

**PENGARUH KONDISI OPERASI TERHADAP KONVERSI
ASETON MENJADI HIDROKARBON AROMATIK
MENGUNAKAN KATALIS HZSM-5**

SKRIPSI

**LINNA
0606076564**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JANUARI 2010**

**PENGARUH KONDISI OPERASI TERHADAP KONVERSI
ASETON MENJADI HIDROKARBON AROMATIK
MENGUNAKAN KATALIS HZSM-5**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

**LINNA
0606076564**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JANUARI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Linna

NPM : 0606076564

Tanda Tangan :

Tanggal : 17 Januari 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Linna
NPM : 0606076564
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pengaruh Kondisi Operasi terhadap Konversi
Aseton Menjadi Hidrokarbon Aromatik
Menggunakan Katalis HZSM-5

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Setiadi, M. Eng. ()

Penguji : Ir. Dewi Tristantini, MT., PhD. ()

Penguji : Ir. Tilani Hamid, M. Si ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 17 Januari 2010

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

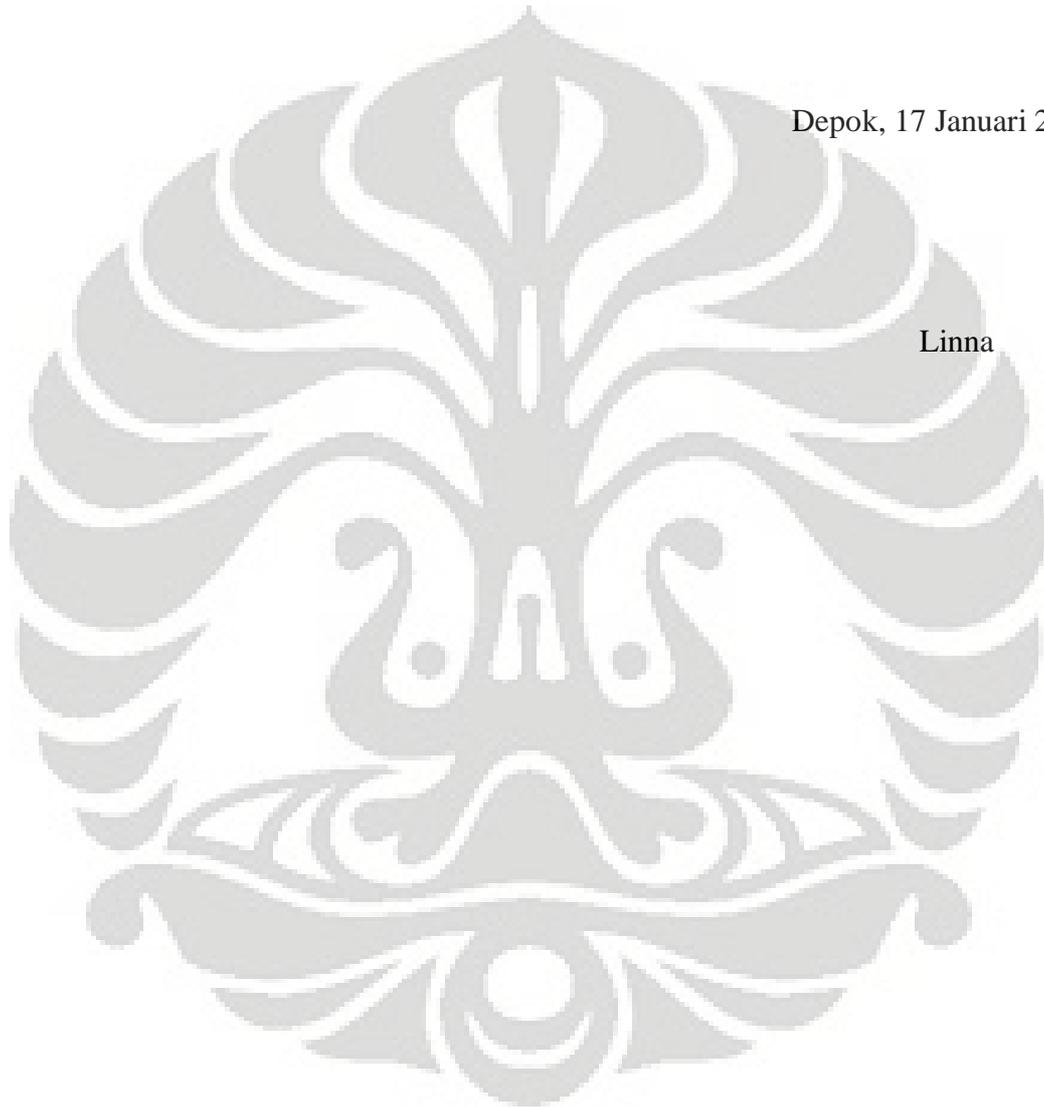
- (1) Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
- (2) Ir. Setiadi, M. Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (3) Dijan Suparmono selaku dosen pembimbing akademik yang telah menyediakan waktu dan membantu kehidupan akademik perkuliahan selama ini;
- (4) Para dosen Departemen Teknik Kimia FTUI yang telah memberikan ilmu dan membagi wawasannya; Saudari Venesia, saudari Isti, dan saudara Adlan, serta Saudara Andres yang telah membagi pengalaman selama penelitian, serta Saudara Peter Firstian yang telah membantu memfasilitasi penyediaan literatur dalam menyusun tinjauan pustaka dalam seminar ini;
- (5) Ayah, Ibu, Kakak, dan Adik yang selalu memberi dukungan dan semangat;
- (6) Mang Ijal, Mas Eko dan Kang Djajat sebagai penanggung jawab laboratorium yang selalu mendampingi selama saya penelitian;
- (7) Refani, Kenny, Nandi, Francy, Catherine, Ellen, Yeni, Anny, dan Pingkan atas dukungan dan persahabatannya;
- (8) Astrid, Karnanim, dan Mondy yang sudah membantu dalam pencarian sumber dan saling bertukar wawasan serta informasi yang ada;
- (9) Semua teman-teman yang tidak dapat disebutkan satu demi satu, yang selalu memberikan informasi dan bantuan semangat dikala susah;

(10) Semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini secara langsung maupun tidak langsung.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 17 Januari 2010

Linna



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Linna
NPM : 0606076564
Program studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Fakultas Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Pengaruh Kondisi Operasi terhadap Konversi Aseton Menjadi
Hidrokarbon Aromatik Menggunakan Katalis HZSM-5**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 17 Januari 2010

Yang menyatakan

(Linna)

ABSTRAK

Nama : Linna
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pengaruh Kondisi Operasi terhadap Konversi Aseton Menjadi Hidrokarbon Aromatik Menggunakan Katalis HZSM-5

Benzena, Toluena, dan Xilena (BTX) merupakan komponen penting dalam industri petrokimia. Konversi aseton menjadi benzena, toluena, dan xilena sudah dapat dilakukan melalui reaksi perengkahan dan aromatisasi dengan menggunakan katalis HZSM-5. Produk gas yang terbentuk dari reaksi dianalisis dengan *Gas Chromatography*. Secara umum konversi dan yield produk benzena, toluena, dan xilena akan meningkat seiring dengan kenaikan suhu reaksi. Konversi dan yield benzena, toluena, dan xilena juga akan meningkat seiring bertambahnya waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis. Kondisi operasi optimum diperoleh pada suhu 425°C dan 1/WHSV 0,3 jam dengan konversi reaksi 38,5% dan yield produk benzena, toluena, dan xilena 84%.

Kata kunci : HZSM-5, Benzena, Toluena, Xilena, Aseton

ABSTRACT

Name : Linna
Study Program : Chemical Engineering
Title : The Effect of Operating Conditions on The Conversion of Acetone to Aromatic Hydrocarbons Using HZSM-5

Benzene, Toluene, and Xylene (BTX) are very important in petrochemical industry. Conversion acetone to benzene, toluene, and xylene can be done by cracking and aromatization reaction using HZSM-5 Catalyst. Gases produce from the reaction are analyze with Gas Chromatography. Generally, conversion and yield of benzene, toluene, and xylene will increase along with the increase of temperature. Conversion and yield of benzene, toluene, and xylene also increase along with the increase of contact time between acetone and catalyst. Optimum operating condition is in 425°C and 1/WHSV 0,3 hour that give conversion 38,5% and yield benzene, toluene, and xylene 84%.

Keywords: HZSM-5, Benzene, Toluene, Xylene, Acetone

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR SINGKATAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Sumber Aseton	6
2.2 Katalis	6
2.3 Zeolit	7
2.3.1 Sejarah zeolit	7
2.3.2 Jenis-jenis zeolit	7
2.3.3 Struktur zeolit	8
2.3.4 Penggunaan zeolit	12
2.4 ZSM-5	17
2.4.1 Penggunaan ZSM-5	19
2.4.2 Struktur ZSM-5	19
2.5 Deaktivasi	21
2.5.1 <i>Coking</i>	22
2.5.2 Kerusakan partikel	25
2.5.3 Fouling	25
2.5.4 Volatisasi komponen	26
2.5.5 Perubahan fasa	27
2.5.6 Pembentukan senyawa	27
2.5.7 Sintering	27

2.5.8 Poisoning	29
2.6 Mekanisme Reaksi	30
BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1 Rancangan Penelitian	31
3.1.1 Persiapan sampel dan katalis	31
3.1.2 Karakterisasi katalis sebelum reaksi	32
3.1.3 Uji reaksi dan kinerja katalis	32
3.2 Alat dan Bahan.....	34
3.2.1 Alat.....	34
3.2.2 Bahan.....	35
3.3 Model Penelitian	35
3.4 Variabel Penelitian	36
3.5 Teknik Pengumpulan Data dan Analisis Data	36
3.5.1 Analisis <i>Gas Chromatography</i> (GC)	36
3.5.2 Analisis <i>Gas Chromatography/Mass Spectroscopy</i> (GC/MS).....	37
3.6 Cara Penafsiran dan Penyimpulan Hasil	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Karakterisasi Katalis	39
4.1.1 Karakterisasi dengan XRF (<i>X-Ray Fluorescence</i>).....	39
4.1.2 Karakterisasi dengan XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>).....	40
4.2 Hasil Uji Konversi Katalitik	41
4.2.1 Tahap <i>Blank Test</i>	42
4.2.2 Pengaruh Temperatur terhadap Konversi Aseton dan Yield BTX	42
4.2.3 Pengaruh Waktu Kontak antara Reaktan Aseton dan Katalis HZSM-5 (1/WHSV) terhadap Konversi Aseton dan Yield BTX	47
4.3 Kondisi Operasi Optimum	55
4.4 Analisa <i>Gas Chromatography/Mass Spectroscopy</i> (GC/MS).....	56
4.5 Uji Kestabilan Katalis	58
BAB V PENUTUP	62
5.1 Kesimpulan	62
5.2 Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN A: DATA KALIBRASI.....	65
LAMPIRAN B: HASIL PERCOBAAN	67

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Kondisi Operasi GC-FID.....	38
Tabel 4.1 Kondisi operasi optimum reaksi antara aseton dengan katalis HZSM-5 ...	56
Tabel 4.2 Hasil Analisa GC/MS pada Produk Suhu 425°C.....	56



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Unit Pembentuk Primer.....	9
Gambar 2.2 Unit pembentuk sekunder	10
Gambar 2.3 Polyhedron simetris	11
Gambar 2.4 Reaksi Pembentukan NH ₄ -Zeolit	13
Gambar 2.5 Rongga Selektif Reaktan Zeolit.....	15
Gambar 2.6 Rongga Selektif Produk.....	15
Gambar 2.7 Perubahan keasaman zeolit	17
Gambar 2.8 Perbandingan Antara Zeolit Type Faujasite dengan ZSM-5.....	20
Gambar 2.9 Struktur ZSM-5	20
Gambar 2.10 Grafik konversi menunjukkan penurunan aktivitas katalis.....	21
Gambar 2.11 Pertambahan coke sejalan dengan waktu.....	23
Gambar 2.12 Mekanisme Pembentukan <i>Coke</i>	23
Gambar 2.13 Hubungan kandungan karbon dengan tingkat konversi.....	24
Gambar 2.14 Laju deaktivasi dengan katalis silica alumina dan faujasite.....	24
Gambar 2.15 Peningkatan ukuran pori selama sntering	28
Gambar 2.16 Hilangnya pori kecil selama <i>sintering</i>	28
Gambar 2.17 Mekanisme sintering pada logam yang terdispersi.....	29
Gambar 2.18 Skema reaksi untuk konversi dari aseton menjadi hidrokarbon dengan menggunakan HZSM-5	30
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian secara umum	31
Gambar 3.2 Reaktor Uji	34
Gambar 3.3 Susunan Reaktor Uji Katalis <i>Fixed Bed Reactor</i>	36
Gambar 4. 1 Hasil <i>X-Ray Fluorescence</i> untuk katalis HZSM-5 yang digunakan.....	41
Gambar 4.2 <i>X-Ray Diffraction</i> HZSM-5.....	42
Gambar 4.3 Kurva konversi aseton pada 1/WHSV 0,14 jam.....	43
Gambar 4.4 Kurva konversi aseton pada 1/WHSV 0,149 jam.....	44
Gambar 4.5 Kurva konversi aseton pada 1/WHSV 0,155 jam.....	44
Gambar 4.6 Kurva konversi aseton pada 1/WHSV 0,175 jam.....	44
Gambar 4.7 Pengaruh temperature terhadap distribusi produk aromatik pada 1/WHSV 0,125 jam	46
Gambar 4.8 Pengaruh temperature terhadap distribusi produk aromatik pada 1/WHSV 0,15 jam	46
Gambar 4.9 Pengaruh temperature terhadap distribusi produk aromatik pada 1/WHSV 0,2 jam.....	47
Gambar 4.10 Kurva Konversi Aseton pada Suhu 300°C	48
Gambar 4.11 Kurva Konversi Aseton pada Suhu 375°C	49
Gambar 4.12 Kurva Konversi Aseton pada Suhu 400°C	49
Gambar 4.13 Kurva Konversi Aseton pada Suhu 425°C	50
Gambar 4.14 Kurva Produk yang Dihasilkan pada Suhu 250°C	51
Gambar 4.15 Kurva Produk yang Dihasilkan pada Suhu 300°C	52
Gambar 4.16 Kurva Produk yang Dihasilkan pada Suhu 375°C	53
Gambar 4.17 Kurva Produk yang Dihasilkan pada Suhu 400°C	54
Gambar 4.18 Kurva Produk yang Dihasilkan pada Suhu 425°C	55
Gambar 4.19 Kurva konversi pada uji kestabilan katalis selama 14 jam	59

Gambar 4.20 Distribusi produk hidrokarbon aromatik pada uji kestabilan katalis selama 14 jam60

Gambar 4.21 Kiri: Katalis sebelum digunakan untuk reaksi. Kanan: Katalis yang digunakan pada uji stabilitas selama 14 jam61



DAFTAR SINGKATAN

WHSV	Weighted Hourly Space Velocity
GC	<i>Gas Chromatography</i>
BTX	Benzena, Toluena, dan Xilena
GC/MS	Gas Chromatography/Mass Spectroscopy



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini kebutuhan hidup masyarakat terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk yang terjadi. Peningkatan kebutuhan tersebut harus disertai dengan peningkatan kegiatan industri, terutama industri petrokimia yang berperan besar terhadap pemenuhan kebutuhan hidup. Salah satu aspek yang penting untuk mendorong produktivitas adalah ketersediaan sumber bahan baku secara kontinyu dan berkesinambungan (*sustainable resources*).

Selama ini bahan baku industri petrokimia masih sangat bergantung pada minyak bumi yang bersifat tidak dapat diperbaharui (*non-renewable resources*). Permintaan global BTX pada tahun 2008 di negara-negara ASEAN sebesar 2,4 juta ton dengan tingkat pertumbuhan 8,5% selama periode 2002 - 2008. Permintaan Toluena sebesar 0,7 juta ton dengan tingkat pertumbuhan 10,3% selama periode 2002 - 2008. Untuk xilena, permintaan globalnya sebesar 1,3 juta ton dengan tingkat pertumbuhan 3,7% selama periode 2002 - 2008 (Chemical Division Manufacturing Industries Bureau, 2004).

Di Indonesia sendiri, cadangan minyak bumi kini hanya sekitar 8,3 milyar barel yang terdiri atas 4,3 milyar barel yang sudah terbukti dan 4 milyar barel potensial. Produksi Minyak (crude oil) Indonesia, memang kebanyakan berasal dari sumur-sumur tua yang mengalami penurunan secara alami dari tahun ke tahun sebanyak 15% dari total produksi. Jumlah cadangan demikian kemungkinan hanya dapat diproduksi untuk jangka waktu 20 tahun (Toni, 2008). Perlu dicari alternative lain pengganti bahan baku minyak bumi tersebut dengan yang ketersediaannya lebih terjamin. Salah satu sumber daya alternatif terbarukan yang dapat dijadikan bahan baku industri petrokimia adalah senyawa hasil fermentasi secara anaerob dari material hayati (biomassa) berupa aseton.

Aseton dihasilkan dari bahan baku yang mengandung zat tepung ataupun gula misalnya pati, singkong, molase (tetes tebu) dan lain-lain. Oleh karena itu, aseton merupakan bahan baku yang sangat potensial untuk bisa diproduksi di

Indonesia karena ketersediaan bahan bakunya sangat melimpah dan mudah didapat. Apabila teknologi konversi senyawa hasil fermentasi tersebut menjadi senyawa hidrokarbon terus dikembangkan, maka teknologi berbasis biomassa dapat menjadi teknologi masa depan yang menjanjikan tanpa bergantung pada sumber energi fosil.

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa hidrokarbon seperti golongan alkohol dan keton dapat diubah menjadi hidrokarbon. Konversi katalitik methanol dan ethanol menjadi hidrokarbon telah banyak dilakukan, misalnya yang dilakukan oleh Chang and Silvestri pada tahun 1977. Sebaliknya, informasi tentang konversi katalitik aseton masih belum banyak diteliti dan diperlukan riset agar aseton dapat diubah menjadi hidrokarbon yang dapat dijadikan bahan baku industri petrokimia.

HZSM-5 yang digunakan dalam reaksi aseton ini dikenal sebagai jenis zeolit sintetis yang mempunyai permukaan inti asam dan struktur jaringan pori yang luas serta homogen. Struktur kerangka jenis bahan alumino-silikat tersebut terbentuk dari bahan dasar pembangun berupa tetrahedron atom silikon atau aluminium. Kemampuan HZSM-5 untuk mengakselerasi berbagai jenis reaksi sangat berkait dengan sifat keasamannya, dan parameter penting HZSM-5 bisa dikontrol dengan rasio Si/Al. Namun beragamnya variasi Si/Al ini sama sekali tidak akan mempengaruhi struktur kerangka HZSM-5 (Bhatia, 1990).

Disamping itu, kemampuan selektivitas HZSM-5 terhadap terbentuknya senyawa hidrokarbon sangat tinggi berdasarkan ukuran dan struktur pori (Weitkamp, 2000). Berbagai hasil penelitian (Chang dkk, 1981; Lucas dkk, 1997; Lucas dkk., 2001; Setiadi dkk, 2003) telah dapat menyimpulkan bahwa HZSM-5 mempunyai kemampuan selektivitas yang tinggi berdasar bentuk dan ukuran pori (*shape selective catalyst*) kearah terbentuknya berbagai jenis molekul yang berdiameter kinetik maksimal sekitar 0.6 nm, yang mana sangat sesuai dengan hidrokarbon aromatik (benzena, toluena, dan xilena). Reaksi konversi aseton menjadi hidrokarbon aromatik telah terbukti dapat dilakukan dengan baik pada suhu 673 K dan space velocity sebesar 4 h^{-1} pada tekanan atmosferik. Konversi aseton yang didapat mendekati 100% selama rentang waktu uji reaksi 17 jam. Namun, terjadi penurunan aktivitas (deaktivasi) setelah 17 jam karena penutupan

pori katalis oleh kokas yang pembentukannya berasal dari reaksi konversi aseton (Setiadi, 2005).

Kemampuan katalis dalam menahan aktivitas dan selektivitas dalam rentang waktu tertentu sangat dipengaruhi oleh jenis reaksi, jenis zeolit, dan kondisi reaksi (Richardson, 1989).

Berdasarkan uraian di atas maka penelitian ini bermaksud mempelajari pengaruh kondisi reaksi (lebih khususnya suhu reaksi dan waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis) terhadap konversi aseton menjadi hidrokarbon aromatik dengan menggunakan katalis HZSM-5 agar dapat menghasilkan yield hidrikarbon aromatik (BTX) yang cukup tinggi dan proses yang efisien.

1.2 Rumusan Masalah

- Bagaimana pengaruh suhu reaksi terhadap konversi aseton dan distribusi produk hidrokarbon aromatik yang dihasilkan.
- Bagaimana pengaruh waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis terhadap konversi aseton dan distribusi produk hidrokarbon aromatik yang dihasilkan.
- Bagaimana kestabilan katalis HZSM-5.
- Bagaimana peranan katalis HZSM-5 dalam konversi aseton menjadi benzena, toluena, dan xilena.

1.3 Tujuan Penelitian

- Memproduksi senyawa BTX dari aseton melalui proses perengkahan katalitik dan aromatisasi dengan katalis HZSM-5.
- Mengidentifikasi pengaruh suhu reaksi dan waktu kontak reaktan aseton dengan katalis dalam proses konversi aseton menjadi hidrokarbon serta mengetahui kondisi operasi yang optimum untuk menghasilkan *yield* dan konversi maksimum dari proses tersebut.
- Mengidentifikasi terjadinya reaksi perengkahan dan aromatisasi serta fraksi-fraksi yang terbentuk melalui analisis produk gas dan cair.

1.4 Batasan Masalah

Sesuai dengan tujuan dari penelitian yang akan dilakukan serta untuk memfokuskan pada masalah yang akan dibahas, maka dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut :

1. Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah aseton murni.
2. Katalis yang digunakan dalam reaksi konversi katalitik senyawa Aseton menjadi senyawa hidrokarbon aromatik adalah HZSM-5 komersial dengan rasio Si/Al=27.
3. Variasi suhu reactor dalam penelitian ini adalah 250⁰C, 300⁰C, 375⁰C, 400⁰C, dan 425⁰C.
4. Variasi WHSV (weighted hourly space velocity) dalam penelitian ini adalah divariasikan dengan cara mengubah laju alir dari carrier gas. Variasi laju alir dari carrier gas dalam penelitian ini adalah 60ml/menit, 80ml/menit, 100ml/menit, 120ml/menit, 140ml/menit, 180ml/menit, 200ml/menit, 220ml/menit, dan 240ml/menit.
5. Reaksi konversi katalitik aseton dilakukan di dalam reaktor tabung yaitu jenis reaktor unggun tetap (*Fixed bed reactor*).
6. Analisa karakteristik produk yang dihasilkan dari reaksi konversi katalitik dengan menggunakan GC (*Gas Chromatography*) untuk identifikasi komposisi produk.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan terdiri dari :

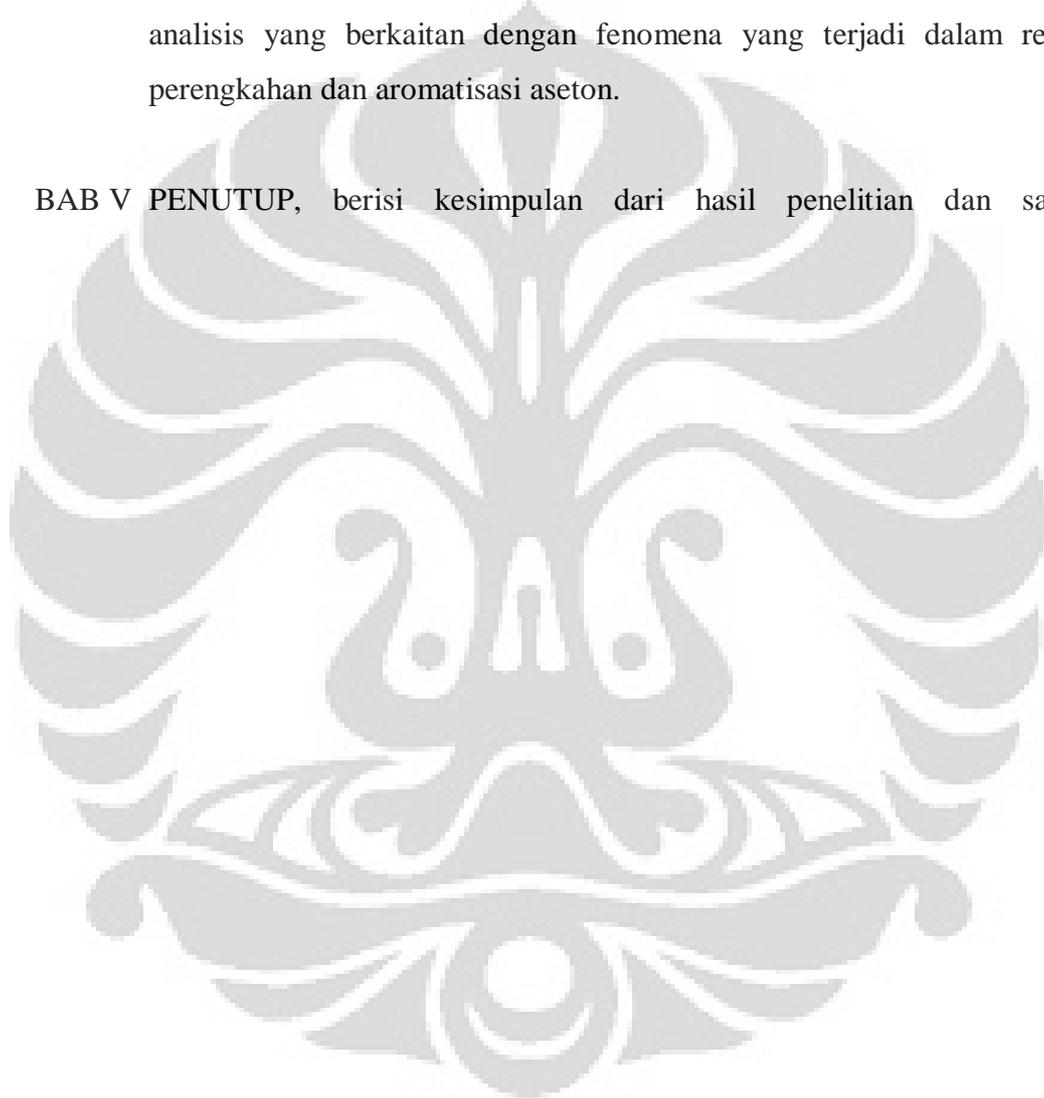
BAB I PENDAHULUAN, bab ini berisi tentang gambaran umum permasalahan yang diangkat mencakup latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, bab ini berisikan tentang informasi dan teori-teori yang mendukung penelitian pengaruh kondisi operasi terhadap reaksi konversi aseton menjadi aromatik dengan menggunakan katalis HZSM-5 yang akan dijadikan landasan dan dasar acuan yang mendukung penelitian yang akan dilakukan.

BAB III METODE PENELITIAN, bab ini berisi metode yang dipakai dalam penelitian yang mencakup tahapan-tahapan penelitian yaitu mulai dari metode pengumpulan data hingga pengolahan data. Bagian ini juga menjelaskan diagram alir penelitian, prosedur percobaan, jenis bahan dan alat yang dipakai serta susunan dan fungsinya dalam percobaan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN, berisi perumusan hasil penelitian dan analisis yang berkaitan dengan fenomena yang terjadi dalam reaksi perengkahan dan aromatisasi aseton.

BAB V PENUTUP, berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan saran.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sumber Aseton

Pada tahun 1862, Pasteur melakukan proses fermentasi yang memproduksi butanol dari asam laktat dan kalsium laktat. Pada tahun 1912, Weizmann melanjutkan penelitian untuk mempelajari fermentasi. Setelah sekitar dua tahun dia menemukan organisme yang disebut *Clostridium acetobutylicum* yang telah berhasil menghasilkan aseton dari proses fermentasi bijih-bijih padi. *Clostridium acetobutylicum* memiliki enzim *amylolytic* dan *saccarolytic* yang dibutuhkan untuk menghidrolisis gelatin dari padi-padian menjadi glukosa dan maltosa.

2.2 Katalis

Konsep tentang katalis pertama kali diperkenalkan oleh Berzellius pada tahun 1935 yang menyebutkan bahwa katalis adalah suatu zat yang mempengaruhi laju reaksi tanpa perubahan secara kimiawi pada akhir reaksi. Berdasarkan fasanya, material katalis dapat digolongkan menjadi katalis homogen dan heterogen.

Parameter yang harus diperhatikan untuk menilai kualitas suatu katalis adalah sebagai berikut:

1. Aktifitas, yaitu kemampuan katalis untuk mengkonversi reaktan menjadi produk yang diinginkan.
2. Selektifitas, yaitu kemampuan katalis untuk mempercepat suatu reaksi diantara beberapa reaksi yang terjadi sehingga produk yang diinginkan dapat diperoleh dengan produk samping seminimal mungkin.
3. Stabilitas, yaitu lamanya katalis memiliki aktifitas dan selektifitas seperti pada keadaan semula.
4. Yield, yaitu jumlah produk tertentu untuk setiap satuan reaktan yang dikonsumsi.
5. Kemudahan diregenerasi, yaitu proses pengembalian aktifitas dan selektifitas katalis pada keadaan semula.

2.3 Zeolit

2.3.1 Sejarah zeolit

Pada tahun 1756, ahli mineralogy berkebangsaan Swedia, F.A. Cronstedt memperkenalkan mineral zeolit untuk pertama kalinya. Kata zeolit berasal dari kata Yunani yaitu *zein* yang berarti membuih dan *lithos* yang berarti batu. Hal ini erat kaitannya dengan sifat zeolit yang membuih jika dipanaskan pada suhu 100°C dan tekanan atmosfer.

2.3.2 Jenis-jenis zeolit

Zeolit memiliki beraneka ragam bentuk dan jenis, tergantung pada cara perolehannya. Ada yang berasal dari alam dan ada yang sintetis. Untuk itu, berdasarkan cara perolehannya, zeolit dapat dikelompokkan menjadi 2 bagian, yaitu :

1. Zeolit alam, yang diperoleh dari alam.

Zeolit alam terbentuk melalui proses alam, zeolitisasi batuan vulkanik dengan air lingkungan (air hidrologi) pada sistem terbuka maupun tertutup. Kondisi batuan, tanah dan lingkungan tempat pembentukannya mempengaruhi sifat-sifat fisik, kimia dan struktur mineral zeolit alam sehingga muncul beragam spesies. Batuan yang sangat jenuh dengan silika misalnya, membentuk zeolit alam jenis *faujasit*, *khabasit* dan *gmelinit*. Spesies yang banyak ditemukan pada batuan sedimen adalah *klonoptilolit*, *khabasit*, *heulandit*, *mordenit*, *filipsit*, *analkim*, *laumontit* dan *wairakit*.

2. Zeolit sintetis, yang diperoleh melalui proses sintesa dan direkayasa oleh manusia.

Zeolit sintesis diproduksi dengan cara hidrothermal. Pembuatan zeolit sintesis sangat tergantung pada pemanfaatannya. Sifat-sifatnya dimodifikasi, dengan memvariasikan kadar unsur alumunium (Al) dan silika (Si). Biasanya zeolit sintesis terbagi menjadi empat kelompok, yaitu:

- a. Zeolit sintesis berkadar Si rendah ($Si/Al = 1$).

Kadar Si yang rendah menyebabkan harga rasio Si/Al mendekati 1. Kadar Si yang rendah menyebabkan daya penukaran kation dari zeolit

maksimum. Contoh : Zeolit A dan X.

- b. Zeolit sintesis berkadar Si sedang ($\text{Si/Al} = 5$).

Jika dibandingkan dengan zeolit alam, zeolit sintesis ini termasuk jenis *klinoptilolit*, *mordenit* dan *erionit*.

- c. Zeolit sintesis berkadar Si tinggi ($\text{Si/Al} = 10-100$).

Mampu menyerap molekul-molekul non polar dan baik digunakan sebagai katalisator asam untuk hidrokarbon. Contoh : ZSM-5, ZSM-11 dan ZSM-21.

- d. Zeolit Si (100%).

Sama sekali tidak mengandung unsur Al, dapat mengeluarkan atau memisahkan suatu molekul organik dari suatu campuran air. Contoh : zeolit silikat.

2.3.3 Struktur zeolit

Zeolit merupakan kristal aluminosilikat yang dibentuk oleh struktur pori seragam yang memiliki minimum diameter saluran sekitar 0.3-1,0 nm. Pada dasarnya ukuran tergantung pada jenis zeolit. Zeolit memiliki aktivitas dan selektivitas yang tidak biasa untuk berbagai variasi reaksi katalis asam. Sebagian besar ini disebabkan sifat keasaman zeolit.

Struktur zeolit terdiri atas kerangka tiga dimensi SiO_4 atau tetrahedral AlO_4 . Masing-masing terdiri dari atom Sillikon dan Alumunium di pusat. Atom oksigen terletak berdampingan membentuk tetrahedral, dimana dapat berada pada berbagai rasio dan tersusun dengan berbagai cara. Kerangka yang terbentuk terdiri atas pori-pori, saluran-saluran dan ruang kosong.

Rumus kimia unit sel zeolit adalah sebagai berikut :



dengan,

$M_{a/n}$: merupakan kation bervalensi n yang dapat ditukar dan tidak termasuk struktur rangka aluminosilikat.

[] : melambangkan struktur rangka aluminasilikat.

w : menunjukkan jumlah molekul air di dalam stuktur zeolit.

a & b : menyatakan jumlah tetrahedron $(\text{SiAl})\text{O}_4$ di dalam satu unit sel dimana

b>a.

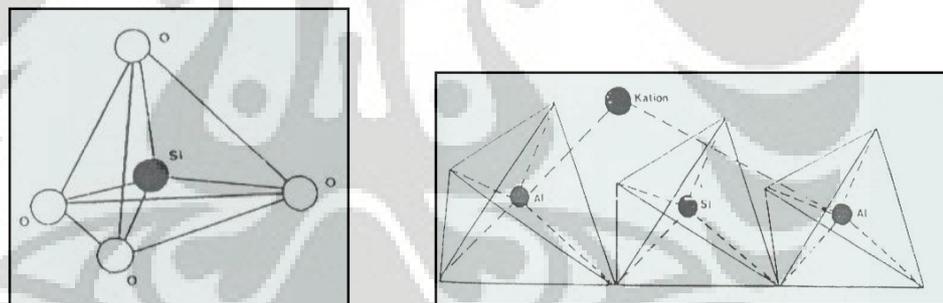
Berdasarkan rumus tersebut dapat disimpulkan bahwa zeolit terbagi menjadi tiga komponen yaitu :

1. Kerangka aluminosilikat.
2. Kation-kation.
3. Molekul air.

Kation-kation dan molekul-molekul air tidak termasuk pada kerangka aluminosilikat, tetapi mengisi rongga diantara kerangka.

Kerangka aluminosilikat sebagai inti dari zeolit yang secara keseluruhan sangat kompleks tersusun menjadi unit-unit pembentuk sebagai berikut :

1. Unit pembentuk primer, yaitu tetrahedron yang mengandung (Si, Al) O₄. Di keempat sudut tetrahedronnya terdapat atom-atom oksigen yang digunakan bersama-sama oleh dua tetrahedron yang berdekatan, dimana atom-atom oksigen tersebut mengelilingi pusat-pusat silicon atau aluminium. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.1 sebagai berikut :



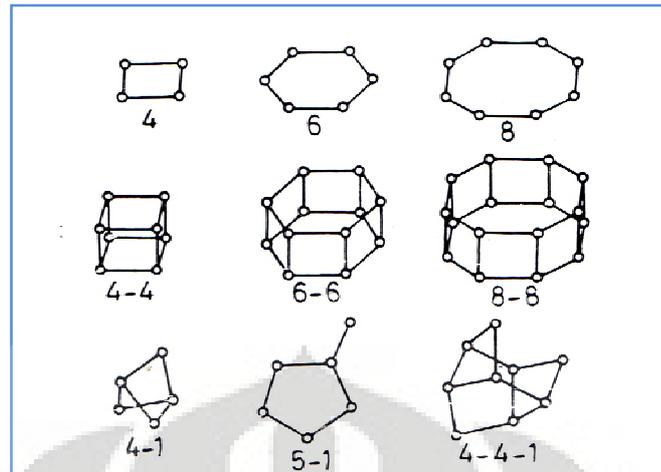
a. Tetrahedron dengan pusat atom Si

b. Rangkaian beberapa tetrahedron

Gambar 2.1 Unit Pembentuk Primer (Darius, 2005)

2. Unit pembentuk sekunder, yaitu merupakan penggabungan unit-unit pembentuk primer dengan cara menyusun atom-atom pusat hingga membentuk sudut-sudut tertentu yang membagi atom-atom oksigennya. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.2. Unit pembentuk sekunder terbagi menjadi tiga jenis, yaitu :

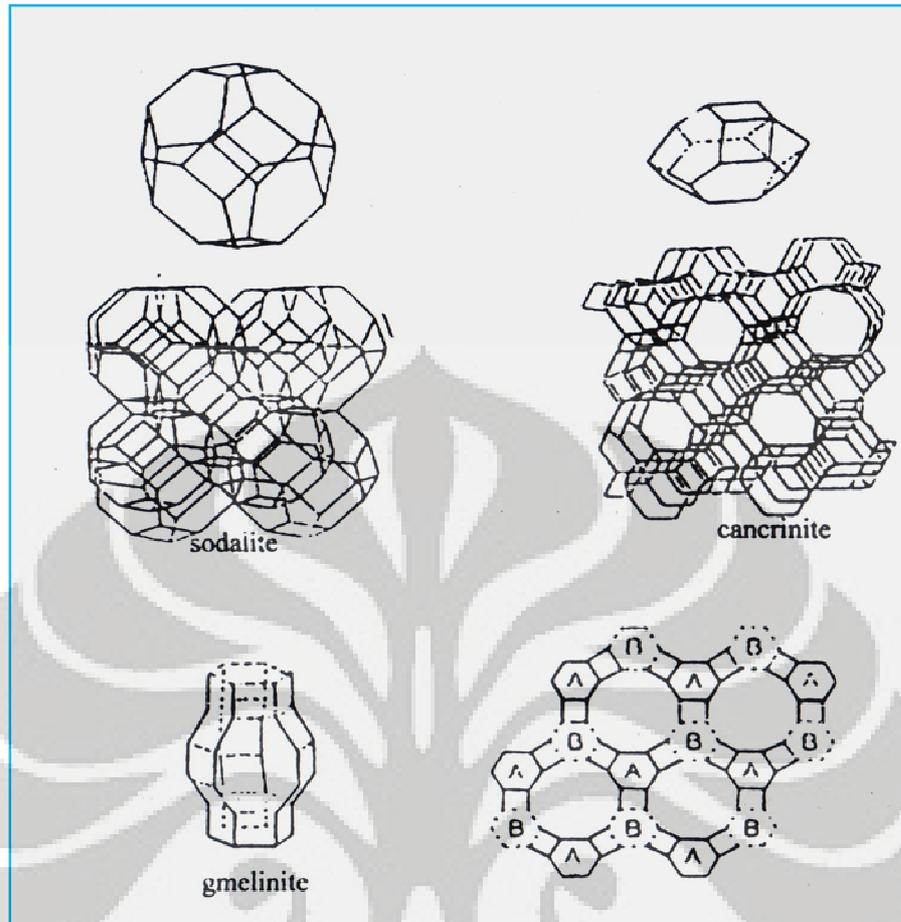
- a. *Single ring* ; S4R, S6R, S8R, S10R, S12R
- b. *Double ring* ; D4R, D6R, D8R
- c. *Complex ring* ; 4-1, 5-1, 4-4-i



Gambar 2.2 Unit Pembentuk Sekunder (Bhatia, 2000)

3. Polyhedron simetris, yaitu unit pembentuk sekunder bergabung membentuk satu polyhedron simetris yang arah pertumbuhannya sesuai dengan tiap-tiap bidang kristal unit pembentuk sekunder yang dapat dilihat pada gambar 2.3 polyhedron simetris terbagi menjadi tiga jenis, yaitu :

- a. *Truncated octahedron* (T, O) atau unit *sodalite*.
- b. 11-Hedron atau unit *cancrinite*.
- c. 14-Hedron atau unit *gmelinite*.



Gambar 2.3 Polyhedron Simetris (Meier, 1992)

4. Struktur zeolit secara keseluruhan, merupakan gabungan polihedron-polihedron simetris sehingga membentuk jaringan rongga teratur ke segala arah yang dapat terisi oleh kation-kation dan molekul air.

Zeolite mempunyai struktur berongga dan biasanya rongga ini diisi oleh air dan kation yang dapat dipertukarkan dan memiliki ukuran pori yang tertentu dan bisa dimodifikasikan. Oleh sebab itu zeolit dapat dimanfaatkan sebagai penyaring molecular, penukar ion, penyerap bahan dan katalisator. Karena adanya pusat aktif dalam porinya, zeolit mampu mengkonversikan suatu reaktan menjadi bermacam-macam produk.

Ukuran pori diklasifikasi berdasarkan diameter porinya (D). Yang terkecil adalah mikro pori ($D < 2 \text{ nm}$). Yang medium adalah meso pori ($2 \text{ nm} \leq D \leq 50 \text{ nm}$), dan yang terbesar adalah makro pori ($D > 50 \text{ nm}$). Beberapa material seperti

zeolit dan mineral tanah liat seluruhnya adalah mikro pori. Material lain seperti arang dan silika-alumina mempunyai pori yang tidak beraturan dengan interval diameter yang lebar (Tanabe, 1989; Darmawan, 1998).

Bila dilihat secara struktur dan topology, zeolit X dan zeolit Y berhubungan dengan mineral faujasite. Dua material tersebut hanya berbeda pada rasio Si/Al yaitu 1-1,5 untuk zeolit X dan 1,5-3,0 untuk zeolit Y. Pada faujasite, lubang atau pori terbesar memiliki diameter 1,3 nm yang masing-masing dihubungkan oleh lubang 1,0 nm. Berdasarkan ukuran pori, zeolit sebagai katalis terbagi atas :

- Sistem pori cincin 8 oksigen yaitu ZSM-8 dan ZSM-34
- Sistem pori cincin 10 oksigen yaitu ZSM-5, ZSM-11 < ZSM-22, ZSM-23, dan ZSM-48
- Sistem pori cincin 12 oksigen yaitu jenis mordenit dan mazite.

Pada zeolit A, memiliki lubang besar berukuran 0,5 nm, memiliki delapan buah cincin. Struktur pori mordenit berbentuk ellips dan saluran *noninterconnected* pada struktur *orthorombic*. ZSM-5 menunjukkan struktur pori yang unik yang terdiri atas dua saluran yang berpotongan, yang satu lurus sedangkan yang lain berbentuk sinusoidal dan tegak lurus terhadap bentuknya. Kedua sistem saluran memiliki 10 cincin pembuka berbentuk ellips (diameter 0,55 Å) (Bhatia, 2000; Tanabe, 1989).

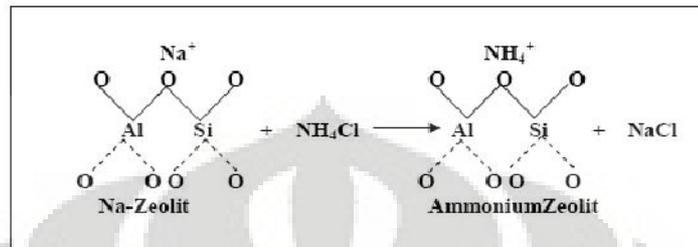
2.3.4 Penggunaan zeolit

2.3.4.1 Zeolit sebagai penukar ion (*ion exchange*)

Zeolit maupun resin dapat dipakai sebagai penukar ion. Akan tetapi penggunaan resin lebih terkenal daripada zeolit dan zeolit baru dipakai bila pemakaian resin sudah tidak layak lagi.

Kemampuan zeolit sebagai penukar ion tergantung pada banyaknya kation tukar pada zeolit. Banyaknya kation tukar pada zeolit ditentukan oleh banyaknya kation Si^{4+} yang diganti oleh kation lain yang bervalensi tiga atau lima. Pada zeolit alam Si^{4+} biasanya digantikan oleh kation Al^{3+} , sehingga kapasitas tukar kation ditentukan oleh perbandingan Si terhadap Al. Kation tukar pada zeolit dapat dipertukarkan dengan kation lain dari logam alkali atau alkali tanah yang

lain karena kation tukar tidak terikat dalam rangka zeolit oleh empat atom oksigen seperti Si^{4+} dan Al^{3+} . Contoh pertukaran kation, dengan Na sebagai logam alkali :



Gambar 2.4 Reaksi Pembentukan NH_4 -Zeolit (Bhatia, 2000)

Sifat-sifat pertukaran ion dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut :

- Ukuran rongga zeolit, semakin besar ukuran rongga zeolit semakin besar pula kemampuan pertukaran ion zeolit.
- Rasio Si terhadap Al, kapasitas tukar kation zeolit merupakan fungsi dari rasio Si/Al karena muatan negatif dari zeolit merupakan fungsi dari jumlah Al^{3+} . Gugus $(\text{AlO}_4)^-$ menyebabkan zeolit bermuatan negatif. Semakin kecil rasio Si/Al, semakin besar kapasitas tukar kation zeolit.
- Volume ion, ukuran ion yang masuk dapat mempengaruhi laju dan jumlah pertukaran ion. Contohnya, ion NH_4^+ mengalami proses pertukaran ion yang cukup lambat karena ukuran molekulnya hampir sama atau setara dengan ukuran rongga zeolit.
- Selektivitas ion, pada umumnya tiap jenis zeolit memiliki ukuran selektivitas ion yang berbeda-beda. Ion dengan selektivitas yang tinggi akan lebih mudah masuk ke dalam rongga zeolit.
- Temperatur, semakin tinggi temperatur akan mempercepat laju pertukaran ion.

2.3.4.2 Zeolit sebagai katalisator

Zeolit merupakan katalis yang cukup efektif untuk proses *hydrocarbon alkylation*, *isomerization* dan *perengkahan*. Tiga sifat zeolit yang berperan dalam fungsinya sebagai katalis adalah :

1. Penyaring molekul. Sifat ini menyeleksi pereaksi, hasil antara dan produk akhir yang terlibat dalam proses katalisis oleh zeolit katalis.
2. Pusat asam. Adanya pusat asam ini memberikan medium yang kondusif (lebih reaktif) untuk proses katalisis.
3. Si/Al yang tinggi menyebabkan keasaman tinggi. Setiap jenis zeolit mempunyai batas Si/Al yang optimum untuk bahan katalis.

Salah satu proses kimia yang menggunakan katalis adalah proses perengkahan hidrokarbon. Katalis yang digunakan adalah katalis yang bersifat asam, yaitu sebuah katalis yang dapat menghasilkan karbokation pada permukaannya. Larutan asam dapat digunakan tetapi dalam operasi mengalami banyak masalah seperti korosi, pemisahan produk dan katalis ada yang hilang.

Zeolit dapat digunakan sebagai katalis untuk reaksi katalitik. Ciri paling khusus dari zeolit adalah adanya ruang kosong yang membentuk saluran didalamnya. Bila zeolit digunakan pada proses katalisis maka akan terjadi difusi molekul ke dalam ruang bebas antar kristal dan reaksi kimia juga terjadi di permukaan saluran tersebut.

Pada rangka zeolit yang mengandung air, kationnya dapat bergerak dan digantikan oleh kation lain. Sifat ini dapat dimanfaatkan untuk mempertukarkan kation pengotor pada permukaan zeolit.

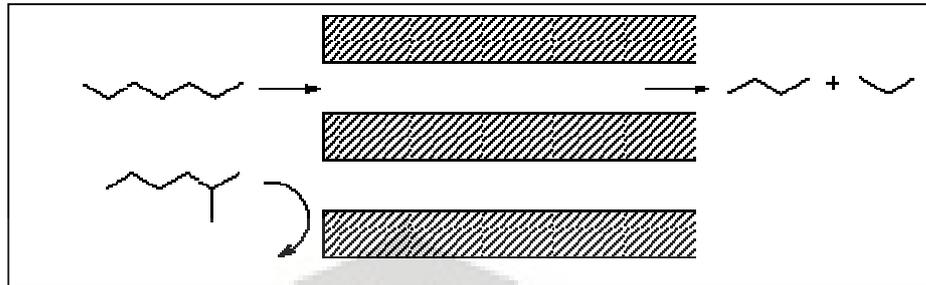
2.3.4.2.1 Zeolit sebagai katalis selektif bentuk

Zeolit dimanfaatkan sebagai katalis karena tersedianya pusat aktif dalam sistem pori katalis dan pori tersusun atas satu atau lebih ukuran yang seragam. Sistem pori ini berhubungan dengan sifat kristal dari zeolit. Ukuran pori yang sesungguhnya terbentuk dari struktur cincin pada prakteknya menjadi lebih kecil (bervariasi dengan adanya kation-kation pada permukaan zeolit). Katalis selektivitas dikelompokkan dalam beberapa kelompok berikut, yaitu :

1. Selektivitas reaktan.

Hal ini berlaku pada umpan yang terdiri dari beberapa molekul, sementara sebagian saja yang selektif reaktan. Contoh yang paling populer adalah reaksi dari umpan yang berisi campuran karbon berantai lurus dan rantai bercabang. Dengan kemampuan selektivitas bentuk dari zeolit, maka hanya rantai lurus

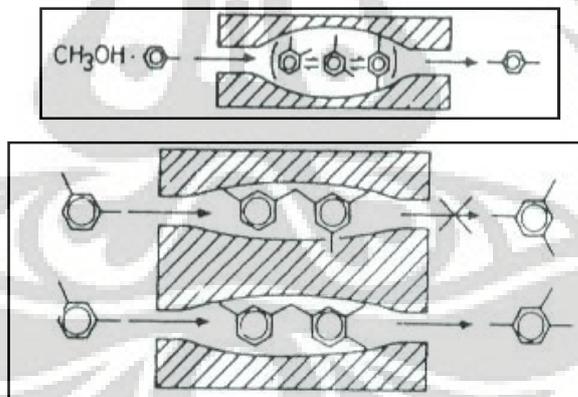
saja yang dapat dilewatkan sementara rantai bercabang tidak. Proses ini dapat dilihat pada gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Rongga Selektif Reaktan Zeolit (Bhatia, 2000)

2. Selektivitas Produk.

Fungsi ini bermanfaat manakala produk yang dihasilkan dari suatu reaksi di dalam sistem pori terlalu beragam ukuran molekulnya, sementara hanya molekul dengan ukuran tertentu yang bisa melewati mulut pori, molekul yang tidak dikehendaki akan tersaring. Selanjutnya molekul yang tidak bisa melewati mulut pori tadi akan bereaksi menjadi reaktan yang lebih kecil. Proses selektivitas produk dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2.6 Rongga Selektif Produk (Bhatia, 2000)

2.3.4.2.2 Zeolit sebagai katalis asam

Zeolit dapat berfungsi sebagai katalis asam, karena kationnya dapat dipertukarkan. Sebagai contoh zeolit alam, umumnya memiliki kation jenis alkali (misalnya Na^+), jika kation ini ditukarkan dengan NH_4^+ yang diikuti pemanasan, maka pada permukaan zeolit akan terdapat ion H^+ . Secara katalitik ion berfungsi sebagai pusat aktif (inti aktif).

Kemampuan zeolit sebagai katalis dikarenakan zeolit memiliki sifat-sifat tertentu, diantaranya yaitu :

1. Keasaman zeolit

Keasaman pada kerangka zeolit dapat dibagi dalam dua kelompok yaitu **pusat asam Bronsted dan pusat asam Lewis**.

a. Asam Bronsted, yaitu spesies yang dapat memberikan proton H^+ . Bila AlO_4^- mengikat proton maka akan timbul suatu asam Bronsted. Proton ini menempel pada atom-atom oksigen *framework* yang berikatan dengan atom-atom silikon dan aluminium. Asam Bronsted dapat timbul melalui beberapa cara diantaranya adalah:

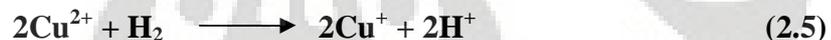
- Ionisasi air oleh kation-kation polivalen



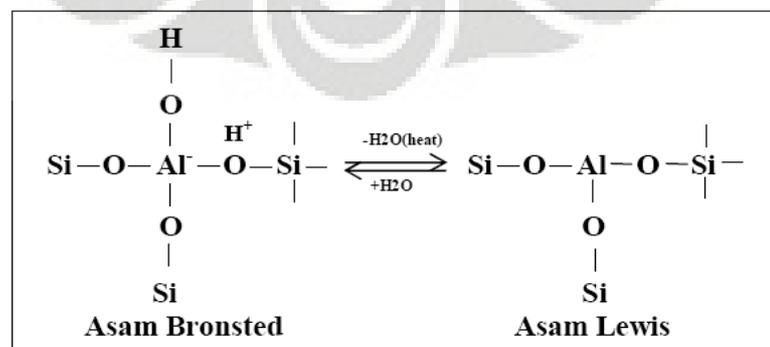
- Perlakuan dengan larutan asam



- Dekomposisi thermal dari zeolit hasil pertukaran ion dengan garam ammonium.
- Reduksi logam dengan hidrogen oleh kation-kation logam transisi dalam zeolit dengan tujuan untuk membentuk H-zeolit.



b. Asam Lewis, yaitu spesies yang dapat menerima sepasang elektron bebas yang dikombinasikan dengan zat kedua yang mempunyai sepasang elektron bebas. Keasaman Bronsted dapat diubah menjadi keasaman Lewis dengan memanaskan pada suhu tinggi.



Gambar 2.7 Perubahan Keasaman Zeolit (Bhatia, 2000)

Pada gambar 2.7 terlihat bahwa Al mempunyai sisi yang dapat menerima sepasang elektron bebas sehingga dapat bertindak sebagai asam Lewis. Asam Lewis ini dapat berubah menjadi asam Bronsted dengan hadirnya H₂O pada zeolit dengan disertai pemanasan. Zeolit yang telah melalui tahap pengasaman akan memiliki luas permukaan yang lebih tinggi sehingga perannya sebagai katalis ataupun penyangga dapat lebih baik.

2. Sifat pori mikronya dapat ditentukan

Zeolit yang berbentuk kristal memiliki banyak ruang kosong yang dapat memegang peranan penting dalam proses katalisis.

3. Ukuran kristal dan morfologinya yang dapat diubah-ubah

Secara umum aktivitas zeolit menurun dengan semakin meningkatnya ukuran kristal. Ukuran kristal yang besar menyebabkan distribusi Al pada kristal yang tidak merata terutama pada permukaannya sehingga keasaman dari katalis menurun.

4. Kestabilan termal

Kestabilan termal adalah kemampuan zeolit untuk berfungsi pada temperatur tinggi.

5. Kemampuan penggabungan dengan logam dan logam kompleks

Pertukaran ion logam atau logam kompleks yang diikuti prosedur reduksi yang sesuai dapat menghasilkan zeolit yang mengandung logam sebagai katalis bagi reaksi tertentu. Partikel logam kompleks yang berukuran kecil dan sesuai dengan ukuran pori atau saluran zeolit dapat dipertukarkan ke dalam zeolit dan memberikan sifat selektivitas tertentu pada zeolit.

2.4 ZSM-5

ZSM-5 (Zeolit Socony Mobil-5) merupakan zeolit yang pertama kali ditemukan oleh Robert J. Argauer dan Bob Landolt dari *Applied Research and Development Division, Central Research Division Mobile* pada tahun 1963

(Ramo, 1984). Selanjutnya pada tahun 1972, hasil penelitian tersebut dipatenkan dalam *US Patent*.

ZSM-5 merupakan salah satu dari beberapa jenis zeolit. Zeolit sintetis jenis ZSM-5 dikembangkan oleh peneliti-peneliti *Mobile Oil Corp* sekitar tahun 1960. Material ini biasanya terbuat dari sistem campuran yang terdiri atas kation logam alkali dalam kation organik atau kompleks. ZSM-5 bermanfaat sebagai katalis untuk berbagai jenis reaksi, sebagai contoh ZSM-5 banyak digunakan sebagai katalis untuk mengkonversi methanol menjadi hidrokarbon.

Zeolit ZSM-5 dikenal sebagai jenis zeolit sintetis yang mempunyai permukaan inti asam dan struktur jaringan pori yang luas serta homogen. Struktur kerangka jenis bahan alumino silikat tersebut terbentuk dari bahan dasar pembangun berupa tetrahedron atom silikon atau aluminium. Kemampuan ZSM-5 untuk mempercepat berbagai jenis reaksi sangat berkaitan dengan sifat keasamannya dan parameter penting ZSM-5 yang bisa dikontrol dengan rasio Si/Al. Namun beragamnya variasi Si/Al ini sama sekali tidak akan mempengaruhi struktur kerangka ZSM-5 tetapi diharapkan menyebabkan pertukaran dalam asam dan distribusi kekuatan asam (Bhatia, 2000).

Secara umum, ZSM-5 memiliki 2 jenis sisi asam, yaitu sisi asam Bronsted dan sisi asam Lewis. Pembentukannya sendiri dapat dijelaskan sebagai berikut. Saat disintesis secara normal, zeolit biasanya akan memiliki ion Na^+ yang akan menyeimbangkan muatan dalam rangkanya. Ion ini dapat ditukarkan melalui reaksi langsung dengan menggunakan asam sehingga diperoleh gugus hidroksil pada permukaannya, yang dikenal dengan nama sisi asam Bronsted. Selanjutnya, pemanasan yang ekstrim dari sisi asam Bronsted akan menghilangkan air dan menghasilkan ion Al yang memiliki orbital kosong. Inilah yang disebut dengan sisi asam Lewis.

Disamping itu, kemampuan selektivitas ZSM-5 terhadap terbentuknya senyawa hidrokarbon aromatik sangat tinggi berdasarkan ukuran dan struktur pori. Berbagai penelitian menyimpulkan bahwa ZSM-5 mempunyai kemampuan selektivitas yang tinggi berdasarkan bentuk dan ukuran pori (*shape selective catalyst*) ke arah terbentuknya berbagai jenis molekul yang berdiameter kinetik maksimal sekitar 0,6 nm yang sesuai dengan hidrokarbon aromatik (benzena,

toluena, xilena).

2.4.1 Penggunaan ZSM-5

Sama halnya dengan zeolit alam, ZSM-5 dapat berfungsi sebagai katalis dan penukar ion (*ion exchanger*). Sebagai penukar ion ZSM-5 dapat membentuk *templating agent* (pembangun rangka) dalam rangka jaringan polimer yang bersifat mobile dan sudah dipertukarkan ion lain. Fungsi sebagai penukar ion dalam ZSM-5 adalah pertukaran ion Na^+ dan H^+ karena pengaruh asam pada saat pengaktifan (Chumaidi, 1999). Fungsi lain sebagai katalis adalah mempengaruhi kecepatan reaksi tanpa mempengaruhi kesetimbangan karena mampu menaikkan perbedaan *path* molekuler dari reaksi.

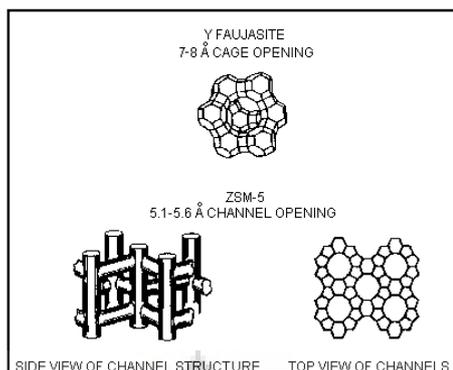
Namun, umumnya katalis jenis zeolit mudah mengalami deaktivasi, tidak terkecuali untuk ZSM-5. Menurut Richardson kemampuan katalis dalam menahan aktivitas dan selektivitas dalam rentang waktu tertentu tergantung dari jenis reaksi, jenis zeolit dan kondisi reaksi. Oleh karenanya Loffer menyarankan agar *durability test* atau *time on stream reaction test* tetap diperhatikan dalam memilih dan menentukan jenis katalis sesuai dengan reaksi dan kondisi operasinya (Setiadi, 2005).

2.4.2 Struktur ZSM-5

Struktur ZSM-5 memiliki kerangka tiga dimensi dari tetrahedral yang sangat berhubungan dengan atom O dan di dalam struktur Si^+ dapat diganti dengan Al^{3+} (Chumaidi, 1999).

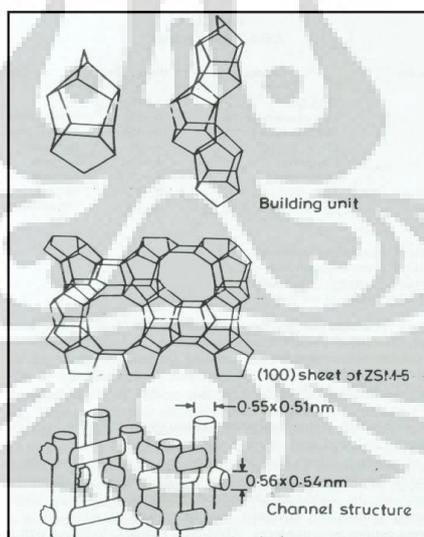
Sifat unik ZSM-5 adalah bersifat asam dan sistem tiga dimensi dari saluran yang berpotongan yaitu saluran lurus yang berbentuk ellips (0,51 x 0,55 nm) dan saluran zig-zag bundar (0,54 x 0,5 nm).

ZSM-5 termasuk kelompok baru dalam katalis dengan struktur yang berbeda dengan pori besar faujasite dan pori kecil zeolit seperti type A dan erionite. ZSM-5 memiliki sifat katalitik yang tidak biasa dan memiliki stabilitas termal yang tinggi. Perbandingan antara ZSM-5 dengan zeolit type faujasite dapat dilihat pada gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2.8 Perbandingan Antara Zeolit Type Faujasite dengan ZSM-5 ([www.google/ZSM-5/com](http://www.google.com/ZSM-5/com))

Kerangka ZSM-5 terdiri atas konfigurasi baru yang berhubungan dengan tetrahedral. Unit ZSM-5 tersebut melewati pinggiran rantai seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9 dibawah ini. Rantai-rantai dapat dihubungkan ke bentuk lembaran-lembaran dan lembaran-lembaran tersebut memegang peranan penting dalam struktur kerangka tiga dimensi. Struktur ZSM-5 menunjukkan bahwa atom Si dapat tersubstitusi untuk aluminium tanpa dipengaruhi struktur dasar hingga kisi-kisi yang terdiri dari SiO_2 murni (Bhatia, 2000).



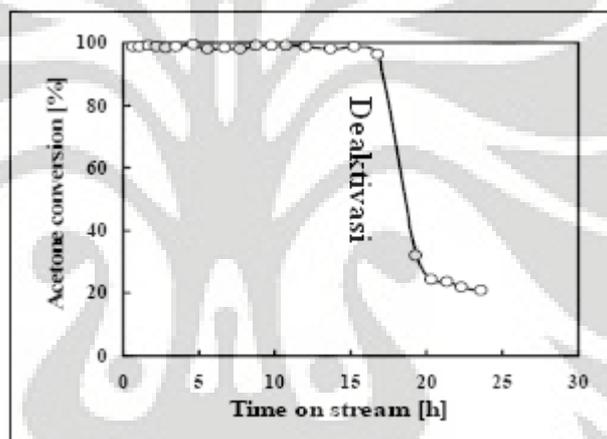
Gambar 2.9 Struktur ZSM-5 (Bhatia, 2000)

Sifat keasaman ZSM-5 dipengaruhi juga oleh rasio Si/Al, biasanya rasio Si/Al bervariasi dari 10-100. Variasi rasio Si/Al dalam zeolit tidak berpengaruh pada struktur, tetapi diharapkan menyebabkan perubahan dalam keasaman, distribusi asam dan akibatnya perubahan dalam sifat katalitik (Bhatia, 2000).

2.5 Deaktivasi

Idealnya, katalis seharusnya berfungsi selamanya. Tetapi pada kenyataannya katalis dapat mati setelah digunakan akibat berbagai macam hal yang dapat menghilangkan kemampuan mereka. Beberapa katalis bertahan hanya beberapa menit sedangkan yang lain bisa mencapai 10 tahun. Perancang katalis dapat membuat katalis berumur lebih panjang, tetapi saat masalah ditemukan untuk memperpanjang umur, masalah lain muncul.

Dalam pengukuran laboratorium, deaktivasi merupakan suatu masalah dan dapat menghasilkan data yang salah jika tidak diidentifikasi. Suatu permukaan katalis yang masih bersih akan mulai terdeaktivasi segera setelah katalis bertemu dengan molekul reaktan.



Gambar 2.10 Grafik Konversi Menunjukkan Penurunan Aktivitas Katalis

Pengurangan (dalam beberapa kasus peningkatan) temperatur, meningkatnya tekanan hidrogen, seringkali cukup untuk menurunkan laju deaktivasi. Pendekatan lain adalah dengan mempertahankan konversi yang konstan dengan cara meningkatkan temperatur secara berkala sejalan dengan turunnya katalis. Tetapi ini dibatasi oleh sensitivitas peralatan proses terhadap temperatur tinggi, kapasitas furnace dan heat exchanger, dan kemungkinan adanya reaksi samping.

Beberapa metode modifikasi katalis yang paling umum digunakan untuk mengatasi deaktivasi yang terjadi adalah sebagai berikut:

1. Mengurangi keaktifan atau mengganti komponen aktif yang berbeda atau support yang lain yang bertujuan untuk memperpanjang umur katalis

walaupun hal ini dapat menurunkan aktivitas.

2. Optimasi kombinasi komponen aktif dengan support. Suatu support yang berbeda dapat digunakan untuk meningkatkan interaksi, yang juga menurunkan *Sintering*. Support dengan keasaman yang lebih kecil dapat digunakan untuk mengurangi pembentukan coke.
3. Penambahan promotor untuk menghambat deaktivasi. Contohnya, stabilitas support yang lebih besar pada alumina dicapai dengan penambahan sedikit silika atau zirkonia, *Sintering* dan coking pada platina dikurangi dengan penambahan rhenium, dan sisi asam dinetralkan dengan kalium.
4. Penambahan promotor untuk menghilangkan deactivating agent. Contohnya pada steam reforming dimana karbon dihilangkan dengan cara reaksi dengan steam, yang dikatalisasi oleh aditif alkali.
5. Penambahan promotor untuk menetralkan racun katalis. Poisoning sulfur terhadap nikel dikurangi dengan menambahkan copper chromite, karena ion copper dan chromium lebih mudah membentuk sulfida.

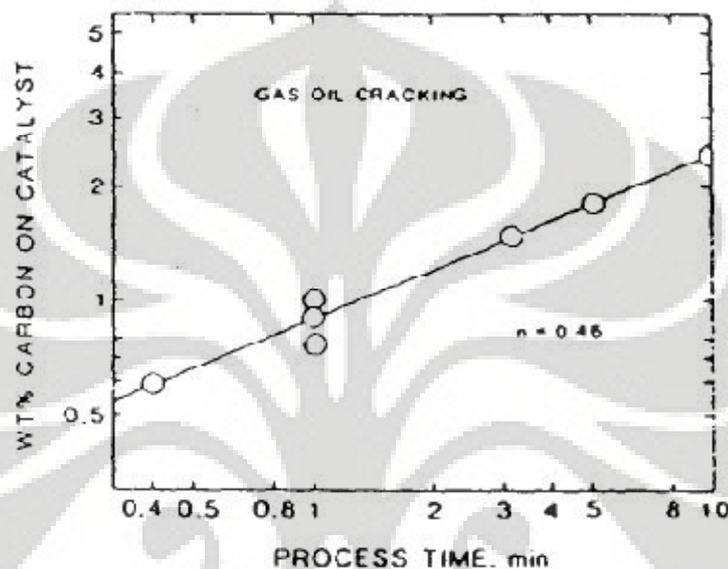
2.5.1 Coking

Istilah *coke* diberikan kepada residu terkarbonasi yang ada pada permukaan katalis. Deposit coke ditemukan dalam jumlah sampai 20% berat katalis. Semua jenis katalis mengalami peristiwa coking ini. Dalam kondisi ekstrim, permukaan katalis tertutupi oleh lapisan deposit coke sehingga menurunkan luas permukaan yang dapat diakses, komponen aktif akan terbungkus dalam karbon, dan pori katalis akan tertutup (*blocked*). Ketika efek ini sangat signifikan, maka katalis harus segera diganti atau diregenerasi.

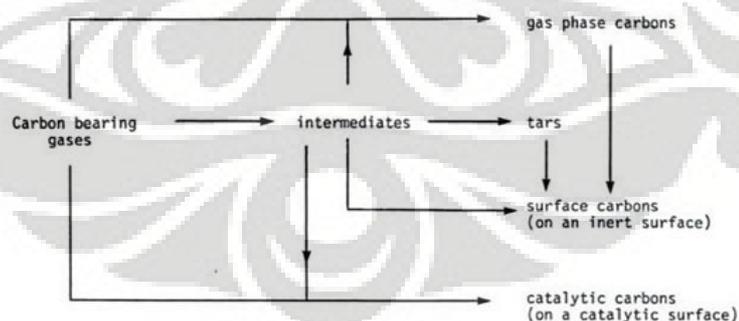
▪ Acid Coking

Acid coke terbentuk pada katalis perengkahan silica-alumina, zeolit, dan pada support yang bersifat asam. Kecenderungan pembentukan coke ini berhubungan langsung dengan keasaman. Ada dua jenis utama struktur karbon sebagai fasa yang terdispersi sangat tinggi pada pori. Sebagian besar coke ada dalam bentuk *pseudografitic* atau *turbostatic* dan *random-layer lattice*, mirip dengan grafit dengan komposisi $CH_{0,4}$ sampai $CH_{0,5}$.

Olefin terbentuk melalui reaksi dehidrogenasi dan bertindak sebagai akseptor hydrogen untuk membentuk ion karbonium. Molekul yang belum jenuh diadsorp sangat kuat dan menaikkan pengurangan hydrogen, yang pada akhirnya membentuk coke melalui pembentukan cincin (siklisasi). Kenaikan kekuatan asam dan densitas membantu pembentukan coke, yang merupakan fakta dalam katalis. Namun, katalis dapat dimodifikasi untuk menunda pembentukan coke.



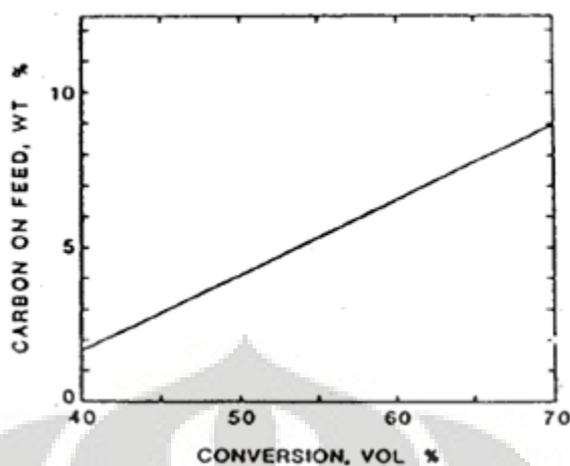
Gambar 2.11 Pertambahan *Coke* Sejalan Dengan Waktu (Richardson, 1989)



Gambar 2.12 Mekanisme Pembentukan *Coke*

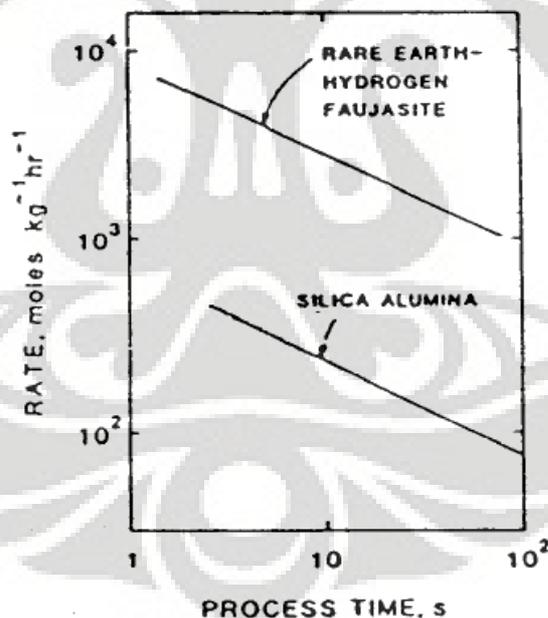
- *Hal yang berpengaruh pada pembentukan coke*

Kandungan karbon juga berhubungan dengan tingkat konversi atau kekuatan operasi, seperti ditunjukkan dalam gambar berikut:



Gambar 2.13 Hubungan Kandungan Karbon dengan Tingkat Konversi (Richardson, 1989)

Penambahan sejumlah kecil zeolit (5-10%) kedalam katalis dapat memperlambat deaktivasi. Hal ini merupakan konsekuensi dari *shape selectivity*, dimana pembentukan coke dibatasi oleh ukuran rongga zeolit.



Gambar 2.14 Laju Deaktivasi dengan Katalis Silica Alumina dan Faujasite (Richardson, 1989)

Dengan mengetahui pengaruh dari susunan dalam reaksi asam, memungkinkan untuk mengontrol geometri dan mencegah pembentukan spesies dengan molekul besar tanpa menyebabkan pemutusan menjadi molekul yang lebih kecil. Apabila katalis asam tidak diinginkan sementara coke terbentuk pada

support, maka memungkinkan mengontrolnya dengan cara mengganti support asam dengan support yang bersifat non-asam seperti magnesia menggantikan silica atau alumina. Jika ini tidak dilakukan, mungkin saja asam tersebut meracuni dirinya sendiri. Hal ini biasanya diselesaikan dengan sejumlah kecil kalium. Unsur-unsur alkali dan alkali tanah lainnya dapat berfungsi sama, akan tetapi kaliumlah yang paling umum digunakan.

2.5.2 Kerusakan partikel

Partikel katalis jika dipilih dan dipasang dengan benar berdasarkan spesifikasinya, seharusnya cukup kuat untuk menahan kerusakan. Uji ketahanan harus dilakukan pada semua katalis baru. Perubahan selama proses operasi menghasilkan kerusakan yang perlahan terhadap sifat mekanis. Konsekuensi dari hal ini adalah terjadinya plugging, channelling, kenaikan pressure drop dan ketidakteraturan kinerja katalis. Hal ini dapat berlanjut menjadi hot spot yang bergabung dengan efek pemanasan dan coking. Karena itu, kerusakan partikel mengawali deaktivasi yang lebih parah dibandingkan penyebab lainnya.

Hilangnya kekuatan mekanis jarang terjadi, kecuali didorong oleh efek termal dan kimiawi. Contohnya, suatu peningkatan tekanan pada unit steam reforming menyebabkan hilangnya silikat yang volatil. Karena pellet disemen bersama dengan bahan pengikat berjenis kalsium silikat, hilangnya silikat memicu terjadinya pelemahan pellet katalis. Perbaikannya adalah merubah metode preparasi dan formulasi katalis. Contoh lain ditemukan pada pellet yang berbasis alumina. Pengotor sulfat yang tidak dibuang selama preparasi bereaksi dengan aluminium pada kondisi regenerasi membentuk aluminium sulfat yang memperlemah pellet. Hal ini juga terjadi jika logam berat terdeposisi selama desulfurisasi residu minyak.

2.5.3 Fouling

Fouling adalah deposisi kotoran reaktor pada partikel. Kerak, oksida hasil korosi dan produk korosi yang lain, semuanya dapat menyebabkan fouling. Partikel yang dibuang dari reaktor sering mempunyai lapisan besi oksida yang berwarna merah kecoklatan pada bagian luarnya. Terkadang ditemukan pula

senyawa kalsium. Kasus yang paling parah terjadi dalam pemrosesan batu bara dan cairan turunan batu bara, yang mengandung banyak senyawa mineral anorganik.

Biasanya, bahan-bahan tersebut menyumbat bagian luar partikel, menutupi pori dan menghalangi permukaan aktif. Tetapi yang lebih parah, partikel-partikel katalis menjadi tergabung yang mengakibatkan hilangnya ruang-ruang antartikel didalam reaktor dan menyebabkan sulitnya pembuangan katalis. Untuk deaktivasi jenis ini tidak ada perbaikan yang dapat dilakukan, katalis hanya dapat diganti, dan melakukan antisipasi.

2.5.4 Volatisasi komponen

Peningkatan temperatur dapat mengakibatkan hilangnya komponen aktif atau promotor katalis melalui penguapan. Hilangnya aktivitas dan fungsi promotor diikuti dengan kerusakan tambahan dari deposisi korosi pada peralatan plant di bagian downstream. Kejadian seperti ini dapat dideteksi dengan mudah dalam operasi laboratorium, sehingga kita harus mengasumsikan bahwa dalam penggunaan di industri kemungkinan terjadinya cukup kecil.

Suatu contoh adalah pada hydrotreating dengan katalis yang mengandung molibdenum. Selama regenerasi, coke dibakar dengan udara. Walaupun pencegahan telah dilakukan untuk menghindari hot spot dalam reaktor tetapi terkadang masih bisa terjadi. Molibdenum menguap diatas suhu 800°C , sehingga kristal kuning terdeposisi pada daerah downstream dan partikel katalis berubah menjadi putih. Aktivitas katalis hilang dan tak dapat dikembalikan. Kasus lain adalah pada katalis metanasi nikel. Jika bed katalis menjadi dingin di bawah 150°C dengan adanya gas yang mengandung karbondioksida, karbonil nikel dapat teruapkan dari partikel katalis, membentuk senyawa berbahaya yang sangat beracun sekaligus hilangnya nikel.

Volatisasi jangka panjang juga ditemukan dalam *steam reforming nafta*. Pembentukan coke dari hidrokarbon yang lebih berat dapat dikontrol dengan potasium yang menjadi promotor dalam reaksi karbon dengan *steam*. Dalam adanya *steam*, potasium membentuk KOH secara perlahan yang dapat menghasilkan percepatan pembentukan coke.

2.5.5 Perubahan fasa

Semua komponen dalam katalis harus dijaga dalam keadaan paling aktifnya. Perubahan fasa adalah fenomena termal adalah fenomena termal yang berbeda dari pembentukan senyawa. Contohnya alumina yang mempunyai luas permukaan yang besar, berubah menjadi kecil ketika dipanaskan. Katalis berbasis alumina sering kali diregenerasi dengan membakar karbon. Setelah jangka waktu tertentu, luas permukaan berkurang dan aktivitas turun, sejalan dengan terjadinya *Sintering* termal selama regenerasi. Ini adalah salah satu alasan mengapa aktivitas tidak pernah bisa kembali ke kondisi awalnya. Perubahan fasa ini dikontrol dengan cara menambahkan silika sebagai promotor.

Pemisahan komponen juga dikategorikan sebagai perubahan fasa. Paduan logam yang sangat terdispersi jarang mempunyai kecenderungan membentuk kristalit nonhomogen, dengan komponen yang lebih volatil berdifusi ke permukaan. Ini banyak ditemukan pada paduan tembaga-nikel, yang membingungkan pengerjaan katalisis logam di jaman dahulu.

2.5.6 Pembentukan senyawa

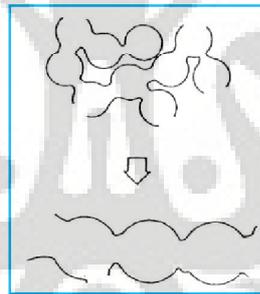
Pembentukan senyawa antara komponen-komponen dengan lingkungan yang reaktif menyebabkan penurunan aktivitas katalis. Meningkatnya temperature mempercepat reaksi antara nikel dengan support yang umum untuk memproduksi nikel aluminat dan nikel silikat. Steam membentuk oksida dari kobal dan besi, nitrogen dapat menghasilkan nitrida, dan atmosfer yang mengandung karbon membentuk karbida. Peristiwa-peristiwa tersebut bukan merupakan fenomena permukaan, sama seperti pada poisoning, tetapi merupakan pembentukan senyawa dalam jumlah banyak yang dapat diidentifikasi dengan mudah menggunakan XRD.

2.5.7 Sintering

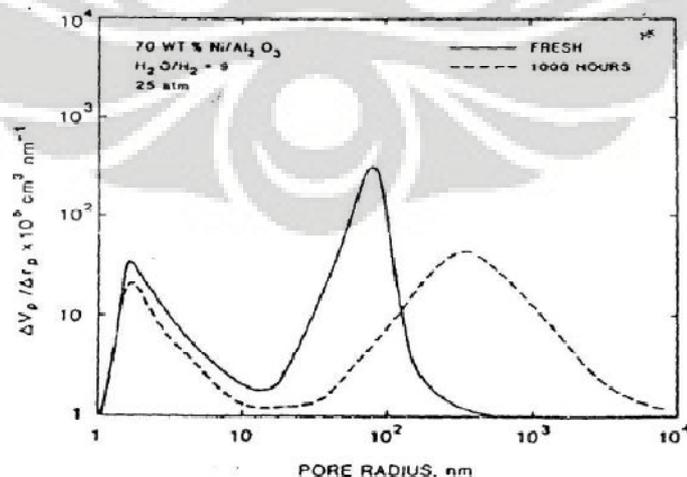
Sintering adalah fenomena yang telah diketahui dalam ilmu logam dan keramik. Beberapa dapat diaplikasikan dalam ilmu katalis karena ukuran kristalit yang sangat kecil, support yang berpori, atmosfer yang reaktif, dan temperatur yang relatif rendah. Atom-atom dipermukaan dan di fasa bulk menjadi mudah

bergerak pada temperatur diatas sepertiga dan setengah dari titik lelehnya. Karena support biasanya merupakan oksida keramik yang mempunyai titik leleh tingginya sedangkan komponen aktifnya mempunyai titik leleh yang lebih rendah, logam yang terdispersi, oksida, atau sulfida mempunyai mekanisme *Sintering* yang berbeda-beda.

Langkah-langkah dalam *Sintering* dari support ditunjukkan dalam gambar 2.15. Butiran-butiran kecil (50-500 mikron) dengan mesoporousitas internal yang tinggi dikompres bersama-sama selama pembuatan. Aliran dan penyempitan batas butir adalah bagian dari proses yang mempengaruhi kekuatan partikel. Dari sini *Sintering* telah dimulai. Pada titik ini, partikel lebih baik dideskripsikan dalam hal porositasnya. Difusi material terjadi pertama melewati jembatan antara pori-pori kecil, dimana tegangan permukaan paling besar. Pada mulanya, pori-pori kecil menghilang yang memicu berkurangnya luas permukaan. Contohnya ditunjukkan dalam gambar 2.16. untuk katalis steam reforming nafta yang digunakan dalam produksi pengganti gas alam.



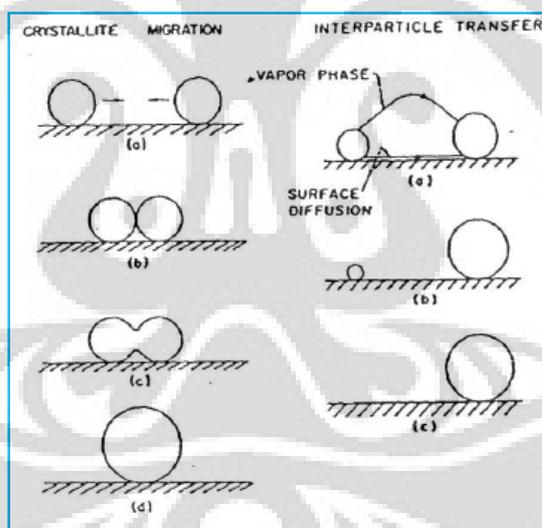
Gambar 2.15 Peningkatan Ukuran Pori Sselama Sintering



Gambar 2.16 Hilangnya Pori Kecil Selama *Sintering*

Konsekuensi dari hilangnya pori-pori di dalam support ada dua hal. Yang pertama, kristalinitas dari komponen akhir terperangkap dalam pori-pori yang paling kecil dan menjadi tidak dapat diakses. Yang kedua, fungsi dispersi dari support menjadi hilang. Kristal support bergerak saling mendekat, mempercepat hilangnya permukaan aktif begitu mengalami sintering.

Disain katalis yang bagus harusnya mengantisipasi kemungkinan di atas. Kalsinasi dilakukan pada suhu yang lebih tinggi dari temperatur sintering. Support dipilih agar dapat stabil pada range yang diinginkan. Walaupun support tidak terlalu merespon deaktivasi termal, tetapi beberapa ada yang terpengaruh, berdasarkan fakta bahwa setelah penggunaan berbulan-bulan termodinamikanya berubah. Hal yang tidak diinginkan terjadi karena adanya interaksi antar partikel. Kebanyakan penelitian teoritis dan eksperimental pada sintering lebih berfokus pada logam dengan dispersi tinggi, seperti platina dan alumina. Gambar 2.17 menunjukkan dua mekanisme yang dapat diterima untuk pertumbuhan kristal.

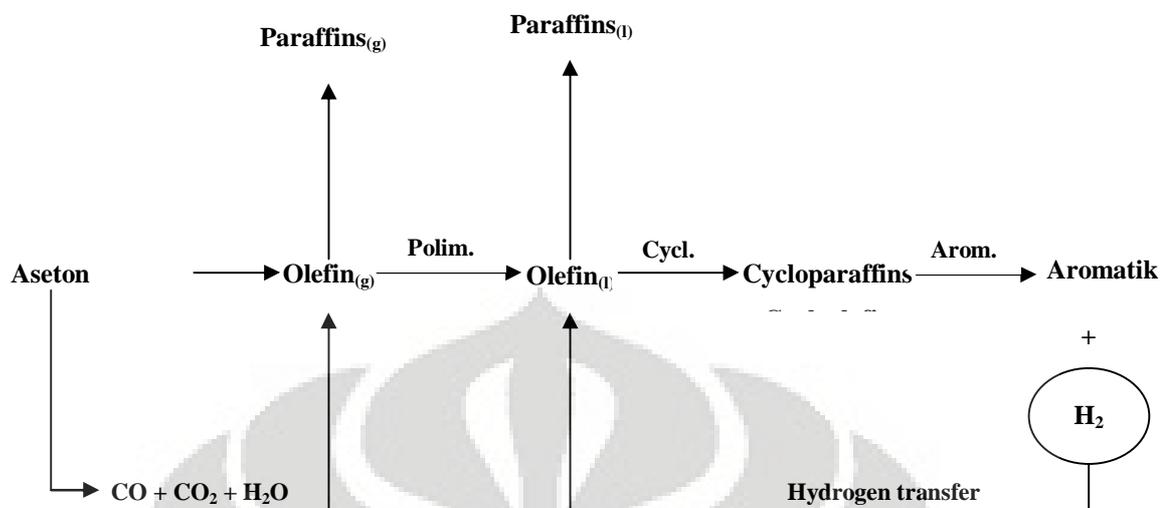


Gambar 2.17 Mekanisme Sintering pada Logam yang Terdispersi

2.5.8 Poisoning

Poisoning pada katalis merupakan sebuah efek kimia, meskipun temperature mungkin mempengaruhi sensitivitas. Sebuah *poison* atau racun pada katalis adalah suatu agen yang bereaksi permanen dengan sisi aktif katalis. Reaksi *poisoning* dapat bersifat *reversible* atau *irreversible*, *regenerable* atau tidak, tergantung pada jenis *poison*, katalis, dan penanganannya.

2.6 Mekanisme Reaksi



Gambar 2.18 Skema Reaksi untuk Konversi dari Aseton Menjadi Hidrokarbon dengan Menggunakan HZSM-5 (Enrique Costa, 1992)

Reaksi konversi katalitik Aseton menjadi hidrokarbon pada penelitian ini melibatkan banyak reaksi, yang meliputi reaksi *perengkahan*, reaksi polimerisasi, siklisasi, hidrogenasi, aromatisasi dan pembentukan *coke*.

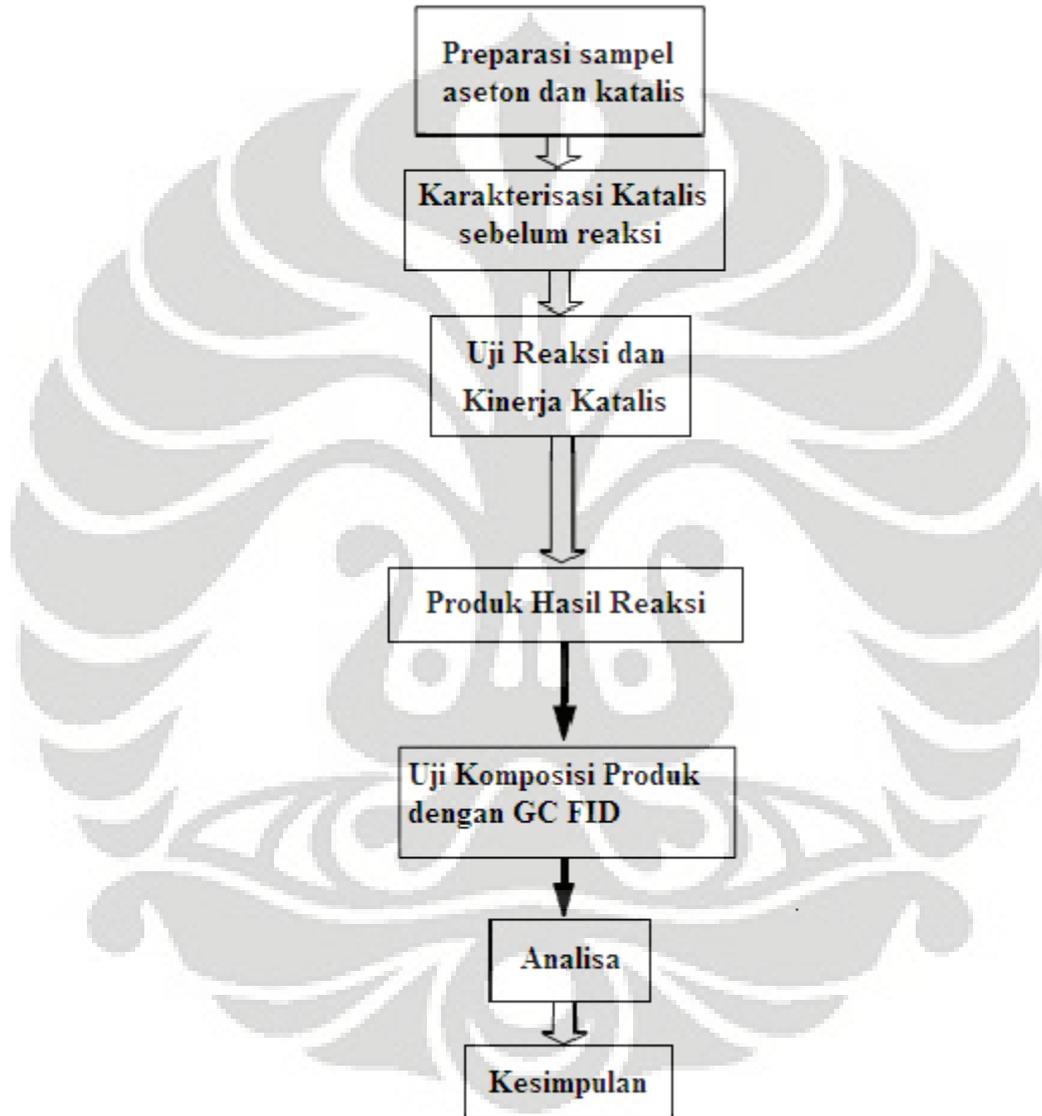
Olefin C₂-C₄ fasa gas yang merupakan produk intermediate akan dihasilkan dari perengkahan aseton. Olefin dengan berat molekul lebih besar akan terbentuk dari reaksi polimerisasi. Setelah itu akan mengalami siklisasi membentuk sikloparafin / sikloolefin kemudian mengalami reaksi aromatisasi sehingga menghasilkan hidrokarbon aromatik dan melepaskan hidrogen. Hidrogen yang dilepaskan ini akan bereaksi dengan olefin membentuk paraffin melalui reaksi hidrogenasi. Hidrogenasi merupakan suatu penambahan senyawa hidrogen, salah satunya terjadi pada olefin sesuai dengan skema reaksi konversi katalitik pada gambar berikut, dimana olefin akan berubah menjadi *paraffin*.

Pembentukan aromatik hidrokarbon, campuran polisiklik dan polialkilnaphtha dapat menyebabkan *coke*. *Coke* yang terbentuk dapat menyebabkan katalis terdeaktivasi.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Diagram alir penelitian secara umum dapat dilihat pada diagram berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Secara Umum

3.1.1 Persiapan sampel dan katalis

Tahap persiapan sampel terdiri dari penyiapan senyawa aseton murni. Sedangkan untuk persiapan katalis dilakukan pretreatment pada 673 K dalam aliran nitrogen sebesar 50 ml/min selama sedikitnya 1 jam untuk menghilangkan

kemungkinan adanya kandungan komponen air akibat penyimpanan maupun penyusunan unggun katalis.

3.1.2 Karakterisasi katalis sebelum reaksi

Karakterisasi katalis ini dilakukan untuk mengetahui sifat fisis/ kimia katalis. Karakterisasi katalis sebelum reaksi cukup dilakukan satu kali dan dapat dijadikan data karakterisasi untuk setiap katalis yang digunakan karena katalis yang digunakan adalah sama yaitu katalis komersial HZSM-5.

3.1.2.1 Karakterisasi dengan XRF (*X-Ray Fluorescence*)

Karakterisasi dengan XRF ini dilakukan untuk mengetahui komponen senyawa kimiawi yang terkandung dalam HZSM-5.

3.1.2.2 Karakterisasi dengan XRD (*X-Ray Diffraction*)

Uji karakteristik dengan metode XRD ini bertujuan untuk mengetahui struktur dan komposisi kristalinitas katalis. Pengukuran intensitas dari difraksi sinar-X menggunakan skala relatif. Penentuan kristalinitas pada dasarnya adalah membandingkan intensitas yang diperoleh dari hamburan sinar-X yang mengenai sampel dengan intensitas sampel standar. Penentuan ini dengan jalan meratakan tinggi puncak sampel *standard* yang dianggap memiliki kristalinitas 100%. Kemudian kristalinitas dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\sum \text{tinggi puncak terpilih dari sampel uji}}{\sum \text{tinggi puncak terpilih dari sampel standard}} \times 100\% \quad (3.1)$$

Katalis yang telah diberi perlakuan proses panas dan kimia sering mengalami perubahan pada stukturanya seperti menghasilkan kristal partikel yang lebih baik atau bahkan dapat menyebabkan sebagian atau seluruh katalis berubah bentuk menjadi bentuk amorf.

3.1.3 Uji reaksi dan kinerja katalis

Pada tahap ini senyawa aseton direaksikan dengan katalis HZSM-5 menggunakan reaktor uji seperti pada gambar 3.2. Reaksi berlangsung dalam reaktor *fixed bed* dimana laju alir umpan dan temperaturnya diatur pada kondisi

tertentu.



Gambar 3.2 Reaktor Uji

Prosedur penelitian tahap reaksi ini adalah sebagai berikut :

1. Persiapan Sampel
 - a. Siapkan Aseton
 - b. Ambil Aseton yang akan direaksikan,
Ambil diambil dengan menggunakan pipet volume, kemudian dimasukkan ke dalam wadah sampel.
 - c. Sampel diletakkan dalam sebuah *heater* yang di set 40°C dan pasang pipa penghubungnya (jika ingin memulai reaksi maka valve yang terletak antara aseton dan reaktor dibuka agar aseton dapat mengalir ke dalam reaktor).
2. Persiapan alat
 - a. Pada reaktor, dimasukkan katalis sebanyak 1 gram dan quartz sand sekitar 5 gram.
 - b. *Furnace electric* dinyalakan dan diset pada temperatur reaksi yang diinginkan (misalnya: 400°C).

- c. Untuk *start up*, N₂ dialirkan terlebih dahulu sedikitnya 1 jam untuk membersihkan reaktor sehingga bebas dari kemungkinan adanya kandungan komponen air akibat selama penyimpanan maupun selama penyusunan unggun katalis.
- d. Pada saat temperatur reaktor telah tercapai, *valve* yang menghubungkan aseton dan reaktor dibuka agar dan sampel (Aseton) dapat mengalir ke reaktor dan berkontak dengan katalis dalam reaktor. Jumlah aseton yang masuk ke reaktor setiap jamnya akan dideteksi dengan menggunakan peak area yang ada pada GC-FID. Kemudian untuk peak area tersebut akan dikalibrasi untuk mendapatkan volume aseton yang masuk ke reaktor.
- e. WHSV dihitung dari :
$$\frac{\left(\frac{\text{gram sampel}}{\text{waktu}} \right)}{\text{gram katalis}} = h^{-1} \quad (3.2)$$
- f. Sampel aseton yang menguap dalam ruang aseton akan dibawa oleh *carrier gas* ke dalam reaktor sehingga terjadi reaksi di dalam reaktor.
- g. Produk yang diperoleh ditampung dalam sebuah wadah yang telah dicelupkan dalam nitrogen cair agar produk yang didapat langsung dapat terkondensasi.
- h. Analisa produk cair yang diperoleh.
- i. Untuk produk gas dapat dianalisa dengan cara gas diambil melalui selangnya dengan menggunakan syringe kemudian langsung diinjek ke GC-FID.
3. Prosedur 1-2 diulangi untuk variasi laju alir umpan *carrier gas* 60ml/menit, 80ml/menit, 100ml/menit, 120ml/menit, 140ml/menit, 180ml/menit, 200ml/menit, 220ml/menit, dan 240ml/menit. Laju alir *carrier gas* yang berbeda akan menghasilkan WHSV yang berbeda.
4. Prosedur 1-3 diulangi untuk variasi suhu reaktor 250⁰C, 300⁰C, 375⁰C dan 425⁰C.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

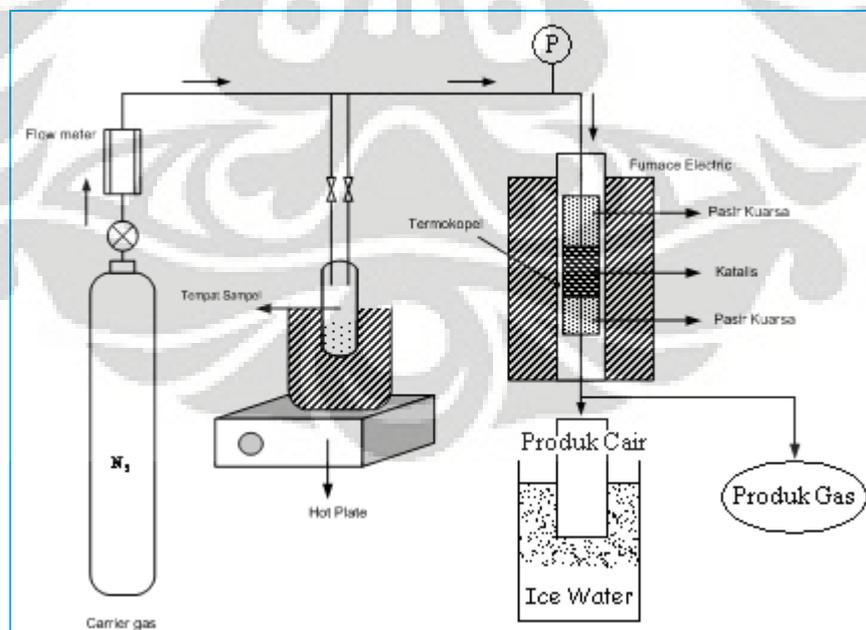
- Termometer
- Spatula

- Kertas Timbang
- Gelas ukur 100 ml
- Labu takar 100 ml
- Pipet volume
- Reaktor *Fixed Bed*
- *Beaker glass* 250 ml
- *Syringe Gas Tight*

3.2.2 Bahan

- Aseton : sebagai reaktan
- N_2 : sebagai carrier gas bagi aseton yang teruapkan agar dapat masuk ke reaktor
- Air distilat : untuk membuat variasi komposisi aseton
- HZSM-5 : sebagai katalis dalam proses konversi aseton menjadi hidrokarbon aromatik

3.3 Model Penelitian



Gambar 3.3 Susunan Reaktor Uji Katalis *Fixed Bed Reactor*

Susunan reaktor untuk tahap konversi katalitik adalah :

- Unggun katalis yang berupa katalis HZSM-5 ditahan dengan lapisan *quartz wool* (pasir kuarsa) agar unggun katalis berada pada posisi yang tetap.
- Unggun katalis dibuat dengan cara mencampurkan 1 gram katalis dengan 5 gram *quartz sand*.
- Tepat di sisi luar unggun katalis, disematkan pipa kecil untuk peletakan ujung termokopel sebagai monitoring suhu katalis selama reaksi.
- Reaktor yang telah disiapkan dengan susunan tersebut diatas kemudian ditempatkan pada sistem aliran uji reaksi seperti terlihat pada gambar 3.3 di atas.

Kondisi reaksi pada reaktor :

1. Tekanan Operasi : atmosferik
2. Laju alir *carrier gas* : 240-60 ml /min
3. Katalis sampel unggun : 1 gram (variable konstan)
4. Suhu reaksi : 250⁰C, 300⁰C, 375⁰C, 400⁰C dan 425⁰C

3.4 Variabel Penelitian

Adapun variabel yang akan terkait pada tahapan ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel bebas : suhu reactor dan laju alir *carrier gas*.
2. Variabel terikat : konversi aseton dan yield hidrokarbon aromatik (BTX).

3.5 Teknik Pengumpulan Data dan Analisis Data

Pada tahap ini dilakukan identifikasi dan analisis terhadap hasil reaksi yang telah dilakukan. Analisis yang dilakukan adalah untuk mengetahui komposisi produk hidrokarbon aromatik.

3.5.1 Analisis *Gas Chromatography* (GC)

Proses pemisahan komponen-komponen produk dalam kromatografi gas berlangsung di dalam kolom berdasarkan pada interaksi komponen produk dan fasa diam. Proses pemisahannya dapat dipandang sebagai serangkaian peristiwa

partisi, dimana produk masuk ke dalam fasa cair, dan selang beberapa waktu akan teruapkan.

Interaksi antara produk dan fasa diam (cair) sangat menentukan berapa lama komponen-komponen akan ditahan. Komponen-komponen yang mempunyai afinitas lebih rendah (tidak suka) terhadap fasa diam, akan keluar dari kolom terlebih dahulu. Sedangkan komponen-komponen dengan afinitas lebih besar (larut dengan baik) terhadap fasa diam akan keluar lebih lama dari kolom. Dalam kromatografi gas, dikenal istilah waktu retensi (t_r), yaitu waktu komponen sampel ditahan oleh kolom.

Produk cair dan gas dianalisa dengan GC jenis FID (*Flame Ionization Detector*) dari GC-FID Shimazu 9A. Kondisi operasi GC-FID dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Kondisi Operasi GC-FID

Column	PEG
Carrier	Nitrogen
Column Temp.	100°C
Injector Temp.	1300°C

3.5.2 Analisis Gas Chromatography/Mass Spectroscopy (GC/MS)

Untuk menganalisa dan mengetahui produk hasil reaksi secara detail dan akurat maka digunakan analisa Gas Chromatography/Mass Spectroscopy (GC/MS). Metode yang dipakai adalah dengan menggunakan aplikasi dari spectroscopic atau detector elektroanalisis untuk memonitor keluaran dari kolom secara kontinyu. Biasanya, prosedur ini memerlukan instrumen terkomputerisasi dan memory computer yang besar untuk menyimpan data spectra dan elektrokimia untuk selanjutnya ditampilkan sebagai spectra dan chromatogram.

3.6 Cara Penafsiran dan Penyimpulan Hasil

- Data-data produk yang didapat dari analisis *Gas Chromatography* (GC) pada setiap variasi suhu reaktor dan laju alir carrier gas dibuat ke dalam grafik konversi aseton dan yield produk yang dihasilkan pada setiap 1/WHSV dan setiap suhu.

- Dari grafik-grafik tersebut dapat dilihat pengaruh suhu terhadap konversi dan yield produk aromatik serta pengaruh laju alir carrier gas terhadap konversi dan yield produk aromatik.
- Dari hasil GC/MS dapat dilihat secara detail produk-produk apa saja yang dihasilkan sehingga rute reaksi dapat diprediksi.



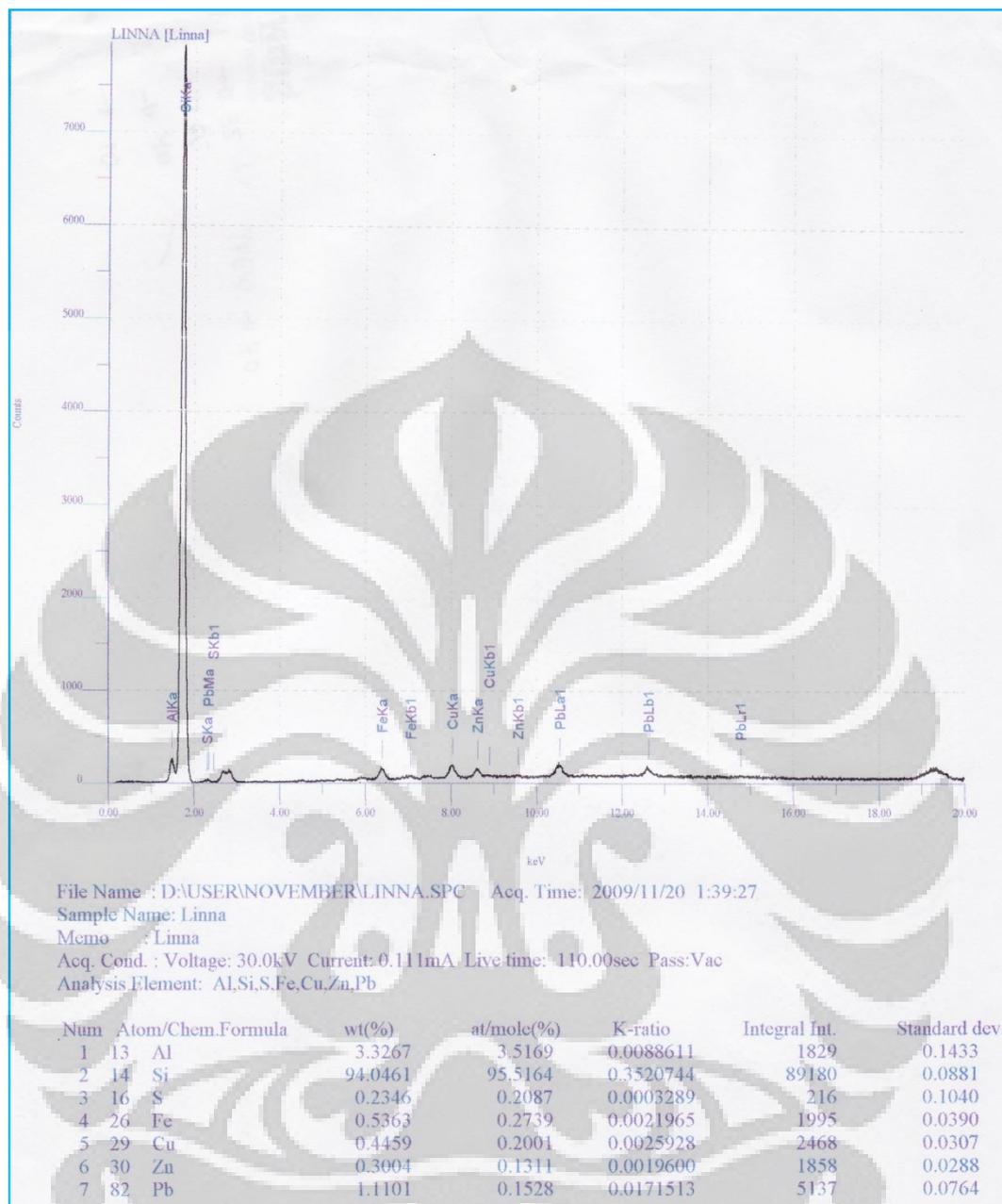
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Katalis

4.1.1 Karakterisasi dengan XRF (*X-Ray Fluorescence*)

Karakterisasi dengan XRF ini dilakukan untuk mengetahui komponen senyawa kimiawi yang terkandung dalam HZSM-5 serta untuk menentukan rasio Si/Al katalis HZSM-5 yang digunakan. Dari hasil karakterisasi XRF yang disajikan dalam gambar 4.1 nampak adanya puncak-puncak dari komponen senyawa katalis HZSM-5. Nilai kandungan unsur-unsurnya dapat digunakan untuk menghitung rasio Si/Al untuk katalis HZSM-5 yang akan digunakan. Berdasarkan perhitungan hasil XRF gambar 4.1 diatas didapat rasio mol Si/Al untuk HZSM-5 yang akan digunakan adalah sebesar 27.

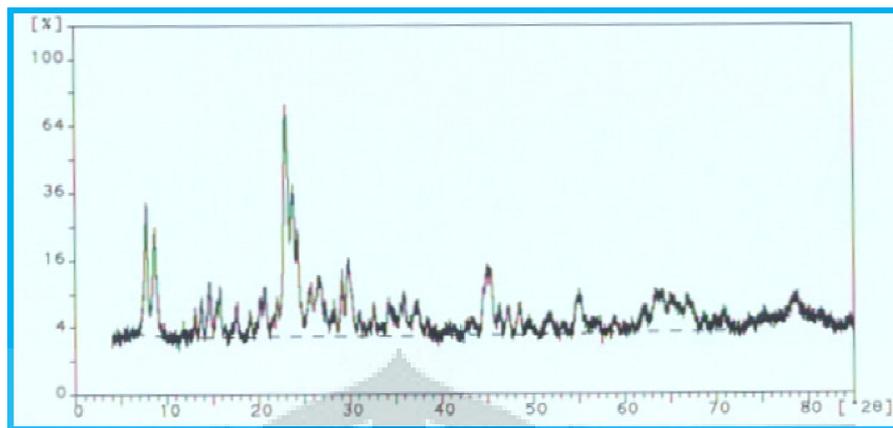
Dari hasil XRF terlihat bahwa masih ada kandungan selain komponen Si dan Al yakni adanya unsur Al, Si, S, Fe, Cu, Zn dan Pb, walaupun nilai kandungan unsur-unsur tersebut sangat kecil (total kandungan < 1 %). Hal ini menunjukkan bahwa kemurnian HZSM-5 tersebut sangat tinggi.



Gambar 4.1 Hasil X-Ray Fluorescence untuk Katalis HZSM-5 yang Digunakan

4.1.2 Karakterisasi dengan XRD (X-Ray Diffraction)

Karakterisasi XRD ini dilakukan untuk mengetahui kristalinitas dari katalis HZSM-5 dan kemungkinan mendeterminasi keberadaan dari pengotor lain. Beragamnya variasi rasio Si/Al yang digunakan tidak akan mempengaruhi struktur kerangka dari HZSM-5.



Gambar 4.2 X-Ray Diffraction HZSM-5

Jangkauan sudut difraksi 2θ yang digunakan pada uji karakteristik XRD ini berkisar antara 10° - 90° . *Tube anode* yang digunakan pada karakterisasi XRD ini adalah Cu- α dengan panjang gelombang 1.54056 Å. Untuk material yang amorf maka pita adsorpsi akan datar (tidak terbentuk peak). Dari gambar 4.2 terlihat bahwa HZSM-5 merupakan suatu katalis berbentuk kristalin dimana *peak-peak* dominan muncul pada daerah sudut 2θ antara 20 - 30° . Kristalinitas HZSM-5 tertinggi berada pada kisaran tersebut, tepatnya pada daerah sudut 2θ dengan nilai 23 derajat.

4.2 Hasil Uji Konversi Katalitik

Uji konversi katalitik dilakukan pada aseton dengan menggunakan katalis HZSM-5 dengan variasi 2 variabel bebas yaitu suhu dan laju alir carrier gas. Adapun variasi yang ada pada suhu adalah 250°C , 300°C , 375°C , 400°C , dan 425°C . Variasi yang dilakukan pada laju alir carrier gas adalah 60ml/menit, 80ml/menit, 100ml/menit, 120ml/menit, 140ml/menit, 180ml/menit, 200ml/menit, 220ml/menit, dan 240ml/menit. Variasi laju alir carrier gas akan mempengaruhi lamanya kontak antara reaktan aseton dengan katalis (1/WHSV). 1/WHSV didefinisikan sebagai perbandingan antara berat katalis dalam gram dengan berat aseton per jam yang akan bertemu dengan katalis. Berat katalis yang digunakan bernilai tetap yaitu 1 gram. Berat aseton per jam yang akan bertemu dengan katalis seberat 1 gram ini dapat berubah-ubah karena tergantung pada densitas reaktan pada suhu tersebut. Hal ini yang menjadi penyebab pada suhu berbeda

walaupun laju alir carrier gas sama, terdapat perbedaan nilai $1/\text{WHSV}$.

Produk reaksi dalam fasa gas dianalisis dengan *Gas Chromatography* (GC) untuk mengetahui komposisinya. Komposisi produk digunakan untuk mengetahui pengaruh suhu dan waktu kontak terhadap produk BTX yang diinginkan.

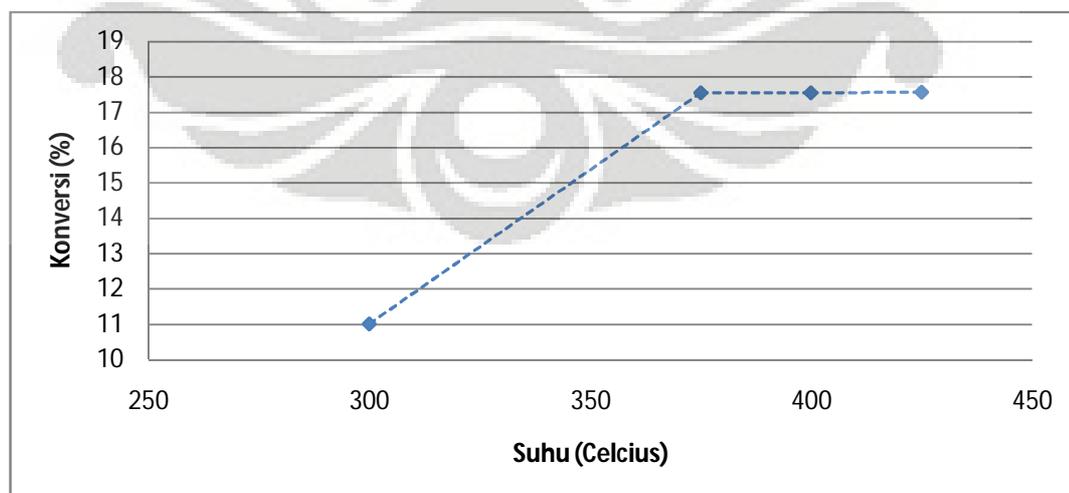
4.2.1 Tahap *Blank Test*

Pada tahap ini dilakukan reaksi aseton tanpa katalis di dalam reaktor *fixed bed*. Di dalam reaktor hanya diisi dengan quartz sand seberat 5,0040 gram. Tujuannya adalah mengetahui apakah pada saat tidak terdapat katalis tetap didapatkan produk BTX yang diinginkan. Data yang digunakan sebagai perbandingan adalah komposisi produk yang dihasilkan. Pada reaksi aseton tanpa katalis yang dilakukan pada suhu $425\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $1/\text{WHSV}$ 0,3 jam didapat produk berupa 100 persen aseton. Hal ini berarti bahwa tanpa katalis HZSM-5 maka tidak terjadi reaksi konversi.

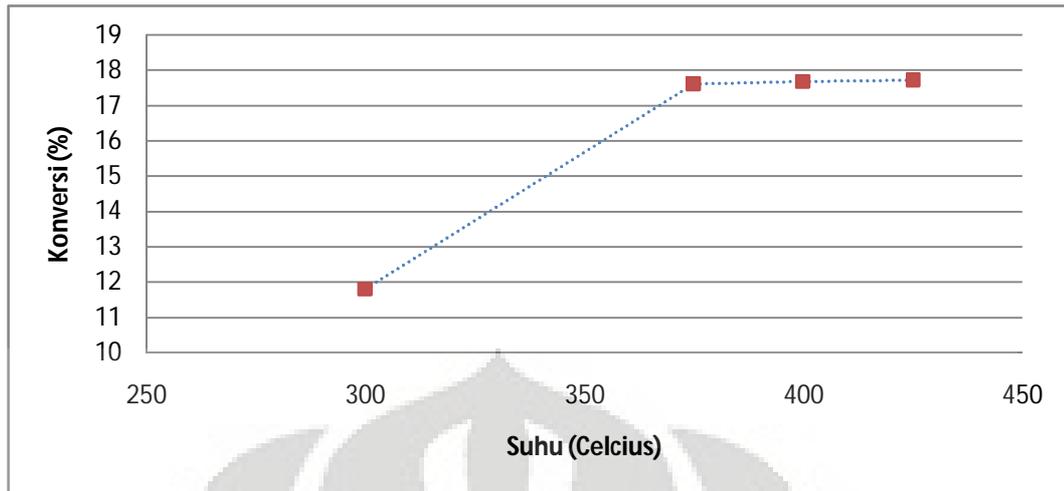
4.2.2 Pengaruh Temperatur terhadap Konversi Aseton dan Yield BTX

4.2.2.1 Pengaruh Temperatur terhadap Konversi Aseton

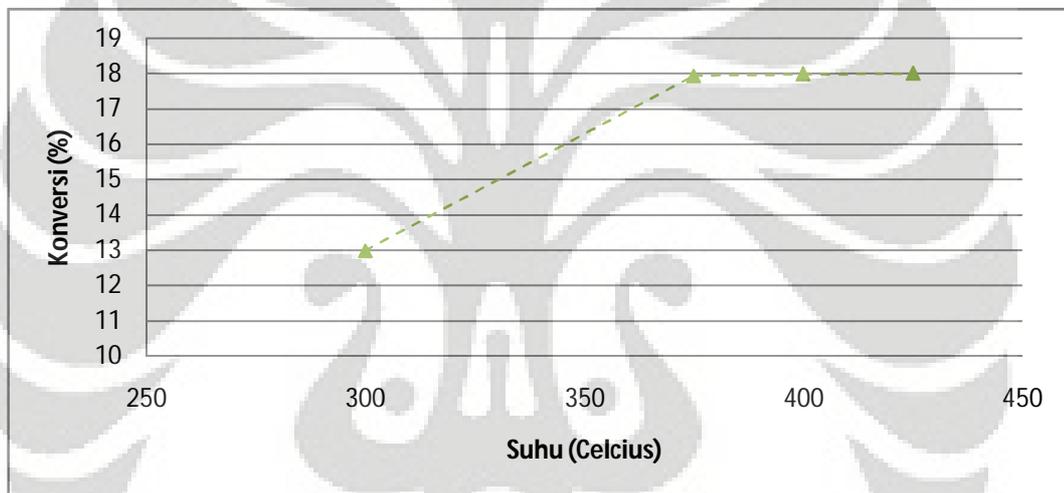
Dari analisis produk gas hasil reaksi antara aseton dengan katalis HZSM-5 dihasilkan senyawa BTX yang menandakan terjadinya reaksi aromatisasi. Selain itu, pada produk juga masih terdapat aseton yang tidak bereaksi. Aseton yang tidak bereaksi ini dapat digunakan untuk menghitung konversi dari reaktan aseton.



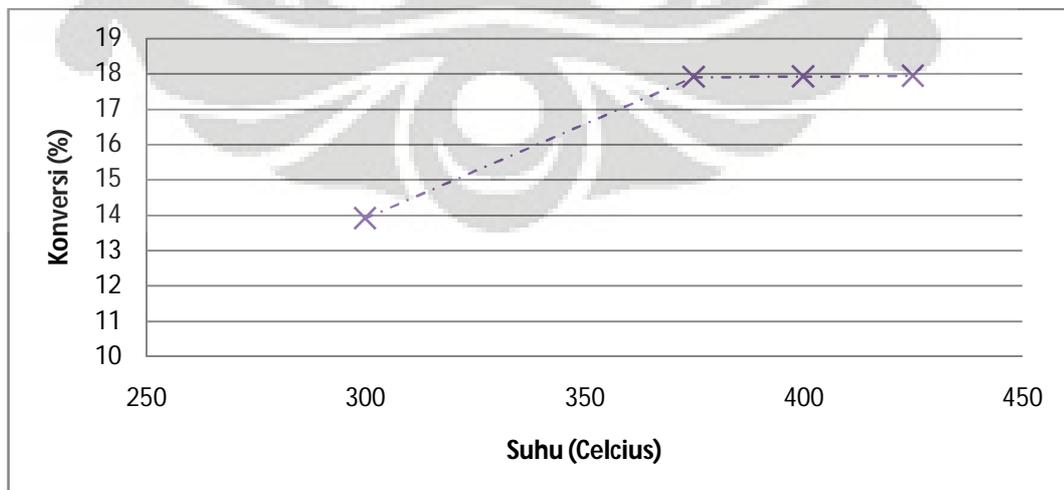
Gambar 4.3 Kurva Konversi Aseton pada $1/\text{WHSV}$ 0,14 jam



Gambar 4.4 Kurva Konversi Aseton pada 1/WHSV 0,149 jam



Gambar 4.5 Kurva Konversi Aseton pada 1/WHSV 0,155 jam



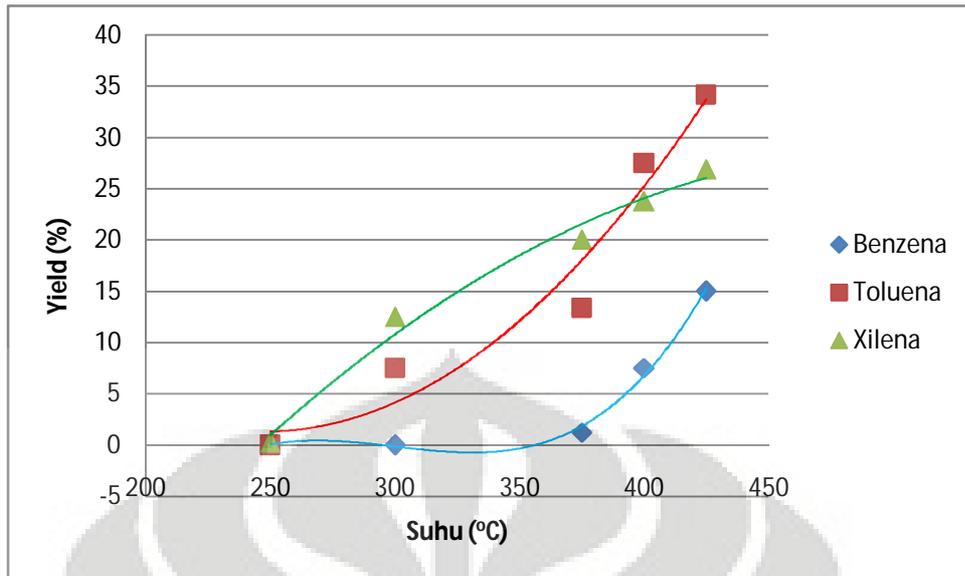
Gambar 4.6 Kurva Konversi Aseton pada 1/WHSV 0,175 jam

Dari gambar 4.3 s/d 4.6 dapat dilihat dari suhu 300°C sampai suhu 375°C, konversi akan semakin besar dengan semakin tingginya suhu. Pada suhu yang lebih tinggi, energi yang tersedia untuk melangsungkan reaksi akan lebih besar. Untuk reaksi endotermis, hal ini akan mempercepat laju reaksi. Namun, pada suhu 375°C sampai 425°C, konversi yang didapat cenderung sama. Konversi yang sama ini dikarenakan *Bronsted acidity* yang sama pada suhu 600K – 800K (Sumber: *New Solid Base Catalyst*). Fakta ini membuktikan bahwa suhu berperan penting dalam proses konversi katalitik ini karena suhu mempengaruhi *Bronsted acidity*. Konversi katalitik yang paling tinggi didapatkan pada suhu paling tinggi yang ada di percobaan ini yaitu 425°C sehingga suhu ini yang dipilih untuk percobaan berikutnya saat mengamati kestabilan katalis (deaktivasi katalis).

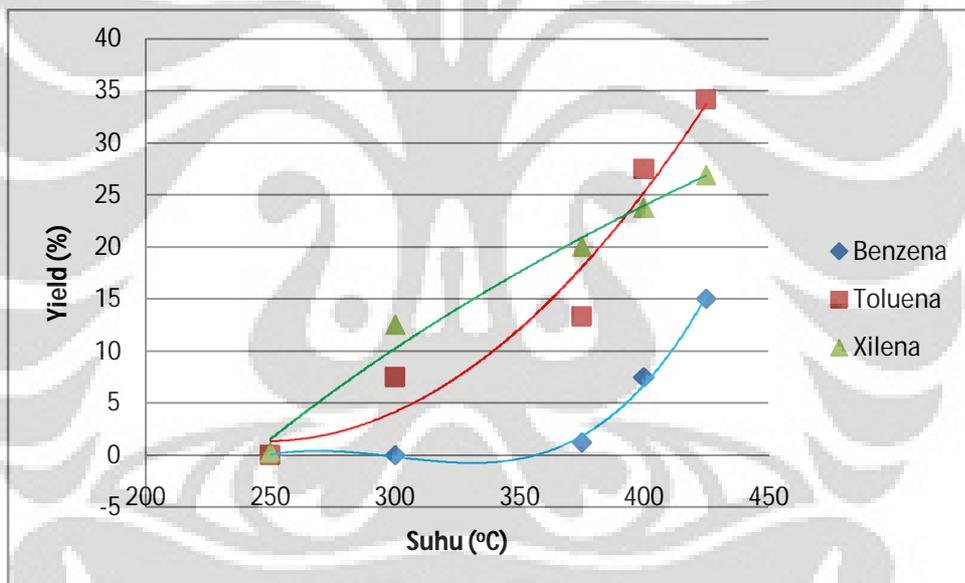
Hasil yang diperoleh masih lebih kecil dibandingkan penelitian yang dilakukan oleh Yin (2003) dengan katalis Ni-ZSM-5 dan reaktan n-heptana murni pada fasa cair dalam mikroreaktor unggun tetap bertekanan tinggi yang mencapai 91,8% dengan yield aromatik 65% ($T = 400^{\circ}\text{C}$, tekanan $\text{H}_2 = 0,2\text{MPa}$, rasio $\text{H}_2/\text{umpan} = 150$, $\text{LHSV} = 2\text{h}^{-1}$). Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Bhatia (1999) dengan katalis ZSM-5 dan reaktan minyak sawit (CPO) pada fasa gas dalam mikroreaktor unggun tetap bertekanan atmosferik yang menghasilkan konversi 99% dan yield BTX 27,1% ($T=350^{\circ}\text{C}$, $\text{WSHV} = 1\text{h}^{-1}$). Konversi yang kecil menjadi salah satu kekurangan dalam penelitian ini karena reaksi dilakukan dalam reaktor tumpak (*batch*) bertekanan atmosferik. Namun yield aromatik yang diperoleh telah mencapai lebih dari 50% sehingga menunjukkan hasil yang cukup menjanjikan.

4.2.2.2 Pengaruh Temperatur terhadap Yield BTX

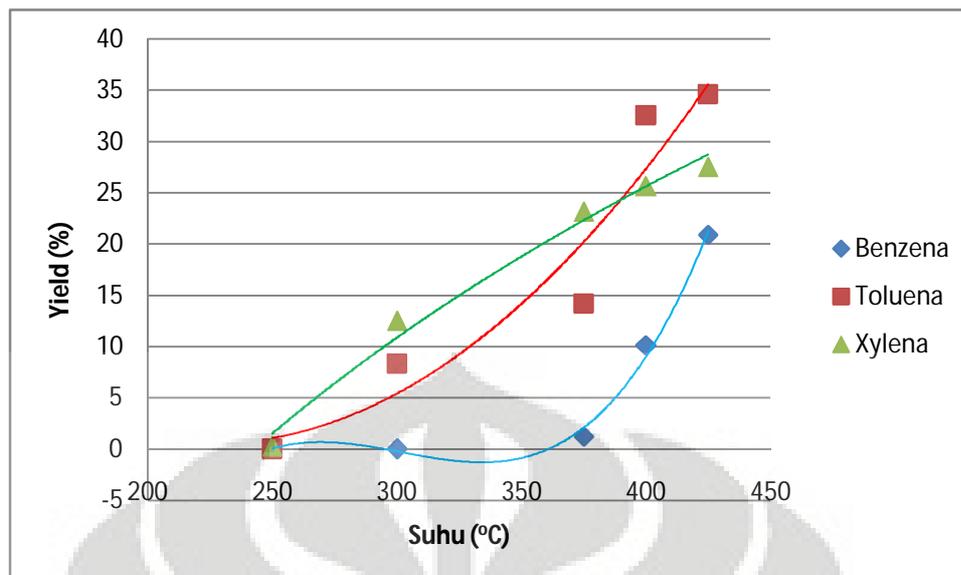
Produk hidrokarbon aromatik dalam percobaan terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.7 Pengaruh Temperature terhadap Distribusi Produk Aromatik pada 1/WHSV 0,125 jam



Gambar 4.8 Pengaruh Temperatur terhadap Distribusi Produk Aromatik pada 1/WHSV 0,15 jam



Gambar 4.9 Pengaruh Teperatur terhadap Distribusi Produk Aromatik pada 1/WHSV 0,2 jam

Gambar 4.7 s/d 4.9 di atas memperlihatkan pengaruh temperature terhadap distribusi produk aromatik. Reaksi aromatisasi adalah reaksi endotermis, sehingga secara umum laju reaksi akan naik seiring dengan kenaikan suhu. Hal ini tercermin dari yield produk hidrokarbon aromatik pada reaksi dengan menggunakan katalis HZSM-5 yang semakin tinggi seiring bertambah tingginya suhu reaksi. Aromatik yang paling mudah terbentuk adalah xilena. Hal ini dapat dilihat pada produk 250 °C telah terdapat produk xilena sedangkan produk aromatik lain yang lebih ringan (benzena dan toluena) belum terbentuk. Kemudian pada suhu 300°C toluena mulai terbentuk. Benzena baru akan terbentuk pada suhu di atas 375°C.

Katalis ZSM-5 mengandung sisi asam Brönsted kuat yang berkaitan dengan keberadaan alumunium di struktur rangkanya serta asam Lewis yang berkaitan dengan keberadaan spesi tambahan dari alumunium (gugus AlO^+). Asam Brönsted dapat membentuk ion karbenium dan karbonium sementara asam Lewis hanya dapat membentuk ion karbenium. (Asaftei, 2009). Pembentukan kedua jenis ion ini terutama ion karbonium diperlukan dalam reaksi perengkahan.

Keasaman tinggi dari ZSM-5 dapat memutus ikatan-ikatan C-C maupun C-H dalam rantai dan mengubahnya menjadi produk hidrokarbon dengan rantai yang lebih pendek. Proses ini diawali dengan protonasi atau penyerangan ikatan rangkap oleh ion H^+ yang dilepaskan dari asam kuat ZSM-5. Protonasi ini akan

menghasilkan pembentukan ion karbonium yang sangat tak stabil. Ion karbonium ini akan menghasilkan pemutusan ikatan menjadi senyawa alkana baru atau hidrogen dan ion karbenium.

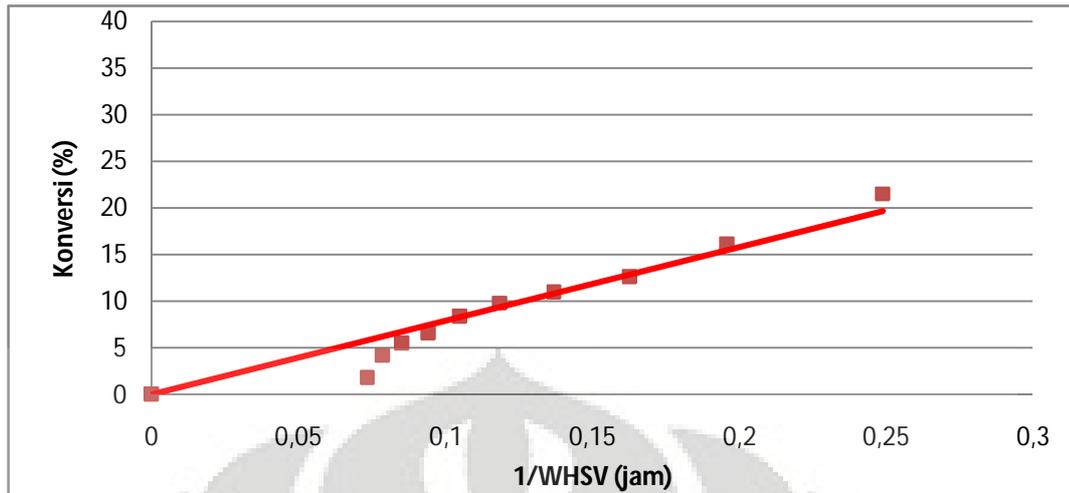
Selain itu, Gambar 4.7 s/d 4.9 mengindikasikan bahwa ada sebagian xilena yang akan mengalami dealkilasi membentuk benzena dan toluena. Hal ini dibuktikan dari laju penambahan xilena yang awalnya jauh lebih tajam dari toluena dan benzena, setelah suhu 400°C , laju penambahan toluena dan benzena akan lebih tajam dari laju pembentukan xilena. Sebagian xilena akan mengalami dealkilasi dan perengkahan menjadi benzena dan toluena. Laju penambahan xilena pada gambar 4.7 s/d 4.9 semakin sedikit dengan semakin tingginya suhu reaksi berarti semakin banyak xilena yang mengalami perengkahan dan dealkilasi. Sehingga, diindikasikan bahwa perengkahan dan dealkilasi akan meningkat dengan meningkatnya suhu reaksi.

Dari gambar 4.7 s/d 4.9 dapat disimpulkan bahwa maka xilena terbentuk terlebih dahulu kemudian diikuti dengan pembentukan toluena dan benzena kemudian dengan semakin tingginya suhu reaksi xilena akan mengalami perengkahan dan dealkilasi menjadi benzena dan toluena.

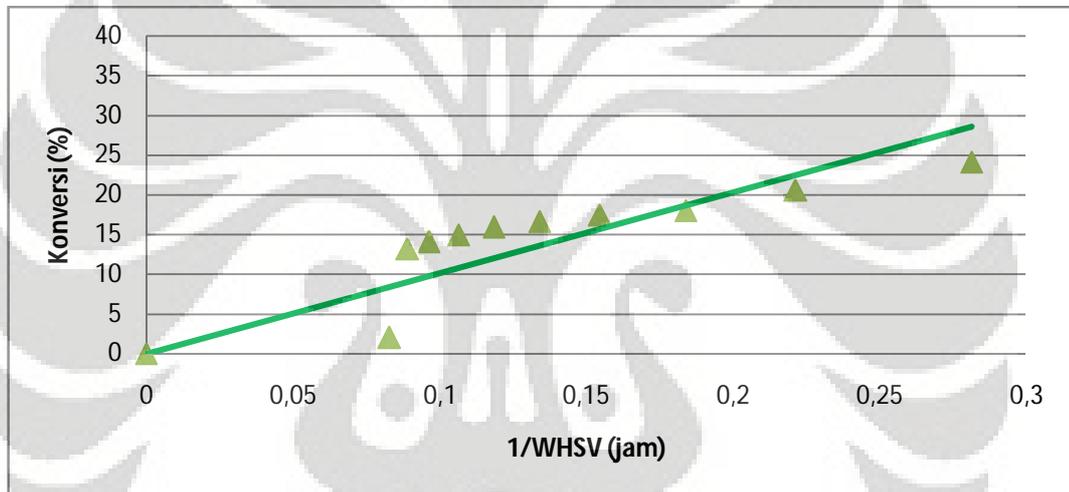
4.2.3 Pengaruh Waktu Kontak antara Reaktan Aseton dan Katalis HZSM-5 (1/WHSV) terhadap Konversi Aseton dan Yield BTX

4.2.3.1 Pengaruh Waktu Kontak antara Reaktan Aseton dan Katalis HZSM-5 (1/WHSV) terhadap Konversi Aseton

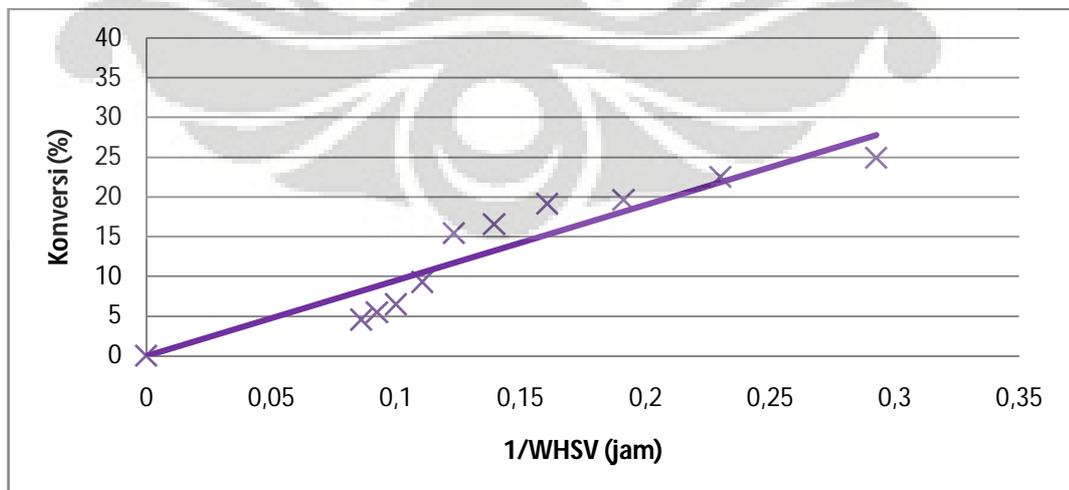
Dari hasil analisa produk gas dengan menggunakan GC FID didapat bahwa masih ada aseton yang tidak terkonversi. Data peak area aseton yang didapat dari hasil GC FID dapat digunakan untuk mengetahui aseton yang tidak terkonversi sehingga kita dapat mengetahui konversi reaktan aseton tersebut.



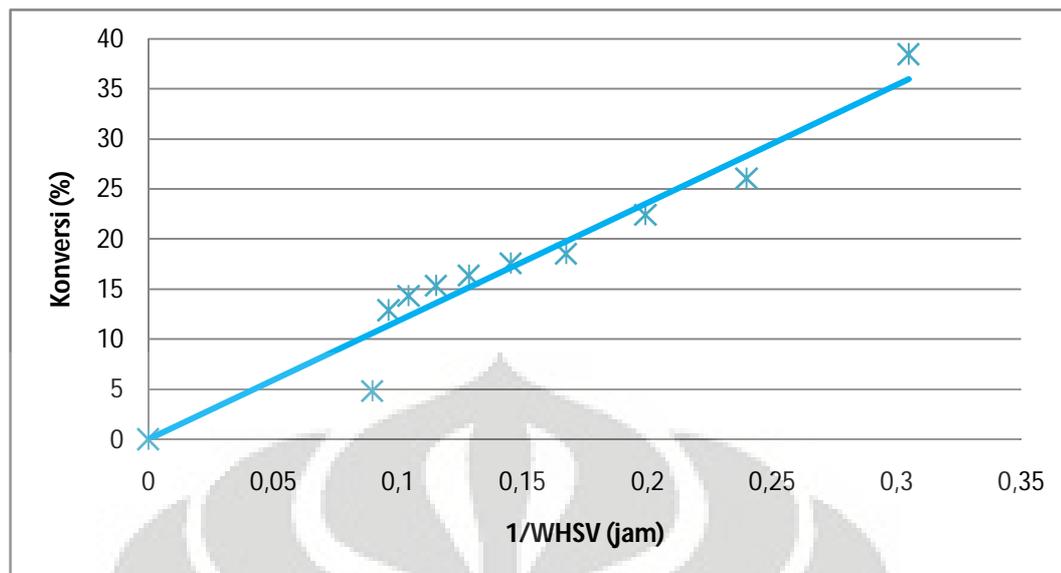
Gambar 4.10 Kurva Konversi Aseton pada Suhu 300°C



Gambar 4.11 Kurva Konversi Aseton pada Suhu 375°C



Gambar 4.12 Kurva Konversi Aseton pada Suhu 400°C



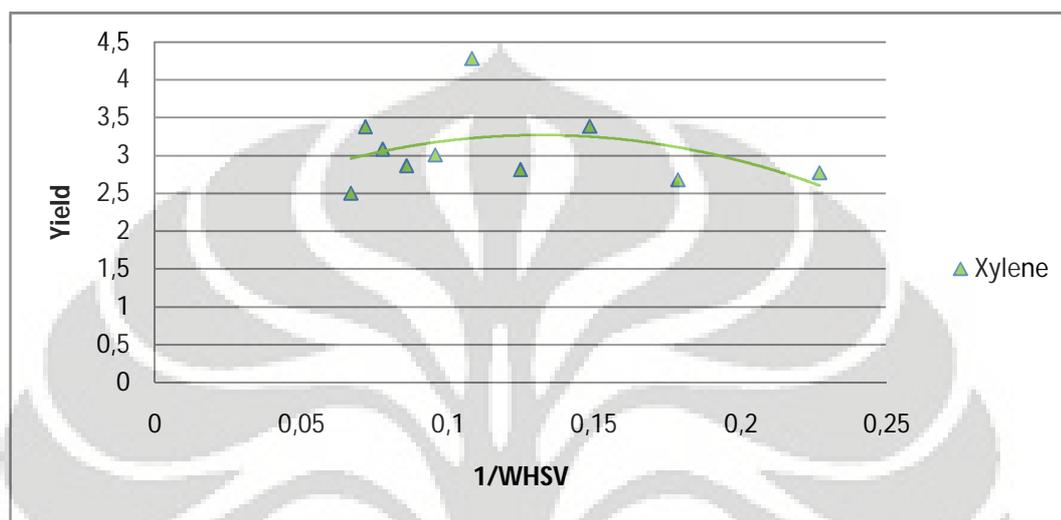
Gambar 4.13 Kurva Konversi Aseton pada Suhu 425°C

Dari gambar 4.10 s/d 4.13 diatas dapat dilihat bahwa konversi yang didapat semakin besar dengan semakin tingginya waktu kontak reaktan aseton dengan katalis HZSM-5 (1/WHSV) karena semakin lama kontak antara reaktan dan katalis maka jumlah reaksi yang terjadi akan semakin meningkat. Hal ini membuktikan bahwa waktu kontak antara reaktan dan katalis merupakan variable operasi yang dapat mempengaruhi berlangsungnya reaksi aseton menjadi hidrokarbon aromatik.

Peningkatan waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis dapat meningkatkan laju difusi eksternal (difusi ruah), sehingga tumbukan antar molekul reaktan menjadi bertambah. Secara eksperimental, daerah kinetika yang telah tidak dikontrol oleh difusi eksternal melainkan dikontrol oleh reaksi kimia, ditandai dengan nilai konversi yang telah mencapai konstan walaupun waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis ditingkatkan. Pada Gambar 4.12 terlihat bahwa secara eksperimental tidak diperoleh daerah yang memiliki nilai konversi konstan. Dengan demikian, penelitian yang dilakukan ini masih sangat dipengaruhi oleh difusi eksternal.

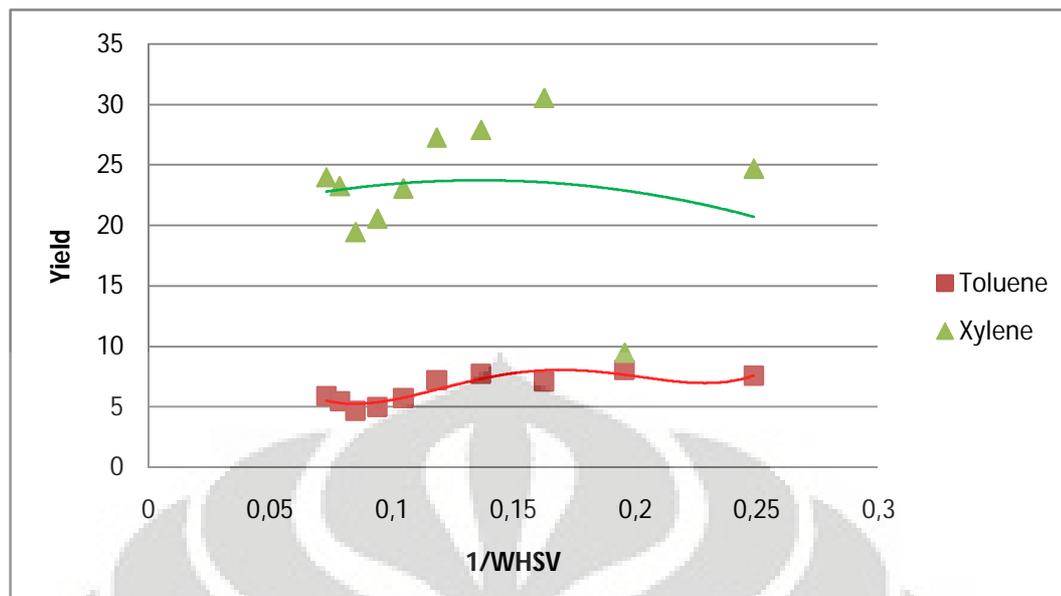
4.2.3.2 Pengaruh Waktu Kontak antara Reaktan Aseton dan Katalis HZSM-5 (1/WHSV) terhadap Yield BTX

Untuk melihat pengaruh waktu kontak reaktan aseton dan katalis HZSM-5 terhadap yield Benzena, Toluena, dan Xilena yang dihasilkan maka dibuat kurva yield produk pada setiap waktu kontak dalam setiap variasi suhu yang ada.



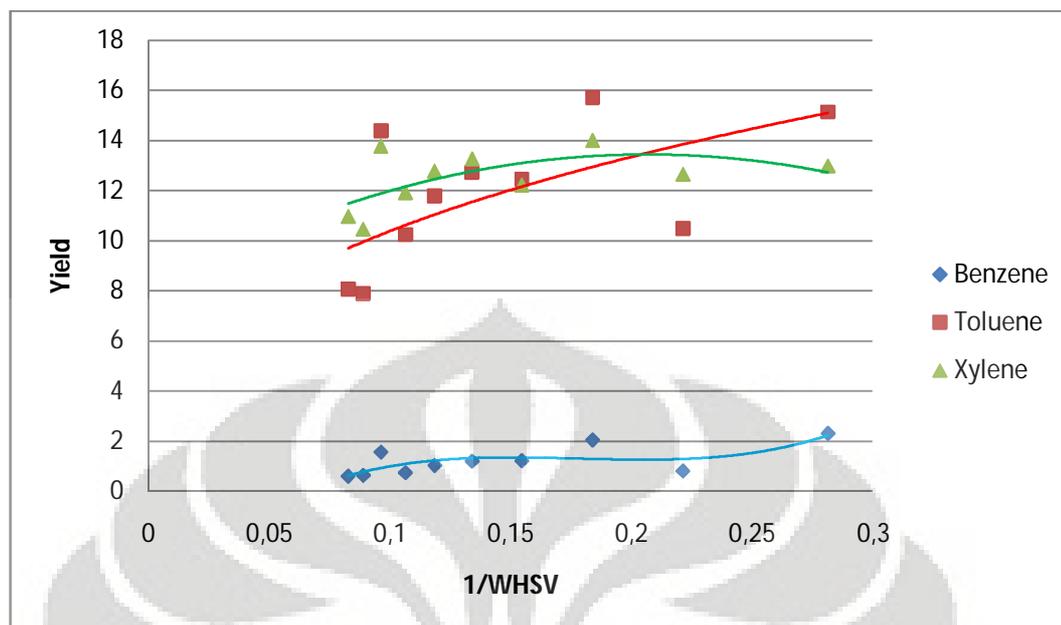
Gambar 4.14 Kurva Produk yang Dihasilkan pada Suhu 250°C

Gambar 4.14 di atas menunjukkan distribusi produk pada suhu 250°C dengan waktu kontak antara reaktan aseton dengan katalis (1/WHSV) sebesar 0,06 jam s/d 0,23 jam. Pada suhu 250°C, produk yang dihasilkan hanyalah xilena. Artinya, pada suhu yang paling rendah yaitu 250°C, produk 50aromatik50 yang dominan yang dihasilkan adalah xilena. Yield xilena awalnya akan semakin tinggi dengan semakin lamanya waktu kontak reaktan aseton dengan katalis, namun waktu kontak antara reaktan aseton dengan katalis diatas 0,15 jam akan menurunkan yield xilena karena semakin lama waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis maka konversi yang terjadi akan makin sempurna sehingga xilena yang telah terbentuk akan terkonversi lagi menjadi senyawa lain.



Gambar 4.15 Kurva Produk yang Dihasilkan pada Suhu 300°C

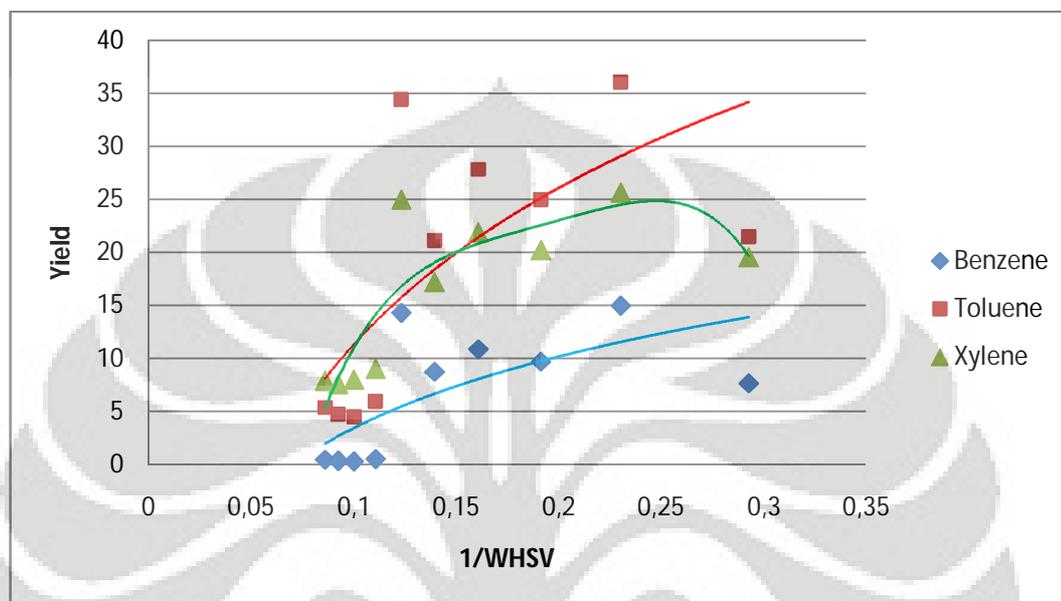
Gambar 4.15 di atas menunjukkan distribusi produk pada suhu 300°C dengan waktu kontak antara reaktan aseton dengan katalis ($1/WHSV$) sebesar 0,07 jam s/d 0,25 jam. Pada suhu 300°C, produk yang dihasilkan adalah xilena dan toluena. Yield xilena awalnya akan semakin tinggi dengan semakin lamanya waktu kontak reaktan aseton dengan katalis, namun waktu kontak antara reaktan aseton dengan katalis diatas 0,15 jam akan menurunkan yield xilena karena semakin lama waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis maka konversi yang terjadi akan makin sempurna sehingga xilena yang telah terbentuk akan terkonversi lagi menjadi senyawa lain. Yield toluena pada produk hasil reaksi suhu 300°C dari 0,07 jam sampai 0,25 jam menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak reaktan aseton dengan katalis maka yield toluene juga akan semakin tinggi. Dari gambar diatas dapat disimpulkan bahwa yield aromatic yang lebih ringan (toluena) akan cenderung meningkat dengan meningkatnya waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis, sedangkan yield aromatic yang lebih berat (xilena) akan menurun. Distribusi yield aromatic ini menjelaskan bahwa semakin lama waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis maka produk aromatic lebih berat (xilena) akan mengalami reaksi dealkilasi menjadi produk aromatic yang lebih ringan (dalam hal ini adalah toluena). Artinya, pada suhu 300°C, produk aromatic yang dominan dihasilkan adalah toluena.



Gambar 4.16 Kurva Produk yang Dihasilkan pada Suhu 375°C

Gambar 4.16 di atas menunjukkan distribusi produk pada suhu 375°C dengan waktu kontak antara reaktan aseton dengan katalis ($1/WHSV$) sebesar 0,08 jam s/d 0,28 jam. Pada suhu 375°C, produk yang dihasilkan adalah xilena, toluena, dan benzena. Yield xilena awalnya akan semakin tinggi dengan semakin lamanya waktu kontak reaktan aseton dengan katalis, namun waktu kontak antara reaktan aseton dengan katalis diatas 0,2 jam akan menurunkan yield xilena karena semakin lama waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis maka konversi yang terjadi akan makin sempurna sehingga xilena yang telah terbentuk akan terkonversi lagi menjadi senyawa lain. Yield toluena pada produk hasil reaksi suhu 375°C dari 0,08 jam sampai 0,28 jam menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak reaktan aseton dengan katalis maka yield toluene juga akan semakin tinggi. Yield benzena pada produk hasil reaksi suhu 375°C dari 0,08 jam sampai 0,28 jam menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak reaktan aseton dengan katalis maka yield benzena juga akan semakin tinggi. Jadi, dapat disimpulkan bahwa yield aromatik yang lebih ringan (toluene dan benzena) akan cenderung meningkat dengan meningkatnya waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis, sedangkan yield aromatik yang lebih berat (xilena) akan menurun. Distribusi yield aromatik ini menjelaskan bahwa semakin lama waktu kontak antara reaktan

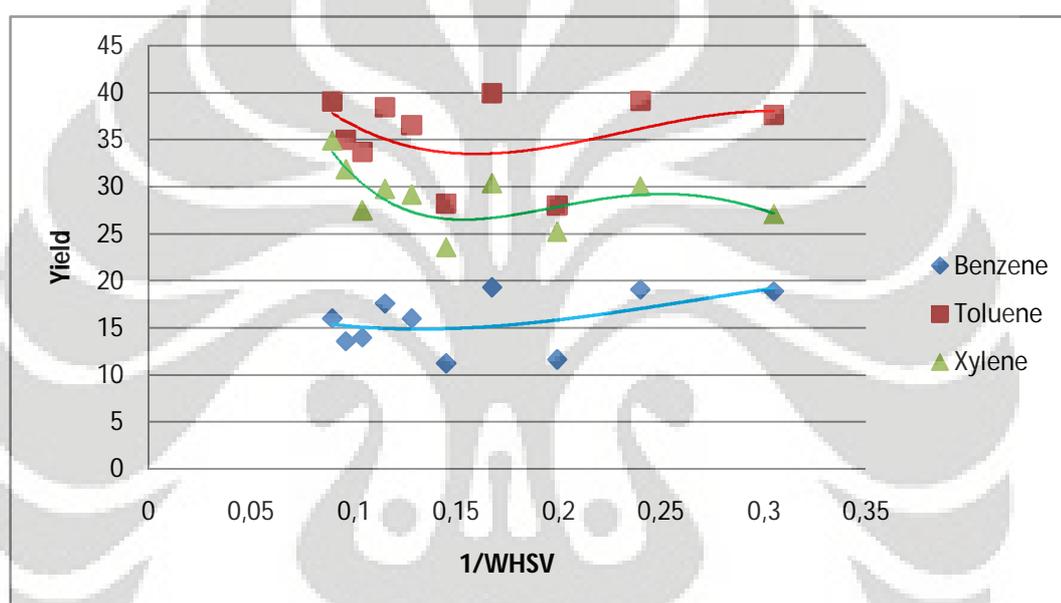
aseton dan katalis maka produk aromatik lebih berat (xilena) akan mengalami reaksi dealkilasi menjadi produk aromatik yang lebih ringan (dalam hal ini adalah toluena dan benzena). Artinya, pada suhu 375°C, produk utama yang dihasilkan adalah toluena dan benzena.



Gambar 4.17 Kurva Produk yang Dihasilkan pada Suhu 400°C

Gambar di atas menunjukkan distribusi produk pada suhu 400°C dengan waktu kontak antara reaktan aseton dengan katalis ($1/WHSV$) sebesar 0,08 jam s/d 0,3 jam. Pada suhu 400°C, produk yang dihasilkan adalah xilena, toluena, dan benzena. Yield xilena awalnya akan semakin tinggi dengan semakin lamanya waktu kontak reaktan aseton dengan katalis, namun waktu kontak antara reaktan aseton dengan katalis diatas 0,25 jam akan menurunkan yield xilena karena semakin lama waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis maka konversi yang terjadi akan makin sempurna sehingga xilena yang telah terbentuk akan terkonversi lagi menjadi senyawa lain. Yield toluena pada produk hasil reaksi suhu 400°C dari 0,08 jam sampai 0,3 jam menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak reaktan aseton dengan katalis maka yield toluene juga akan semakin tinggi. Yield benzena pada produk hasil reaksi suhu 400°C dari 0,08 jam sampai 0,3 jam menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak reaktan aseton dengan katalis maka yield benzena juga akan semakin tinggi. Jadi, dapat disimpulkan

bahwa yield aromatik yang lebih ringan (toluena dan benzena) akan cenderung meningkat dengan meningkatnya waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis, sedangkan yield aromatik yang lebih berat (xilena) akan menurun. Distribusi yield aromatik ini menjelaskan bahwa semakin lama waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis maka produk aromatik lebih berat (xilena) akan mengalami reaksi dealkilasi dan perengkahan menjadi produk aromatik yang lebih ringan (dalam hal ini adalah toluena dan benzena). Artinya, pada suhu 400°C, produk utama yang dihasilkan adalah toluena dan benzena.



Gambar 4.18 Kurva Produk yang Dihasilkan pada Suhu 425°C

Gambar di atas menunjukkan distribusi produk pada suhu 425°C dengan waktu kontak antara reaktan aseton dengan katalis ($1/WHSV$) sebesar 0,09 jam s/d 0,31 jam. Pada suhu 425°C, produk yang dihasilkan adalah xilena, toluena, dan benzena. Yield xilena awalnya akan semakin tinggi dengan semakin lamanya waktu kontak reaktan aseton dengan katalis, namun waktu kontak antara reaktan aseton dengan katalis diatas 0,25 jam akan menurunkan yield xilena karena semakin lama waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis maka konversi yang terjadi akan makin sempurna sehingga xilena yang telah terbentuk akan terkonversi lagi menjadi senyawa lain. Yield toluena pada produk hasil reaksi suhu 425°C dari 0,09 jam sampai 0,31 jam menunjukkan bahwa semakin lama

waktu kontak reaktan aseton dengan katalis maka yield toluena juga akan semakin tinggi. Yield benzena pada produk hasil reaksi suhu 425°C dari 0,9 jam sampai 0,31 jam menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak reaktan aseton dengan katalis maka yield benzene juga akan semakin tinggi. Jadi, dapat disimpulkan bahwa yield aromatik yang lebih ringan (toluena dan 55benzena) akan cenderung meningkat dengan meningkatnya waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis, sedangkan yield aromatik yang lebih berat (xilena) akan menurun. Distribusi yield aromatik ini menjelaskan bahwa semakin lama waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis maka produk aromatik lebih berat (xilena) akan mengalami reaksi dealkilasi menjadi produk aromatik yang lebih ringan (dalam hal ini adalah toluena dan benzena). Artinya, pada suhu 425°C, produk utama yang dihasilkan adalah toluena dan benzena.

Dengan semakin lamanya waktu kontak antara reaktan aseton dengan katalis maka jumlah produk benzena, toluena, dan xilena semakin tinggi. Senyawa BTX yang terbentuk dalam percobaan merupakan hasil dari reaksi aromatisasi alkana ringan hasil perengkahan. Alkana ringan yang terbentuk sangatlah bervariasi sehingga reaksi aromatisasi yang terjadi sangatlah kompleks dan melibatkan sejumlah besar reaksi heterogen. Akan tetapi secara umum reaksi aromatisasi alkana ringan dapat dibagi menjadi tiga tahap: 1) konversi alkana menjadi alkana ringan; 2) perengkahan dan oligomerisasi alkana; dan 3) aromatisasi alkana ringan menjadi hidrokarbon 55eactor55 (Asaftei, 2009).

Sedangkan reaksi yang terlibat terdiri dari: 1) protonasi dan aktivasi ikatan C-H melalui ion karbonium pentavalen dan ikatan C-H melalui ion karbenium trivalent; 2) dehidrogenasi ion karbonium menjadi ion karbenium sehingga membentuk alkana ringan; 3) oligomerisasi alkana ringan menjadi alkana yang lebih berat, C6-C10; 4) isomerisasi secara cepat; 5) pemutusan ikatan; 6) dehidrogenasi alkana yang lebih tinggi menjadi dialkena; 7) siklisasi dialkena menjadi sikloalkena; 8) dehidrogenasi sikloalkena menjadi siklodialkena dan akhirnya membentuk 55eactor55 (Asaftei, 2009).

4.3 Kondisi Operasi Optimum

Berdasarkan hasil reaksi antara aseton dengan katalis HZSM-5 dalam

reaktor unggun tetap (fixed bed) bertekanan atmosferik, diperoleh kondisi optimum berikut ini.

Tabel 4.1 Kondisi Operasi Optimum Reaksi antara Aseton Menggunakan Katalis HZSM-5

Suhu Reaksi	425°C
1/WHSV	0,3 jam
Konversi	90 %
Yield Benzena	19 %
Yield Toluena	38 %
Yield Xilena	27 %

Kondisi operasi optimum tersebut dipilih karena menghasilkan konversi aseton maksimum dan yield BTX yang tinggi.

4.4 Analisa Gas Chromatography/Mass Spectroscopy (GC/MS)

Untuk menganalisa dan mengetahui produk hasil reaksi secara detail dan akurat maka digunakan analisa Gas Chromatography/Mass Spectroscopy (GC/MS). Metode yang dipakai adalah dengan menggunakan aplikasi dari spectroscopic atau detector elektroanalisis untuk memonitor keluaran dari kolom secara kontinyu. Biasanya, prosedur ini memerlukan instrumen terkomputerisasi dan memory computer yang besar untuk menyimpan data spectra dan elektrokimia untuk selanjutnya ditampilkan sebagai spectra dan chromatogram. Salah satu hasil GC/MS yang dilakukan pada produk yang dihasilkan dari reaksi pada suhu 425°C dapat dilihat pada table 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Hasil Analisa GC/MS pada Produk Suhu 425°C

Waktu Retensi	Area (%)	Senyawa
1,84	4,68	3,5 dimetil siklopentena
2,07	1,05	4,4 dimetil siklopentena
2,54	0,04	5,5 dimetil 1,3 heksadiena

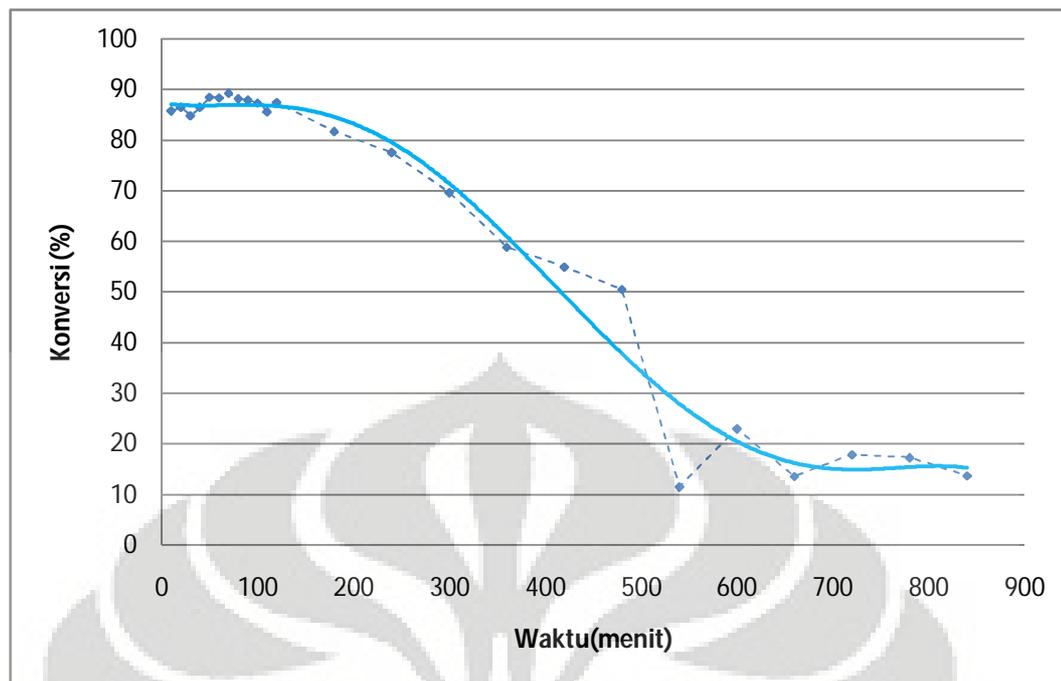
Waktu Retensi	Area (%)	Senyawa
2,84	0,61	4 metil sikloheksena
2,99	0,51	3 metil 1,3,5 heksatriena
3,06	0,05	1 metil 1,4 sikloheksadiena
3,13	0,17	3 metil 1,3,5 heksatriena (cis)
3,33	0,27	1,2 dimetil siklopentadiena
3,45	1,4	2 metil 2,4 heksadiena
3,52	0,54	1 etil siklopentena
4,09	49,4	toluena
4,28	0,06	1,3 sikloheptadiena
4,39	0,19	etil siklopentena
5,28	0,2	1,2,3 trimetil siklopentena
5,88	0,46	1,2,3,4 tetrametil siklobutena
6,58	0,16	1,5 dimetil heksana
6,7	0,13	1,4 dimetil 1 sikloheksena
7,31	0,08	metil etil siklopentena
7,78	0,1	okta 2,4,6 triena
8,6	3,25	etilbenzena
8,87	0,04	1,2 dimetil 1,4 sikloheksadiena
9,19	26,49	p-xilena
10,38	2,74	o-xilena
12,26	0,06	benzena
14,02	0,1	propilbenzena
14,58	1,22	1 etil 2 metil benzena
14,65	1,38	1 etil 4 metil benzena
14,99	0,07	1,2,4 trimetil benzena
15,62	0,06	1 etil 3 metil benzena
16,48	0,84	1,2,3 trimetil benzena
18,92	0,08	7 metil okta 1,3,5 triena
20,01	0,08	1,2 dietil benzena

Waktu Retensi	Area (%)	Senyawa
22,15	0,06	1 etil 2,3 dimetil benzena
25,22	0,09	1 metil 2 propil benzena
27,86	0,08	2 butil 3 metil benzena
28,91	0,08	2,3 dimetil fenol
34	0,47	2 metil naphthalena
34,88	0,09	1 metil naphthalena
39,28	0,07	1 etil naphthalena
39,87	0,58	2,6 dimetil naphthalena
40,57	0,16	2,7 dimetil naphthalena
40,73	0,12	2,7 dimetil naphthalena
44,82	0,1	alpha isopropilnaphthalena

Dari hasil GC/MS dapat dilihat bahwa produk yang dihasilkan adalah berupa olefin, paraffin, sikloparafin, dan aromatik. Hampir semua produk hidrokarbon tidak mengandung ikatan oksigen, padahal reaktan aseton mengandung gugus karbonil. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi reaksi deoxygenation dari aseton. Hanya terdapat satu produk yang mengandung ikatan oksigen yaitu fenol. Sangat dimungkinkan oksigen terikat dalam produk samping berupa CO₂, CO, maupun H₂O. Hasil-hasil ini dapat digunakan untuk menentukan rute reaksi dari konversi aseton menjadi hidrokarbon aromatik.

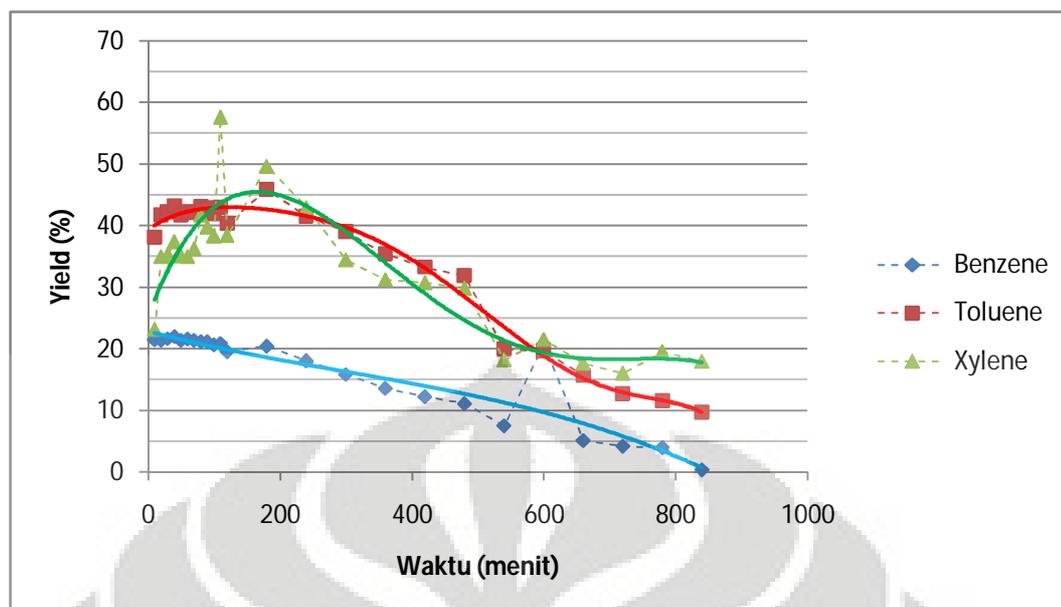
4.5 Uji Kestabilan Katalis

Untuk menguji kestabilan katalis dilakukan reaksi kontinyu selama 14 jam pada temperatur 425°C pada WHSV⁻¹ 0,3 jam menggunakan katalis HZSM-5 dengan rasio Si/Al 27.



Gambar 4.19 Kurva Konversi pada Uji Kestabilan Katalis Selama 14 jam (Pada Suhu 425°C pada $WHSV^{-1}$ 0,3 jam Menggunakan Katalis HZSM-5 dengan Rasio Si/Al 27)

Gambar 4.19 di atas menunjukkan konversi dari reaktan aseton yang berbeda-beda pada waktu reaksi yang berbeda-beda. Dapat dilihat bahwa penurunan yang signifikan dalam konversi ini terjadi setelah waktu 3 jam (180 menit). Dari 90% konversi pada 3 jam awal kemudian konversi turun terus sampai stabil pada 20 % setelah 14 jam. Hal ini berarti, katalis mulai terdeaktivasi setelah 3 jam bereaksi dengan reaktan aseton.



Gambar 4.20 Distribusi Produk Hidrokarbon Aromatik pada Uji Kestabilan Katalis Selama 14 jam (pada temperatur 425°C pada $WHSV^{-1}$ 0,3 jam Menggunakan Katalis HZSM-5 dengan Rasio Si/Al 27)

Gambar 4.20 di atas menunjukkan distribusi hidrokarbon aromatik yang berbeda-beda pada waktu reaksi yang berbeda-beda. Dapat dilihat bahwa aktivitas katalis tetap konstan selama 3 jam reaksi, setelah itu, produk aromatik berkurang hampir secara linear dengan bertambahnya waktu reaksi, benzena dari yield 22% pada 3 jam pertama berkurang menjadi 0,3% setelah 14 jam reaksi, toluena yang pada 3 jam awal memiliki yield sekitar 43% berkurang menjadi 9% setelah 14 jam reaksi, dan xilena pada 3 jam awal reaksi memiliki yield sekitar 47% berkurang menjadi 17% setelah 14 jam reaksi.

Perubahan pada distribusi hidrokarbon aromatik menunjukkan bahwa pada awalnya penurunan pada yield xilena jauh lebih tajam daripada penurunan yield pada toluena dan benzena. Hal ini semakin membuktikan bahwa xilena merupakan produk antara yang akan mengalami dealkilasi menjadi toluena dan benzena (4 s/d 10 jam reaksi). Kemudian, setelah 10 jam reaksi, laju penurunan xilena lebih lambat daripada laju penurunan toluena dan benzena. Hal ini membuktikan bahwa reaksi dealkilasi aromatik lebih terpengaruh oleh bloking inti aktif pada sisi asam daripada reaksi isomerisasi dan alkilasi.



Gambar 4.21 Kiri: Katalis Sebelum Digunakan untuk Reaksi. Kanan: Katalis yang Digunakan pada Uji Stabilitas Selama 14 jam (Pada Temperatur 425°C pada WHSV^{-1} 0,3 jam Menggunakan Katalis HZSM-5 dengan Rasio Si/Al 27)

Dari gambar 4.21 dapat diperkirakan bahwa katalis terdeaktivasi akibat deposisi kokas pada sisi aktif katalis sehingga menurunkan luas permukaan yang dapat diakses, dan pori katalis akan tertutup (*blocked*). Kokas ini dibuktikan dengan warna katalis yang menjadi hitam sedangkan warna awal katalis adalah putih.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Benzena, toluena, dan xilena (BTX) dapat diproduksi dari aseton dalam reaktor unggun tetap (*fixed bed*) bertekanan atmosferik dengan katalis HZSM-5.
2. Secara umum konversi dan yield produk benzena, toluena, dan xilena akan meningkat seiring dengan kenaikan suhu reaksi karena bertambahnya energi yang diperlukan untuk melaksanakan reaksi. Namun, pada suhu 375°C sampai 425°C, konversi yang didapat cenderung sama. Konversi yang sama ini dikarenakan *Bronsted acidity* yang sama pada suhu 600K – 800K.
3. Konversi dan yield produk juga akan meningkat seiring bertambahnya waktu kontak antara reaktan aseton dan katalis.
4. Produk hidrokarbon aromatik yang pertama terbentuk adalah xilena. Selanjutnya xilena akan mengalami dealkilasi menjadi benzena dan toluena.
5. Kondisi operasi optimum diperoleh pada suhu 425°C dan 1/WHSV 0,3 jam dengan konversi reaksi 90% dan yield produk BTX 84%.

5.2 Saran

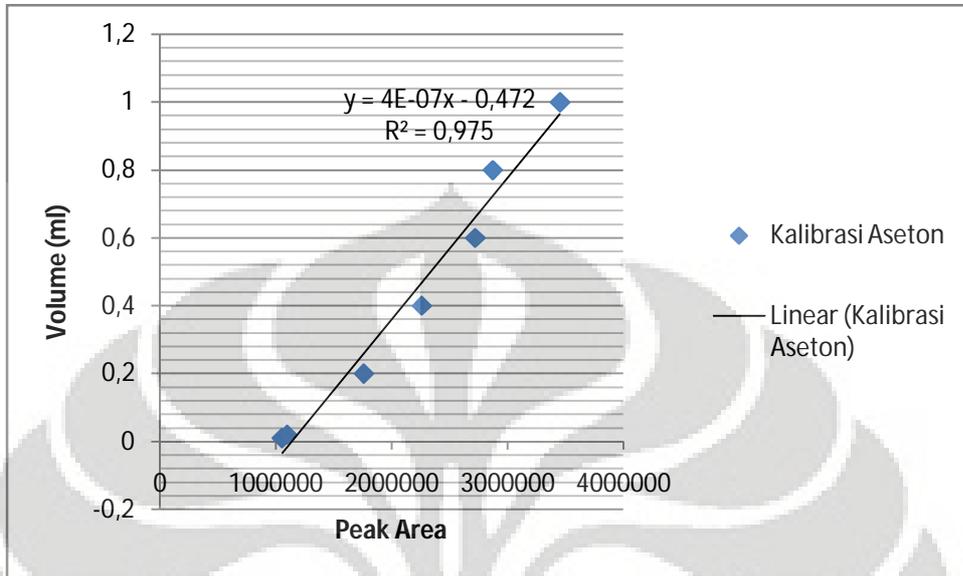
% konversi yang didapat dari penelitian ini relatif kecil jika dibanding dengan peneliti-peneliti lainnya. Hal ini kemungkinan disebabkan umpan yang masuk ke dalam reaktor yang terlalu besar sehingga perbandingan antara massa umpan dengan massa katalis terlalu besar yang mengakibatkan katalis tidak bekerja pada kondisi katalitiknya atau dengan kata lain ada sebagian umpan yang masuk ke reaktor tidak terkonversi karena hanya lewat pada permukaan katalis, tidak masuk ke dalam pori katalis (hanya bereaksi pada eksternal *surface*). Untuk penelitian selanjutnya, peneliti menyarankan untuk melakukan variasi berat katalis yang digunakan dalam reaksi.

DAFTAR PUSTAKA

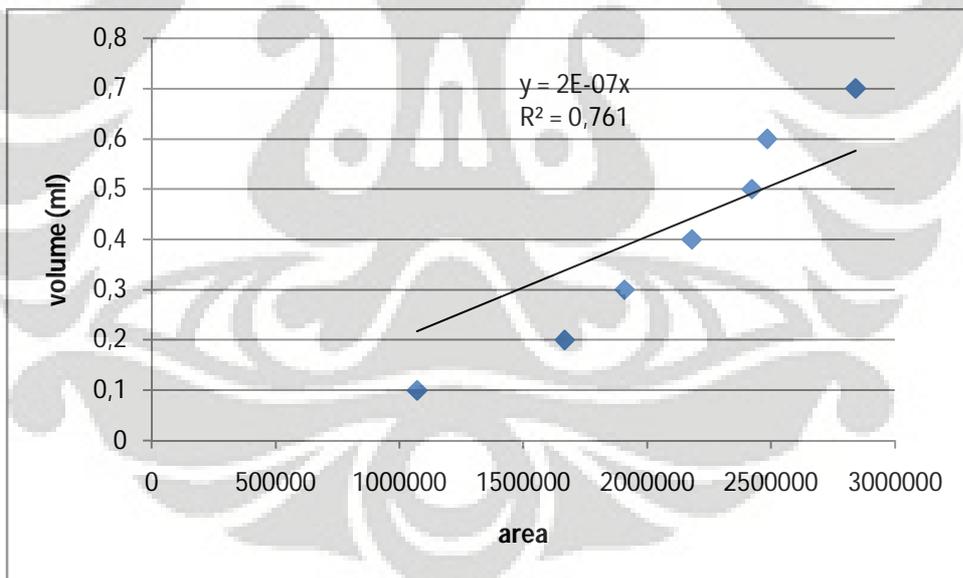
- Alamanar, M. 1997. Skripsi : *Preparasi dan Karakterisasi H-Zeolit dari Zeolit Alam Lampung dengan Metode Pertukaran Ion*. Jurusan Teknik Gas dan Petrokimia UI : Depok.
- Bhatia, S. 2000. *Zeolite Catalysis : Principles and Applications*. CRC Press, inc, Boca Raton : Florida.
- Chang, C. D., Lang, W. H., dan Bell W.K. 1981. *Molecular Shape-Selective Catalysis in Zeolite, in Catalysis of Organic Reactions*, edited by William R. Moser, Marcel Dekker Inc., hal. 73-94
- Chemical Division Manufacturing Industries Bureau. 2004. *Forecast of Global Supply And Demand Trends for Petrochemical Products*.
- Dariyus. 2005. Seminar : *Konversi Katalitik Hasil Biologi fermentasi Biomassa (Aseton-Butanol-Etanol) menjad Hidrokarbon Setaraf LPG dengan Menggunakan Katalis B_2O_3 /Zeolit Alam*. Jurusan Teknik Gas dan Petrokimia UI : Depok.
- Dharmawan, Y. 1998. Skripsi : *Preparasi, Karakterisasi dan Kinerja Katalis $CuO/ZnO/ZSM-5$ untuk Reaksi Hidrogenasi CO_2* . Jurusan Teknik Gas dan Petrokimia UI : Depok.
- Husin, H. 2009. Studi Deaktivasi pada Katalis Besi Molibdat (Fe/ Mo/ O).
- Lucas, A., Canizares, P., Duran, A. 2001. *Improving deactivation behaviour of HZSM-5 catalysts. App.Catal. A : General*, 206, hal. 87-93
- Lucas, A., Canizares, P., Duran, A., and Carrero, A. 1997. *Coke Formation, Location, nature and regeneration on Dealuminated HZSM-5 type Zeolites. Applied Catalysis A : General*, 156, hal. 299-317
- Meier, W.M and D.H. Olson. 1992. *Atlas of Zeolite Structure Types*. Third Revised Ed. Butterworth-Heinemann: London.

- Poerdjono, F. 1997. Seminar : *Aktivasi H-Zeolit dari ZAI Granular (Perbandingan Kapasitas Pertukaran Kation dan Kualitatif Inti Aktif)*. Jurusan Teknik Gas dan Petrokimia UI : Depok.
- Richardson, James T. 1989. *Principles of Catalyst Development*. Plenum Press, New York.
- Setiadi, S., Tsutsui, T., Kojima, T. 2003. *Conversion of Acetone to Aromatik Compound with HZSM-5*. The journal of Japan Institute of Energy, 82 (12), hal. 926-932.
- Setiadi. 2005. *Uji Kinerja Katalis ZSM-5 dalam Konversi Aseton menjadi Hidrokarbon Aromatik*. Prosiding Simposium dan Kongres Masyarakat Katalisis Indonesia, Gedung Widya Bhakti , Serpong.
- Subekti, A. 2007. *Deaktivasi Katalis Konverter-Hidrogen Di Pabrik Urea Kaltim-3*. Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis, 2(2-3), hal. 52-55.
- Sunarti, M dan Minta R. 1994. *Zeolit Tinjauan Literatur*. Pusat Dokumentasi dan Formasi Ilmiah, LIPI : Jakarta.
- Tanabe, Kozo, Makoto Misono, et al. 1989. *New Solid Acids and Bases. Their Catalytic Properties*. Kondansha LTD and Elsevier Science Publisher : Tokyo.
- Toni. 2008. *Produksi Minyak 2009 Turun 17 Ribu Barel/ Hari*. [Online] Available from : <http://indonesiaenergywatch.com> [Accessed 17:05:09]

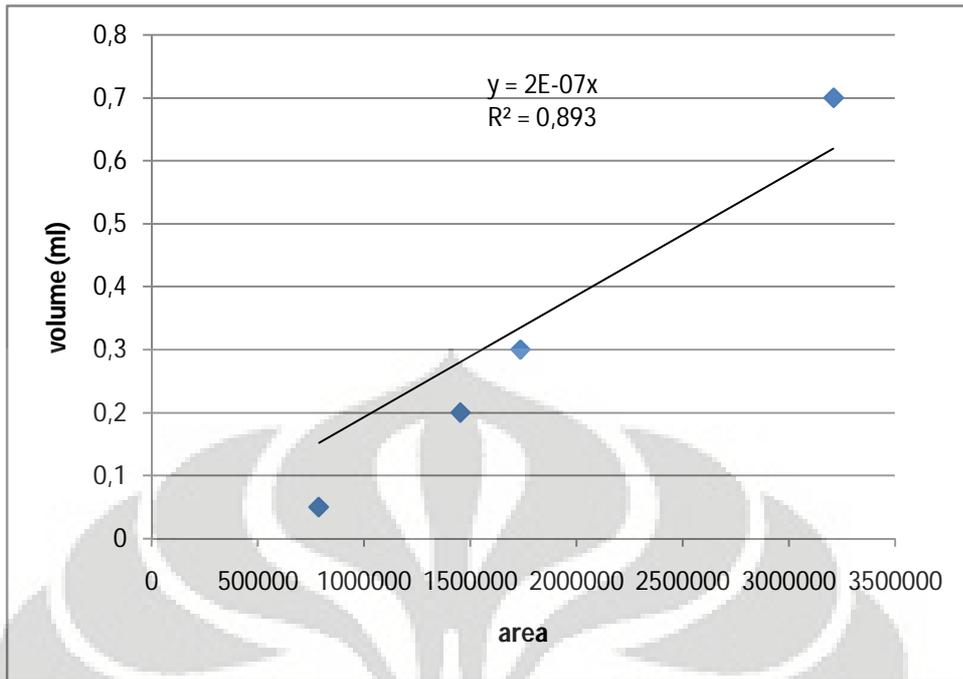
LAMPIRAN A
DATA KALIBRASI



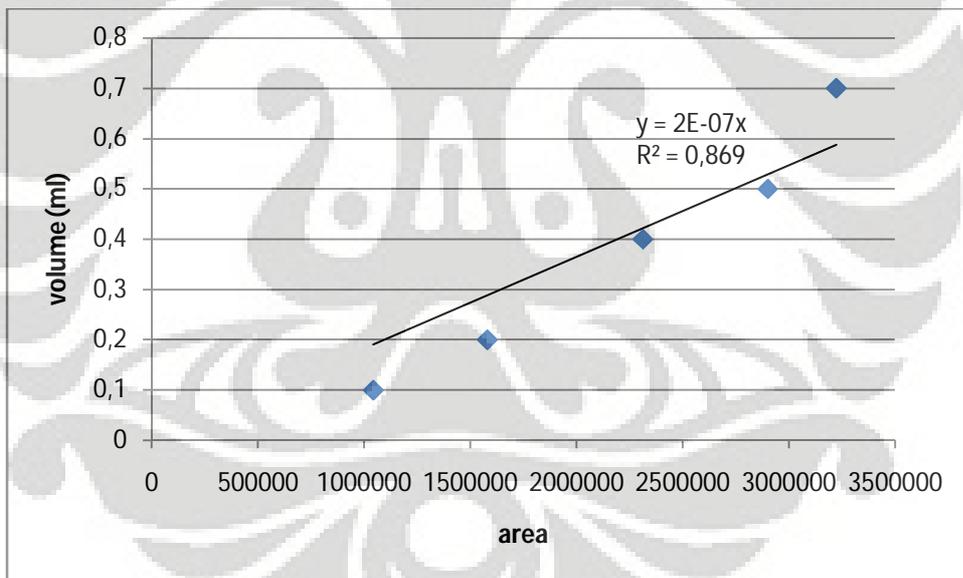
Gambar 1. Kurva Kalibrasi Aseton



Gambar 2. Kurva Kalibrasi Benzena



Gambar 3. Kurva Kalibrasi Toluena



Gambar 4. Kurva Kalibrasi Xilena

LAMPIRAN B
HASIL PERCOBAAN

Tabel 1. Data Percobaan pada Suhu 250°C

Laju alir carrier	Peak Area per 1 ml produk yang diinjeksikan					Konversi	Yield			1/WHSV
	Aseton sebelum reaksi	Aseton setelah reaksi	Benzena	Toluena	Xilena		Benzena	Toluena	Xilena	
240	3101176	3069822	0	0	50662	1,011036	0	0	2,505179	0,066939
220	3130730	2933913	0	0	69443	6,286617	0	0	3,381854	0,071918
200	3162454	2929371	0	0	64447	7,370321	0	0	3,088326	0,077843
180	3172568	2828272	0	0	60194	10,85228	0	0	2,869879	0,086054
160	3193657	2820731	0	0	63814	11,67708	0	0	3,010607	0,095796
140	3215210	2813064	0	0	91676	12,50761	0	0	4,279273	0,108322
120	3238598	2806196	0	0	60968	13,35152	0	0	2,813546	0,12494
100	3256809	2799667	0	0	74004	14,0365	0	0	3,385184	0,148614
80	3337498	2778611	0	0	60915	16,74569	0	0	2,682239	0,178819
60	3443549	2748265	0	0	66170	20,19091	0	0	2,777121	0,227255

Tabel 2. Data Percobaan pada Suhu 300°C

Laju alir carrier	Peak Area per 1 ml produk yang diinjeksikan					Konversi	Yield			1/WHSV
	Aseton sebelum reaksi	Aseton setelah reaksi	Benzena	Toluena	Xilena		Benzena	Toluena	Xilena	
240	3101176	3045426	0	14235	48535	1,797705	0	5,890572	24,00001	0,07335
220	3130730	2998275	0	13455	47767	4,230802	0	5,483447	23,26239	0,078806
200	3162454	2987957	0	11665	40619	5,517772	0	4,677877	19,46479	0,085299
180	3172568	2963729	0	12549	43213	6,582649	0	5,006833	20,60273	0,094296
160	3193657	2926677	0	14472	48950	8,359695	0	5,713605	23,09356	0,104972
140	3215210	2898714	0	18431	58469	9,843712	0	7,199574	27,29229	0,118697
120	3238598	2882506	0	20076	60500	10,99525	0	7,753053	27,91949	0,136907
100	3256809	2845763	0	18581	66821	12,62113	0	7,112785	30,5661	0,162848
80	3337498	2799296	0	21876	21587	16,12591	0	8,060921	9,505293	0,195947
60	3443549	2701542	0	21587	58934	21,54774	0	7,581751	24,7343	0,249022

Tabel 3. Data Percobaan pada Suhu 375°C

Laju alir carrier	Peak Area per 1 ml produk yang diinjeksikan					Konversi	Yield			1/WHSV
	Aseton sebelum reaksi	Aseton setelah reaksi	Benzena	Toluena	Xilena		Benzena	Toluena	Xilena	
240	3101176	3038695	17231	194846	221909	2,014752	0,6054065	8,062904	10,97315	0,082906
220	3130730	2718844	18571	193357	214947	13,15623	0,6426017	7,880066	10,46786	0,089072
200	3162454	2717109	45850	358997	287439	14,08226	1,5611333	14,39643	13,77419	0,096412
180	3172568	2698577	21985	256784	250058	14,94029	0,7447613	10,24524	11,92206	0,10658
160	3193657	2685430	30680	298724	270908	15,91364	1,0284274	11,79375	12,78086	0,118647
140	3215210	2680780	36196	325709	284440	16,62193	1,2004805	12,72295	13,27716	0,134161
120	3238598	2673934	37052	322610	265157	17,43545	1,2149094	12,45872	12,23644	0,154742
100	3256809	2671278	62833	410741	306339	17,97867	2,0421847	15,72312	14,01294	0,184063
80	3337498	2652076	25873	284657	287576	20,537	0,8094689	10,48911	12,66269	0,221474
60	3443549	2613622	77249	431205	309738	24,10092	2,3035982	15,14471	12,99955	0,281463

Tabel 4. Data Percobaan pada Suhu 400°C

Laju alir carrier	Peak Area per 1 ml produk yang diinjeksikan					Konversi	Yield			1/WHSV
	Aseton sebelum reaksi	Aseton setelah reaksi	Benzena	Toluena	Xilena		Benzena	Toluena	Xilena	
240	3101176	2961398	12473	129994	160147	4,507258	0,4382355	5,379269	7,91909	0,086228
220	3130730	2961076	9369	115912	155876	5,418992	0,3241902	4,723875	7,591117	0,092642
200	3162454	2959076	7959	112232	167001	6,431018	0,2709937	4,500707	8,002756	0,100275
180	3172568	2878827	14304	149317	189627	9,258777	0,4845606	5,957489	9,040878	0,110852
160	3193657	2701839	427207	871403	529562	15,39984	14,320449	34,40335	24,98359	0,123402
140	3215210	2683055	263217	540087	369020	16,55117	8,7298841	21,09704	17,2252	0,139537
120	3238598	2619633	331528	720486	474244	19,11213	10,870573	27,8241	21,88537	0,160944
100	3256809	2587722	298266	652138	441616	19,56443	9,6941775	24,96376	20,20095	0,191439
80	3337498	2586190	479273	978139	582173	22,46521	14,99465	36,0427	25,63452	0,230349
60	3443549	2537666	256408	611774	465612	24,89754	7,6461963	21,48663	19,5415	0,292743

Tabel 5. Data Percobaan pada Suhu 425°C

Laju alir carrier	Peak Area per 1 ml produk yang diinjeksikan					Konversi	Yield			1/WHSV
	Aseton sebelum reaksi	Aseton setelah reaksi	Benzena	Toluena	Xilena		Benzena	Toluena	Xilena	
240	3101176	2951121	608993	1258723	941491	4,838648	16,047603	39,06532	34,91676	0,089828
220	3130730	2727520	524383	1144568	871854	12,8791	13,608695	34,98427	31,84428	0,09651
200	3162454	2709156	548248	1119903	764593	14,33374	14,000353	33,68261	27,47971	0,104462
180	3172568	2685893	693995	1284167	832788	15,3401	17,63227	38,42702	29,77873	0,11548
160	3193657	2671893	638061	1235468	824427	16,33751	16,04138	36,58259	29,17102	0,128554
140	3215210	2650658	453350	962944	673489	17,55879	11,276892	28,21111	23,57796	0,145363
120	3238598	2638389	786321	1379257	877744	18,53299	19,33719	39,94864	30,37954	0,167663
100	3256809	2527464	478695	975146	734659	22,39447	11,668832	27,99635	25,20427	0,199432
80	3337498	2468656	814300	1416755	909121	26,03273	19,107289	39,15369	30,02314	0,239966
60	3443549	2120103	846135	1428009	860493	38,43262	18,924081	37,61572	27,08584	0,304965