisi atmosfer nitrogen tetap dijaga. Pada saat sudah mencapai suhu ruang, zeolit-X dikeluarkan dari *tubular furnace* dan didinginkan pada suhu kamar. Setelah itu dicampurkan dengan 5 g sukrosa yang telah dilarutkan dalam 50 mL asam sulfat 0,35 M. Campuran tersebut diaduk dengan kecepatan 100 rpm selama 72 jam pada suhu ruang. Tahap impregnasi ini dilakukan kembali untuk variasi penambahan sukrosa 7,5; 10; dan 12,5 g (Kayadoe, 2013).

Proses karbonisasi dilakukan dengan menempatkan komposit sukrosa/zeolit-X dalam tabung *stainless steel* dan dipanaskan pada suhu 800 °C selama 4 jam dibawah aliran gas N<sub>2</sub> (laju alir 30 cm<sup>3</sup>/menit) serta laju pemanasan 2 °C/menit.

Komposit sukrosa/zeolit-X yang telah dikarbonisasi, dicuci dengan asam flourat (HF) 5% selama 1 jam untuk menghilangkan templat zeolit. Setelah itu dicuci dengan air demineralisasi hingga pH netral. Sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C selama 12 jam. Setelah itu, sampel direfluks menggunakan 37% asam klorat (HCl) selama 1 jam untuk menghilangkan residu alumina yang masih tersisa. Padatan karbon hasil refluks disaring dan dicuci dengan air demineralisasi hingga pH netral. Sampel dikeringkan pada suhu 120 °C selama 12 jam. Pencucian dilanjutkan dengan merendam komposit ke dalam HF 48% selama 24 jam untuk menghilangkan sisa silika. Sampel dicuci dengan air demineralisasi hingga pH netral dan dilanjutkan pengeringan pada suhu 120 °C selama 12 jam. Karbon hasil pencucian tersebut merupakan karbon tertemplat zeolit-X.

### **3.2.3 Karakterisasi**

Karakterisasi XRD dan SEM dilakukan terlebih dahulu pada zeolit-X hasil sintesis untuk mengkonfirmasi pembentukan templat. Kemudian, pada KTZ-X dilakukan karakterisasi XRD, SEM, TEM, TGA, dan isothermal adsorpsi-desorpsi N<sub>2</sub> dengan metode BET, untuk mengetahui pengaruh dari variasi penambahan rasio sukrosa/zeolit-X.

#### **3.2.3.1 XRD**

Karakterisasi XRD terhadap sampel padatan hasil sintesis dilakukan pada skala 2θ sudut pendek antara 5°-50°. Karakterisasi ini menggunakan sumber radiasi CuKα pada panjang gelombang 1,54 Å. Pada zeolit-X hasil sintesis, XRD digunakan untuk mengidentifikasi pembentukan struktur fasa kristal zeolit. Pada KTZ-X, XRD digunakan untuk mengkonfirmasi hilangnya templat zeolit-X dan mengetahui pengaruh rasio sukrosa/zeolit-X terhadap keteraturan struktur KTZ-X.

#### **3.2.3.2 SEM**

Untuk mengamati ciri mikroskopis struktur permukaan karbon tertemplat zeolit-X, dilakukan teknik analisis SEM. Selain itu, teknik ini digunakan juga

untuk membandingkan morfologi permukaan material sebelum dan sesudah aktivasi. Sampel diletakkan pada permukaan *holder* yang telah diberi *carbon tape*, kemudian dilakukan pelapisan emas pada permukaan sampel (*coating*). Setelah dilakukan *coating*, sampel dimasukkan dalam ruang sampel yang telah divakum terlebih dahulu, lalu dilakukan pengamatan morfologi sampel dengan perbesaran tertentu.

### **3.2.3.3 TEM**

Karakterisasi TEM pada penelitian ini dilakukan untuk menganalisis mikrostruktur KTZ-X dengan resolusi skala atomik. Karakteristik mikrostruktur KTZ-X meliputi morfologi, fasa kristal, maupun celah-celah *defect* pada antarmuka material. Prinsip yang digunakan pada karakterisasi TEM adalah sampel KTZ-X ditembakkan elektron dengan akselerasi voltase 80 – 300 kV. Energi elektron yang ditransmisikan sebesar 200 – 300 keV menuju sampel dan kemudian elektron dipencarkan. Pencaran elektron akan ditangkap oleh lensa *postspecimen*, *aperture*, dan sistem deteksi yang akan membentuk mikrograf material. Mikrograf material pada TEM terdiri atas Bright Field (BF) dan Dark Field (DF) yang merepresentasikan karakteristik morfologi, fasa, dan defect pada KTZ-X.

### **3.2.3.4 TGA**

Karakterisasi analisis termal dengan TGA pada penelitian ini dilakukan untuk mempelajari proses pembentukan karbon di dalam pori zeolit-X saat proses karbonisasi. TGA-DTA juga menganalisis pengaruh suhu terhadap perubahan fisik yang terjadi pada sampel. Selain itu, karakterisasi ini digunakan untuk menentukan suhu aktivasi material karbon tertemplat zeolit-X yang sesuai.

### **3.2.3.5 Isotermal adsorpsi-desorpsi Gas N<sub>2</sub> dengan metode BET**

Teknik adsorpsi gas N<sub>2</sub> dilakukan untuk menganalisis struktur pori karbon tertemplat zeolit-X sebelum dan sesudah diaktivasi dengan KOH. Analisis ini dilakukan pada 77 K dengan metode standar BET (Brunauer – Emmett - Teller). Sampel di *degassing* terlebih dahulu untuk menghilangkan partikel gas selain N<sub>2</sub>

yang terdapat pada permukaan sampel. Analisis ini memberikan informasi terkait luas permukaan, volume pori, dan diameter pori karbon tertemplat zeolit-X.

### 3.2.4 Penentuan Kapasitas Adsorpsi-Desorpsi Gas CO<sub>2</sub>

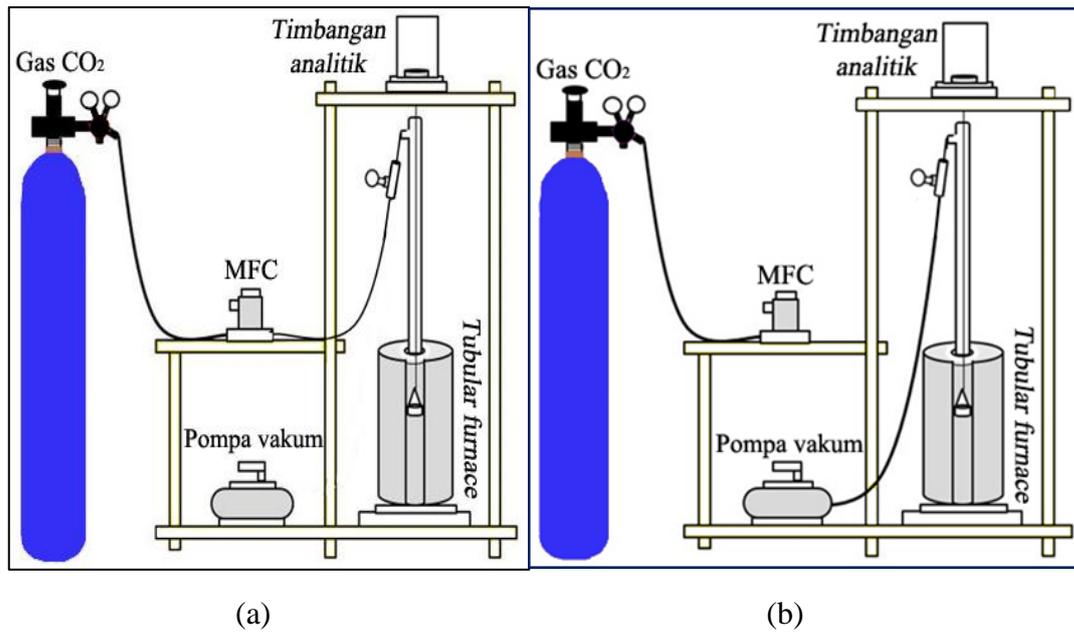
Penentuan kapasitas adsorpsi gas CO<sub>2</sub> pada material karbon tertemplat zeolit-X dilakukan dengan metode gravimetri. Pada pengujian ini, sampel diambil sebanyak 2 gram untuk dikeringkan selama 2 jam pada suhu 105 °C. Kemudian sampel dikeringkan pada suhu ruang dan disimpan dalam desikator.

Sampel yang telah dikeringkan diambil lagi sebanyak 1 gram dan dimasukkan ke dalam *sample holder* pada rangkaian alat gravimetrik seperti pada Gambar 3.1. Sampel di *degassing* menggunakan *tubular furnace* dalam kondisi vakum. Setelah itu, suhu sistem diatur pada 30°C dan tekanan 1 bar untuk proses adsorpsi. Berat sampel diamati hingga konstan, lalu dicatat sebagai berat awal ( $m_0$ ). Mass Flow Control (MFC) dinyalakan, lalu ditunggu hingga menunjukkan angka nol. Laju aliran gas karbon dioksida diatur pada 20 mL/menit menggunakan MFC. Knop tabung gas CO<sub>2</sub> dibuka perlahan hingga gas dapat mengalir ke dalam sistem. Pengamatan dilakukan setiap 1 menit terhadap perubahan berat sebagai berat akhir setelah adsorpsi ( $m_t$ ) hingga diperoleh berat konstan. Kapasitas adsorpsi karbon dioksida menggunakan metode gravimetri [%CO<sub>2</sub>(Ads)] dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.1:

$$\% \text{CO}_2 (\text{ads}) = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (3.1)$$

Pada proses desorpsi, pengurangan masa yang terjadi dicatat setiap 1 menit hingga mencapai masa konstan. Masa akhir saat adsorpsi mencapai kesetimbangan dicatat sebagai masa awal desorpsi ( $m_0$ ), sedangkan masa yang berkurang tiap 1 menit disebut dengan  $m_t$ . Kapasitas CO<sub>2</sub> yang telah terdesorp [%CO<sub>2</sub>(Des)] dapat dihitung menggunakan Persamaan (3.2).

$$\% \text{CO}_2 (\text{des}) = \frac{m_0 - m_t}{m_t} \times 100\% \quad (3.2)$$



Gambar 3.1. Rangkaian alat metode gravimetri, (a) proses adsorpsi CO<sub>2</sub> dan (b) proses desorpsi CO<sub>2</sub>

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian hasil dan pembahasan dijelaskan mengenai pengaruh variasi rasio massa sukrosa/zeolit-X terhadap struktur, permukaan, kestabilan termal, porositas dan kemampuan adsorpsi karbon tertemplat zeolit-X (KTZ-X). Sintesis KTZ-X dilakukan dengan metode impregnasi sederhana. Material hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan *X-ray Diffraction (XRD)*, *Scanning Electron Microscopy (SEM)*, *Transmission Electron Microscope (TEM)*, *Thermal Gravimetric Analysis (TGA)*, dan isothermal adsorpsi-desorpsi gas N<sub>2</sub> dengan metode *Brenauer-Emmet-Teller (BET)*. Kemudian uji adsorpsi gas CO<sub>2</sub> pada material KTZ-X dilakukan dengan metode gravimetri.

#### 4.1 Sintesis dan Karakterisasi Karbon Tertemplat Zeolit-X

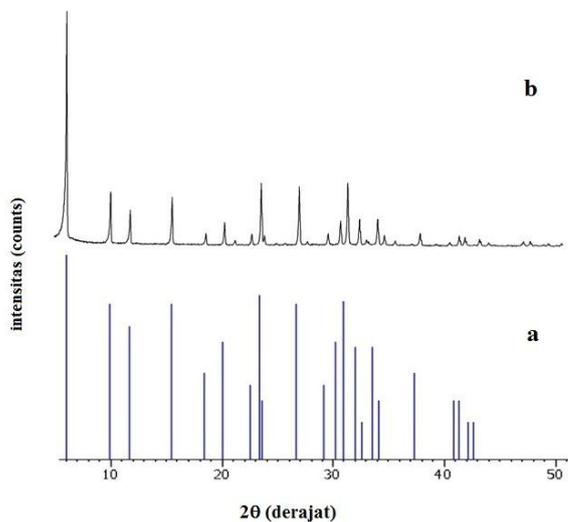
Pada penelitian ini zeolit-X yang digunakan sebagai templat KTZ-X disintesis sesuai dengan prosedur penelitian Devianti (2014) yang telah melakukan optimasi sintesis zeolit-X dengan metode hidrotermal pada suhu 100 °C selama 24 jam. Zeolit-X yang dihasilkan setelah proses hidrotermal secara fisik berbentuk padatan putih seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Padatan putih zeolit-X setelah proses hidrotermal

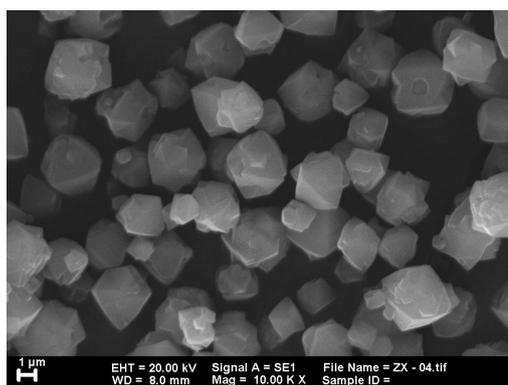
Zeolit-X dikarakterisasi dengan XRD untuk mengkonfirmasi pembentukan fasa zeolit-X melalui kesesuaian pola XRD dengan standar. Pola XRD zeolit-X hasil sintesis dicocokkan dengan standar JCPDS No. 00-038-0237 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Hasil menunjukkan kesesuaian antara pola XRD zeolit-X hasil sintesis dengan pola XRD standar. Selain itu, fasa kristal zeolit-X

memiliki keteraturan tinggi yang ditunjukkan dengan adanya puncak tinggi pada  $2\theta = 6^\circ$ . Hal ini mengindikasikan bahwa zeolit-X telah berhasil disintesis.



Gambar 4.2. Pola XRD zeolit-X standar JCPDS No.00-038-0237 (a) dan zeolit-X hasil sintesis (b)

Karakterisasi SEM dilakukan untuk mengkonfirmasi pembentukan morfologi zeolit-X. Hasil karakterisasi SEM zeolit-X ditunjukkan pada Gambar 4.3. Mikrograf SEM zeolit-X menunjukkan keteraturan kristal oktahedral yang berbentuk kotak. Hasil karakterisasi ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan Devianti (2014) dan Purnomo dkk. (2012). Zeolit-X hasil sintesis ini kemudian digunakan sebagai templat pada sintesis KTZ-X.



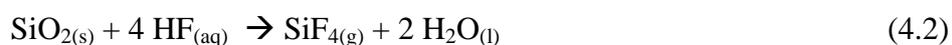
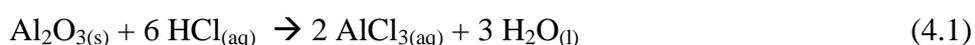
Gambar 4.3. Mikrograf SEM zeolit-X

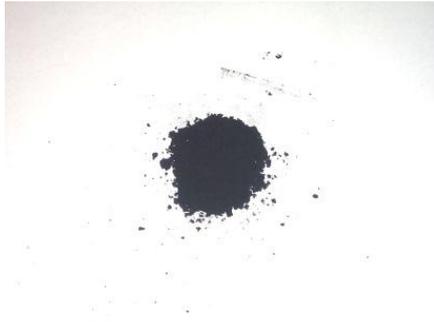
KTZ-X disintesis dari sukrosa sebagai prekursor karbon dan zeolit-X sebagai templat. Pada tahap sintesis KTZ-X dilakukan variasi penambahan sukrosa dengan rasio massa sukrosa/zeolit-X (g/g) yaitu 0,5; 0,75; 1; dan 1,25.

Sukrosa dimasukkan ke dalam pori dan *channel* zeolit-X melalui metode impregnasi, dengan cara melarutkan sukrosa terlebih dahulu dalam larutan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> encer untuk mempermudah molekul sukrosa memasuki pori zeolit-X pada proses impregnasi. Setelah itu, dilakukan polimerisasi melalui proses karbonisasi untuk membentuk komposit karbon.

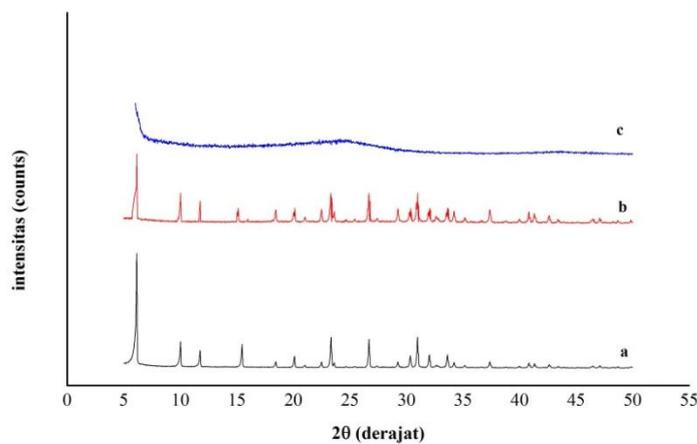
Karbonisasi komposit sukrosa/zeolit-X dilakukan untuk membentuk material komposit karbon/zeolit-X. Mekanisme pembentukan karbon dari sukrosa terjadi melalui dekomposisi yang dimulai pada suhu 180 °C. Pada proses ini, terjadi dekomposisi material-material volatil dan pengotor dari bahan dasar sukrosa. Hilangnya material tersebut bersamaan dengan terbentuknya karbon berpori dari sukrosa yang berada di dalam kerangka zeolit-X hingga suhu karbonisasi mencapai 800 °C untuk membentuk spesi komposit karbon yang stabil secara termal.

Komposit karbon/zeolit-X yang diperoleh kemudian dicuci dengan asam kuat untuk menghilangkan templat zeolit. Karena struktur *framework* zeolit-X terdiri atas Si dan Al yang saling dihubungkan oleh atom O membentuk unit bangun sekunder, maka dibutuhkan dua jenis asam yang berbeda yaitu asam florida (HF) dan asam klorida (HCl) untuk merusak struktur zeolit (Yang dkk., 2006). Proses penghilangan Si dan Al dijabarkan dalam Persamaan 4.1 (Omegna dkk., 2001) dan Persamaan 4.2 (Saito, 1996). HF digunakan untuk memecah ikatan atom Si, karena sifat keelektronegatifannya yang sangat kuat, sehingga mampu mengekstrak Si dalam jumlah besar (Anggarini, 2013). Sedangkan HCl digunakan untuk menghilangkan Al dengan membentuk garam yang menyebabkan terjadinya reaksi dealuminasi (Anggarini, 2013). Hasil pencucian komposit karbon/zeolit-X berupa padatan KTZ-X berwarna hitam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.





Gambar 4.4. Padatan KTZ-X setelah pencucian dengan asam

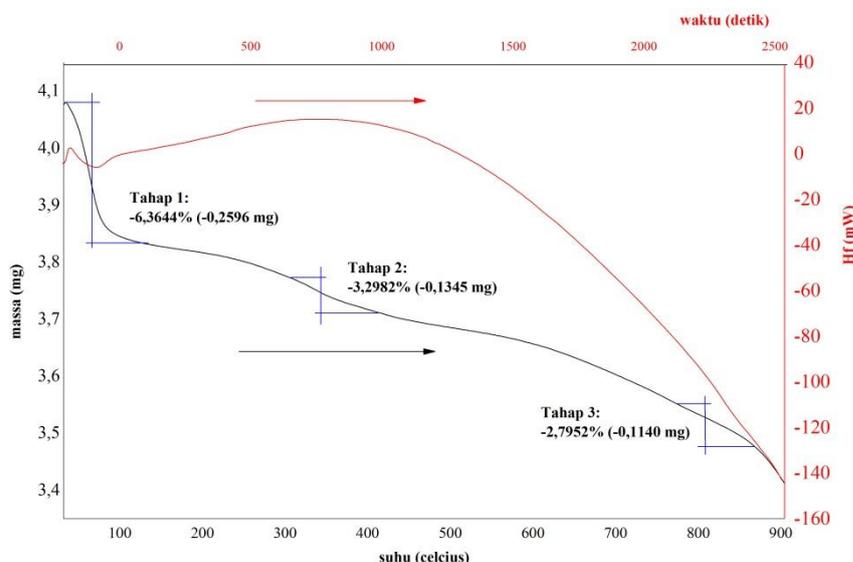


Gambar 4.5. Pola XRD (a) zeolit-X; (b) komposit karbon/zeolit-X sebelum dicuci dengan asam; dan (c) KTZ-X

Padatan karbon hasil sintesis di atas, dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengamati keteraturan karbon dalam memasuki pori zeolit-X dan mengkonfirmasi hilangnya templat zeolit. Terlebih dahulu, pola XRD komposit karbon/zeolit-X sebelum pencucian dibandingkan dengan pola XRD zeolit-X. Gambar 4.5 menunjukkan bahwa pola XRD komposit karbon/zeolit-X memiliki kesamaan dengan pola XRD zeolit-X. Komposit karbon/zeolit-X memiliki karakteristik puncak zeolit-X, terutama munculnya puncak pada  $2\theta = 6^\circ$ . Hal ini mengindikasikan keteraturan karbon dalam memasuki struktur pori zeolit-X tanpa merubah ataupun merusak struktur kristal zeolit-X. Setelah itu, pola XRD komposit karbon/zeolit-X dibandingkan dengan pola XRD KTZ-X. Gambar 4.5 menunjukkan puncak karakteristik komposit karbon/zeolit-X tidak tampak pada pola XRD KTZ-X. Hilangnya puncak tersebut menandakan keberhasilan

penghilangan templat zeolit-X setelah proses pencucian dengan asam. Namun, pada pola XRD KTZ-X muncul puncak pada  $2\theta = 6^\circ$ , yang menunjukkan bidang (111), yang mengindikasikan karbon berhasil mereplika negatif struktur zeolit-X setelah pencucian (Su dkk., 2004). Ilustrasi struktur KTZ-X ini dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Proses dan tahapan yang terjadi selama pembentukan KTZ-X juga dianalisis dengan karakterisasi TGA-DSC, seperti tertera pada Gambar 4.6. Tahapan dekomposisi KTZ-X terdiri dari tiga tahapan pengurangan massa. Dekomposisi tahap pertama terjadi pada suhu  $59,68^\circ\text{C}$  dengan pengurangan massa sebesar  $6,3664\%$  ( $0,2596\text{ mg}$ ). Tahap ini mengindikasikan terjadi pengurangan massa air yang terdapat pada material. Lembah kurva DSC pada suhu  $59,68^\circ\text{C}$  menunjukkan terjadinya reaksi pelepasan molekul air yang terikat secara fisik secara endotermis.



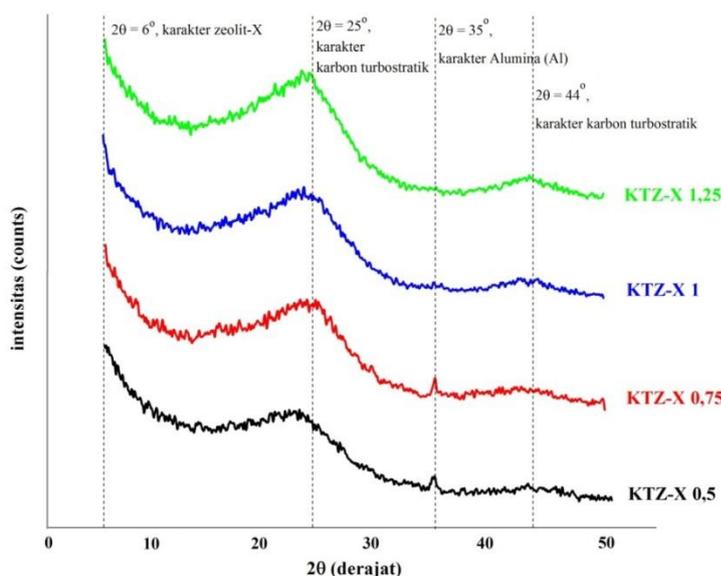
Gambar 4.6. Kurva TGA (---) dan DSC (---) KTZ-X

Tahapan kedua terjadi pengurangan massa sebesar  $3,2982\%$  ( $0,1345\text{ mg}$ ) pada suhu  $336,18^\circ\text{C}$  mengindikasikan pengurangan air permukaan dan molekul volatil yang ditunjukkan adanya puncak endotermis lebar pada kurva DSC. Pada tahap ini, sisa air permukaan akan terlepas secara sempurna dan terjadi pengurangan molekul C ataupun H. Pada tahapan ini, terjadi pembentukan

sejumlah pori terkait dengan hilangnya beberapa material volatil dengan berat molekul yang ringan. Selain itu, tahapan ini juga menunjukkan pada saat karbonisasi komposit sukrosa/zeolit-X terjadi pengurangan massa zeolit-X pada suhu diatas 300 °C (Abd-Elrahman dan Ahmed, 2009). Tahapan ketiga terjadi pengurangan massa sebesar 2,7952% (0,1140 mg) pada kisaran suhu 845 °C. Pada tahapan ini kurva mengalami penurunan drastis yang mengindikasikan hilangnya templat zeolit (Masika dan Mokaya, 2013).

#### 4.1.1 Pengaruh Rasio Massa Sukrosa/Zeolit-X Terhadap Struktur KTZ-X

Pengaruh rasio massa sukrosa/zeolit-X terhadap struktur KTZ-X dianalisis dengan karakterisasi XRD. Gambar 4.7. menunjukkan pola XRD empat sampel KTZ-X (KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25). Hasil analisis tersebut menunjukkan keempat sampel KTZ-X memiliki pola XRD yang sama pada puncak  $2\theta = 6^\circ$ . Puncak tersebut berasal dari bidang (111) yang merupakan karakteristik dari zeolit-X. Hal ini mengindikasikan keempat sampel KTZ-X memiliki struktur yang mereplika negatif struktur zeolit-X. Pembentukan struktur replika negatif KTZ-X tersebut sesuai dengan hasil penelitian tentang KTZ yang dilakukan oleh Cai dkk. (2014) dan Nishihara dan Kyotani (2012).



Gambar 4.7. Pola XRD KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25

Pengaruh variasi rasio massa sukrosa/zeolit-X terhadap pola XRD keempat sampel KTZ-X ditunjukkan pada puncak lebar  $2\theta = 25^\circ$  dan  $44^\circ$ . Seperti

yang ditunjukkan pada Gambar 4.7., puncak lebar pada  $25^\circ$  dan  $44^\circ$  semakin terlihat tajam seiring dengan meningkatnya rasio massa sukrosa/zeolit-X pada KTZ-X. Dua puncak tersebut adalah bidang (002) dan (100) yang mengindikasikan terbentuknya karbon turbostratik, yaitu karbon grafit heksagonal (h-grafit) yang tersusun atas lapisan *graphene* (Li dkk., 2007). Menurut Cai dkk. (2014) pembentukan karbon turbostratik berasal dari prekursor karbon yang tidak terdeposit di dalam pori selama proses sintesis KTZ-X.

Penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X pada keempat sampel KTZ-X juga menunjukkan pengaruh pada puncak kecil tajam  $2\theta = 35^\circ$ . Gambar 4.7. menunjukkan intensitas puncak  $35^\circ$  cenderung menurun dan semakin menghilang seiring dengan bertambahnya rasio massa sukrosa/zeolit-X. Menurut Singh dan Sarkar (2014) puncak  $35^\circ$  merupakan karakteristik dari Alumina (Al). Menurut Yi dkk. (2012) sisi aktif Al zeolit-X dengan kation  $\text{Na}^+$  memiliki polaritas yang kuat. Polaritas tersebut menyebabkan sukrosa masuk ke dalam pori dan berinteraksi secara fisika dengan sisi Al selama proses impregnasi. Komposisi sukrosa yang lebih sedikit dari zeolit-X menyebabkan masih terdapat sedikit Al yang tidak berinteraksi dengan sukrosa selama pembentukan karbon, sehingga muncul puncak kecil dan tajam pada  $2\theta = 35^\circ$ .

Berdasarkan hasil analisis XRD keempat sampel KTZ-X di atas, penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X tidak memberikan pengaruh apapun terhadap pembentukan struktur replika negatif KTZ-X. Keempat sampel menunjukkan pola XRD yang sama pada puncak  $6^\circ$ . Namun, penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X justru meningkatkan pembentukan struktur karbon turbostratik pada KTZ-X. Hal tersebut ditunjukkan dengan peningkatan intensitas pada puncak lebar  $25^\circ$  dan  $44^\circ$ . Selain itu, penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X juga memperkecil peluang munculnya struktur Al pada KTZ-X, yang direpresentasikan dengan adanya puncak kecil dan tajam pada  $2\theta = 35^\circ$ .

#### **4.1.2 Pengaruh Rasio Massa Sukrosa/Zeorlit-X Terhadap Morfologi dan Mikrostruktur KTZ-X**

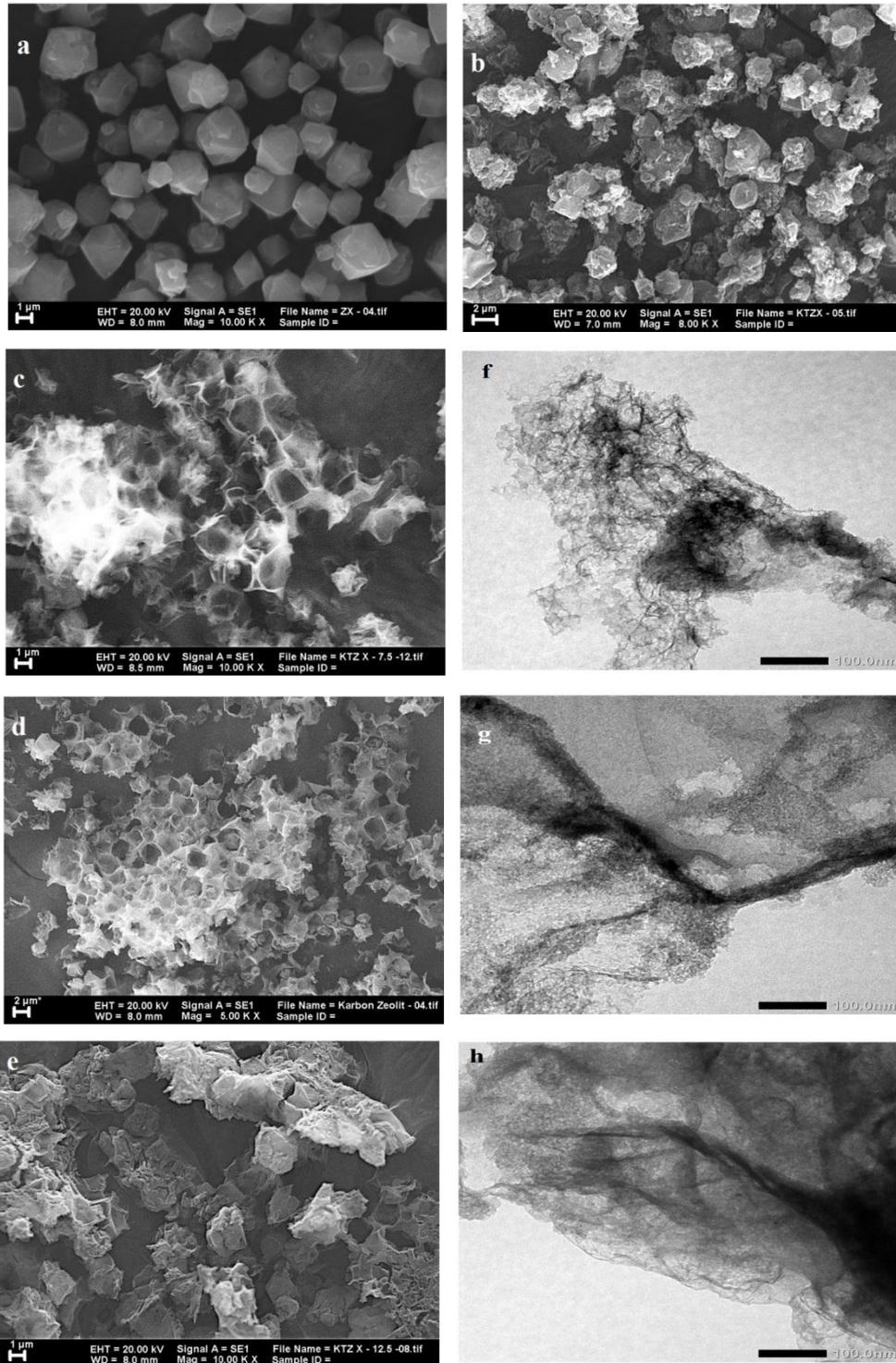
Pengaruh penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X terhadap morfologi KTZ-X dianalisis dengan karakterisasi SEM, seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 4.8. Parameter yang digunakan untuk menganalisis morfologi keempat sampel KTZ-X yaitu mencocokkan morfologi KTZ-X dengan templat zeolit-X yang berbentuk kristal oktahedral (Nishihara dan Kyotani, 2012; Cai dkk., 2014; Anggarini, 2013; Gunawan, 2014). Kesesuaian morfologi antara KTZ-X dan zeolit-X mengalami penurunan seiring dengan penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X. Hal tersebut ditunjukkan dengan semakin sedikitnya partikel KTZ-X yang mereplika kristal oktahedral zeolit-X. Selain itu, gumpalan dan agregat yang diduga sebagai karbon turbostratik pada partikel KTZ-X semakin bertambah seiring dengan peningkatan rasio massa sukrosa/zeolit-X.

Pembentukan karbon turbostratik pada KTZ-X mengindikasikan bahwa proses pengisian pori templat zeolit-X oleh sukrosa selama impregnasi berjalan kurang sempurna. Beberapa sukrosa tidak terdeposit ke dalam kerangka dan pori zeolit-X. Ketidakmampuan sukrosa memasuki saluran pori disebabkan adanya *pore blocking* pada saat impregnasi. Menurut Alam dan Mokaya (2011) *pore blocking* dapat terjadi karena sukrosa melakukan kontak terlebih dahulu dengan permukaan luar partikel zeolit-X sebelum terdifusi ke dalam pori. Beberapa partikel tersebut membentuk blokade yang dapat mempersulit partikel sukrosa lain untuk memasuki saluran pori zeolit-X. Hal ini menyebabkan terbentuknya karbon turbostratik yang dominan terlihat pada KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25.

Pengaruh variasi rasio massa sukrosa/zeolit-X terhadap mikrostruktur KTZ-X juga dianalisis dengan karakterisasi TEM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8f,g,h. Parameter mikrostruktur KTZ-X yang dianalisis meliputi morfologi, guratan dan celah kecil pada permukaan material. Mikrograf TEM ketiga sampel KTZ-X (KTZ-X 0,75; 1; dan 1,25) menunjukkan peningkatan morfologi bidang gelap seiring dengan penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X. Menurut Li dkk. (2007) bidang gelap yang teramati pada mikrograf TEM KTZ mengindikasikan karbon turbostratik. Sebaliknya, guratan garis dan celah kecil pada permukaan KTZ-X mengalami peningkatan dan keteraturan seiring dengan penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X. Menurut Masika dan Mokaya (2013),

guratan garis dan celah kecil tersebut merupakan mikropori yang teramati pada permukaan KTZ-X.

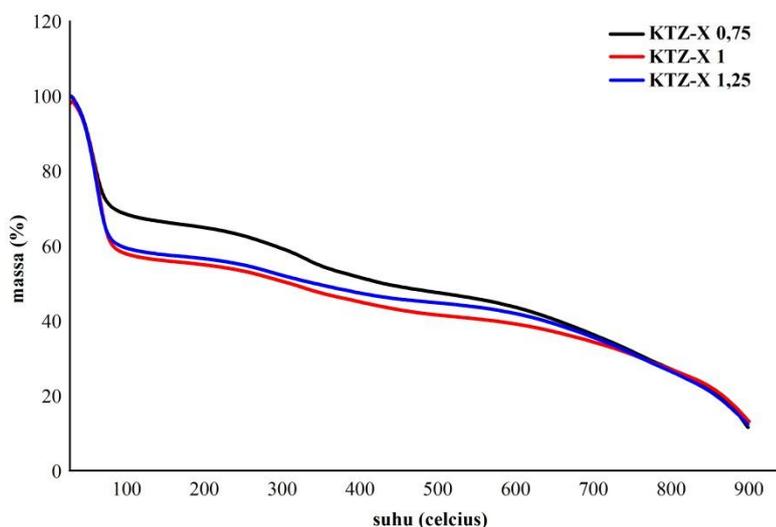


Gambar 4.8. Mikrograf SEM : (a) zeolit-X; (b) KTZ-X 0,5; (c) KTZ-X 0,75; (d) KTZ-X 1; (e) KTZ-X 1,25 dan mikrograf TEM : (f) KTZ-X 0,75; (g) KTZ-X 1; (h) KTZ-X 1,25

Berdasarkan hasil karakterisasi SEM dan TEM di atas, peningkatan rasio massa sukrosa/zeolit-X menyebabkan penurunan jumlah partikel KTZ-X yang berbentuk menyerupai kristal oktahedral zeolit-X dan meningkatkan pembentukan struktur karbon turbostratik. Hasil karakterisasi SEM dan TEM tersebut mendukung hasil karakterisasi XRD yang telah dilakukan. Selain itu, karakterisasi TEM juga menunjukkan bahwa *channel* mikropori pada KTZ-X semakin meningkat seiring dengan peningkatan rasio massa sukrosa/zeolit-X.

#### 4.1.3 Pengaruh Rasio Massa Sukrosa/Zeolit-X Terhadap Kestabilan Termal KTZ-X

Pengaruh penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X terhadap kestabilan termal KTZ-X dianalisis dengan karakterisasi TGA. Gambar 4.9. menunjukkan adanya pergeseran dekomposisi pada KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25. Pada suhu 50-60 °C, dekomposisi KTZ-X 1 dan KTZ-X 1,25 lebih besar dibandingkan KTZ-X 0,75 yaitu masing-masing 7,5564% dan 6,5334%. Hal ini mengindikasikan pengurangan air pada KTZ-X 1 dan KTZ-X 1,25 lebih besar dari KTZ-X 0,75.



Gambar 4.9. Kurva TGA KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25

Pada suhu di atas 300 °C, KTZ-X 0,75 mengalami pengurangan massa yang paling besar yaitu 3,2982%, KTZ-X 1 sebesar 2,4459%, dan KTZ-X 1,25 sebesar 1,9164%. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat karbonisasi komposit

sukrosa/zeolit-X 0,75 terjadi pengurangan massa zeolit-X dalam jumlah besar karena komposisi massa zeolit-X yang lebih banyak di dalam komposit. Sedangkan pada KTZ-X 1 dan KTZ-X 1,25 tidak banyak mengalami pengurangan massa templat zeolit-X karena komposisi massa sukrosa/zeolit-X  $\geq 1$ .

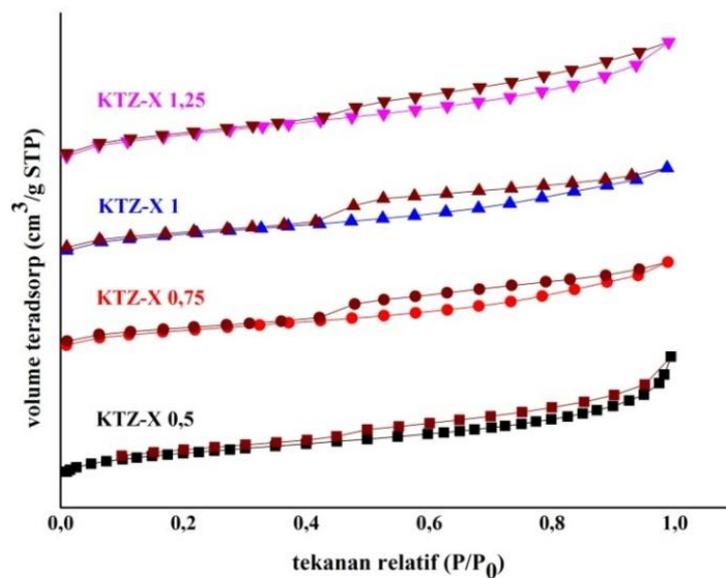
Berdasarkan hasil karakterisasi TGA tersebut, peningkatan rasio massa sukrosa/zeolit-X berpengaruh terhadap semakin meningkatnya kestabilan termal pada KTZ-X. Dengan meningkatnya rasio massa sukrosa/zeolit-X, massa air pada KTZ-X mengalami penurunan secara drastis. Hal itu ditunjukkan dengan semakin bertambahnya pengurangan massa air pada suhu 50 °C. Selain itu, peningkatan rasio massa sukrosa/zeolit-X memperkecil dekomposisi massa KTZ-X pada suhu di atas 300 °C hingga 800 °C.

#### **4.1.4 Pengaruh Rasio Massa Sukrosa/Zeolit-X Terhadap Sifat Permukaan KTZ-X**

Pengaruh penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X terhadap sifat permukaan KTZ-X dianalisis dengan karakterisasi adsorpsi isotermal gas N<sub>2</sub> dengan metode BET. Gambar 4.10. menunjukkan adanya *loop* histeresis pada grafik isotermal adsorpsi-desorpsi gas N<sub>2</sub> KTZ-X. *Loop* histeresis KTZ-X semakin lebar seiring dengan peningkatan rasio massa sukrosa/zeolit-X. *Loop* histeresis merupakan suatu kondisi yang disebabkan adanya kondensasi kapiler saat adsorpsi berlangsung. Kondensasi kapiler dipengaruhi oleh adanya *channel* mesopori pada permukaan KTZ-X.

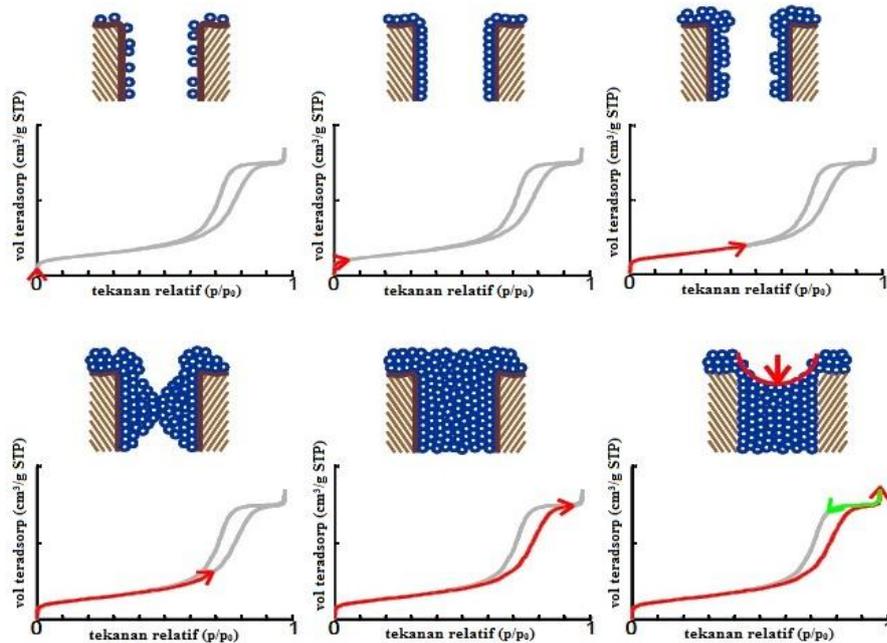
Berdasarkan klasifikasi IUPAC, grafik keempat sampel tersebut termasuk gabungan tipe I dan tipe IV. Grafik tipe I menunjukkan karakteristik mikropori material yang ditandai dengan adanya adsorpsi sejumlah gas N<sub>2</sub> pada tekanan relatif yang sangat rendah. Sedangkan grafik tipe IV menunjukkan karakteristik mesopori material yang ditandai dengan adanya *loop* histeresis pada grafik. Pada grafik isotermal adsorpsi-desorpsi gas N<sub>2</sub> sampel KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25 menunjukkan karakteristik pori dengan saluran mesopori yang lebih dominan dari mikropori. Hal ini ditunjukkan pada tekanan relatif yang sangat rendah ( $P/P_0 < 0,1$ ) peningkatan volume gas yang teradsorp sangat sedikit dan daerah *monolayer* belum terisi secara penuh. Ketika tekanan relatif dinaikkan

( $P/P_0 > 0,5$ ), terjadi peningkatan volume gas yang teradsorp namun masih sedikit. Hal ini mengindikasikan molekul gas  $N_2$  mulai menjenuhi *monolayer* dan mengisi beberapa bagian di daerah *multilayer*. Volume gas teradsorp mulai menunjukkan peningkatan yang tajam ketika tekanan relatif dinaikkan hingga  $P/P_0 = 1$ . Tekanan tinggi menyebabkan molekul gas yang teradsorp memenuhi mesopori dalam jumlah yang besar. Mekanisme adsorpsi permukaan mesopori ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.10. Grafik isothermal adsorpsi-desorpsi gas  $N_2$  pada KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25

Pada Gambar 4.11, kurva menunjukkan loop histeresis dimana jumlah gas yang terdesorp tidak sama dengan jumlah gas yang teradsorp ketika tekanan relatif diturunkan. Hal ini mengindikasikan jumlah gas yang tertinggal saat desorpsi lebih banyak dibandingkan saat adsorpsi yang disebabkan adanya kondensasi kapiler pada permukaan mesopori, sehingga terbentuk *loop* histeresis pada grafik. Berdasarkan klasifikasi IUPAC, *loop* histeresis grafik di atas merupakan tipe H4 yang menandakan sifat struktur permukaan yang lebih didominasi mesopori, keteraturan pori tidak terlalu bagus, dan karakteristik pori berbentuk celah (*slit*).

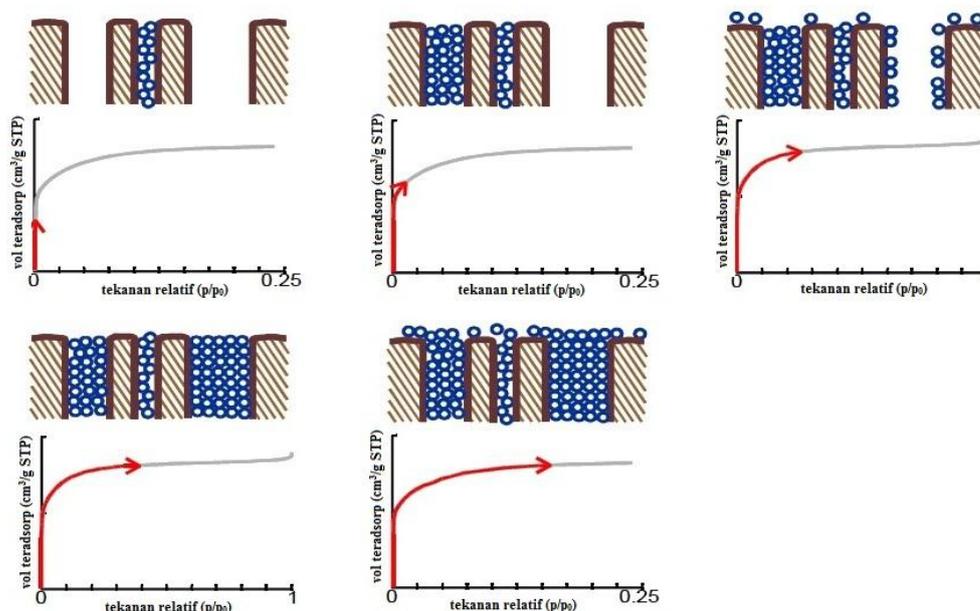


Gambar 4.11. Mekanisme adsorpsi-desorpsi gas  $N_2$  pada permukaan mesopori KTZ-X

Hasil analisis yang sedikit berbeda ditunjukkan grafik isotermaal adsorpsi-desorpsi gas  $N_2$  KTZ-X 0,5. Pada tekanan yang sangat rendah ( $P/P_0 < 0,1$ ), volume gas teradsorp mengalami peningkatan yang sedikit lebih tajam bila dibandingkan tiga sampel lainnya. Hal ini mengindikasikan adanya karakteristik mikropori pada permukaan KTZ-X 0,5 dimana terjadi *overlap* potensial dari kedua sisi dinding pori, sehingga potensial adsorpsi material meningkat. Mekanisme adsorpsi pada permukaan mikropori ditunjukkan pada Gambar 4.12. Pada saat tekanan relatif ditingkatkan ( $P/P_0 > 0,5$ ), terjadi pengisian mikropori sekunder dengan jumlah gas yang sangat sedikit. Pada tekanan relatif yang lebih tinggi, volume gas teradsorp mengalami peningkatan yang tajam. Hal ini mengindikasikan adanya pengisian permukaan mesopori yang disebabkan oleh kondensasi kapiler pori.

Pengaruh penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X terhadap luas permukaan KTZ-X ditunjukkan diagram batang pada Gambar 4.13 dan Tabel 4.1. Pada diagram tersebut peningkatan rasio massa sukrosa/zeolit diikuti dengan peningkatan luas permukaan KTZ-X. Namun, hasil yang berbeda ditunjukkan oleh KTZ-X 0,75 yang memiliki luas permukaan paling rendah yaitu 392,539  $m^2/g$ . Hal tersebut mengindikasikan bahwa proses replikasi pada KTZ-X 0,75

kurang berjalan sempurna. Hasil karakterisasi ini berbeda dengan penelitian Anggarini (2013) dan Kayadoe (2013) yang menghasilkan KTZ dengan luas permukaan sekitar 800 – 1500 m<sup>2</sup>/g. Hal tersebut disebabkan karena adanya pembentukan karbon turbostratik pada saat proses pembentukan KTZ-X.



Gambar 4.12. Mekanisme adsorpsi gas N<sub>2</sub> pada permukaan mikropori KTZ-X

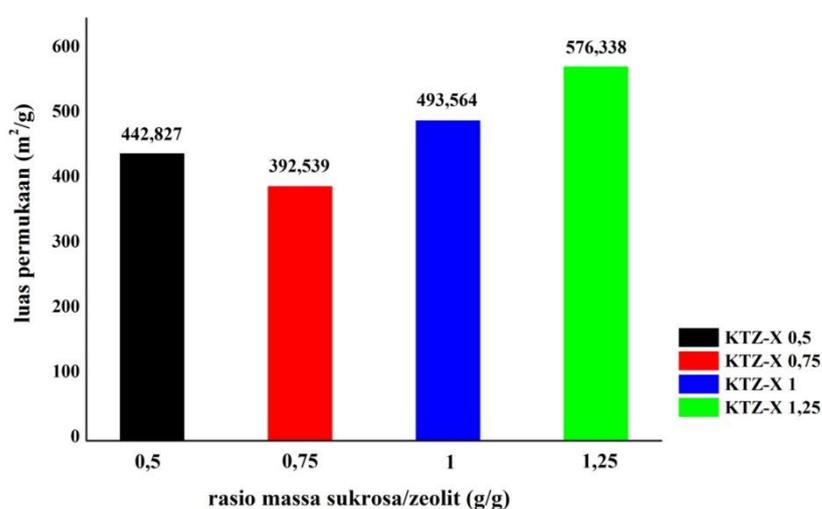
Menurut Arenillas dkk. (2004), karbon turbostratik secara dimensional dapat membentuk suatu bidang (*plane*). Pembentukan bidang tersebut dapat menutup dan mengurangi area KTZ-X, sehingga luas permukaan KTZ-X menjadi rendah. Karbon turbostratik juga disebut sebagai karbon kristalit karena bidang yang dibentuk memiliki struktur menyerupai kristal yang tidak beraturan. Hal tersebut mendukung data karakterisasi XRD yang menunjukkan adanya puncak lebar pada  $2\theta = 25^\circ$  dan  $44^\circ$  serta mikrograf SEM dan TEM.

Karakterisasi isothermal adsorpsi gas N<sub>2</sub> pada KTZ-X digunakan juga untuk mengetahui distribusi ukuran pori dengan permodelan BJH (*Barret-Joyner-Halenda*). Analisis model BJH didasarkan pada perhitungan ketebalan pori saat gas teradsorp dan membentuk *multilayer* pada dinding-dinding pori. Representasi model BJH ditunjukkan pada grafik hubungan antara ukuran suatu pori dengan volume pori, Gambar 4.14. Pola dari keempat grafik menunjukkan distribusi ukuran pori sempit pada struktur permukaan KTZ-X. Distribusi ukuran pori sempit menunjukkan keseragaman ukuran pori yang terpusat pada suatu ukuran

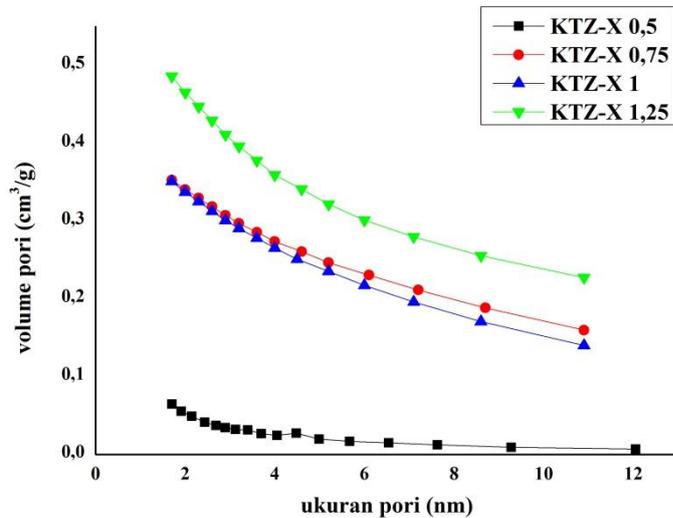
tertentu. Pada keempat sampel, pola keseragaman ukuran pori terlihat sama yaitu terpusat pada ukuran pori < 2 nm. Hal ini mengindikasikan adanya karakteristik mikropori pada permukaan sampel KTZ-X meskipun juga terdapat *channel* mesopori sebagaimana ditunjukkan grafik isotermal BET pada Gambar 4.11.

Tabel 4.1. Sifat struktur permukaan KTZ-X hasil analisis isotermal adsorpsi gas N<sub>2</sub> dengan metode BET

Sampel	Rasio massa sukrosa/zeolit (g/g)	Struktur permukaan			
		Luas permukaan (m <sup>2</sup> /g)	Volume mikropori (cm <sup>3</sup> /g)	Volume pori total (cm <sup>3</sup> /g)	Ukuran pori rata-rata (nm)
KTZ-X 0,5	0,5	442,827	0,149	0,5665	2,558
KTZ-X 0,75	0,75	392,539	0,065	0,4366	4,449
KTZ-X 1	1	493,564	0,108	0,4798	3,888
KTZ-X 1,25	1,25	576,338	0,097	0,6128	4,253



Gambar 4.13. Diagram batang hubungan rasio penambahan sukrosa/zeolit dengan luas permukaan KTZ-X

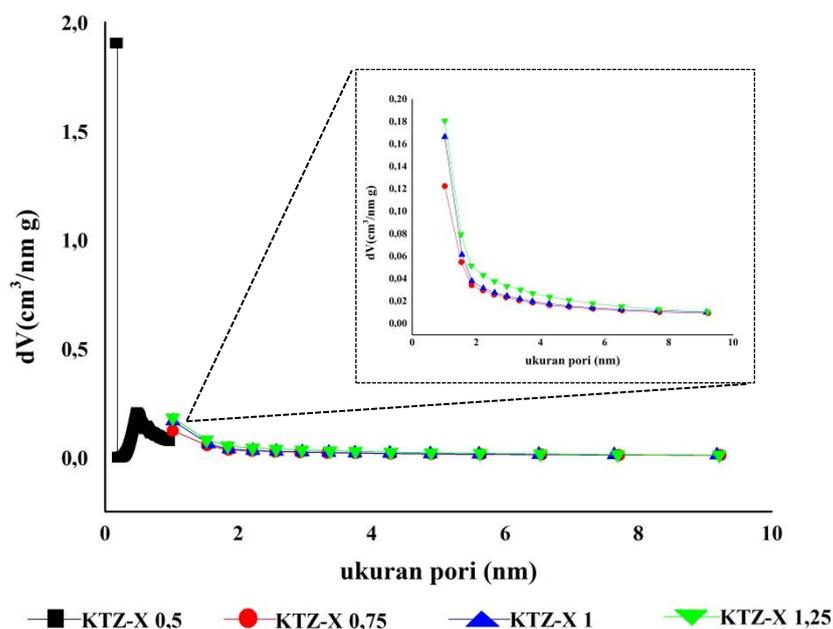


Gambar 4.14. Distribusi ukuran pori dengan permodelan BJH karbon teremplat zeolit-X

Selain itu, untuk mengetahui bentuk pori yang terdapat di permukaan KTZ-X, digunakan distribusi ukuran pori dengan permodelan HK (*Horvath-Kawazoe*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15. Permodelan HK didasarkan pada interaksi antara permukaan gas yang teradsorp dengan dinding pori padatan. Permodelan ini digambarkan dengan grafik hubungan antara ukuran pori dan diferensial volume pori saat gas teradsorp. Tiga sampel KTZ-X yaitu 0,75; 1 dan 1,25 menunjukkan pola dimana gas teradsorp terpusat pada pori dengan ukuran mikro. Hal ini ditunjukkan dengan tingginya diferensial volume pori pada saat ukuran pori < 2 nm dan mengalami penurunan pada ukuran pori > 2 nm. Sedangkan pada KTZ-X 0,5, molekul gas keseluruhan teradsorp pada *channel* mikropori sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.12. yang berbeda dengan tiga sampel lainnya. Hal ini ditunjukkan dengan tingginya diferensial volume pori KTZ-X 0,5 pada ukuran pori < 1 nm. Hal ini mengindikasikan bahwa pada KTZ-X 0,5 molekul gas teradsorp dan mengisi celah-celah sempit pada permukaan mikropori dalam jumlah besar. Menurut Cai dkk. (2014), banyaknya mikropori dengan bentuk celah sempit mempengaruhi peningkatan potensial adsorpsi terhadap molekul gas karena terjadi *overlap* potensial pada saat pengisian dinding

pori tersebut. Berdasarkan analisis tersebut, KTZ-X 0,5 memiliki karakteristik mikropori dengan bentuk *slit*.

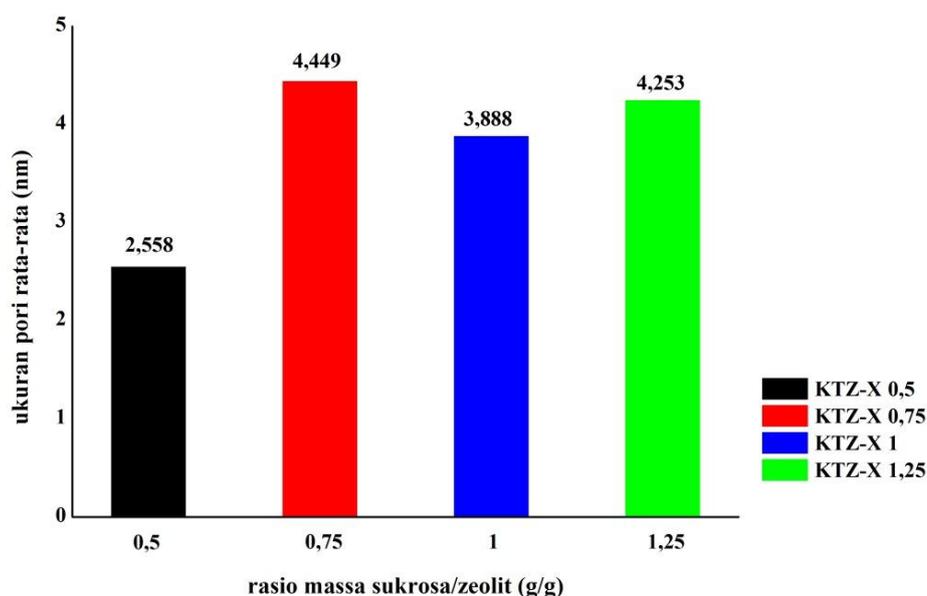
Pada grafik distribusi ukuran pori dengan permodelan HK sampel KTZ-X 0,75; 1 dan 1,25, molekul gas banyak teradsorp pada pori yang berukuran mikro. Hal ini dikonfirmasi dengan tingginya diferensial volume pori yang terpusat pada ukuran pori < 2 nm. Meskipun gas juga teradsorp pada *channel* mesopori, namun jumlah molekul gas yang teradsorp pada *channel* mikropori pada tiga sampel KTZ-X tersebut masih menunjukkan yang paling dominan. Hal ini mengindikasikan permukaan tiga sampel KTZ-X tersebut memiliki *channel* mikropori dan mesopori dengan bentuk *slit* dan silinder. Teradsorpsinya sebagian gas pada ukuran pori > 2 nm menunjukkan adanya kondensasi kapiler pori yang berbentuk silindris dimana gas mengisi dinding-dinding pori dalam jumlah yang sedikit.



Gambar 4.15. Distribusi ukuran pori permodelan HK : KTZ-X 0,5 (■); KTZ-X 0,75 (●); KTZ-X 1 (▲); dan KTZ-X 1,25 (▼)

Pengaruh penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X terhadap ukuran pori rata-rata KTZ-X ditunjukkan pada diagram batang Gambar 4.16. Dari diagram tersebut menunjukkan peningkatan ukuran pori rata-rata seiring dengan

meningkatnya rasio massa sukrosa/zeolit-X. KTZ-X 0,5 memiliki ukuran pori rata-rata paling kecil diantara tiga sampel lainnya yaitu 2,558 nm. Hal tersebut juga didukung data volume mikropori pada tabel 4.1, yang menunjukkan volume mikropori KTZ-X tertinggi yaitu 0,149 cm<sup>3</sup>/g. Dengan rasio massa sukrosa/zeolit-X 0,5, prekursor karbon mereplika struktur negatif zeolit-X secara efektif dan memiliki banyak *channel* mikropori. Sedangkan pada KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25, menunjukkan ukuran pori rata-rata yang tinggi. Hal ini disebabkan banyaknya sukrosa yang tidak terinterkalasi dalam pori zeolit dan terakumulasi di sisi luar pori membentuk karbon turbostratik sehingga karakteristik mesopori lebih mendominasi struktur permukaan karbon.



Gambar 4.16. Diagram batang hubungan antara rasio massa sukrosa/zeolit dengan ukuran pori rata-rata KTZ-X

Berdasarkan hasil karakterisasi isothermal adsorpsi-desorpsi gas N<sub>2</sub> dengan metode BET di atas, menunjukkan bahwa peningkatan rasio massa sukrosa/zeolit-X mempengaruhi peningkatan *channel* mesopori KTZ-X. Hal tersebut ditunjukkan dengan semakin melebarnya *loop* histeresis pada grafik isothermal adsorpsi-desorpsi N<sub>2</sub>. KTZ-X 0,5 menunjukkan hasil dengan *channel* mikropori paling tinggi dan ukuran pori rata-rata paling kecil diantara tiga sampel lain. Hasil

tersebut mendukung data SEM yang menunjukkan kesuksesan KTZ-X dalam mereplika struktur negatif zeolit-X.

## 4.2 Pengujian Kapasitas Adsorpsi-Desorpsi CO<sub>2</sub> pada KTZ-X

Pada penelitian ini, karbon tertemplat zeolit-X digunakan untuk aplikasi penangkap gas CO<sub>2</sub>. Material karbon hasil sintesis diuji kapasitas adsorpsi-desorpsi gas CO<sub>2</sub> dengan menggunakan metode gravimetri. Metode ini dilakukan pada suhu ruang atau 30 °C dan tekanan 1 atm. Kondisi pengoperasian tersebut merupakan optimum yang telah dilakukan oleh Wardani (2016) dan Gunawan (2014) pada penelitian tentang adsorpsi CO<sub>2</sub> sebelumnya.

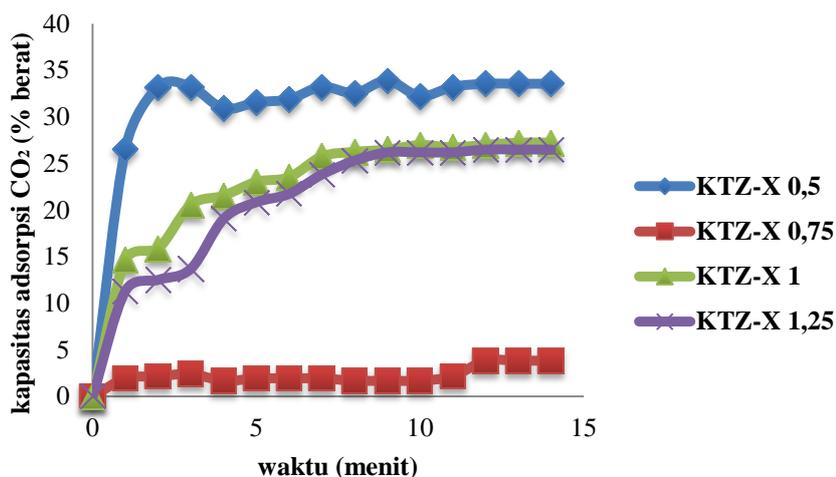
Proses pengujian didahului dengan melakukan *degassing* sampel pada suhu 350 °C untuk menghilangkan kandungan air dan pengotor. Selain itu, suhu *degassing* yang berada pada kisaran 300 – 400 °C. Setelah proses *degassing*, suhu diturunkan menjadi suhu ruang dan dialiri gas CO<sub>2</sub> dengan laju alir sebesar 20 mL/menit yang diatur oleh *mass flow control* (MFC). Perubahan massa sampel sebelum dan sesudah dialiri gas CO<sub>2</sub> dicatat tiap menit. Pengujian dihentikan setelah massa sampel yang dialiri gas CO<sub>2</sub> stabil. Hasil pengujian kapasitas adsorpsi-desorpsi gas CO<sub>2</sub> berdasarkan selisih massa sampel akhir dan massa sampel awal yang dikonversi dalam persen berat.

### 4.2.1 Adsorpsi CO<sub>2</sub> pada KTZ-X

Hasil pengujian adsorpsi CO<sub>2</sub> empat sampel KTZ-X dengan metode gravimetri pada suhu 30 °C dan tekanan 1 atm ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.18 dan Tabel 4.2. Dari data tersebut, KTZ-X 0,5 memiliki kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> yang paling besar yaitu 33,55%. Kemudian, kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> untuk KTZ-X 1 dan KTZ-X 1,25 adalah masing-masing 27,23% dan 26,48%. Sedangkan KTZ-X 0,75 memiliki kapasitas adsorpsi yang paling kecil yaitu 3,82%.

Kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X dipengaruhi mikroporositas pada permukaannya. Hal tersebut ditunjukkan secara jelas pada data adsorpsi Gambar 4.17 dan diagram batang pada Gambar 4.16. KTZ-X 0,5 memiliki kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> sebesar 33,55% dengan ukuran pori rata-rata 2,558 nm.

Sebagaimana mekanisme adsorpsi gas pada Gambar 4.12. dan Gambar 4.13., molekul CO<sub>2</sub> lebih banyak teradsorpsi pada pori ukuran mikro. Hal ini menunjukkan bahwa banyaknya pori dengan ukuran mikro pada KTZ-X 0,5 meningkatkan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub>. Selain itu, adanya momen kuadrupol antara molekul CO<sub>2</sub> dan permukaan mikropori KTZ-X 0,5 menyebabkan interaksi fisisorpsi menjadi lebih kuat.



Gambar 4.17. Grafik adsorpsi CO<sub>2</sub> pada KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25

Tabel 4.2. Hasil adsorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X

Material	Suhu (°C)	Tekanan (atm)	Kapasitas Adsorpsi CO <sub>2</sub> (%berat)	Waktu (menit)
KTZ-X 0,5	30	1	33,55	14
KTZ-X 0,75	30	1	3,82	14
KTZ-X 1	30	1	27,23	14
KTZ-X 1,25	30	1	26,48	14

Hubungan antara mikroporositas dengan kapasitas adsorpsi juga dibuktikan pada penelitian Sevilla dan Fuertes (2012) yang menggunakan karbon sebagai adsorben gas CO<sub>2</sub>. Karbon dengan karakter *channel* mikropori mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi gas CO<sub>2</sub> hingga mencapai 4 – 5 mmol/g. Ducrot-

Boisgontier dkk., (2010) juga telah mensintesis KTZ-Y berkarakter pori mikro dengan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> mencapai 18- 34 mmol/g.

KTZ-X pada penelitian ini menunjukkan kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> yang lebih baik dibandingkan material adsorben lain. Meskipun luas permukaan yang dihasilkan lebih rendah, namun kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X pada penelitian ini juga melebihi material adsorben yang pernah disintesis sebelumnya. Perbandingan kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> pada beberapa adsorben ditunjukkan pada Tabel 4.3. Tingginya kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> ditunjukkan pada KTZ-X 0,5; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25. Sedangkan KTZ-X 0,75 menunjukkan kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> yang rendah.

Tabel 4.3. Perbandingan kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> dari beberapa material

Material	Kapasitas CO <sub>2</sub> (%berat)	Suhu (°C)	Referensi
KTZ-X	33,55	30	Penelitian ini
	3,82		
	27,23		
	26,48		
KTZ-Y	1,07	30	Gunawan (2014)
Zeolit-X/serat <i>glaswool</i>	24,5	30	Wardani (2014)
	15,3	40	
Zeolit-X murni	30,5	25	Akhtar dan Bergstorm (2012)
	22,2	35	
Zeolit-X-karbon aktif	12,9	40	Lee dkk., (2002)
	10,8	60	

Berdasarkan hasil uji adsorpsi di atas, penambahan rasio massa sukrosa/zeolit-X memiliki pengaruh terhadap hubungan antara mikroporositas dan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X. Kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> yang didapatkan mendukung data isotermal adsorpsi-desorpsi gas N<sub>2</sub>, seperti yang ditunjukkan

pada Gambar 4.16 dan 4.17. Hasil uji adsorpsi tersebut juga mendukung data karakterisasi XRD dan SEM yang telah dilakukan pada keempat sampel KTZ-X

#### 4.2.2 Desorpsi CO<sub>2</sub> pada KTZ-X

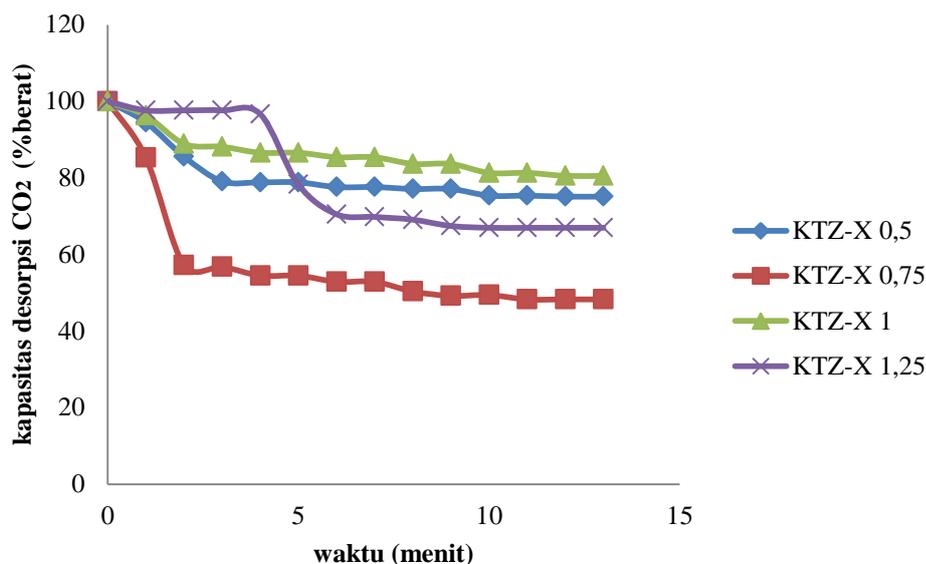
Selain untuk mengetahui kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub>, KTZ-X perlu diuji kemampuan desorpsi untuk mengetahui kemampuan regenerasi adsorben KTZ-X. Pengujian desorpsi CO<sub>2</sub> pada KTZ-X dilakukan seperti prosedur pengujian adsorpsi. Desorpsi dilakukan langsung setelah proses adsorpsi selesai dengan bantuan pompa vakum. Pengurangan massa yang ada di dalam material diplotkan terhadap waktu. Hasil pengujian desorpsi KTZ-X ditunjukkan pada Gambar 4.18 dan Tabel 4.4.

Pada Gambar 4.18. keempat sampel KTZ-X mengalami penurunan massa CO<sub>2</sub> pada pengujian desorpsi. KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; dan KTZ-X 1 mengalami penurunan massa CO<sub>2</sub> sejak menit pertama pengujian. Sedangkan KTZ-X 1,25 mulai mengalami penurunan massa CO<sub>2</sub> pada menit ke-5. Kapasitas desorpsi CO<sub>2</sub> pada keempat sampel KTZ-X juga ditunjukkan Tabel 4.4. Tingginya kapasitas desorpsi pada KTZ-X 0,5; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25 menandakan bahwa proses pelepasan molekul CO<sub>2</sub> pada *multilayer* material berjalan secara efektif. Gaya interaksi pada *multilayer* yang bersifat lemah mempercepat pelepasan molekul CO<sub>2</sub>. Sedangkan adanya sisa CO<sub>2</sub> setelah desorpsi disebabkan molekul CO<sub>2</sub> masih terjebak di dalam *monolayer* yang memiliki gaya interaksi yang kuat.

Pada KTZ-X 0,75 kapasitas desorpsi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan paling rendah diantara tiga sampel lain, yaitu 48,28 %berat. Pada menit awal pengujian, kapasitas desorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X 0,75 masih tinggi (< 80 %berat) yang mengindikasikan pelepasan molekul CO<sub>2</sub> pada *multilayer* berjalan efektif. Setelah itu, kapasitas desorpsi cenderung menurun karena pelepasan molekul CO<sub>2</sub> pada lapisan *monolayer* kurang sempurna akibat gaya interaksi yang lebih besar.

Tingginya kapasitas desorpsi CO<sub>2</sub> pada KTZ-X hingga mencapai 80 %berat menandakan proses adsorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> berjalan secara *reversible* mengikuti proses fisisorpsi. Interaksi yang melibatkan gaya *Van der waals* antara permukaan KTZ-X dan molekul CO<sub>2</sub> sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.11 dan 4.12. Pada proses desorpsi, interaksi tersebut akan melemah ketika

material mendapat gaya tarik eksternal dan menyebabkan molekul CO<sub>2</sub> mudah terlepas pada lapisan *multilayer*. Apabila kondisi tersebut diteruskan, akan tersisa molekul CO<sub>2</sub> yang berada pada lapisan *monolayer*. Pada lapisan ini, interaksi molekul CO<sub>2</sub> dan permukaan material lebih kuat, sehingga proses desorpsi berjalan lebih lambat.



Gambar 4.18. Grafik desorpsi CO<sub>2</sub> pada KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25

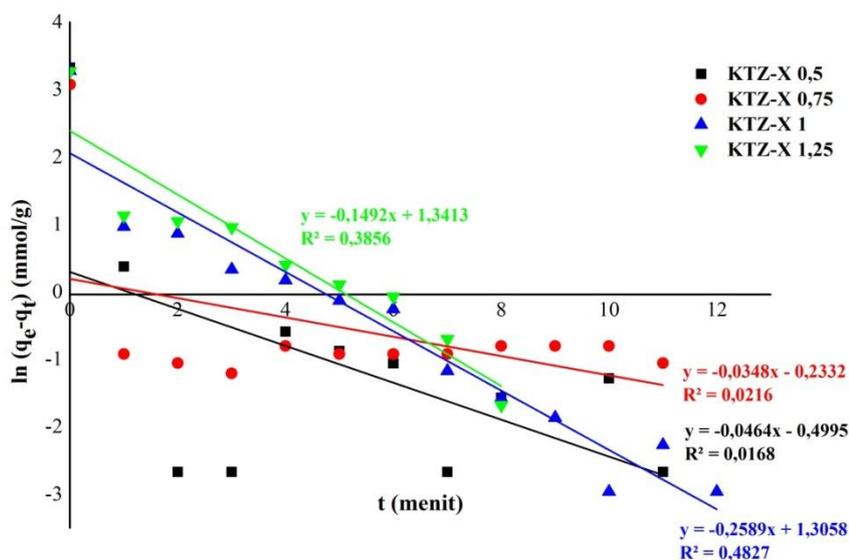
Tabel 4.4. Hasil desorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X pada suhu 30 °C dan tekanan 1 atm

Material	Kapasitas desorpsi CO <sub>2</sub> (%berat)	Sisa CO <sub>2</sub> (%berat)	Waktu (menit)
KTZ-X 0,5	75,12	24,88	13
KTZ-X 0,75	48,28	51,72	13
KTZ-X 1	80,55	19,45	13
KTZ-X 1,25	66,98	33,02	13

### 4.2.3 Model Kinetika Adsorpsi KTZ-X

Pada penelitian ini dilakukan penentuan model kinetika adsorpsi untuk menjelaskan mekanisme adsorpsi CO<sub>2</sub> yang terjadi pada material KTZ-X. Penentuan model kinetika adsorpsi juga digunakan untuk memprediksi desain unit

dan laju adsorpsi pada aplikasi teknologi penangkap dan pemisahan CO<sub>2</sub>. Pada penentuan ini, terdapat tiga model kinetika adsorpsi yaitu kinetika orde satu semu, kinetika orde dua semu dan difusi intra partikel. Hasil perhitungan ketiga model kinetika adsorpsi ditunjukkan pada Gambar 4.19., 4.20., dan 4.21., sedangkan parameter kinetika adsorpsi ditunjukkan pada Tabel 4.5.



Gambar 4.19. Plot model kinetika orde satu semu KTZ-X

Berdasarkan nilai koefisien korelasi ( $R^2$ ), adsorpsi CO<sub>2</sub> pada keempat sampel KTZ-X mengikuti model kinetika orde dua semu. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penentuan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X didasarkan pada kapasitas adsorpsi kesetimbangan. Model kinetika ini mengasumsikan bahwa kapasitas adsorpsi selalu proporsional dengan banyaknya sisi aktif yang dimiliki oleh adsorben. Hal ini mengindikasikan bahwa pada keempat sampel KTZ-X banyak terdapat sisi aktif yang dapat ditempati oleh molekul CO<sub>2</sub>. Banyaknya sisi aktif juga mengkonfirmasi tingginya kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan material seperti ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Model kinetika orde dua semu pada keempat KTZ-X tersebut sesuai dengan model kinetika pada adsorben penelitian sebelumnya. Pada penelitian Gunawan (2014) KTZ-Y memiliki model kinetika adsorpsi CO<sub>2</sub> orde dua semu pada suhu 30 °C dan tekanan 1 atm. Sedangkan Wardani (2016) menghasilkan zeolit-X/serat glaswool yang memiliki model kinetika orde dua semu pada suhu

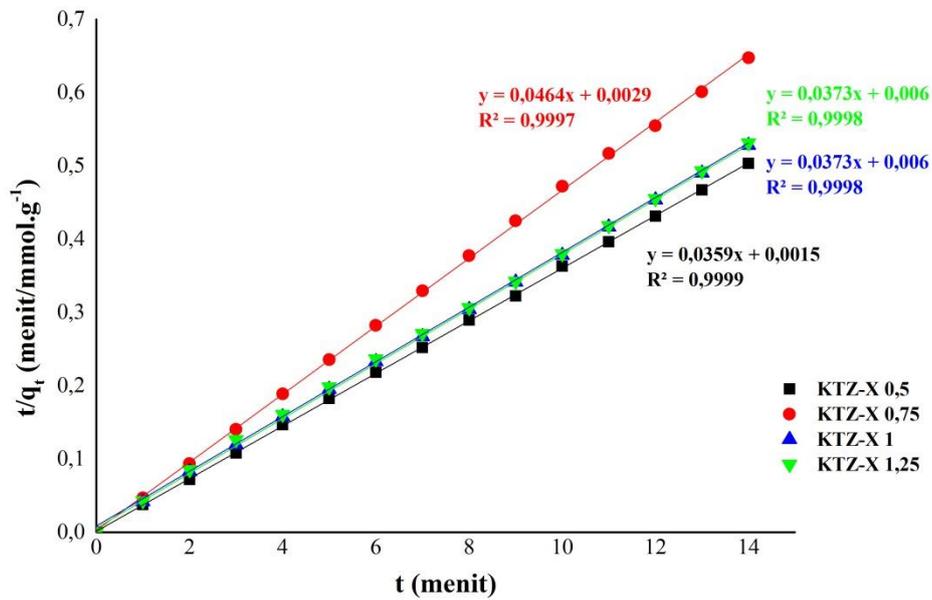
30 °C. Hal ini menunjukkan bahwa pada kinetika orde dua semu, laju adsorpsi CO<sub>2</sub> berlangsung lebih cepat pada suhu yang rendah.

Tabel 4.5. Parameter kinetika adsorpsi CO<sub>2</sub> dengan berbagai model

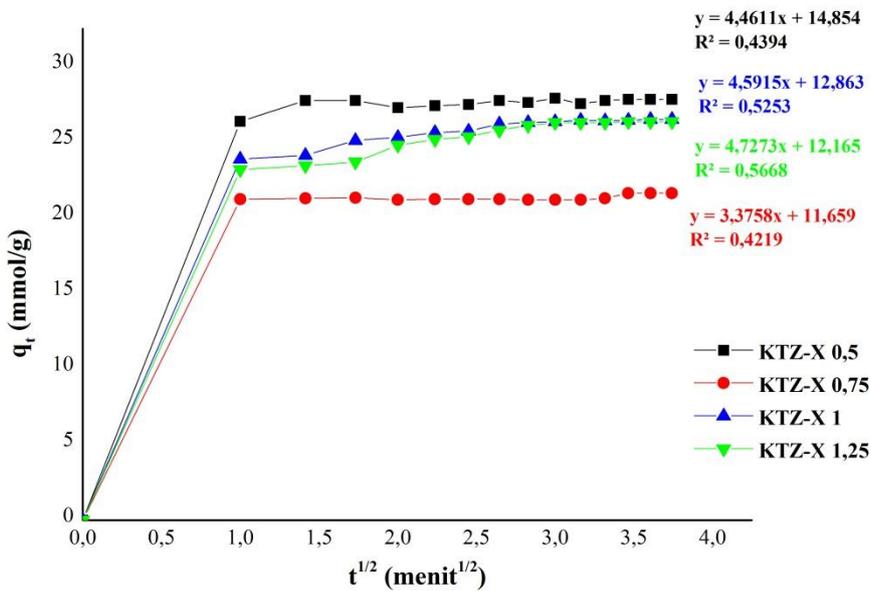
Model kinetika	Parameter		
	$k_f$ (menit <sup>-1</sup> )	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$
KTZ-X 0,5	0,0464	0,607	0,0168
KTZ-X 0,75	0,0348	0,792	0,0216
KTZ-X 1	0,2589	3,691	0,4827
KTZ-X 1,25	0,1492	3,824	0,3856
Orde dua semu	$k_s$ (g/mmol.menit)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$
KTZ-X 0,5	0,859	27,85	0,9999
KTZ-X 0,75	0,743	21,55	0,9997
KTZ-X 1	0,231	26,81	0,9998
KTZ-X 1,25	0,231	26,81	0,9998
Difusi intra partikel	$k_{id}$ (mmol/g.menit <sup>1/2</sup> )	C	$R^2$
KTZ-X 0,5	4,461	14,854	0,4394
KTZ-X 0,75	3,376	11,659	0,4219
KTZ-X 1	4,592	12,863	0,5253
KTZ-X 1,25	4,727	12,165	0,5668

Keterangan :

- $k_f$  : konstanta laju orde satu semu
- $q_e$  : kapasitas adsorpsi pada saat kesetimbangan
- $k_s$  : konstanta laju orde dua semu
- $k_{id}$  : konstanta laju difusi intra partikel
- C : ketebalan batas lapisan
- $R^2$  : nilai koefisien korelasi



Gambar 4.20. Plot model kinetika orde dua semu KTZ-X



Gambar 4.21. Plot model kinetika difusi intra partikel KTZ-X

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa karbon tertemplat zeolit-X (KTZ-X) yang menggunakan rasio massa sukrosa/zeolit-X 0,5 menunjukkan keteraturan struktur, volume mikropori yang tinggi dan ukuran pori yang kecil. KTZ-X 0,5 memiliki keteraturan struktur yang dikonfirmasi pada puncak  $6^\circ$  dan mikrograf SEM yang menunjukkan partikel karbon menyerupai struktur kristal oktahedral zeolit-X. Selain itu, penggunaan rasio massa sukrosa/zeolit-X 0,5 menghasilkan KTZ-X yang memiliki banyak *channel* mikropori dengan ukuran pori rata-rata 2,55 nm dan volume mikropori tertinggi yaitu  $0,149 \text{ cm}^3/\text{g}$ .

Pengujian adsorpsi  $\text{CO}_2$  pada suhu  $30^\circ\text{C}$  dan tekanan 1 atm menghasilkan kapasitas adsorpsi  $\text{CO}_2$  pada KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25 berturut-turut sebesar 33,55; 3,82; 27,23; dan 26,48 %berat. KTZ-X 0,5 menunjukkan kapasitas adsorpsi  $\text{CO}_2$  paling tinggi diantara sampel KTZ-X yang lain. Hal ini menunjukkan adanya korelasi antara mikroporositas yang dimiliki KTZ-X terhadap kapasitas adsorpsi  $\text{CO}_2$ .

Proses adsorpsi  $\text{CO}_2$  KTZ-X pada suhu  $30^\circ\text{C}$  dan tekanan 1 atm mengikuti model kinetika orde dua semu dengan nilai koefisien korelasi ( $R^2$ ) KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25 berturut-turut sebesar 0,9999; 0,9997; 0,9998; dan 0,9998. Konstanta laju orde dua semu pada KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25 berturut-turut sebesar 0,859; 0,743; 0,231; dan 0,231  $\text{g}/(\text{mmol}\cdot\text{menit})$ . Sedangkan kapasitas adsorpsi yang diperoleh saat kesetimbangan pada KTZ-X 0,5; KTZ-X 0,75; KTZ-X 1; dan KTZ-X 1,25 berturut-turut sebesar 27,85; 21,55; 26,81; dan 26,81  $\text{mmol/g}$ . Berdasarkan hasil tersebut, disimpulkan bahwa karakteristik adsorpsi  $\text{CO}_2$  KTZ-X berlangsung secara fisika dan menghasilkan kapasitas adsorpsi pada saat mencapai

kesetimbangan, dimana kapasitas adsorpsi proporsional dengan banyaknya sisi aktif yang terdapat pada pori KTZ-X.

## **5.2 Saran**

Luas permukaan KTZ-X pada penelitian ini berkisar antara 392,539 – 576,338 m<sup>2</sup>/g. Hal tersebut disebabkan adanya pembentukan karbon turbostratik pada saat sintesis KTZ-X. Salah satu faktor yang berpengaruh terhadap pembentukan karbon turbostratik adalah suhu saat karbonisasi komposit sukrosa/zeolit-X. Berdasarkan hasil karakterisasi TGA, karbon mulai terbentuk pada suhu sekitar 500 °C. Oleh karena itu, untuk mendapatkan material KTZ-X yang memiliki luas permukaan tinggi, sebaiknya karbonisasi dilakukan pada kondisi suhu sekitar 500 °C atau di bawah suhu 800 °C.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abd-Elrahman, M.I. dan Ahmed, S.M., (2009). Thermal Degradation Kinetics and Geometrical Stability of D-Sucrose. *International Journal of Polymeric Materials*. 58, 322-335.
- Ahmad, K., Mowla, O., Kennedy, E., Dlugogorski, B.Z., Mackie, J.C. dan Stockenhuber, M. (2013). A Melamine-Modified  $\beta$ -Zeolite with Enhanced CO<sub>2</sub> Capture Properties. *Energy Technol.* **1**, 345–349.
- Akhtar, F., Andersson, L., Keshavarzi, N. dan Bergström, L. (2012). Colloidal processing and CO<sub>2</sub> capture performance of sacrificially templated zeolite monoliths. *Energy Solut. Sustain. World - Proc. Third Int. Conf. Appl. Energy May 16-18 2011 - Perugia Italy* 97, 289–296.
- Alabadi, A., Razzaque, S., Yang, Y., Chen, S. dan Tan, B., (2015). Highly porous activated carbon materials from carbonized biomass with high CO<sub>2</sub> capturing capacity. *Chem. Eng. J.* 281, 606–612.
- Alam, N. dan Mokaya, R., (2011). Characterisation and hydrogen storage of Pt-doped carbons templated by Pt-exchanged zeolite-Y. *Microporous and Mesoporous Materials*. 142, 716-724
- Anggarini, U., (2013). Sintesis dan Karakterisasi Karbon Tertemplat Zeolit-Y dengan Aktivasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sebagai Material Penyimpan Hidrogen. *Tesis Magister Inst. Teknol. Sepuluh Nop. Surabaya*.
- Bansal, R.C. dan Goyal, M., 2005. Activated Carbon Adsorption. Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Bao, Z., Yu, L., Ren, Q., Lu, X. dan Deng, S., (2011). Adsorption of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> on a magnesium-based metal organic framework. *J. Colloid Interface Sci.* 353, 549–556.
- Barata-Rodrigues, P., Mays, T. dan Moggridge, G., (2003). Structured carbon adsorbents from clay, zeolite and mesoporous aluminosilicate templates. *Carbon* 41, 2231–2246.
- Belmabkhout, Y. dan Sayari, A., (2009). Effect of pore expansion and amine functionalization of mesoporous silica on CO<sub>2</sub> adsorption over a wide range of conditions. *Adsorption Sci.* 15. 318-328
- Bonenfant, D., Kharoune, M., Niquette, P., Mimeault, M. dan Hausler, R., (2008). Advances in principal factors influencing carbon dioxide adsorption on zeolites. *IOP Publ.*
- Bouzalakos, S. dan Mercedes, M., (2010). 1 - Overview of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture and storage technology, in: Maroto-Valer, M.M. (Ed.), *Developments and Innovation in Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Capture and Storage Technology*. Woodhead Publishing, pp. 1–24.
- Brunetti, A., Scura, F., Barbieri, G. dan Drioli, E., (2010). Membrane technologies for CO<sub>2</sub> separation. *Membr. CO<sub>2</sub> Sep.* 359, 115–125.

- Burchell, T.D., Judkins, R.R., Rogers, M.R. dan Williams, A.M., (1997). A novel process and material for the separation of carbon dioxide and hydrogen sulfide gas mixtures. *Carbon*. 35, 1279–1294.
- Byrappa, K. dan Yoshimura, M., (2013). 1 - Hydrothermal Technology—Principles and Applications, in: Byrappa, K., Yoshimura, M. (Eds.), *Handbook of Hydrothermal Technology (Second Edition)*. William Andrew Publishing, Oxford, pp. 1–49.
- Cai, J., Yang, M., Xing, Y. dan Zhao, X., (2014). Large surface area sucrose-based carbons via template-assisted routes: Preparation, microstructure, and hydrogen adsorption properties. *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.* 444, 240–245.
- Chalal, N., Bouhali, H., Hamaizi, H., Lebeau, B. dan Bengueddach, A., (2015). CO<sub>2</sub> sorption onto silica mesoporous materials made from nonionic surfactants. *Microporous Mesoporous Mater.* 210, 32–38.
- Chen, L., Singh, R.K. dan Webley, P., (2007). Synthesis, characterization and hydrogen storage properties of microporous carbons templated by cation exchanged forms of zeolite Y with propylene and butylene as carbon precursors. *Microporous Mesoporous Mater.* 102, 159–170.
- Chester, A.W. dan Derouane, E.G., (2009). *Zeolite Characterization and Catalysis*. Springer, New York.
- Chew, T.-L., Ahmad, A.L. dan Bhatia, S., (2010). Ordered mesoporous silica (OMS) as an adsorbent and membrane for separation of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). *Adv. Colloid Interface Sci.* 153, 43–57.
- Choi, S., Drese, J.H. dan Jones, C.W., (2009). *Adsorbent Materials for Carbon Dioxide Capture from Large Anthropogenic Point Sources*. Wiley-VCH Verl.
- Chue, K.T., Kim, J.N., Yoo, Y. dan Cho, S.H., (1995). Comparison of Activated Carbon and Zeolite 13X for CO<sub>2</sub> Recovery from Flue Gas by Pressure Swing Adsorption. *Am. Chem. Soc.* 34, 591–598.
- Cinke, M., Li, J., Bauschlicher Jr., C.W., Ricca, A. dan Meyyappan, M., (2003). CO<sub>2</sub> adsorption in single-walled carbon nanotubes. *Chem. Phys. Lett.* 376, 761–766.
- Cuéllar-Franca, R.M. dan Azapagic, A., (2015). Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *J. CO<sub>2</sub> Util.* 9, 82–102.
- D'Alessandro, D., Smit, B. dan Long, J., (2010). *Carbon Dioxide Capture: Prospects for New Materials*. Wiley-VCH Verl.
- Deng, H., Yi, H., Tang, X., Yu, Q., Ning, P. dan Yang, L., (2012). Adsorption equilibrium for sulfur dioxide, nitric oxide, carbon dioxide, nitrogen on 13X and 5A zeolites. *Chem. Eng. J.* 188, 77–85.

- Devianti, V.A., (2014). Sintesis Zeolit-X Berpendukung Material Serat Dengan Variasi Suhu dan Waktu Hidrotermal Untuk Adsorpsi Gas Karbon Dioksida. *Tesis Magister Inst. Teknol. Sepuluh Nop. Surabaya*.
- Díaz, E., Muñoz, E., Vega, A. dan Ordóñez, S., (2008). Enhancement of the CO<sub>2</sub> retention capacity of X zeolites by Na- and Cs-treatments. *Chemosphere* 70, 1375–1382.
- Ducrot-Boisgontier, C., Parmentier, J., Faour, A., Patarin, J. dan Pirngruber, G.D., (2010). FAU-Type Zeolite Nanocasted Carbon Replicas for CO<sub>2</sub> Adsorption and Hydrogen Purification. *Am. Chem. Soc.* 24, 3595–3602.
- Falahati, H. dan Barz, D.P.J., (2013). Evaluation of hydrogen sorption models for AB5-type metal alloys by employing a gravimetric technique. *Int. J. Hydrog. Energy* 38, 8838–8851.
- Furukawa, H. dan Yaghi, O.M., (2009). Storage of Hydrogen, Methane, and Carbon Dioxide in Highly Porous Covalent Organic Frameworks for Clean Energy Applications. *Am. Chem. Soc.*
- Georgiev, D., Bogdanov, B., Angelova, K., Markovska, I. dan Hristov, Y., (2009). Synthetic Zeolites - Structure, Classification, Current Trends in Zeolite Synthesis Review. *Int. Sci. Conf.*
- Guan, C., Wang, K., Yang, C. dan Zhao, X.S., (2009). Characterization of a zeolite-templated carbon for H<sub>2</sub> storage application. *Microporous Mesoporous Mater.* 118, 503–507.
- Gunawan, T., (2014). Adsorpsi-Desorpsi CO<sub>2</sub> Pada Material Karbon Tertemplat Zeolit-Y Dengan Variasi Suhu. *Tugas akhir Inst. Teknol. Sepuluh Nop. Surabaya*.
- Harlick, P.J.E. dan Tezel, F.H., (2004). An experimental adsorbent screening study for CO<sub>2</sub> removal from N<sub>2</sub>. *Microporous Mesoporous Mater.* 76, 71–79.
- Hedin, N., Andersson, L., Bergström, L. dan Yan, J., (2013). Adsorbents for the post-combustion capture of CO<sub>2</sub> using rapid temperature swing or vacuum swing adsorption. *Appl. Energy* 104, 418–433.
- Heidari, A., Younesi, H., Rashidi, A. dan Ghoreyshi, A., (2014). Adsorptive removal of CO<sub>2</sub> on highly microporous activated carbons prepared from Eucalyptus camaldulensis wood: Effect of chemical activation. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 45, 579–588.
- Hunsom, M. dan Autthanit, C., (2013). Adsorptive purification of crude glycerol by sewage sludge-derived activated carbon prepared by chemical activation with H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and KOH. *Chem. Eng. J.* 229, 334–343.
- IEA, (2013). Carbon dioxide Emissions From Fuel Combustion. *Int. Energy Agency*.
- Ilnicka, A. dan Lukaszewicz, J.P., (2015). Synthesis of N-rich microporous carbon materials from chitosan by alkali activation using Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. *Mater. Sci. Eng. B* 201, 66–71.

- Jacobson, M.Z., (2008). Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *R. Soc. Chem.*
- Jimenez, V., Ramirez-Lucas, A., Diaz, J.A., Sanchez, P. dan Romero, A., (2012). CO<sub>2</sub> Capture in Different Carbon Materials. *Am. Chem. Soc.* 46, 7407–7414.
- Kayadoe, V., (2013). Sintesis dan Karakterisasi Karbon Ter-template Zeolit NaY dengan Prekursor Sukrosa Sebagai Material Penyimpan Hidrogen. *Tesis Program Magister Kim.-FMIPA-ITS.*
- Kenarsari, S.D., Yang, D., Jiang, G., Zhang, S., Wang, J., Russell, A.G., Wei, Q. dan Fan, M., (2013). Review of recent advances in carbon dioxide separation and capture. *R. Soc. Chem.*
- Kim, K., Choi, M. dan Ryoo, R., (2013). Ethanol-based synthesis of hierarchically porous carbon using nanocrystalline beta zeolite template for high-rate electrical double layer capacitor. *Carbon* 60, 175–185.
- Klepel, O., Strauß, H., Garsuch, A. dan Böhme, K., (2007). Several ways to produce porous carbon monoliths by template assisted routes. *Mater. Lett.* 61, 2037–2039.
- Klug, H.P. dan Alexander, L.E., (1974). X-ray Diffraction in Snider, Monroe. ed. *John Willey & Sons, New York.*
- Konwar, R.J. dan De, M., (2015). Development of templated carbon by carbonisation of sucrose–zeolite composite for hydrogen storage. *John Wiley Sons Ltd* 39, 223–233.
- Kothandaraman, A., (2010). Carbon Dioxide Capture by Chemical Absorption: A Solvent Comparison Study. *Mass. Inst. Technol.*
- Kumar, A. dan Mohan Jena, H., (2015). High surface area microporous activated carbons prepared from Fox nut (*Euryale ferox*) shell by zinc chloride activation. *Appl. Surf. Sci.* 356, 753–761.
- Kyotani, T., Nagai, T., Inoue, S. dan Tomita, A., (1997). Formation of New Type of Porous Carbon by Carbonization in Zeolite Nanochannels. *Chem. Mater.* 9, 609–615.
- Lee, H.J., Kim, Y.M., Kweon, O.S. dan Kim, I.J., (2007). Structural and morphological transformation of NaX zeolite crystals at high temperature. *Refereed Rep. IX Conf. Exhib. Eur. Ceram. Soc. Conf. Exhib. Eur. Ceram. Soc.* 27, 561–564.
- Lee, J.-S., Kim, J.-H., Kim, J.-T., Suh, J.-K., Lee, J.-M. dan Lee, C.-H., (2002). Adsorption Equilibria of CO<sub>2</sub> on Zeolite 13X and Zeolite X/Activated Carbon Composite. *Am. Chem. Soc.*
- Lee, S.C., Hsieh, C.C., Chen, C.H., dan Chen, Y.S., (2013). CO<sub>2</sub> Adsorption by Y-Type Zeolite Impregnated with Amines in Indoor Air. *Taiwan Assoc. Aerosol Res.* 13, 360–366.
- Lee, S.-Y. dan Park, S.-J., (2015). A review on solid adsorbents for carbon dioxide capture. *J. Ind. Eng. Chem.* 23, 1–11.

- Lepaumier, H., Martin, S., Picq, D., Delfort, B. dan Carrete, P.-L., (2010). New Amines for CO<sub>2</sub> Capture. III. Effect of Alkyl Chain Length between Amine Functions on Polyamines Degradation. *Am. Chem. Soc.*
- Leung, D.Y.C., Caramanna, G. dan Maroto-Valer, M.M., (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 426–443.
- Li, D., Ma, T., Zhang, R., Tian, Y. dan Qiao, Y., (2015). Preparation of porous carbons with high low-pressure CO<sub>2</sub> uptake by KOH activation of rice husk char. *Fuel* 139, 68–70.
- Li, L., Zhao, N., Wei, W. dan Sun, Y., (2013). A review of research progress on CO<sub>2</sub> capture, storage, and utilization in Chinese Academy of Sciences. *Fuel* 108, 112–130.
- Li, Z.Q., Lu, C.J., Xia, Z.P., Zhou, Y., dan Luo, Z., (2007). X-ray Diffraction Patterns of Graphite and Turbostratic Carbon. *Carbons.* 45, 1686-1695
- Liu, S.-H., Lin, Y.-C., Chien, Y.-C., dan Hyu, H.-R., (2011). Adsorption of CO<sub>2</sub> from Flue Gas Streams by a Highly Efficient and Stable Aminosilica Adsorbent. *Taylor Francis.*
- Lu, A.-H. dan Dai, S., (2014). Porous Materials for Carbon Dioxide Capture, Green Chemistry and Sustainable Technology. *Springer Berlin Heidelberg.*
- Manggiasih, N.L., (2013). Pengaruh kondisi penghilangan template zeolit NaY menggunakan pelarut HF dan HCl terhadap karakteristik karbon ter-template zeolit NaY (KTZ-Y). *Tugas Akhir Jur. Kim. FMIPA-ITS.*
- Masika, E. dan Mokaya, R., (2013). Preparation of ultrahigh surface area porous carbons templated using zeolite 13X for enhanced hydrogen storage. *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.* 23, 308–316.
- Matsuoka, K., Yamagishi, Y., Yamazaki, T., Setoyama, N., Tomita, A. dan Kyotani, T., (2005). Extremely high microporosity and sharp pore size distribution of a large surface area carbon prepared in the nanochannels of zeolite Y. *Carbon* 43, 876–879.
- Ma, Z., Kyotani, T. dan Tomita, A., (2000). Preparation of a high surface area microporous carbon having the structural regularity of Y zeolite. *R. Soc. Chem.* 2365–2366.
- Milward, A.R. dan Yaghi, O.M., (2005). Metal-Organic Frameworks with Exceptionally High Capacity for Storage of Carbon Dioxide at Room Temperature. *Am. Chem. Soc.*
- Miyake, M., Kimura, Y., Ohashi, T. dan Matsuda, M., (2008). Preparation of activated carbon–zeolite composite materials from coal fly ash. *Microporous Mesoporous Mater.* 112, 170–177.
- Modak, A. dan Bhaumik, A., (2015). Porous carbon derived via KOH activation of a hypercrosslinked porous organic polymer for efficient CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>

- adsorptions and high CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> selectivity. *J. Solid State Chem.* 232, 157–162.
- Mondal, M.K., Balsora, H.K. dan Varshney, P., (2012). Progress and trends in CO<sub>2</sub> capture/separation technologies: A review. *Energy Exergy Model. Adv. Energy Syst.* 46, 431–441.
- Moore, E. dan Smart, L., (1993). *Solid State Chemistry: An Introduction*, 1st ed. Chapman & Hall University and Professional Division, London.
- Musyoka, N.M., Ren, J., Langmi, H.W., Rogers, D.E.C., North, B.C., Mathe, M. dan Bessarabov, D., (2014). Synthesis of templated carbons starting from clay and clay-derived zeolites for hydrogen storage applications. *Wiley Online Libr.*
- Nishihara, H. dan Kyotani, T., (2012). Chapter 10 - Zeolite-Templated Carbon – Its Unique Characteristics and Applications, in: Tascón, J.M.D. (Ed.), *Novel Carbon Adsorbents. Elsevier, Oxford*, pp. 295–322.
- Nowicki, P., Pietrzak, R. dan Wachowska, H., (2008). Comparison of Physicochemical Properties of Nitrogen-enriched Activated Carbons Prepared by Physical and Chemical Activation of Brown Coal. *Energy Fuels* 22, 4133–4138.
- Omegna, Anna, Haouas, Mohamed, Kogelbauer, Andreas, Prins, Roel, (2001). Realumination of dealuminated HZSM – 5 zeolites by acid treatment: a reexamination. *Journal of Microporous and Mesoporous Materials. Vol* 46, 177-184
- Parmentier, J., Gaslain, F.O.M., Ersen, O., Centeno, T.A. dan Solovyov, L.A., (2013). Structure and Sorption Properties of a Zeolite-Templated Carbon with the EMT Structure Type. *Am. Chem. Soc.* 30, 297–307.
- Payra, P. dan Dutta, P.K., (2003). *Zeolites: A Primer, Handbook of Zeolite Science and Technology. Marcel Dekker Inc.*
- Pham, T.D., Xiong, R., Sandler, S.I., dan Lobo, R.F., (2014). Experimental and computational studies on the adsorption of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> on pure silica zeolites. *Microporous Mesoporous Mater.* 185, 157–166.
- Pires, J.C.M., Martins, F.G., Alvim-Ferraz, M.C.M. dan Simões, M., (2011). Recent developments on carbon capture and storage: An overview. *Spec. Issue Carbon Capture Storage* 89, 1446–1460.
- Plaza, M.G., Pevida, C., Pis, J.J. dan Rubiera, F., (2011). Evaluation of the cyclic capacity of low-cost carbon adsorbents for post-combustion CO<sub>2</sub> capture. *10th Int. Conf. Greenh. Gas Control Technol.* 4, 1228–1234.
- Purnomo, C.W., Salim, C. dan Hinode, H., (2012). Synthesis of pure Na–X and Na–A zeolite from bagasse fly ash. *Microporous Mesoporous Mater.* 162, 6–13.
- Rodriguez-Mirasol, J., Cordero, T., Radovic, L.R. dan Rodriguez, J.J., (1998). Structural and Textural Properties of Pyrolytic Carbon Formed within a Microporous Zeolite Template. *Am. Chem. Soc.* 10.

- Rohmah, F., (2013). Pengaruh suhu karbonisasi pada karakterisasi karbon bertemplat zeolit. *Tugas Akhir Jur. Kim. FMIPA-ITS*.
- Saha, D. dan Deng, S., (2010). Adsorption equilibrium and kinetics of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and NH<sub>3</sub> on ordered mesoporous carbon. *J. Colloid Interface Sci.* 345, 402–409.
- Saito, Taro, (1996). Inorganic Chemistry. *Iwanami Shoten Publisher. Tokyo*
- Sakintuna, B. dan Yurum, Y., (2005). Templated Porous Carbons: A Review Article. *Am. Chem. Soc.* 44.
- Samanta, A., Zhao, A., Shimizu, G.K.H., Sarkar, P. dan Gupta, R., (2011). Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture Using Solid Sorbents: A Review. *Am. Chem. Soc.* 51, 1438–1463.
- Sánchez-Sánchez, Á., Suárez-García, F., Martínez-Alonso, A. dan Tascón, J.M.D., (2014). Influence of Porous Texture and Surface Chemistry on the CO<sub>2</sub> Adsorption Capacity of Porous Carbons: Acidic and Basic Site Interactions. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 6, 21237–21247.
- Sevilla, M. dan Fuertes, A., (2012). CO<sub>2</sub> Adsorption by Activated Templated Carbons. *Journal of Colloid and Interface Science.* 366, 147-154
- Sevilla, M., Alam, N. dan Mokaya, R., (2010). Enhancement of Hydrogen Storage Capacity of Zeolite-Templated Carbons by Chemical Activation. *Am. Chem. Soc.* 114, 11314–11319.
- Shao, W., Zhang, L., Li, L. dan Lee, R.L., (2009). Adsorption of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> on synthesized NaY zeolite at high temperatures. *Springer US* 15.
- Singh, A.K. dan Sarkar, R., (2014). Synthesis and Characterization of Alumina Sol and Its Use as Binder in No Cement High-Alumina Refractory Castables. *International Journal Applied Ceramic Technology.* 1-7
- Siriwardane, R.V., Shen, M.-S. dan Fisher, E.P., (2003). Adsorption of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, and O<sub>2</sub> on Natural Zeolites. *Am. Chem. Soc.*
- Skoog, D.A., Holler, F.J. dan Crouch, S.R., (2007). Principles of Instrumental Analysis. *Thomson Brooks/Cole, Kanada.*
- Song, X.H., Xu, R. dan Wang, K., (2013). The structural development of zeolite-templated carbon under pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 100, 153–157.
- Su, F., Zeng, J., Yu, Y., Lv, L., Lee, J.Y. dan Zhao, X.S., (2005). Template synthesis of microporous carbon for direct methanol fuel cell application. *Carbon* 43, 2366–2373.
- Su, F., Zhao, X.S., Lv, L. dan Zhou, Z., (2004). Synthesis and characterization of microporous carbons templated by ammonium-form zeolite Y. *Carbon* 42, 2821–2831.
- Valero-Romero, M.J., Márquez-Franco, E.M., Bedia, J., Rodríguez-Mirasol, J. dan Cordero, T., (2014). Hierarchical porous carbons by liquid phase impregnation of zeolite templates with lignin solution. *Microporous Mesoporous Mater.* 196, 68–78.

- Walton, K.S., Abney, M.B. dan Douglas LeVan, M., (2006). CO<sub>2</sub> adsorption in Y and X zeolites modified by alkali metal cation exchange. *Microporous Mesoporous Mater.* 91, 78–84.
- Wang, Q., Luo, J. dan Borgna, A., (2011). CO<sub>2</sub> capture by solid adsorbents and their applications: current status and new trends. *R. Soc. Chem.*
- Wardani, A.R.K., (2014). Sintesis Zeolit X Berpendukung Serat Gelas Sebagai Material Penyerap CO<sub>2</sub>: Variasi Waktu Perendaman dan Konsentrasi NaOH Sebagai Aktivator Serat Gelas. *Inst. Teknol. Sepuluh Nop.*
- Xia, K., Tian, X., Fei, S. dan You, K., (2014). Hierarchical porous graphene-based carbons prepared by carbon dioxide activation and their gas adsorption properties. *Int. J. Hydrog. Energy* 39, 11047–11054.
- Xiao, Y., Chen, H., Zheng, M., Dong, H., Lei, B. dan Liu, Y., (2014). Porous carbon with ultrahigh specific surface area derived from biomass rice hull. *Mater. Lett.* 116, 185–187.
- Xu, X., Zhao, X., Sun, L. dan Liu, X., (2009). Adsorption separation of carbon dioxide, methane and nitrogen on monoethanol amine modified  $\beta$ -zeolite. *J. Nat. Gas Chem.* 18, 167–172.
- Yang, H., Xu, Z., Fan, M., Gupta, R., Slimane, R.B., Bland, A.E., dan Wright, I., (2008). Progress in carbon dioxide separation and capture: A review. *J. Environ. Sci.* 20, 14–27.
- Yang, S.-T., Kim, J. dan Ahn, W.-S., (2010). CO<sub>2</sub> adsorption over ion-exchanged zeolite beta with alkali and alkaline earth metal ions. *Microporous Mesoporous Mater.* 135, 90–94.
- Yang, Z., Xia, Y. dan Mokaya, R., (2007). Enhanced Hydrogen Storage Capacity of High Surface Area Zeolite-like Carbon Materials. *Am. Chem. Soc.* 129, 1673–1679.
- Yang, Z., Xia, Y., Sun, X. dan Mokaya, R., (2006)a. Preparation and Hydrogen Storage Properties of Zeolite-Templated Carbon Materials Nanocast via Chemical Vapor Deposition: Effect of the Zeolite Template and Nitrogen Doping. *Am. Chem. Soc.* 110.
- Yang, Z., Xia, Y., Sun, X. dan Mokaya, R., (2006)b. Preparation and Hydrogen Storage Properties of Zeolite-Templated Carbon Materials Nanocast via Chemical Vapor Deposition: Effect of the Zeolite Template and Nitrogen Doping. *J. Phys. Chem. B* 110, 18424–18431.
- Yani, A., Destiarti, L. dan Wahyuni, N., (2013). Sintesis Zeolit A dengan Variasi Sumber Silika dan Alumina. *JKK Univ Tanjungpura* 2, 1–6.
- Yi, H., Deng, H., Tang, X., Yu, Q., Zhou, X. dan Liu, H., (2012). Adsorption equilibrium and kinetics for SO<sub>2</sub>, NO, CO<sub>2</sub> on zeolites FAU and LTA. *J. Hazard. Mater.* 203–204, 111–117.
- Youn, H.-K., Kim, J., Chandrasekar, G., Jin, H. dan Ahn, W.-S., (2011). High pressure carbon dioxide adsorption on nanoporous carbons prepared by Zeolite Y templating. *Mater. Lett.* 65, 1772–1774.

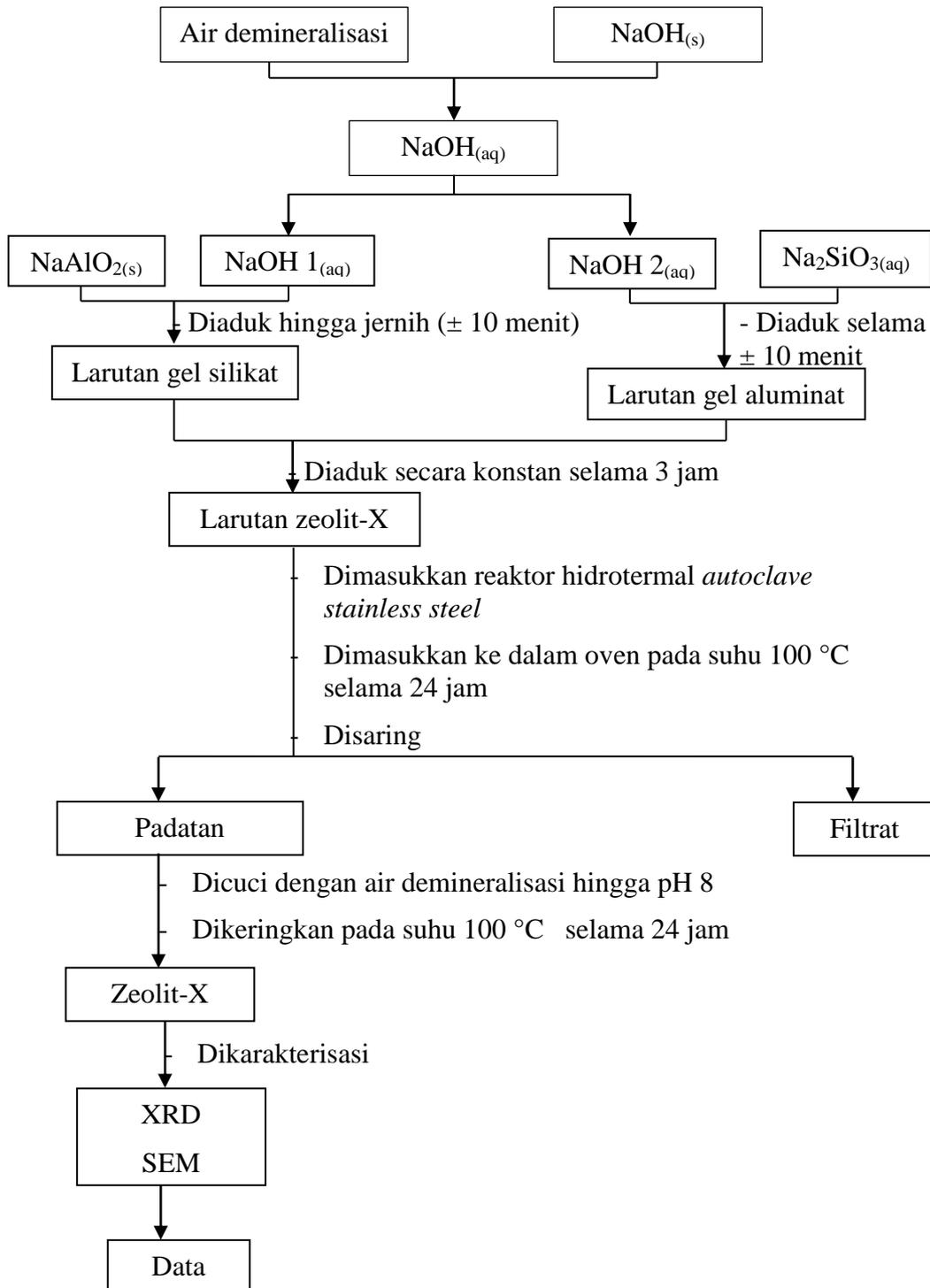
- Zhang, X., Tang, D., Zhang, M. dan Yang, R., (2013)a. Synthesis of NaX zeolite: Influence of crystallization time, temperature and batch molar ratio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  on the particulate properties of zeolite crystals. *Powder Technol.* 235, 322–328.
- Zhang, X., Tong, D., Zhao, J. dan Li, X., (2013)b. Synthesis of NaX zeolite at room temperature and its characterization. *Mater. Lett.* 104, 80–83.
- Zhao, Z., Cui, X., Ma, J. dan Li, R., (2007). Adsorption of carbon dioxide on alkali-modified zeolite 13X adsorbents. *Int. J. Greenh. Gas Control* 1, 355–359.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

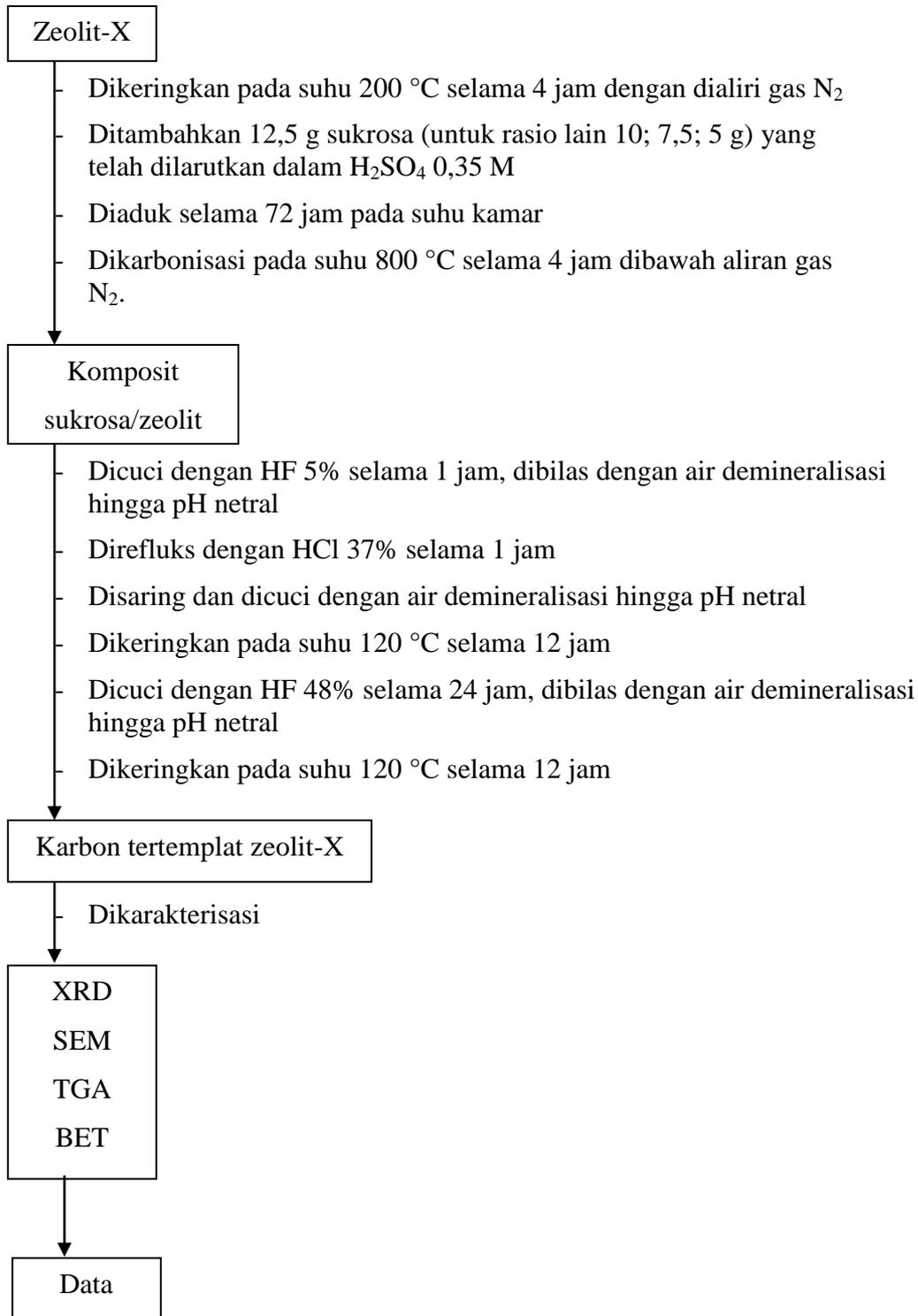
## LAMPIRAN

### LAMPIRAN A : SKEMA KERJA

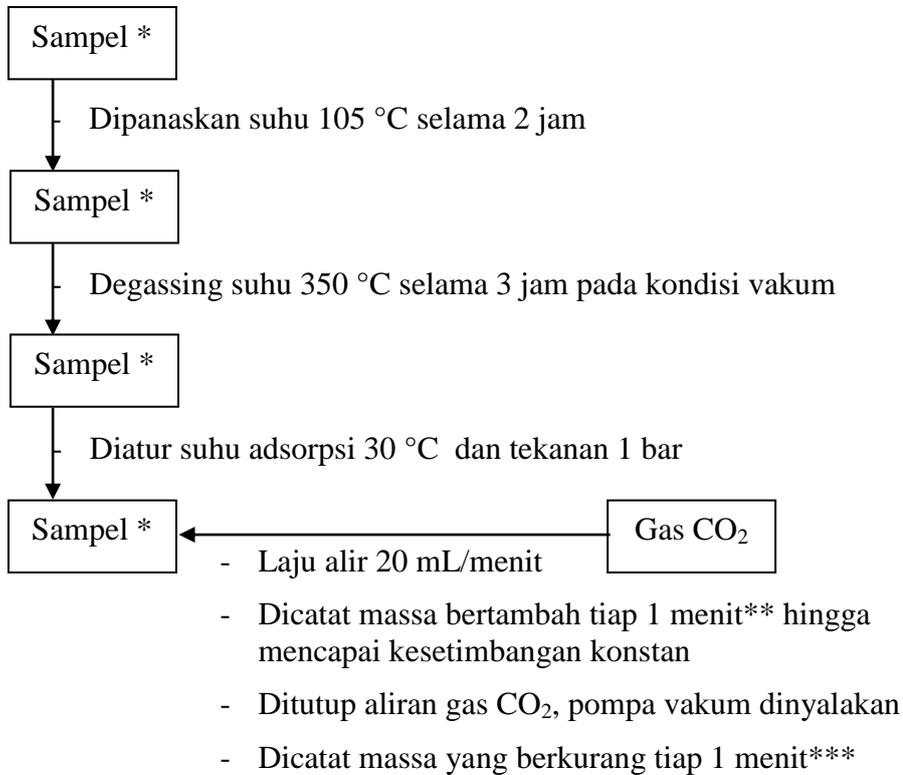
#### 1. Sintesis Zeolit-X



## 2. Sintesis Karbon Teremplat Zeolit-X



### 3. Uji Adsorpsi-Desorpsi CO<sub>2</sub>



Keterangan :

\* = Karbon tertemplat zeolit-X yang telah diaktivasi dengan KOH

\*\* = Massa yang bertambah saat proses adsorpsi

\*\*\* = Massa yang berkurang saat proses desorpsi

## LAMPIRAN B : PERHITUNGAN LARUTAN SINTESIS ZEOLIT-X

### 1. Komposisi bahan

- $\text{NaAlO}_2$  terdiri dari  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 53\%$

$$\text{Na}_2\text{O} = 42,5\%$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,05\% \text{ (diabaikan)}$$

- $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  terdiri dari  $\text{Na}_2\text{O} = 17,75\%$

$$\text{SiO}_2 = 34,25 \%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 48\%$$

### 2. Rasio komposisi molar dari zeolit-X

Rasio komposisi molar yang digunakan untuk sintesis zeolit X berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Zhang dkk.(2013) yaitu:  $4 \text{Na}_2\text{O} : 0,2 \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 : 200 \text{H}_2\text{O}$

### 3. Perhitungan massa yang dibutuhkan pada masing-masing bahan

#### ▪ 0,2 mol $\text{Al}_2\text{O}_3$

- Massa  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang dibutuhkan :

$$m = n \times \text{Mr} = 0,2 \text{ mol} \times 101,96 \text{ gr/mol} = 20,392 \text{ g}$$

- $\text{Al}_2\text{O}_3$  dalam bahan  $\text{NaAlO}_2$  sebanyak 53%

Maka, massa  $\text{NaAlO}_2$  yang dibutuhkan adalah :

$$\text{Massa NaAlO}_2 = \frac{\text{massa Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{20,392}{53\%} = 38,47547 \text{ g}$$

#### ▪ 1 mol $\text{SiO}_2$

- Massa  $\text{SiO}_2$  yang dibutuhkan :

$$m = n \times \text{Mr} = 1 \text{ mol} \times 60 \text{ gr/mol} = 60 \text{ g}$$

- $\text{SiO}_2$  dalam bahan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  sebanyak 34,25%

Maka, massa  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yang dibutuhkan adalah :

$$\text{Massa Na}_2\text{SiO}_3 = \frac{\text{massa SiO}_2}{\% \text{SiO}_2} = \frac{60}{34,25\%} = 175,1825 \text{ g}$$

▪ **200 mol H<sub>2</sub>O**

- Massa H<sub>2</sub>O yang dibutuhkan :

$$m = n \times Mr = 200 \text{ mol} \times 18 \text{ gr/mol} = 3600 \text{ g}$$

- H<sub>2</sub>O dalam bahan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> sebanyak 48%

$$\text{Massa H}_2\text{O dalam Na}_2\text{SiO}_3 = 48\% \times 175,1825 \text{ g} = 84,0876 \text{ g}$$

- Maka, massa H<sub>2</sub>O yang perlu ditambah dari air DM adalah:

$$3600 \text{ g} - 84,0876 \text{ g} = 3515,9124 \text{ g}$$

▪ **4 mol Na<sub>2</sub>O**

- Na<sub>2</sub>O dalam bahan NaAlO<sub>2</sub> sebanyak 42,5%

Massa Na<sub>2</sub>O dalam NaAlO<sub>2</sub> :

$$42,5\% \times 38,47547 \text{ g} = 16,35208 \text{ g}$$

$$\text{Mol Na}_2\text{O dalam NaAlO}_2 = \frac{16,35208 \text{ g}}{62 \text{ g/mol}} = 0,2637 \text{ mol}$$

- Na<sub>2</sub>O dalam bahan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> sebanyak 17,75%

Massa Na<sub>2</sub>O dalam Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> :

$$17,75\% \times 175,1825 \text{ g} = 31,09489 \text{ g}$$

$$\text{Mol Na}_2\text{O dalam Na}_2\text{SiO}_3 = \frac{31,09489 \text{ g}}{62 \text{ g/mol}} = 0,50153 \text{ mol}$$

- Total mol Na<sub>2</sub>O yang telah ada :

$$0,2637 \text{ mol} + 0,50153 \text{ mol} = 0,76528 \text{ mol}$$

Jadi, mol Na<sub>2</sub>O yang perlu ditambahkan :

$$4 \text{ mol} - 0,76528 \text{ mol} = 3,23472 \text{ mol}$$

- Sumber Na<sub>2</sub>O yang digunakan adalah NaOH, sehingga mol Na<sub>2</sub>O yang ditambahkan dikalikan 2 :

$$2 \times 3,23472 \text{ mol} = 6,46944 \text{ mol}$$

- Massa NaOH yang ditambahkan sebanyak :

$$m = n \times Mr$$

$$m_{\text{NaOH}} = 6,46944 \text{ mol} \times 40 \text{ g/mol} = \pm 258,7776 \text{ g}$$

- Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, massa bahan yang digunakan untuk sintesis zeolit-X masing-masing sebanyak :

$$\text{NaAlO}_2 = 38,47547 \text{ g}$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 175,1825 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 3515,9124 \text{ g}$$

$$\text{NaOH} = \pm 258,7776 \text{ g}$$

- Tetapi, pada penelitian ini digunakan massa yang lebih kecil sebanyak  $\frac{1}{4}$  resep dari perhitungan massa, sehingga didapatkan komposisi masa bahan sebagai berikut :

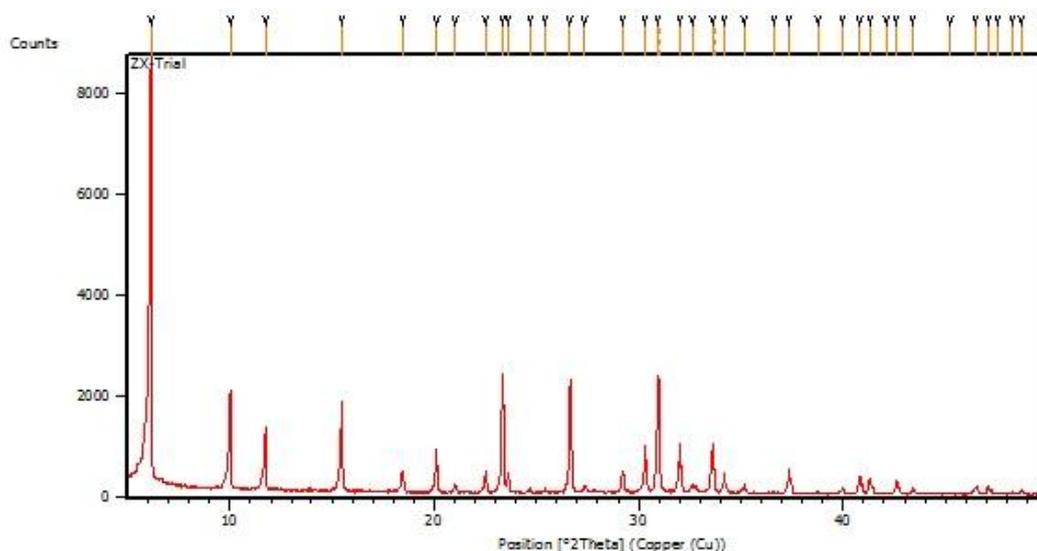
$$\text{NaAlO}_2 = 1,53902 \text{ g}$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 7,0073 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 140,6365 \text{ g}$$

$$\text{NaOH} = \pm 10,3511 \text{ g}$$

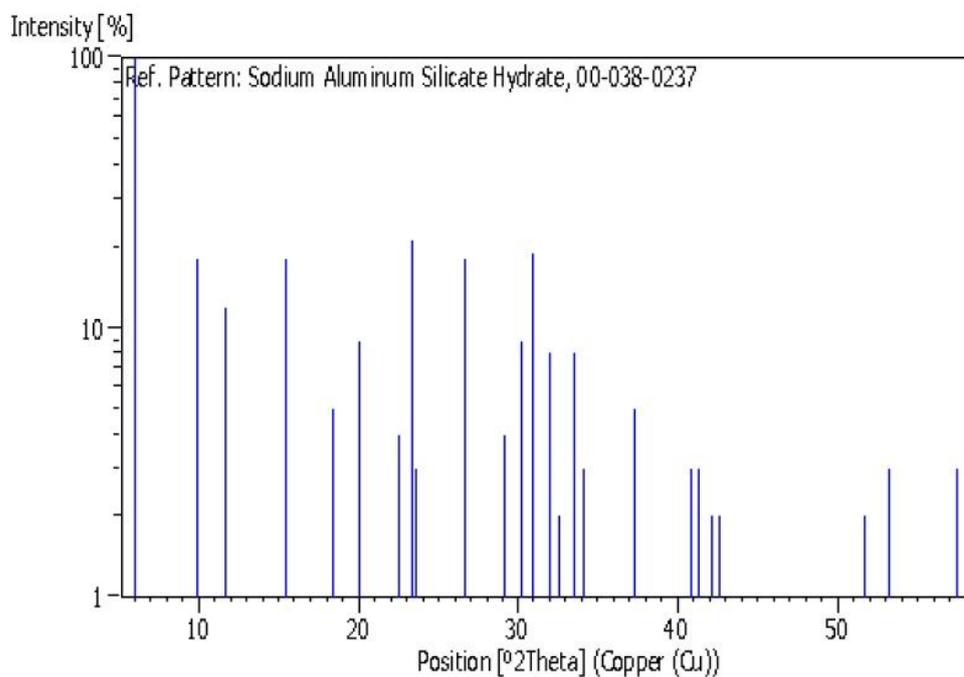
## LAMPIRAN C : DATA DIFRAKTOGRAM XRD ZEOLIT-X



### Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.1471	8532.78	0.0669	14.37841	100.00
10.0271	1924.71	0.0669	8.82168	22.56
11.7584	1220.36	0.0669	7.52640	14.30
15.4629	1775.31	0.0669	5.73059	20.81
18.4464	412.40	0.0836	4.80991	4.83
20.0957	861.42	0.0836	4.41872	10.10
21.0183	161.80	0.1004	4.22679	1.90
22.4918	390.87	0.1004	3.95311	4.58
23.3288	2322.38	0.1171	3.81314	27.22
23.6034	368.38	0.0669	3.76940	4.32
24.6895	62.13	0.1171	3.60599	0.73
25.4405	73.56	0.0836	3.50121	0.86
26.6748	2095.81	0.0669	3.34195	24.56
27.3906	129.39	0.0669	3.25622	1.52
29.2347	430.61	0.0669	3.05488	5.05
30.3245	891.72	0.0669	2.94754	10.45
30.9693	2298.39	0.1020	2.88523	26.94
31.0645	926.34	0.0408	2.88375	10.86
32.0122	965.24	0.1020	2.79357	11.31
32.6234	199.47	0.0816	2.74262	2.34
33.6189	990.90	0.0816	2.66364	11.61
33.7190	468.11	0.0408	2.66257	5.49
34.2009	385.32	0.0816	2.61964	4.52
35.1597	174.19	0.1020	2.55036	2.04
36.6096	46.01	0.1632	2.45262	0.54
37.3672	453.05	0.1020	2.40461	5.31
38.7747	50.11	0.1224	2.32051	0.59

**LAMPIRAN D : DATA DIFRAKTOGRAM ZEOLIT-X STANDAR JCPDS  
038-0237**



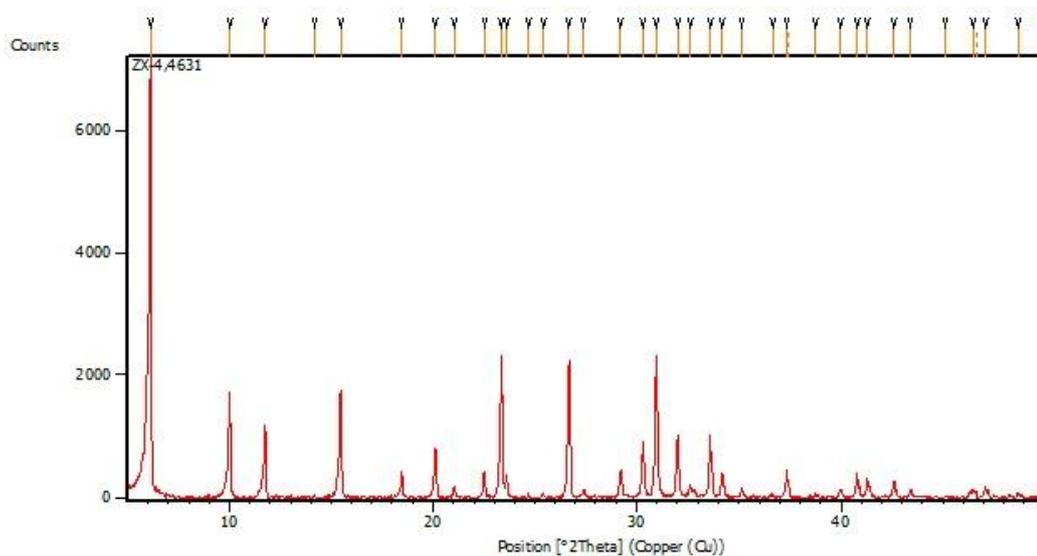
**References**

Primary reference: Milton, R., 2,882,244., *U.S. Patent*, (1959)

**Peak list**

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	14.47000	6.103	100.0
2	2	2	0	8.85000	9.987	18.0
3	3	1	1	7.54000	11.727	12.0
4	3	3	1	5.73000	15.452	18.0
5	5	1	1	4.81000	18.431	5.0
6	4	4	0	4.42000	20.073	9.0
7	5	3	1	4.23000	20.985	1.0
8	6	2	0	3.94600	22.514	4.0
9	5	3	3	3.80800	23.341	21.0
10	6	2	2	3.76500	23.612	3.0
11	4	4	4	3.60900	24.648	1.0
12	7	1	1	3.50000	25.428	1.0
13	6	4	2	3.33800	26.684	18.0

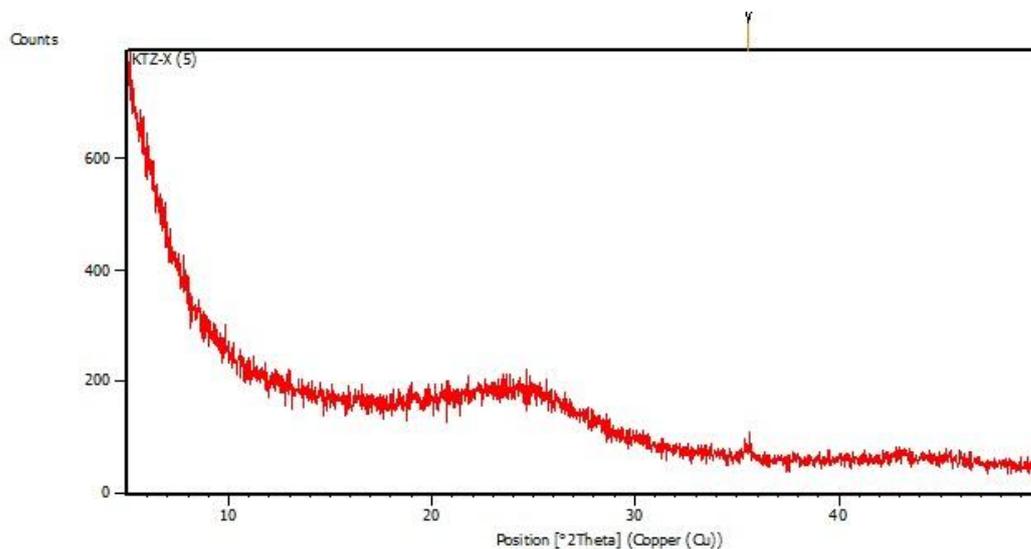
**LAMPIRAN E : DATA DIFRAKTOGRAM KOMPOSIT  
KARBON/ZEOLIT-X**



**Peak List:** (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.1497	7169.23	0.0669	14.37240	100.00
10.0280	1691.33	0.0669	8.82088	23.59
11.7578	1165.81	0.0669	7.52674	16.26
14.1841	47.13	0.1004	6.24422	0.66
15.4615	1746.04	0.0836	5.73111	24.35
18.4458	409.87	0.0836	4.81008	5.72
20.0927	794.08	0.0836	4.41939	11.08
21.0257	171.37	0.0669	4.22532	2.39
22.4973	431.44	0.0669	3.95216	6.02
23.3281	2318.69	0.1171	3.81326	32.34
23.5986	358.29	0.0669	3.77016	5.00
24.6707	69.93	0.1171	3.60870	0.98
25.4362	89.09	0.1004	3.50180	1.24
26.6752	2235.55	0.0669	3.34190	31.18
27.3967	137.57	0.0669	3.25551	1.92
29.2236	432.89	0.0836	3.05602	6.04
30.3230	907.76	0.0669	2.94767	12.66
30.9617	2299.82	0.0836	2.88831	32.08
32.0047	1021.55	0.0669	2.79653	14.25
32.6184	197.90	0.0669	2.74530	2.76
33.6131	1035.75	0.0669	2.66630	14.45
34.2004	392.77	0.0669	2.62184	5.48
35.1430	168.99	0.0502	2.55365	2.36

## LAMPIRAN F : DIFRAKTOGRAM KTZ-X 0,5



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
35.5454	20.32	0.4896	2.52357	100.00

**Pattern List:** (Bookmark 4)

**Document History:** (Bookmark 5)

Insert Measurement:

- File name = KTZ-X (5).rd
- Modification time = "8/10/2016 3:05:49 PM"
- Modification editor = "Teknik Material"

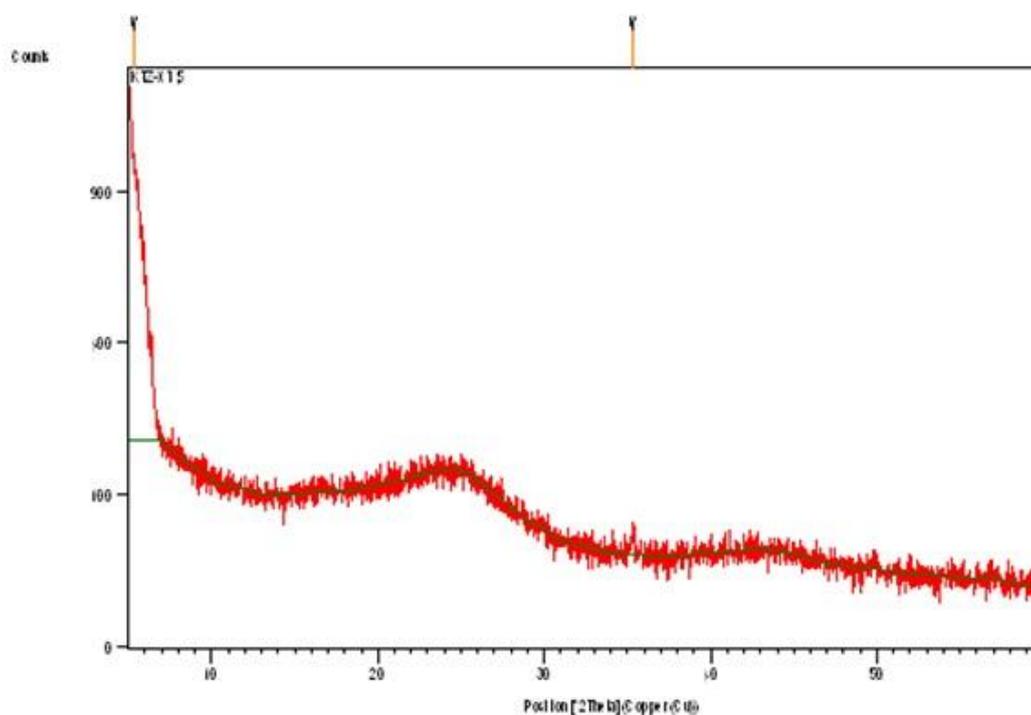
Interpolate Step Size:

- Derived = "Yes"
- Step Size = "0.01"
- Modification time = "8/10/2016 3:05:49 PM"
- Modification editor = "PANalytical"

Search Peaks:

- Minimum significance = "1"
- Minimum tip width = "0.02"
- Maximum tip width = "1"
- Peak base width = "2"
- Method = "Minimum 2nd derivative"
- Modification time = "7/22/2016 9:29:32 AM"
- Modification editor = "Teknik Material"

## LAMPIRAN G : DIFRAKTOGRAM KTZ-X 0,75



### Peak List

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel.Int. [%]
5.3300	893.85	0.6298	16.58063	100.00
35.3038	14.88	0.4723	2.54239	1.66

### Document History

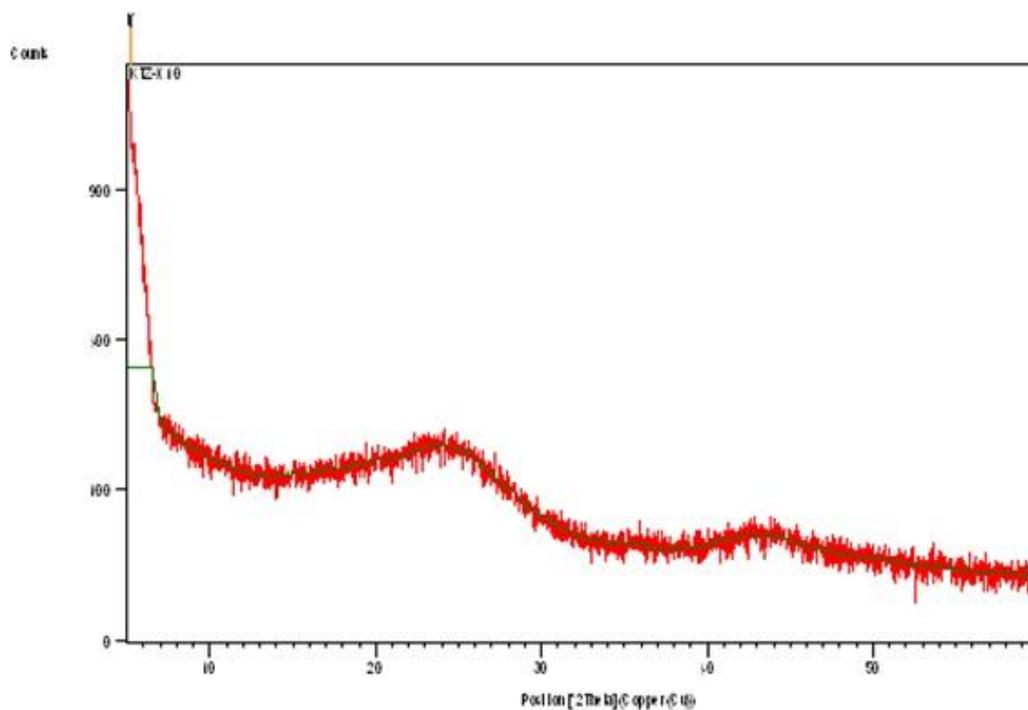
Insert Measurement:

- File name = "KTZ-X 7,5.xrdml"
- Modification time = "7/1/2016 12:15:07 PM"
- Modification editor = "State Univ of Malang"

Default properties:

- Measurement step axis = "None"
- Internal wavelengths used from anode material: Copper (Cu)
- Original K-Alpha1 wavelength = "1.54060"
- Used K-Alpha1 wavelength = "1.54060"
- Original K-Alpha2 wavelength = "1.54443"
- Used K-Alpha2 wavelength = "1.54443"
- Original K-Beta wavelength = "1.39225"
- Used K-Beta wavelength = "1.39225"
- Dist. focus to div. slit = "91.00000"
- Irradiated length = "10.00000"
- Spinner used = "No"
- Linear detector mode = "None"
- Length linear detector = "2"
- Step axis value = "0.00000"
- Offset = "0.00000"
- Sample length = "10.00000"
- Modification time = "7/1/2016 12:15:07 PM"
- Modification editor = "State Univ of Malang"

## LAMPIRAN H : DIFRAKTOGRAM KTZ-X 1



### Peak List

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.2135	896.99	0.5760	16.93682	100.00

### Document History

Insert Measurement:

- File name = "KTZ-X 10.xrdml"
- Modification time = "7/1/2016 12:15:41 PM"
- Modification editor = "State Univ of Malang"

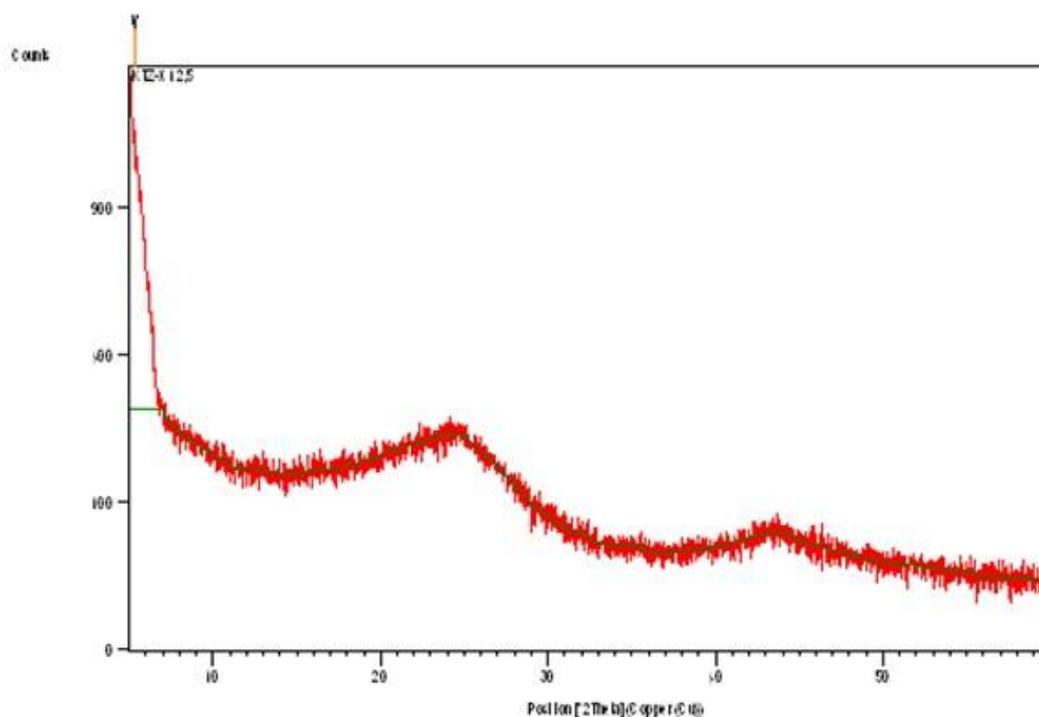
Default properties:

- Measurement step axis = "None"
- Internal wavelengths used from anode material: Copper (Cu)
- Original K-Alpha1 wavelength = "1.54060"
- Used K-Alpha1 wavelength = "1.54060"
- Original K-Alpha2 wavelength = "1.54443"
- Used K-Alpha2 wavelength = "1.54443"
- Original K-Beta wavelength = "1.39225"
- Used K-Beta wavelength = "1.39225"
- Dist. focus to div. slit = "91.00000"
- Irradiated length = "10.00000"
- Spinner used = "No"
- Linear detector mode = "None"
- Length linear detector = "2"
- Step axis value = "0.00000"
- Offset = "0.00000"
- Sample length = "10.00000"
- Modification time = "7/1/2016 12:15:41 PM"
- Modification editor = "State Univ of Malang"

Search Peaks:

- Minimum significance = "2.00"
- Minimum tip width = "0.01"

## LAMPIRAN I : DIFRAKTOGRAM KTZ-X 1,25



### Peak List

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.3300	952.31	0.7680	16.56691	100.00

### Document History

Insert Measurement:

- File name = "KTZ-X 12,5.xrdml"
- Modification time = "7/1/2016 12:16:17 PM"
- Modification editor = "State Univ of Malang"

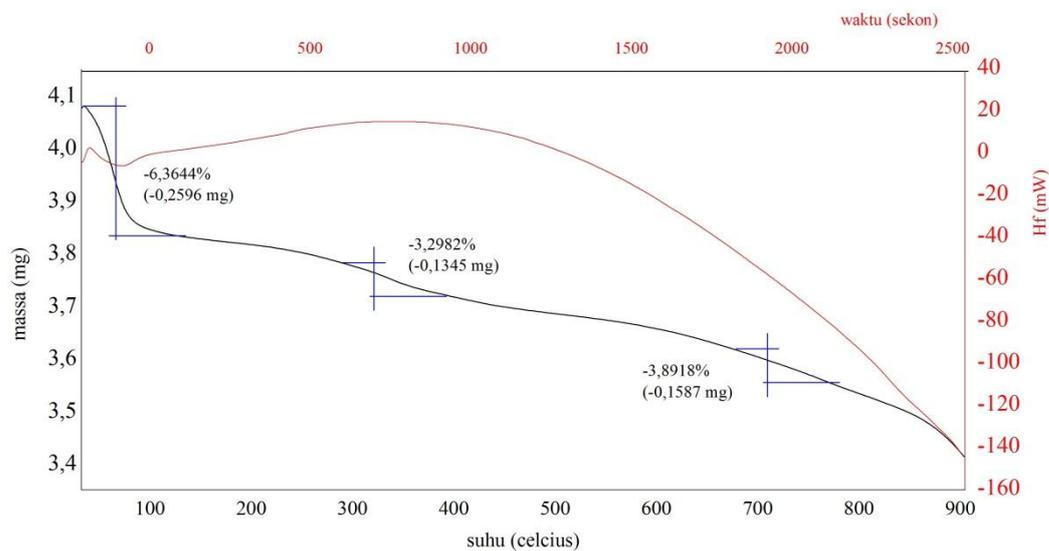
Default properties:

- Measurement step axis = "None"
- Internal wavelengths used from anode material: Copper (Cu)
- Original K-Alpha1 wavelength = "1.54060"
- Used K-Alpha1 wavelength = "1.54060"
- Original K-Alpha2 wavelength = "1.54443"
- Used K-Alpha2 wavelength = "1.54443"
- Original K-Beta wavelength = "1.39225"
- Used K-Beta wavelength = "1.39225"
- Dist. focus to div. slit = "91.00000"
- Irradiated length = "10.00000"
- Spinner used = "No"
- Linear detector mode = "None"
- Length linear detector = "2"
- Step axis value = "0.00000"
- Offset = "0.00000"
- Sample length = "10.00000"
- Modification time = "7/1/2016 12:16:17 PM"
- Modification editor = "State Univ of Malang"

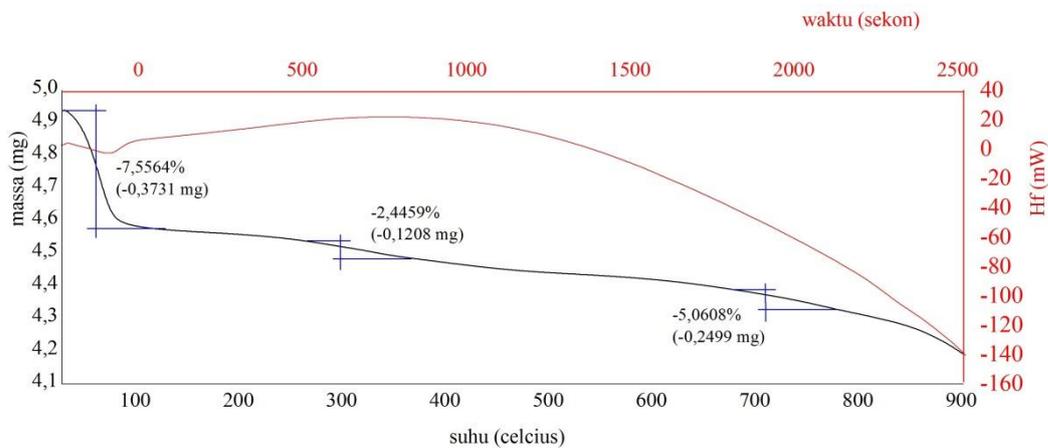
Search Peaks:

- Minimum significance = "2.00"
- Minimum tip width = "0.01"

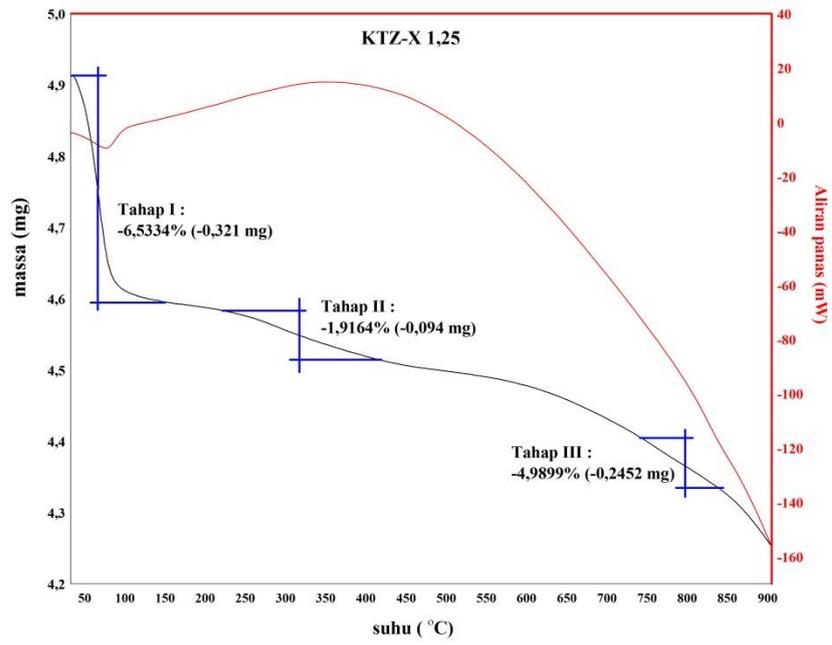
## LAMPIRAN J : DATA TGA-KTZ-X



Gambar J.1. Data TGA-DSC KTZ-X 0,75

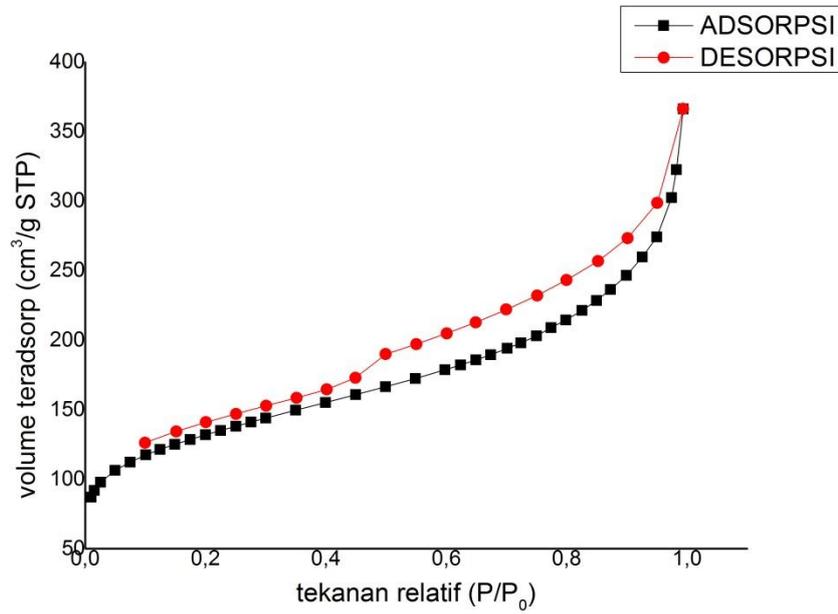


Gambar J.2. Data TGA-DSC KTZ-X 1

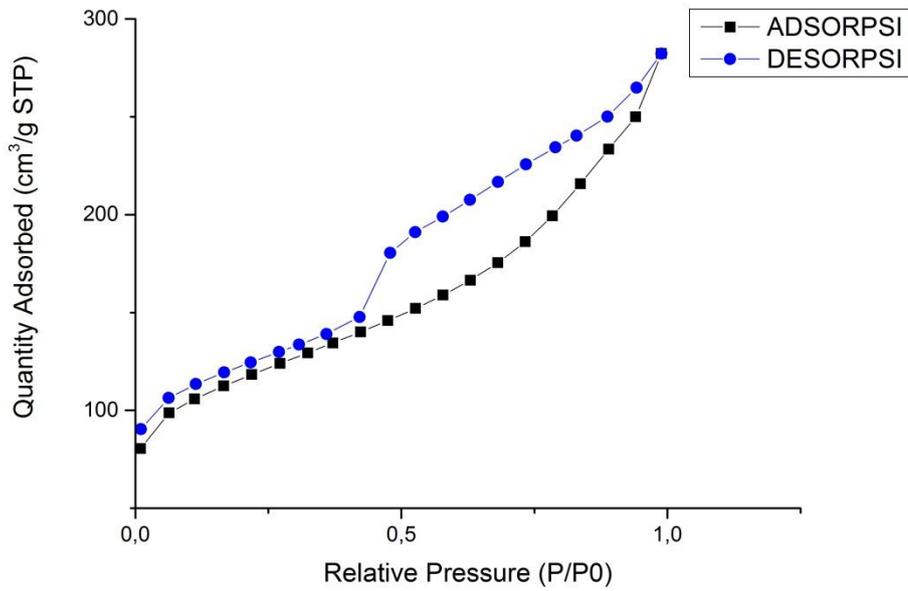


Gambar J.3. Data TGA-DSC KTZ-X 1,25

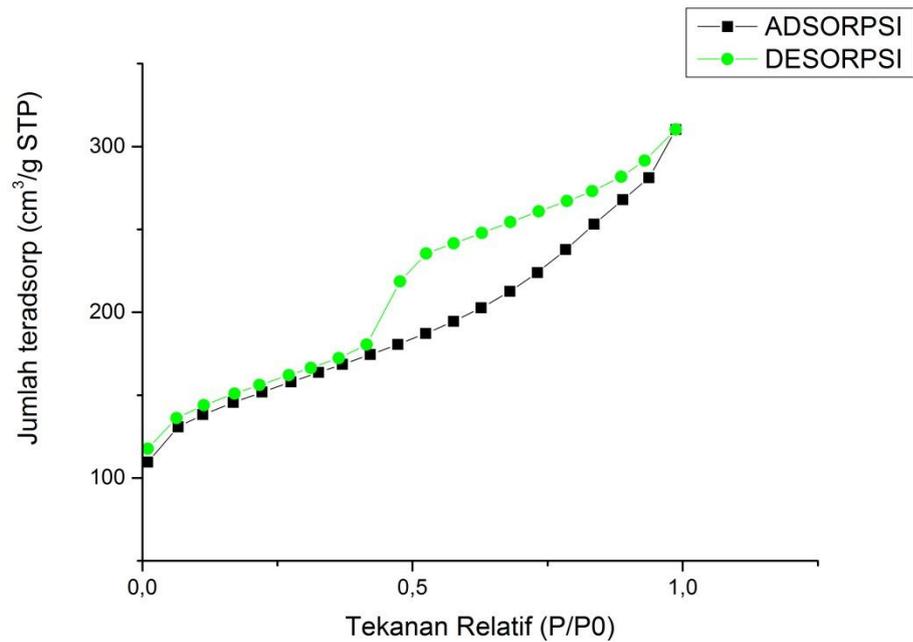
**LAMPIRAN K : DATA ISOTERMAL ADSORPSI-DESORPSI N<sub>2</sub> KTZ-X**



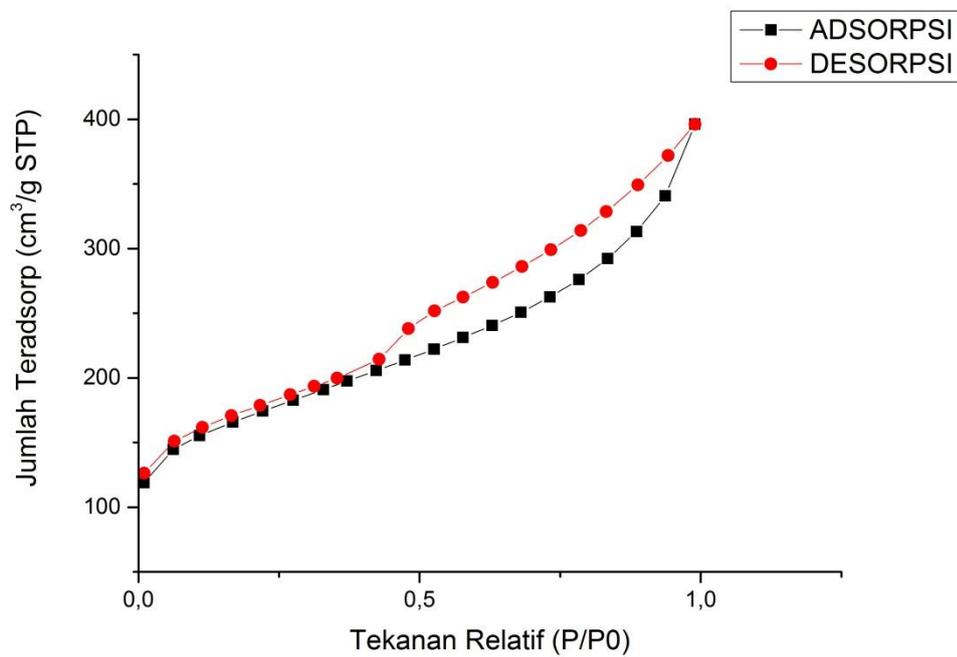
Gambar K.1. Kurva isotermal adsorpsi-desorpsi N<sub>2</sub> KTZ-X 0,5



Gambar K.2. Kurva isotermal adsorpsi-desorpsi N<sub>2</sub> KTZ-X 0,75



Gambar K.3. Kurva isothermal adsorpsi-desorpsi N<sub>2</sub> KTZ-X 1



Gambar K.4. Kurva isothermal adsorpsi-desorpsi N<sub>2</sub> KTZ-X 1,25

## LAMPIRAN L : PENGUJIAN ADSORPSI-DESORPSI CO<sub>2</sub> KTZ-X

### L.1. Kapasitas adsorpsi-desorpsi gas CO<sub>2</sub> pada KTZ-X

#### L.1.1. Uji adsorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X 0,5

Massa sampel awal = 0,301 g

$$\% \text{CO}_2 \text{ ads} = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100 \text{ (\% berat)}$$

$m_0$  = massa sampel awal

$m_t$  = massa sampel pada menit ke-t

$m_r \text{ CO}_2 = 48 \text{ g/mol}$

$$q_t = \frac{m_t}{m_r \text{ CO}_2 \times m_0} \text{ (mol/g)}$$

Data adsorpsi pada suhu ruang (30 °C) dan tekanan 1 atm

Waktu (menit)	Massa (g)	$\Delta m (m_t - m_0)$ (g)	$q_t$ (mmol/g)	% adsorpsi
0	0,301	0	0	0
1	0,381	0,08	26,37043	26,57807
2	0,401	0,1	27,75471	33,22259
3	0,401	0,1	27,75471	33,22259
4	0,394	0,093	27,27021	30,89701
5	0,396	0,095	27,40864	31,56146
6	0,397	0,096	27,47785	31,89369
7	0,401	0,1	27,75471	33,22259
8	0,399	0,098	27,61628	32,55814
9	0,403	0,102	27,89313	33,88704
10	0,398	0,097	27,54707	32,22591
11	0,401	0,1	27,75471	33,22259
12	0,402	0,101	27,82392	33,55482
13	0,398	0,097	27,54707	32,22591
14	0,402	0,101	27,82392	33,55482

Data desorpsi pada suhu ruang (30 °C) dan tekanan 1 atm

Waktu (menit)	Massa (g)	% desorpsi
0	0,402	100
1	0,38	94,52736
2	0,344	85,57214
3	0,318	79,10448
4	0,317	78,85572
5	0,317	78,85572

6	0,312	77,61194
7	0,312	77,61194
8	0,31	77,11443
9	0,31	77,11443
10	0,303	75,37313
11	0,303	75,37313
12	0,302	75,12438
13	0,302	75,12438

$$\% \text{CO}_2 \text{ desorp} = \frac{m_t}{m_0} \times 100 \text{ (\% berat)}$$

### L.1.2. Uji adsorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X 0,75

Massa sampel awal = 0,419 g

Data adsorpsi pada suhu ruang (30 °C) dan tekanan 1 atm

Waktu (menit)	Massa (g)	$\Delta m (m_t - m_0)$ (g)	qt (mmol/g)	% adsorpsi
0	0,419	0	0	0
1	0,427	0,008	21,23111	1,909308
2	0,428	0,009	21,28083	2,147971
3	0,429	0,01	21,33055	2,386635
4	0,426	0,007	21,18138	1,670644
5	0,427	0,008	21,23111	1,909308
6	0,427	0,008	21,23111	1,909308
7	0,427	0,008	21,23111	1,909308
8	0,426	0,007	21,18138	1,670644
9	0,426	0,007	21,18138	1,670644
10	0,426	0,007	21,18138	1,670644
11	0,428	0,009	21,28083	2,147971
12	0,435	0,016	21,62888	3,818616
13	0,435	0,016	21,62888	3,818616
14	0,435	0,016	21,62888	3,818616

Data desorpsi pada suhu ruang (30 °C) dan tekanan 1 atm

Waktu (menit)	Massa (g)	% desorpsi
0	0,435	100
1	0,371	85,28736
2	0,249	57,24138
3	0,247	56,78161
4	0,237	54,48276
5	0,237	54,48276
6	0,23	52,87356
7	0,23	52,87356
8	0,219	50,34483
9	0,214	49,1954
10	0,215	49,42529
11	0,21	48,27586
12	0,217	49,88506
13	0,237	54,48276

### L.1.3. Uji adsorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X 1

Massa sampel awal = 0,404 g

Data adsorpsi pada suhu ruang (30 °C) dan tekanan 1 atm

Waktu (menit)	Massa (g)	$\Delta m (m_t - m_0)$ (g)	qt (mmol/g)	% adsorpsi
0	0,404	0	0	0
1	0,463	0,059	23,87583	14,60396
2	0,468	0,064	24,13366	15,84158
3	0,487	0,083	25,11345	20,54455
4	0,491	0,087	25,31972	21,53465
5	0,497	0,093	25,62913	23,0198
6	0,499	0,095	25,73226	23,51485
7	0,508	0,104	26,19637	25,74257
8	0,51	0,106	26,2995	26,23762
9	0,511	0,107	26,35107	26,48515
10	0,513	0,109	26,45421	26,9802
11	0,512	0,108	26,40264	26,73267
12	0,513	0,109	26,45421	26,9802
13	0,514	0,11	26,50578	27,22772
14	0,514	0,11	26,50578	27,22772

Data desorpsi pada suhu ruang (30 °C) dan tekanan 1 atm

Waktu (menit)	Massa (g)	% desorpsi
0	0,514	100
1	0,495	96,3035
2	0,457	88,91051
3	0,453	88,1323
4	0,445	86,57588
5	0,445	86,57588
6	0,439	85,40856
7	0,439	85,40856
8	0,43	83,65759
9	0,43	83,65759
10	0,418	81,32296
11	0,418	81,32296
12	0,414	80,54475
13	0,414	80,54475

#### L.1.4. Uji adsorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X 1,25

Massa sampel awal = 0,336 g

Data adsorpsi pada suhu ruang (30 °C) dan tekanan 1 atm

Waktu (menit)	Massa (g)	$\Delta m (m_t - m_0)$ (g)	qt (mmol/g)	% adsorpsi
0	0,336	0	0	0
1	0,374	0,038	23,18948	11,30952
2	0,378	0,042	23,4375	12,5
3	0,382	0,046	23,68552	13,69048
4	0,4	0,064	24,80159	19,04762
5	0,406	0,07	25,17361	20,83333
6	0,409	0,073	25,35962	21,72619
7	0,416	0,08	25,79365	23,80952
8	0,421	0,085	26,10367	25,29762
9	0,424	0,088	26,28968	26,19048
10	0,424	0,088	26,28968	26,19048
11	0,424	0,088	26,28968	26,19048

Data desorpsi pada suhu ruang (30 °C) dan tekanan 1 atm

Waktu (menit)	Massa (g)	% desorpsi
0	0,424	100
1	0,414	97,64151
2	0,414	97,64151
3	0,414	97,64151
4	0,41	96,69811
5	0,332	78,30189
6	0,299	70,51887
7	0,296	69,81132
8	0,293	69,10377
9	0,286	67,45283
10	0,284	66,98113
11	0,284	66,98113

## L.2. Kinetika Adsorpsi CO<sub>2</sub> KTZ-X

### L.2.1. Orde satu semu

#### a. Data adsorpsi KTZ-X 0,5

Massa sampel awal = 0,301 g  
 Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>  
 Laju alir = 20 mL/menit  
 Suhu = 30 °C  
 Tekanan = 1 bar

t (menit)	m (g)	qe(mmol/g)	qt(mmol/g)	qe-qt	ln(qe-qt)
0	0	27,82392	0	27,82392	3,325896
1	0,381	27,82392	26,37043	1,453488	0,373966
2	0,401	27,82392	27,75471	0,069214	-2,67056
3	0,401	27,82392	27,75471	0,069214	-2,67056
4	0,394	27,82392	27,27021	0,55371	-0,59111
5	0,396	27,82392	27,40864	0,415282	-0,8788
6	0,397	27,82392	27,47785	0,346069	-1,06112
7	0,401	27,82392	27,75471	0,069214	-2,67056
8	0,399	27,82392	27,61628	0,207641	-1,57194
9	0,403	27,82392	27,89313	-0,06921	#NUM!
10	0,398	27,82392	27,54707	0,276855	-1,28426
11	0,401	27,82392	27,75471	0,069214	-2,67056
12	0,402	27,82392	27,82392	0	#NUM!
13	0,398	27,82392	27,54707	0,276855	-1,28426

$$\%CO_2 = \frac{\text{massa}}{\text{massa adsorben} + \text{massa holder}} \times 100\%$$

$$Q_{eq} = \frac{m_{eq}}{m_r CO_2 \cdot 0,301g}$$

$$Q_{eq} = \frac{0,398g}{48 \frac{g}{mol} \cdot 0,301g}$$

$$= \frac{27,82392 \text{ mmol/g}}{m_t}$$

$$Q_t = \frac{m_t}{m_r CO_2 \cdot 0,301g}$$

$m_{eq}$  = Massa pada saat setimbang (massa yang tidak berubah selama beberapa menit terakhir)

$m_t$  = Massa pada menit ke-t

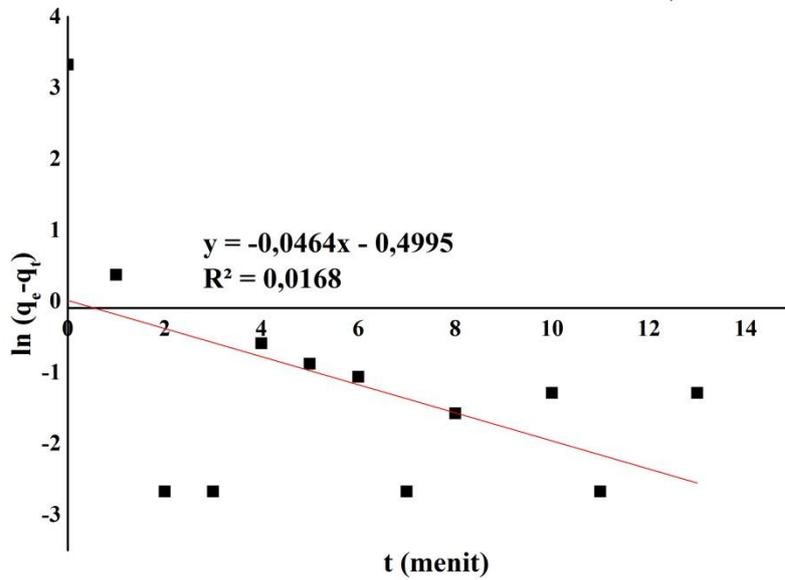
$Q_{eq}$  =  $q_e$  = kapasitas CO<sub>2</sub> saat setimbang (mmol/g)

$Q_t$  =  $q_t$  = Kapasitas CO<sub>2</sub> pada menit ke-t (mmol/g)

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

$$y = a + bx$$

### Kinetika orde satu semu KTZ-X 0,5

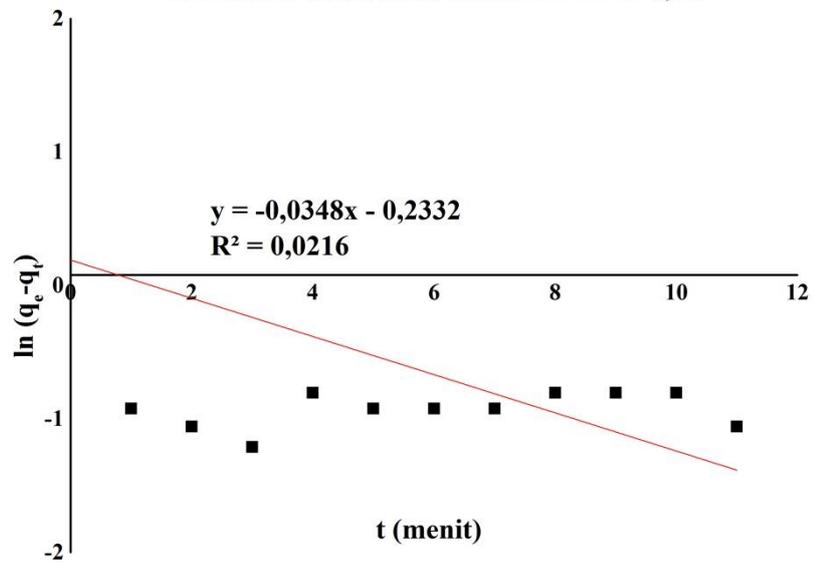


### b. Data adsorpsi KTZ-X 0,75

Massa sampel awal = 0,419 g  
 Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>  
 Laju alir = 20 mL/menit  
 Suhu = 30 °C  
 Tekanan = 1 bar

t (menit)	m (g)	qe(mmol/g)	qt(mmol/g)	qe-qt	ln(qe-qt)
0	0	21,62888	0	21,62888	3,074029
1	0,427	21,62888	21,23111	0,397772	-0,92188
2	0,428	21,62888	21,28083	0,348051	-1,05541
3	0,429	21,62888	21,33055	0,298329	-1,20956
4	0,426	21,62888	21,18138	0,447494	-0,80409
5	0,427	21,62888	21,23111	0,397772	-0,92188
6	0,427	21,62888	21,23111	0,397772	-0,92188
7	0,427	21,62888	21,23111	0,397772	-0,92188
8	0,426	21,62888	21,18138	0,447494	-0,80409
9	0,426	21,62888	21,18138	0,447494	-0,80409
10	0,426	21,62888	21,18138	0,447494	-0,80409
11	0,428	21,62888	21,28083	0,348051	-1,05541
12	0,435	21,62888	21,62888	0	#NUM!
13	0,435	21,62888	21,62888	0	#NUM!

### Kinetika orde satu semu KTZ-X 0,75

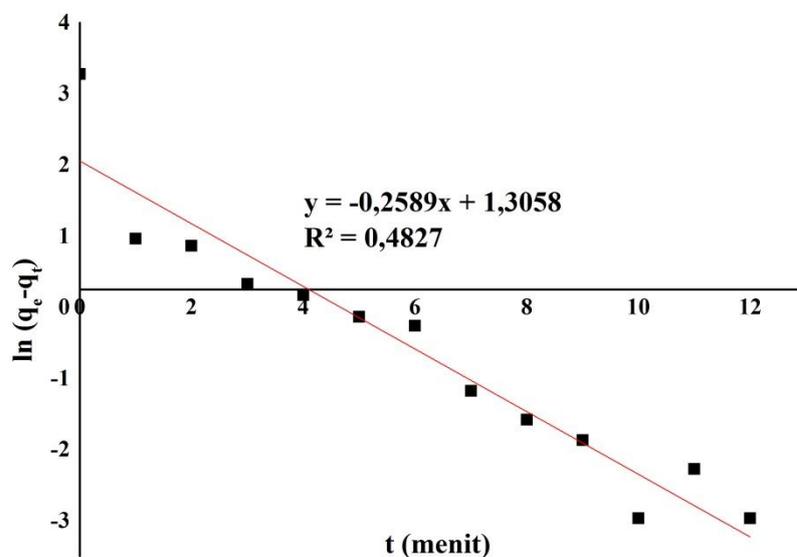


#### c. Data adsorpsi KTZ-X 1

Massa sampel awal = 0,404 g  
 Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>  
 Laju alir = 20 mL/menit  
 Suhu = 30 °C  
 Tekanan = 1 bar

t (menit)	m (g)	qe(mmol/g)	qt(mmol/g)	qe-qt	ln(qe-qt)
0	0	26,50578	0	26,50578	3,277363
1	0,463	26,50578	23,87583	2,62995	0,966965
2	0,468	26,50578	24,13366	2,372112	0,863781
3	0,487	26,50578	25,11345	1,392327	0,330976
4	0,491	26,50578	25,31972	1,186056	0,170634
5	0,497	26,50578	25,62913	0,87665	-0,13165
6	0,499	26,50578	25,73226	0,773515	-0,25681
7	0,508	26,50578	26,19637	0,309406	-1,1731
8	0,51	26,50578	26,2995	0,206271	-1,57857
9	0,511	26,50578	26,35107	0,154703	-1,86625
10	0,513	26,50578	26,45421	0,051568	-2,96486
11	0,512	26,50578	26,40264	0,103135	-2,27171
12	0,513	26,50578	26,45421	0,051568	-2,96486
13	0,514	26,50578	26,50578	0	#NUM!

### Kinetika orde satu semu KTZ-X 1

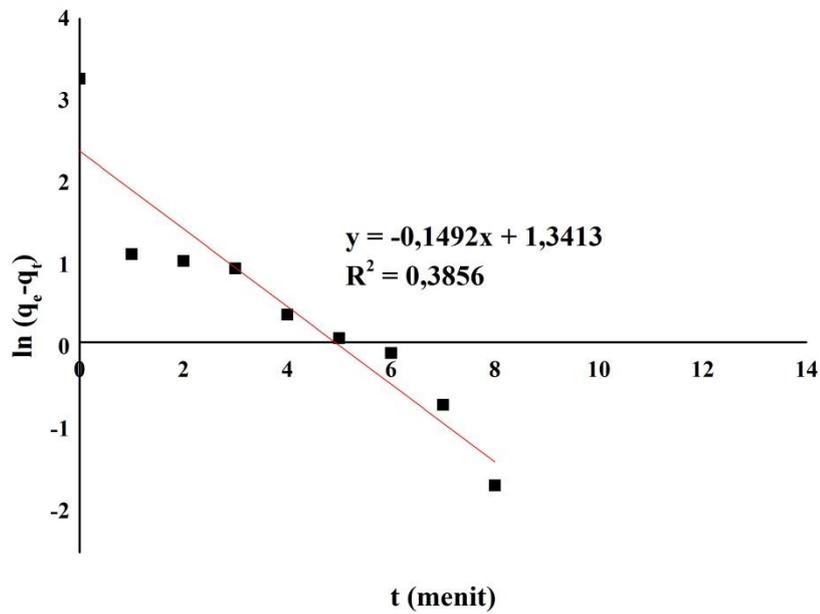


#### d. Data adsorpsi KTZ-X 1,25

Massa sampel awal = 0,336 g  
 Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>  
 Laju alir = 20 mL/menit  
 Suhu = 30 °C  
 Tekanan = 1 bar

t (menit)	m (g)	qe(mmol/g)	qt(mmol/g)	qe-qt	ln(qe-qt)
0	0	26,28968	0	26,28968	3,269177
1	0,374	26,28968	23,18948	3,100198	1,131466
2	0,378	26,28968	23,4375	2,852183	1,048085
3	0,382	26,28968	23,68552	2,604167	0,957113
4	0,4	26,28968	24,80159	1,488095	0,397497
5	0,406	26,28968	25,17361	1,116071	0,109815
6	0,409	26,28968	25,35962	0,93006	-0,07251
7	0,416	26,28968	25,79365	0,496032	-0,70112
8	0,421	26,28968	26,10367	0,186012	-1,68194
9	0,424	26,28968	26,28968	0	#NUM!
10	0,424	26,28968	26,28968	0	#NUM!
11	0,424	26,28968	26,28968	0	#NUM!
12	0,425	26,28968	26,35169	-0,062	#NUM!
13	0,425	26,28968	26,35169	-0,062	#NUM!
14	0,425	26,28968	26,35169	-0,062	#NUM!

### Kinetika orde satu semu KTZ-X 1,25



#### L.2.2. Orde dua semu

##### a. Data adsorpsi KTZ-X 0,5

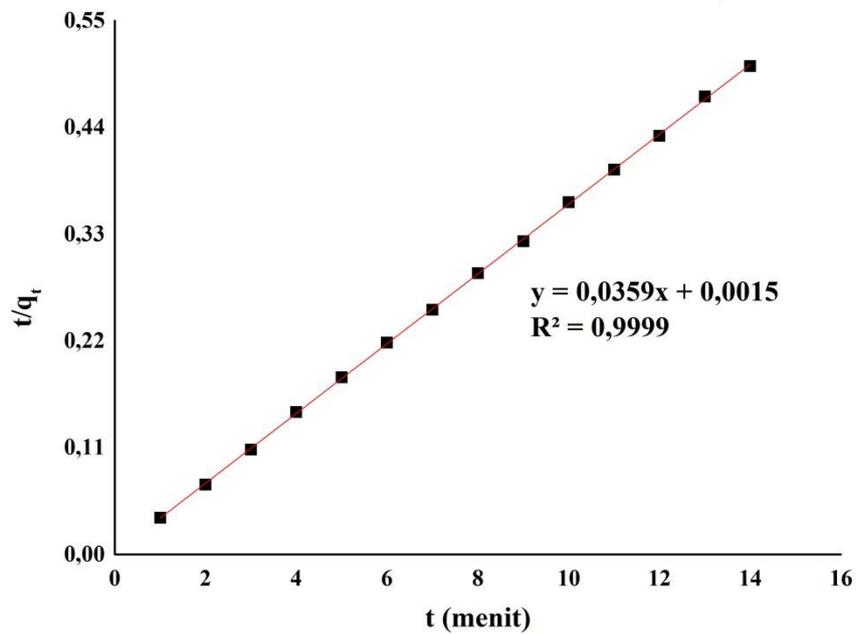
Massa sampel awal = 0,301 g  
 Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>  
 Laju alir = 20 mL/menit  
 Suhu = 30 °C  
 Tekanan = 1 bar

t (menit)	qt (mmol/g)	t/qt
0	0	#DIV/0!
1	26,37043	0,037921
2	27,75471	0,07206
3	27,75471	0,10809
4	27,27021	0,14668
5	27,40864	0,182424
6	27,47785	0,218358
7	27,75471	0,252209
8	27,61628	0,289684
9	27,89313	0,32266
10	27,54707	0,363015
11	27,75471	0,396329
12	27,82392	0,431284
13	27,54707	0,47192
14	27,82392	0,503164

$$t/qt = 1/k.qe^2 + t/qe$$

$$y = bx + a$$

### Kinetika orde dua semu KTZ-X 0,5

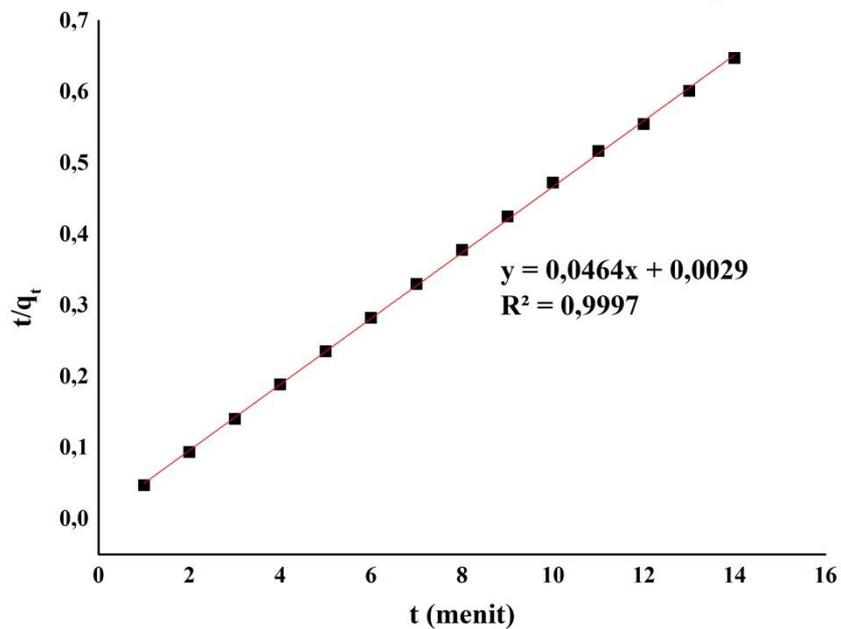


#### b. Data adsorpsi KTZ-X 0,75

Massa sampel awal = 0,419 g  
 Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>  
 Laju alir = 20 mL/menit  
 Suhu = 30 °C  
 Tekanan = 1 bar

t (menit)	qt (mmol/g)	t/qt
0	0	#DIV/0!
1	21,23111	0,047101
2	21,28083	0,093981
3	21,33055	0,140643
4	21,18138	0,188845
5	21,23111	0,235504
6	21,23111	0,282604
7	21,23111	0,329705
8	21,18138	0,37769
9	21,18138	0,424901
10	21,18138	0,472113
11	21,28083	0,516897
12	21,62888	0,554814
13	21,62888	0,601048
14	21,62888	0,647283

### Kinetika orde dua semu KTZ-X 0,75

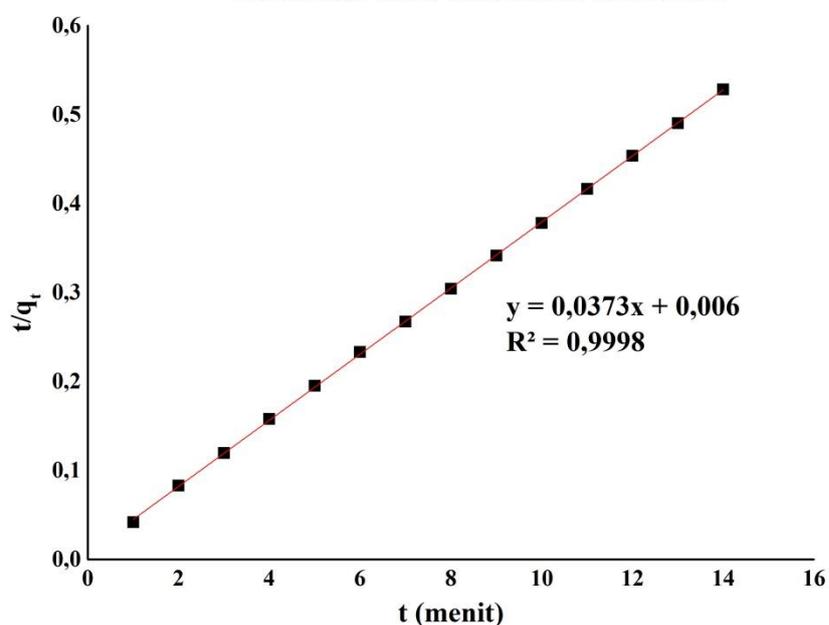


#### c. Data adsorpsi KTZ-X 1

Massa sampel awal = 0,404 g  
 Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>  
 Laju alir = 20 mL/menit  
 Suhu = 30 °C  
 Tekanan = 1 bar

t (menit)	qt (mmol/g)	t/qt
0	0	#DIV/0!
1	23,87583	0,041883
2	24,13366	0,082872
3	25,11345	0,119458
4	25,31972	0,15798
5	25,62913	0,195091
6	25,73226	0,23317
7	26,19637	0,267213
8	26,2995	0,304188
9	26,35107	0,341542
10	26,45421	0,378012
11	26,40264	0,416625
12	26,45421	0,453614
13	26,50578	0,490459
14	26,50578	0,528187

### Kinetika orde dua semu KTZ-X 1

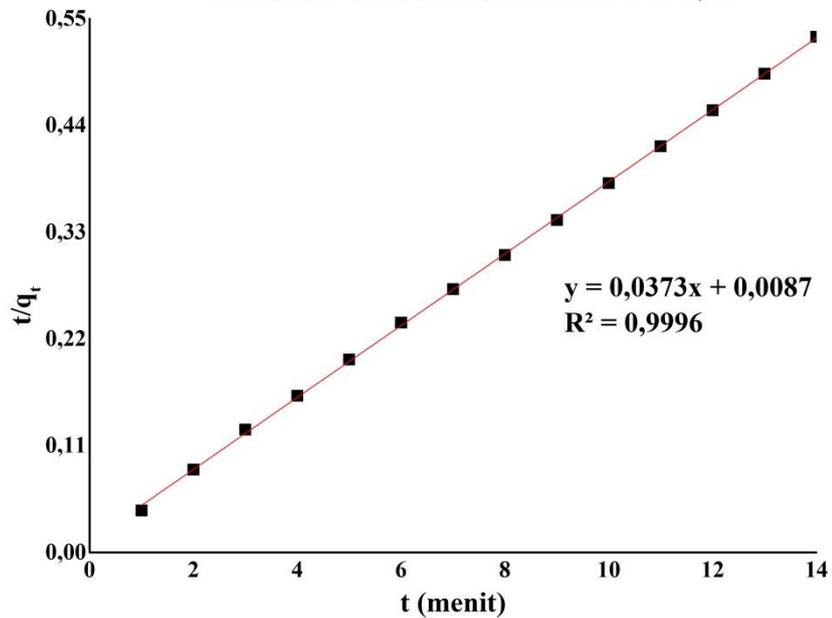


#### d. Data adsorpsi KTZ-X 1,25

Massa sampel awal = 0,336 g  
 Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>  
 Laju alir = 20 mL/menit  
 Suhu = 30 °C  
 Tekanan = 1 bar

t (menit)	qt (mmol/g)	t/qt
0	0	#DIV/0!
1	23,18948	0,043123
2	23,4375	0,085333
3	23,68552	0,12666
4	24,80159	0,16128
5	25,17361	0,198621
6	25,35962	0,236597
7	25,79365	0,271385
8	26,10367	0,30647
9	26,28968	0,34234
10	26,28968	0,380377
11	26,28968	0,418415
12	26,35169	0,455379
13	26,35169	0,493327
14	26,35169	0,531275

### Kinetika orde dua semu KTZ-X 1,25



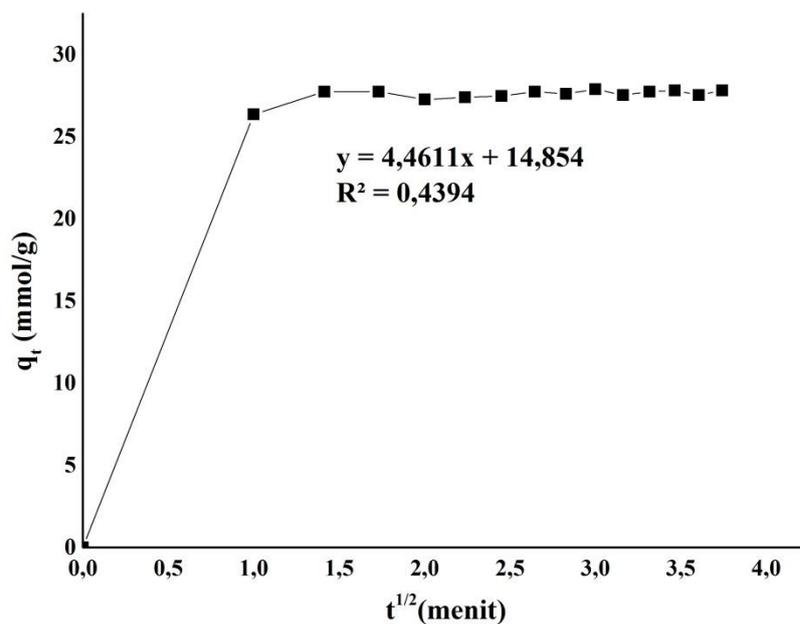
### L.2.3. Difusi intra partikel

#### a. Data adsorpsi KTZ-X 0,5

Massa sampel awal = 0,301 g  
 Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>  
 Laju alir = 20 mL/menit  
 Suhu = 30 °C  
 Tekanan = 1 bar

t	t <sup>1/2</sup>	qt
0	0	0
1	1	26,37043
2	1,414214	27,75471
3	1,732051	27,75471
4	2	27,27021
5	2,236068	27,40864
6	2,44949	27,47785
7	2,645751	27,75471
8	2,828427	27,61628
9	3	27,89313
10	3,162278	27,54707
11	3,316625	27,75471
12	3,464102	27,82392
13	3,605551	27,54707
14	3,741657	27,82392

### Difusi intra partikel KTZ-X 0,5



### b. Data adsorpsi KTZ-X 0,75

Massa sampel awal = 0,419 g

Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>

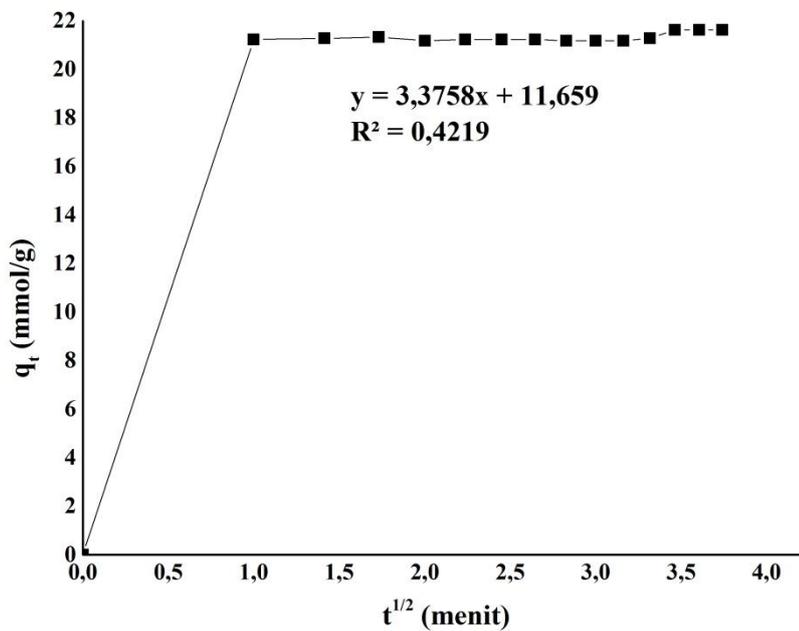
Laju alir = 20 mL/menit

Suhu = 30 °C

Tekanan = 1 bar

t	$t^{1/2}$	qt
0	0	0
1	1	21,23111
2	1,414214	21,28083
3	1,732051	21,33055
4	2	21,18138
5	2,236068	21,23111
6	2,44949	21,23111
7	2,645751	21,23111
8	2,828427	21,18138
9	3	21,18138
10	3,162278	21,18138
11	3,316625	21,28083
12	3,464102	21,62888
13	3,605551	21,62888
14	3,741657	21,62888

### Difusi intra partikel KTZ-X 0,75

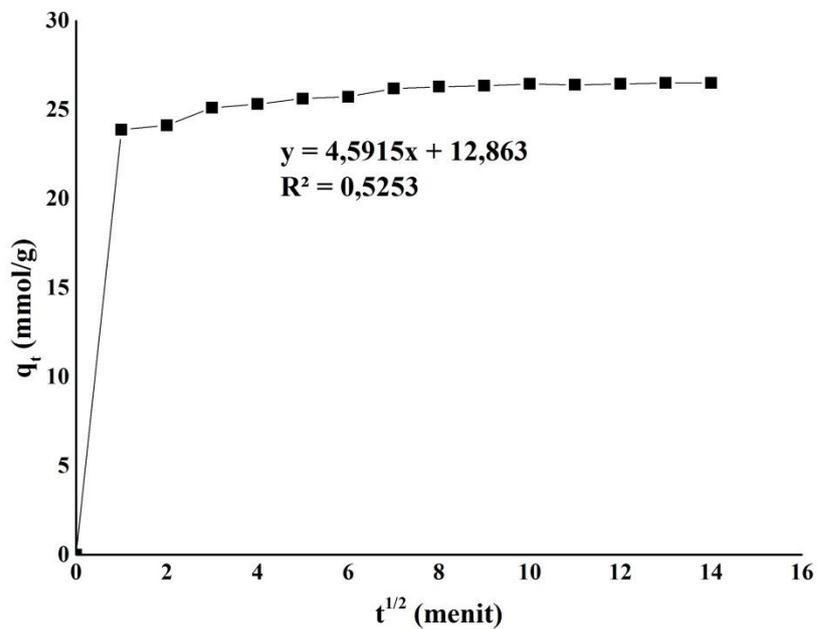


#### c. Data adsorpsi KTZ-X 1

Massa sampel awal = 0,404 g  
 Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>  
 Laju alir = 20 mL/menit  
 Suhu = 30 °C  
 Tekanan = 1 bar

t	t <sup>1/2</sup>	qt
0	0	0
1	1	23,87583
2	1,414214	24,13366
3	1,732051	25,11345
4	2	25,31972
5	2,236068	25,62913
6	2,44949	25,73226
7	2,645751	26,19637
8	2,828427	26,2995
9	3	26,35107
10	3,162278	26,45421
11	3,316625	26,40264
12	3,464102	26,45421
13	3,605551	26,50578
14	3,741657	26,50578

### Difusi intra partikel KTZ-X 1

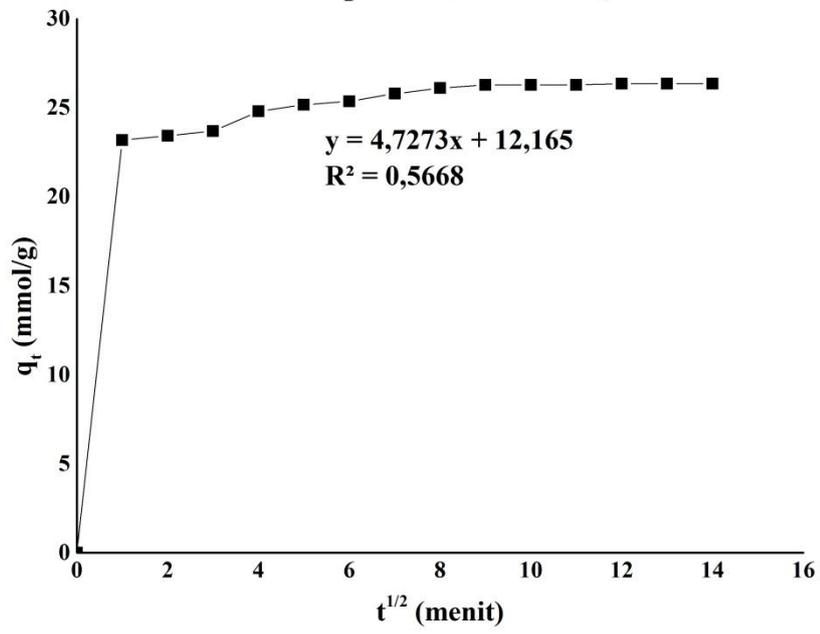


#### d. Data adsorpsi KTZ-X 1,25

Massa sampel awal = 0,336 g  
 Gas adsorbat = CO<sub>2</sub>  
 Laju alir = 20 mL/menit  
 Suhu = 30 °C  
 Tekanan = 1 bar

t	$t^{1/2}$	qt
0	0	0
1	1	23,18948
2	1,414214	23,4375
3	1,732051	23,68552
4	2	24,80159
5	2,236068	25,17361
6	2,44949	25,35962
7	2,645751	25,79365
8	2,828427	26,10367
9	3	26,28968
10	3,162278	26,28968
11	3,316625	26,28968
12	3,464102	26,35169
13	3,605551	26,35169
14	3,741657	26,35169

### Difusi intra partikel KTZ-X 1,25



## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kediri, 30 Juli 1991, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Mutiara, SDN Mrican 1, SMPN 1 Kediri dan SMAN 1 Kediri. Penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Jurusan Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS) pada tahun 2009. Selama kuliah S1, penulis pernah aktif di berbagai kegiatan kemahasiswaan Jurusan Kimia. Penulis pernah menjabat sebagai staf Departemen PPIM HIMKA dan Sekretaris Umum Chemistry Islamic Studies. Setelah mendapatkan gelar sarjana, penulis melanjutkan studi S2 di Jurusan Kimia ITS melalui beasiswa *fresh graduate*. Penulis tercatat sebagai mahasiswa S2 Kimia angkatan 2014 dengan NRP 1414201034. Pada masa akhir studi, penulis melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan sukrosa pada Karbon Tertemplat Zeolit-X (KTZ-X) terhadap mikroporositas dan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub>. Penelitian tersebut dilakukan di bawah bimbingan Ibu Nurul Widiastuti, M.Si., Ph.D.

Email : [muhariawan@gmail.com](mailto:muhariawan@gmail.com)  
Telepon : 082257765451

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini, saya :

nama : Ibnu Muhariawan Restuaji

program studi : Kimia

NRP : 1414 201 034

dengan ini menyatakan bahwa sebagian maupun keseluruhan naskah tesis saya dengan judul :

**“Pengaruh Penambahan Sukrosa Terhadap Mikroporositas dan Kemampuan Adsorpsi CO<sub>2</sub> Karbon Tertemplat Zeolit-X”**

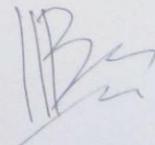
adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 18 Juli 2017

Yang membuat pernyataan,



Ibnu Muhariawan Restuaji

NRP. 1414 201 034