

**PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR DARI CAMPURAN ONGGOK DAN
MINYAK KELAPA SAWIT DENGAN METODE PIROLISIS
MENGUNAKAN ZEOLIT-A SEBAGAI KATALIS**

(Skripsi)

Oleh

DIRA AVISTA



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

ABSTRAK

PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR DARI CAMPURAN ONGGOK DAN MINYAK KELAPA SAWIT DENGAN METODE PIROLISIS MENGUNAKAN ZEOLIT-A SEBAGAI KATALIS

Oleh

Dira Avista

Telah dilakukan pirolisis campuran onggok dan minyak kelapa sawit dengan metode pirolisis menggunakan zeolit sebagai katalis. Zeolit disintesis dari silika sekam padi dan aluminium foil dengan metode hidrotermal pada waktu kristalisasi yang berbeda, yakni 72, 96, dan 120 jam dan selanjutnya disimbolkan S72, S96, dan S120. Hasil karakterisasi XRD zeolit pada S72 dan S96 menunjukkan adanya fasa kristalin zeolit-A dan sodalit, serta fasa amorf, sedangkan pada S120 hanya ada fasa kristalin yakni sodalit dan fasa amorf. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan morfologi permukaan zeolit yang heterogen. Hasil FTIR ketiga sampel zeolit menunjukkan adanya gugus O—H, TO₄ (T= Si atau Al), dan Si—O—Si. Analisis PSA menunjukkan bahwa zeolit memiliki distribusi ukuran partikel yang heterogen. Bahan bakar cair hasil pirolisis dianalisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) untuk mengetahui komponen penyusunnya. Kromatogram menunjukkan bahwa katalis S96 memiliki aktivitas terbaik untuk menghasilkan bahan bakar cair dengan kadar hidrokarbon yang tinggi, yakni 98,68%. Bahan bakar cair yang dihasilkan difraksinasi untuk mendapatkan fraksi ringan. Analisis GC-MS menunjukkan hasil fraksinasi adalah golongan fraksi ringan yang memiliki kandungan hidrokarbon 100% dan termasuk dalam kategori *biogasoline*.

Kata Kunci: bahan bakar cair, onggok, minyak kelapa sawit, pirolisis, zeolit-A.

ABSTRACT

PRODUCTION OF LIQUID FUEL FROM MIXED CASSAVA SOLID WASTE AND PALM OIL BY THE PYROLYSIS USING ZEOLITE-A AS A CATALYST

By

Dira Avista

The pyrolysis of mixed raw materials consist of cassava solid waste and palm oil using synthetic zeolite as a catalyst was carried out. Zeolites were synthesized from rice husk silica and aluminum foil by the hydrothermal method at different crystallization time of 72, 96, and 120 hours and the products obtained were specified as S72, S96, and S120, respectively. The XRD characterization on S72 and S96 showed the presence of crystalline zeolite-A and sodalite phases, whereas in S120 only sodalite phase was detected. The results of SEM characterization showed heterogeneous morphology, in terms of size, shape, and distribution of the particles on the surface of the samples. The FTIR results of the three zeolite samples showed the presence of O—H, TO₄ (T = Si or Al), and Si—O—Si groups. PSA analysis showed that zeolites have heterogeneous particle size distribution. GC-MS analysis revealed that the three zeolites produce liquid fuels with hydrocarbon as the main constituent, with the highest content of 98.68%. was obtained using the S96 catalyst. Distillation of the liquid fuel produced pure hydrocarbon in the biogasoline range.

Keyword: liquid fuel, cassava solid waste, palm oil, pyrolysis, zeolite-A.

**PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR DARI CAMPURAN ONGGOK DAN
MINYAK KELAPA SAWIT DENGAN METODE PIROLISIS
MENGUNAKAN ZEOLIT-A SEBAGAI KATALIS**

Oleh

Dira Avista

Skripsi

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

Pada

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



**UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

Judul Skripsi : **PRODUKSI BAHAN BAKAR CAIR DARI
CAMPURAN ONGGOK DAN MINYAK
KELAPA SAWIT DENGAN METODE
PIROLISIS MENGGUNAKAN ZEOLIT-A
SEBAGAI KATALIS**


Nama Mahasiswa : **Dira Ayista**

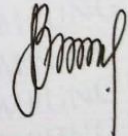
No. Pokok Mahasiswa : 1517011099

Jurusan : Kimia

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.
NIP 19590706 198811 1 001



Dr. Kamisah D. Pandiangan, M.Si.
NIP 19721205 199703 2 001

2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA


Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, M.T.
NIP 19740705 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D.** 

Sekretaris : **Dr. Kamisah D. Pandiangan, M.Si.** 

Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, M.T.** 

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




Drs. Suratman, M.Sc.
NIP. 19640604 199003 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **21 Juni 2019**

RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama lengkap Dira Avista, lahir di Banarjojo pada tanggal 16 April 1997 merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis lahir dari pasangan suami istri Bapak Darma Setiawan dan Ibu Lusiani. Penulis sekarang bertempat tinggal di Banarjojo, Kecamatan Batanghari, Kab. Lampung Timur, Lampung.

Penulis menyelesaikan pendidikan mulai dari Taman Kanak-Kanak Pertiwi Banarjojo lulus pada tahun 2003, SD Negeri 2 Banarjojo lulus pada tahun 2009, SMP Negeri 1 Batanghari lulus pada Tahun 2012, SMA Negeri 4 Metro lulus pada Tahun 2015 dan mulai tahun 2015 hingga penulisan skripsi ini, penulis melanjutkan ke pendidikan tinggi di Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN.

Selain belajar di bangku kuliah, penulis juga aktif berorganisasi. Organisasi yang pernah penulis ikuti adalah Himpunan Mahasiswa Kimia (Himaki) FMIPA Universitas Lampung sebagai Kader Muda Himaki tahun 2015-2016, anggota Bidang Sosial Masyarakat tahun 2016-2017 dan 2017-2018. Penulis juga aktif di organisasi lain sebagai anggota Komunikasi dan Informasi pada tahun 2015 dan anggota Advokasi Kesejahteraan Mahasiswa pada tahun 2016 Badan Eksekutif Mahasiswa FMIPA Universitas Lampung. Penulis juga pernah menjadi asisten praktikum Kimia Dasar dan Kimia Fisik pada tahun 2018.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Kupersembahkan karya ini sebagai wujud bakti dan tanggung jawab kepada :

Kedua orang tuaku,

Bapak Darma Setiawan dan Ibu Lusiani yang telah memberikan cinta kasih, dukungan, dan doa untukku.

Adikku

Farissa Rindi Maharani.

Pembimbing Penelitianku, Prof. Wasinton

Simanjuntak, Ph.D. dan Dr. Kamisah D. Pandiangan M.Si.

Orang terkasih, Sahabat, Kerabat, dan Teman.

Almamater Tercinta

MOTTO

*"Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan"
(Q.S. Asy-syarah: 5)*

*"Tidak ada kesuksesan melainkan dengan pertolongan Allah"
(Q.S. Atund: 88)*

*"Barang siapa menginginkan kebahagiaan di dunia dan di akhirat
maka haruslah memiliki banyak ilmu"
(H.R. Ibnu Asakir)*

*"Waktu bagaikan pedang. Jika engkau tidak memanfaatkannya
dekat dengan baik (untuk memotong), maka ia akan
memanfaatkanmu (dipotong)"
(H.R. Muslim)*

*"Jadilah seperti pohon bambu yang kuat dan kokoh, namun
fleksibel mengikuti hembusan angin"
(Anonim)*

*"Bukan dunia yang merubahku, tetapi aku yang mengubah
duniaku"
(Dira Atvista)*

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, karunia dan kasih sayang-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini.

Skripsi dengan judul “*Produksi Bahan Bakar Cair dari Campuran Onggok dan Minyak Kelapa Sawit dengan Metode Pirolisis Menggunakan Zeolit-A Sebagai Katalis*” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Sains pada Prodi Jurusan Kimia FMIPA Unila. Tidak sedikit kendala yang dihadapi penulis dalam pelaksanaan serta dalam penulisan skripsi ini, namun *Alhamdulillah*, Allah memberikan kemudahan melalui orang-orang untuk membantu penulis, sehingga kendala tersebut dapat dihadapi. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan adik penulis yang selalu memberi cinta kasih, motivasi, dukungan, dan doa untuk penulis.
2. Prof. Wasinton Simanjuntak, Ph.D. selaku pembimbing utama penelitian, guru, dan teladan bagi penulis, atas segala bimbingan, motivasi, bantuan, nasihat, dan saran hingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini.

3. Dr. Kamisah D. Pandiangan, M.Si. selaku pembimbing kedua dan guru bagi penulis, atas segala bimbingan, bantuan, nasihat, dan saran kepada penulis.
4. Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, M.T. selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung sekaligus Pembahas penelitian bagi penulis, atas segala saran, kritik, guru, motivasi, dan inspirasi yang sangat membangun dalam penulisan skripsi ini.
5. Prof. Yandri A.S, M.S. selaku Pembimbing Akademik atas saran, kritik, bimbingan, dukungan, dan bantuan yang telah diberikan selama penulis melakukan perkuliahan.
6. Drs. Suratman M,Sc. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
7. Segenap staf pengajar dan karyawan khususnya Jurusan Kimia dan FMIPA Universitas Lampung pada umumnya.
8. *Partner* penelitian penulis khususnya Ahmad Gilang Arinanda, Rizki Gilang Gumelar, Ponco Prasetyo, Tiara May Rosita yang telah membantu penulis dari awal penelitian hingga proses uji, serta teman-teman laboratorium Kak Agus, Kak Gesa, Faulia, Putri, Nico, Diska, Daus, yang telah membantu penulis selama penelitian.
9. Adik-adik baru di laboratorium angkatan 2016 kimia fisik, semoga selalu semangat penelitiannya.

10. Sahabat tersayang penulis Somplak; Yesi Oktiara Kasih, Meynisa Zunaidar, Widya Kusuma, Nur Wulandari, Meitri Ayu Nigrum, Elsin ‘Azmi, Fatry Sinjia, Hani Chintia Ramadani, dan Zuwita Wulandari yang telah mendukung, mendoakan, dan memberi saran atas segala keluh kesah penulis.
11. Teman belajarku CCA; Sri Budi Asih, Alifa Dyah Savira, Nurmalia, Meitri Ayu Nigrum, Widya Kusuma, Intan Tsamrotul Fu’adah, Nadya Syarifatul Fajriah, Tri Agus Wijayanti, dan Aulia Yulanda yang selalu mendukung, menghibur, dan mendoakan penulis.
12. Saudaraku; Iis Rachmawati, Deny Cahyo Saputro, Handian Dwi Putra, Agung, dan Eva Novenia atas semangat dan saran yang diberikan.
13. Teman-teman jurusan Kimia FMIPA Unila angkatan 2015 atas semangat, saran, motivasi, dan segala suka duka yang telah dilewati selama masa perkuliahan.
14. Teman-teman Kuliah Kerja Nyata (KKN) desa Negeri Tua; Monica, Resti, Nisa, Bachtiar, Rocki, dan Danang atas semangat dan pengalaman yang telah diberikan.
15. Kakak dan adik jurusan Kimia FMIPA Universitas Lampung angkatan 2012, 2013, 2014, 2016, 2017, dan 2018.
16. Semua pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam penyusunan skripsi.

Atas segala kebaikan yang telah diberikan, semoga Allah SWT membalasnya dengan pahala yang berlipat ganda, Aamiin. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat kekurangan, namun penulis

berharap skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna bagi rekan-rekan
khususnya mahasiswa kimia dan pembaca pada umumnya.

Bandar Lampung, Juni 2019

Dira Avista

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	v
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan Penelitian	5
C. Manfaat Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Bahan Bakar Cair Terbarukan	7
B. Pirolisis	9
C. Bahan Baku Bahan Bakar Cair	11
1. Onggok	11
2. Minyak Kelapa Sawit	13
D. Zeolit.....	14
1. Zeolit Alam	18
2. Zeolit Sintetik.....	20
3. Zeolit-A.....	22
E. Silika Sekam Padi	23
F. Asap Cair Tempurung Kelapa.....	26
G. Karakterisasi Zeolit	28
1. <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	28
2. <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	32
3. <i>Fourier Transform InfraRed (FTIR)</i>	34
4. <i>Particle Size Analyzer (PSA)</i>	36
H. Analisis Bahan Bakar Cair	37
1. <i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)</i>	38
2. Karakteristik Fisik	39
a. Densitas.....	39
b. Viskositas.....	40
c. Titik Nyala (<i>Flash Point</i>).....	40
III. METODE PENELITIAN	
A. Tempat dan Waktu Penelitian.....	42
B. Alat dan Bahan.....	42
1. Alat-alat yang Digunakan.....	42

2. Bahan-bahan yang Digunakan	43
C. Prosedur Penelitian	43
1. Pembuatan Asap Cair	43
2. Preparasi Sekam Padi	43
3. Ekstraksi Silika dari Sekam Padi	44
4. Sintesis Zeolit	44
5. Karakterisasi Zeolit	45
a. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	45
b. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	46
c. <i>Fourier Transform InfraRed</i> (FTIR)	46
d. <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	47
6. Preparasi Onggok	48
7. Percobaan Pirolisis	48
8. Analisis Bahan Bakar Cair	48
a. <i>Gas Chromatography-Mass Spectroscopy</i> (GC-MS)	49
b. Uji Fisik Fraksi Ringan Bahan Bakar Cair	50
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Pengantar	51
B. Pembuatan Asap Cair	51
C. Preparasi Sekam Padi	52
D. Ekstraksi Silika Sekam Padi	53
E. Sintesis Zeolit	54
F. Karakterisasi Zeolit	56
1. <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	56
2. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	68
3. <i>Fourier Transform InfraRed</i> (FTIR)	71
4. <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	73
G. Preparasi Onggok	77
H. Pembuatan Bahan Bakar Cair	77
1. Penentuan Suhu Pirolisis dengan Analisis DTA/TGA	77
2. Percobaan Pirolisis	79
I. Analisis Bahan Bakar Cair	81
J. Fraksinasi Bahan Bakar Cair	91
K. Analisis Fraksi Ringan Bahan Bakar Cair	92
L. Karakteristik Fisik Fraksi Ringan Bahan Bakar Cair	94
V. SIMPULAN DAN SARAN	
A. Simpulan	95
B. Saran	96
DAFTAR PUSTAKA	97
LAMPIRAN	106

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Contoh zeolit alam.....	20
2. Rumus oksida beberapa jenis zeolit sintetis.....	23
3. Komposisi silika sekam padi.....	25
4. Komposisi kimia tempurung kelapa.....	28
5. Puncak S72 yang sesuai dengan standar zeolit-A berdasarkan IZA	58
6. Puncak S72 yang sesuai dengan difraktogram standar berdasarkan program <i>Match! version 3.4.2 Build 96</i>	60
7. Kesesuaian puncak difraktogram S72 dengan difraktogram standar zeolit-A berdasarkan PCPDFWin 1997	61
8. Sudut S96 yang sesuai dengan standar zeolit-A berdasarkan IZA	63
9. Puncak S96 yang sesuai dengan difraktogram standar berdasarkan program <i>Match! version 3.4.2 Build 96</i>	64
10. Kesesuaian puncak difraktogram S96 dengan difraktogram standar zeolit-A berdasarkan PCPDFWin 1997	64
11. Sudut S120 yang sesuai dengan standar sodalit berdasarkan IZA.....	66
12. Puncak S120 yang sesuai dengan difraktogram standar berdasarkan program <i>Match! version 3.4.2 Build 96</i>	67
13. Kesesuaian puncak difraktogram S96 dengan difraktogram standar zeolit-A berdasarkan PCPDFWin 1997	68
14. Bilangan gelombang S96 dan S120	73
15. Distribusi ukuran partikel S72	74

16. Distribusi ukuran partikel S96	75
17. Distribusi ukuran partikel S120	76
18. Komponen penyusun bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis campuran onggok dan minyak kelapa sawit menggunakan katalis S72	82
19. Komponen penyusun bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis campuran onggok dan minyak kelapa sawit menggunakan katalis S96	86
20. Komponen penyusun bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis campuran onggok dan minyak kelapa sawit menggunakan katalis S120	88
21. Persentase relatif bahan bakar cair dari ketiga sampel.....	90
22. Komponen penyusun fraksi ringan bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis campuran onggok dan minyak kelapa sawit menggunakan katalis S96	93
23. Hasil uji fisik fraksi ringan bahan bakar cair	94
24. Standar dan mutu (spesifikasi) bahan bakar minyak jenis bensin 88	109

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Onggok	12
2. Tanaman kelapa sawit	14
3. Struktur ikatan zeolit	15
4. Skema pembentukan zeolit secara umum	22
5. Kerangka struktur zeolit-A	23
6. Sekam padi	24
7. Asap cair tempurung kelapa	28
8. Pemantulan cahaya pada bidang kristal.....	31
9. Skema alat SEM	34
10. Skema alat PSA.....	37
11. Asap cair <i>grade</i> 3 (a) dan <i>grade</i> 2 (b).....	52
12. Sekam padi kering dan bersih (a) dan sekam padi setelah direndam HNO ₃ 1 M (b)	52
13. Proses ekstraksi silika sekam padi (a) hasil ekstraksi; (b) gel silika; (c) gel silika setelah dicuci air panas; (d) silika bubuk	53
14. Larutan natrium silikat (a), larutan natrium aluminat (b), dan campuran bahan baku (c)	55
15. Sampel setelah dikalsinasi: (a) S72, (b) S96, dan (c) S120	56
16. Difraktogram sinar-X S72.....	57
17. Difraktogram standar zeolit-A	58

18. Difraktogram S72 yang telah dicocokkan dengan program <i>Match! version 3.4.2 Build 96</i>	59
19. Difraktogram standar zeolit-A berdasarkan PCPDFWin 1997.....	60
20. Difraktogram sinar-X S96.....	61
21. Difraktogram S96 yang telah dicocokkan dengan program <i>Match! version 3.4.2 Build 96</i>	63
22. Difraktogram sinar-X S120.....	65
23. Difraktogram standar sodalit hidroksi berdasarkan IZA.....	65
24. Difraktogram S120 yang telah dicocokkan dengan program <i>Match! version 3.4.2 Build 96</i>	66
25. Difraktogram standar sodalit berdasarkan PCPDFWin 1997	67
26. Mikrograf S72 dengan perbesaran 30000x	69
27. Mikrograf S96 dengan perbesaran 20000x	70
28. Mikrograf S120 dengan perbesaran 20000x	71
29. Spektra FTIR S96 dan S120.....	72
30. Hasil karakterisasi PSA pada S72	74
31. Hasil karakterisasi PSA pada S96	75
32. Hasil karakterisasi PSA pada S120	76
33. Onggok kering sebelum digiling (a) dan onggok bubuk (b).....	77
34. Hasil DTA/TGA onggok.....	78
35. Rangkaian perangkat pirolisis	79
36. Produk yang terbentuk pada pirolisis: (a) gas, (b) uji pembakaran gas, (b) cair, dan (c) padat.....	80
37. Produk cair yang diperoleh dari pirolisis: (a) fasa organik, (b) fasa air.....	81
38. Kromatogram bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis campuran onggok dan minyak kelapa sawit menggunakan katalis S72.....	82

39. Komposisi relatif bahan bakar cair hasil percobaan pirolisis menggunakan katalis S72.....	84
40. Kromatogram bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis campuran onggok dan minyak kelapa sawit menggunakan katalis S96.....	85
41. Komposisi relatif bahan bakar cair hasil percobaan pirolisis menggunakan katalis S96.....	87
42. Kromatogram bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis campuran onggok dan minyak kelapa sawit menggunakan katalis S120.....	88
43. Komposisi relatif bahan bakar cair hasil percobaan pirolisis menggunakan katalis S120.....	89
44. Rangkaian fraksinasi (a), hasil fraksinasi (b), <i>bio crude oil</i> (c), fraksi 2 (d), dan fraksi ringan (e).....	91
45. Kromatogram fraksi ringan bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis campuran onggok dan minyak kelapa sawit menggunakan katalis S96.....	92
46. Mikrograf S72 dengan perbesaran 5000x (a), 15000 (b), 30000x (c), dan 40000x (d).....	113
47. Mikrograf S96 dengan perbesaran 5000x (a), 10000x (b), 20000x (c), dan 35000x (d).....	114
48. Mikrograf S120 dengan perbesaran 5000x (a), 10000x (b), 20000x (c), dan 35000x (d).....	115

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Bahan bakar merupakan salah satu kebutuhan penting dalam kehidupan, seperti untuk transportasi dan kegiatan industri. Jenis bahan bakar yang paling banyak digunakan adalah bahan bakar cair. Secara tradisional, bahan bakar cair yang utama adalah hidrokarbon, yang dihasilkan dari minyak bumi. Terkait dengan penggunaan bahan bakar fosil ini, terdapat beberapa masalah yakni cadangan minyak bumi yang terus menipis, sifatnya tidak terbarukan, dan dampak lingkungan yang timbul dari penggunaannya, terutama pemanasan global.

Berdasarkan data Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (2018) cadangan minyak bumi yang sudah diproduksi adalah sekitar 92,1% terhadap total cadangan. Pada tahun 2016 produksi minyak bumi sebesar 338 juta barel dan menurun menjadi 85 juta barel pada tahun 2050, dengan mempertimbangkan cadangan minyak bumi terbukti minyak akan habis dalam kurun waktu 9 tahun lagi. Karena masalah tersebut, berbagai inisiatif untuk mengembangkan bahan bakar cair alternatif dan terbarukan terus dilakukan.

Seiring dengan berkembangnya teknologi, terdapat tiga jenis bahan bakar cair terbarukan yang sudah dikenal, yakni bioetanol, biodiesel, dan bahan bakar cair hasil pirolisis biomassa. Berdasarkan jenis bahan bakar cair tersebut, bahan

bakar cair hasil pirolisis terus mendapat perhatian karena beberapa alasan yang dianggap memiliki keuntungan dibandingkan bioetanol dan biodiesel.

Kelebihan pertama adalah pembuatan bahan bakar cair hasil pirolisis tidak terbatas oleh bahan baku, karena bahan baku yang digunakan bersifat terbarukan. Kedua, bahan bakar cair yang digunakan ramah lingkungan (Shamsul *et al.*, 2017).

Metode yang dapat digunakan untuk menghasilkan bahan bakar cair adalah transesterifikasi, fermentasi, dan pirolisis. Namun, dalam penelitian ini akan dikaji metode pirolisis. Pirolisis merupakan metode yang relatif mudah untuk mengonversi biomassa menjadi bahan bakar cair, sehingga metode ini terus dikembangkan. Proses pirolisis menghasilkan produk cair (*bio-oil*), padat (*biochar*), dan gas (CO, CO₂, H₂, dan CH₄). Komponen utama yang terkandung dalam bahan bakar cair hasil pirolisis adalah hidrokarbon, sehingga dapat diolah lebih lanjut menjadi biogasolin melalui proses fraksinasi.

Biomassa yang dapat digunakan dapat berasal dari sembarang biomassa, seperti sekam padi (Simanjuntak *et al.*, 2012), kayu ketapang (Rizky, 2014), cangkang sawit (Wardana, 2016), minyak kelapa sawit (Yakub *et al.*, 2015), campuran bagas tebu dan minyak biji karet (Simanjuntak *et al.*, 2017), dan campuran bagas tebu dan minyak jarak kaliki (Pratiwi, 2018). Keuntungan pada metode pirolisis ini prosesnya dapat berlangsung cepat dan peralatan yang digunakan relatif sederhana.

Salah satu biomassa yang berpotensi untuk dikembangkan adalah onggok.

Onggok merupakan residu dari pengolahan tepung tapioka (pati) yang

keberadaannya melimpah. Pada proses pengolahan singkong menjadi tepung tapioka, dihasilkan limbah padat tapioka sekitar 75% dari bahan mentahnya (Nugroho dkk., 2015). Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2015 produksi singkong di Provinsi Lampung mencapai 7.387.084 ton. Onggok mengandung sumber hidrokarbon, yakni selulosa 24,99%, hemiselulosa 6,67%, dan pati 61% (Nugroho dkk., 2015). Hubber *et al.* (2006) mengemukakan bahwa selulosa dalam biomassa dapat menjadi sumber hidrokarbon yang potensial untuk produksi bahan bakar cair. Selain itu, onggok memiliki tekstur yang lembut, sehingga secara teori mudah direngkah melalui proses pirolisis. Onggok sampai saat ini belum dimanfaatkan secara optimal, oleh karena itu pada penelitian ini digagas untuk pemanfaatan onggok yang dapat dikonversi menjadi bahan bakar cair.

Pirolisis menggunakan biomassa padat akan menghasilkan produk cair yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan adanya tambahan zat cair. Salah satu zat cair yang dapat digunakan untuk bahan baku pirolisis adalah minyak kelapa sawit. Pengembangan energi alternatif berbahan baku minyak kelapa sawit dapat dilakukan karena keberadaannya melimpah di Indonesia, termasuk Provinsi Lampung. Berdasarkan data BPS (2017) produksi minyak kelapa sawit di Lampung pada tahun 2016 sebesar 425.857 ton. Oleh karena keberadaannya yang melimpah dan tidak seluruhnya terserap oleh industri pangan, sehingga minyak kelapa sawit berpeluang untuk dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar.

Pada prinsipnya, pirolisis dapat berlangsung dengan atau tanpa katalis. Penggunaan katalis dalam proses pirolisis dapat menurunkan suhu reaksi, mempercepat laju reaksi, dan menghasilkan hidrokarbon rantai pendek (Cwik, 2014). Pada penelitian ini menggunakan zeolit sintetik, yakni zeolit-A. Zeolit-A digunakan karena memiliki kelebihan jika dibandingkan dengan zeolit alam seperti mudah terbentuk kristalin, tingkat kemurniannya lebih tinggi, dan ukuran pori lebih seragam, sehingga aktivitas katalitiknya lebih tinggi.

Pada penelitian ini, zeolit-A disintesis dari silika sekam padi dan aluminium foil *food grade*. Salah satu sumber silika yang ketersediaannya melimpah dan dapat diperbarui adalah sekam padi. Berdasarkan data BPS (2018) produksi padi di Lampung pada tahun 2018 mencapai 1.901.041 ton gabah kering giling (GKG). Simanjuntak *et al.* (2016) melaporkan bahwa sekam padi mengandung 18-20% silika dan memiliki kemurnian yang tinggi, yakni sekitar 95%. Silika sekam padi dapat diperoleh dengan sangat mudah dan biaya yang relatif murah, yakni dengan cara ekstraksi alkalis (Daifullah *et al.*, 2003). Simanjuntak *et al.* (2013) telah melakukan penelitian pembuatan aluminosilikat dari silika sekam padi dan logam aluminium. Namun dalam penelitian ini akan digunakan aluminium foil *food grade* sebagai sumber aluminium karena kandungannya yang tinggi. Berdasarkan informasi industri (Oster, 2015) diketahui bahwa aluminium foil *food grade* memiliki kadar aluminium sebesar 99,99%, sehingga dapat dianggap sebagai aluminium murni. Kelebihan lain menggunakan aluminium foil *food grade*, yakni tidak lebih mudah larut dibanding logam aluminium dalam bentuk batangan atau butiran.

Pada penelitian sebelumnya (Simanjuntak *et al.*, 2019) telah berhasil melakukan penelitian pirolisis campuran limbah padat singkong dan minyak biji karet dengan menggunakan katalis zeolit-A yang dikalsinasi pada suhu 600, 700, 800, dan 900 °C. Pirolisis dilakukan dari suhu kamar hingga suhu 350 °C. Bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis campuran limbah singkong padat dan minyak biji karet menggunakan katalis zeolit-A yang dikalsinasi pada suhu 800 °C memiliki kandungan hidrokarbon tertinggi, yakni 90%.

Bahan bakar cair hasil pirolisis dapat dimurnikan menjadi bahan bakar yang lebih efisien, sehingga dapat diaplikasikan dalam sektor industri, transportasi, pembangkit listrik, dan rumah tangga. Berdasarkan uraian di atas, maka penelitian ini mengkaji metode pirolisis dari campuran onggok dan minyak kelapa sawit menjadi bahan bakar cair menggunakan zeolit-A sebagai katalis.

B. Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian dari latar belakang, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mensintesis zeolit dari silika sekam padi dan aluminium foil *food grade* menggunakan metode hidrotermal.
2. Mengkarakterisasi zeolit menggunakan XRD, SEM, FTIR, dan PSA.
3. Memproduksi bahan bakar cair dari campuran onggok dan minyak kelapa sawit menggunakan metode pirolisis dengan katalis zeolit.

4. Menganalisis bahan bakar cair yang dihasilkan dengan GC-MS untuk melihat komponen dalam bahan bakar cair, serta uji viskositas, densitas, dan titik nyala (*flash point*) untuk mengetahui kelayakan bahan bakar cair.

C. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menanggulangi ketergantungan bahan bakar fosil dengan meningkatkan ketersediaan bahan bakar cair dari biomassa.
2. Meningkatkan pemanfaatan ongkok pada limbah industri tepung tapioka dan minyak kelapa sawit sebagai sumber bahan baku untuk bahan bakar cair terbarukan.
3. Meningkatkan ketersediaan katalis untuk mendukung pengembangan teknologi pirolisis.
4. Meningkatkan nilai ekonomis dari sekam padi dalam sektor pertanian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Bahan Bakar Cair Terbarukan

Bahan bakar cair terbarukan adalah bahan bakar berwujud cair yang dihasilkan dari berbagai senyawa organik besar atau biomassa, dengan metode biologi, kimia, dan termokimia atau lebih dikenal dengan istilah pirolisis. Metode biologi atau fermentasi digunakan untuk menghasilkan bioetanol (Wahono *et al.*, 2015), metode kimia digunakan untuk menghasilkan biodiesel dengan proses transesterifikasi (Pisarello *et al.*, 2018). Bahan bakar cair jenis ketiga adalah bahan bakar cair yang dihasilkan dengan metode pirolisis, dimana molekul organik berukuran besar direngkai menjadi molekul lebih sederhana dan memiliki sifat yang lebih baik sebagai bahan bakar.

Bioetanol diperoleh dari fermentasi berbagai macam bahan baku yang mengandung gula reduksi, sehingga bahan baku terbatas pada karbohidrat. Dewasa ini, bahan baku yang banyak digunakan adalah ubi kayu (Susmiati dkk., 2011) dan tetes tebu (Wardani dan Pertiwi, 2013). Produksi bioetanol dapat dilakukan dengan metode hidrolisis asam dan secara enzimatik. Metode enzimatik lebih sering digunakan karena lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan katalis asam (Seftian dkk., 2012). Selain itu tidak menghasilkan produk samping yang mengganggu pertumbuhan

mikroorganisme. Namun proses hidrolisis mempunyai kelemahan, yakni prosesnya berlangsung lama dan membutuhkan enzim yang spesifik (Susmiati dkk., 2011).

Biodiesel dapat dibuat dari minyak nabati seperti minyak biji kopi (Simbolon dkk., 2013), minyak kelapa sawit (Pandiangan *et al.*, 2017), minyak biji karet (Pandiangan *et al.*, 2017), minyak jarak (Pandiangan *et al.*, 2016), minyak ketapang (Pratiwi, 2015), dan minyak kelapa (Maulidiyah *et al.*, 2017).

Biodiesel memiliki beberapa kelebihan, yakni mengurangi emisi gas-gas beracun seperti CO, CO₂, HC_x, NO_x, SO_x, mengurangi senyawa karsinogenik dan meningkatkan pelumasan mesin (Sudrajat dkk., 2010).

Namun, produksi biodiesel ini masih memerlukan reaktan kedua, yaitu alkohol (terutama metanol atau etanol) sehingga biayanya yang relatif mahal. Selain itu, kebutuhan minyak nabati pangan yang digunakan akan meningkat seiring dengan meningkatnya populasi manusia, hal ini menyebabkan cadangan minyak nabati pangan menurun jika digunakan terus-menerus.

Berdasarkan uraian di atas, berbagai upaya untuk mengembangkan bahan bakar cair hasil pirolisis terus dilakukan, karena bahan bakar cair hasil pirolisis tidak terkendala dengan bahan baku. Berbagai biomassa atau senyawa organik besar dapat digunakan sebagai bahan baku seperti, tandan kosong kelapa sawit (Wibowo dan Hendra, 2015), sampah plastik polipropilena (Wahyudi dkk., 2016), campuran bagas tebu dan minyak jarak kaliki (Pratiwi, 2018), campuran cangkang kelapa sawit dan plastik (Wardana dkk., 2016), dan minyak kelapa sawit (Antono, 2018). Selain itu, tidak

memerlukan bahan baku tambahan kecuali katalis dan perangkat alat yang digunakan sederhana, serta prosesnya cepat.

B. Pirolisis

Pirolisis merupakan suatu proses dekomposisi termokimia senyawa organik besar menjadi senyawa yang lebih sederhana tanpa atau dengan oksigen yang terbatas. Produk yang dihasilkan dari proses pirolisis adalah cairan (*bio-oil*), gas, dan arang (*biochar*). Pirolisis dapat berlangsung dengan atau tanpa katalis. Namun penggunaan katalis dalam proses pirolisis memiliki beberapa keuntungan, yakni menurunkan suhu reaksi, mempercepat reaksi, dan menghasilkan hidrokarbon rantai pendek (Cwik, 2014).

Berdasarkan variasi suhu yang digunakan, pirolisis dapat dibedakan menjadi *slow pyrolysis*, *flash pyrolysis*, dan *fast pyrolysis*. *Slow pyrolysis* dilakukan pada suhu yang rendah, sehingga mencapai suhu puncak membutuhkan waktu yang lama. Metode ini memiliki beberapa keterbatasan teknologi, waktu tinggal yang lama dan transfer panas yang rendah sehingga tidak cocok untuk produksi bahan bakar cair dengan kualitas baik (Tippayawong *et al.*, 2008). Metode ini biasanya digunakan untuk mendapatkan jumlah arang yang lebih banyak dari cairan. Wibowo (2013) berhasil melakukan pirolisis lambat dengan bahan baku serbuk gergaji sengon dengan berbagai suhu pirolisis yaitu 350, 400, 450, dan 500 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arang yang dihasilkan pada suhu 350 °C lebih banyak dibandingkan suhu 400, 450, dan 500 °C.

Flash pyrolysis merupakan proses pirolisis yang beroperasi pada suhu tinggi (450-1000 °C), laju pemanasan yang tinggi dan waktu tinggal gas yang sangat singkat (kurang dari 1 s) (Aguado *et al.*, 2002). Proses ini lebih menjanjikan untuk produksi bahan bakar padat, cair, dan gas dari biomassa yang mencapai hingga 75% dari hasil bahan bakar cair (Demirbas, 2000). Namun *flash pyrolysis* ini masih memiliki kekurangan, yakni prosesnya membutuhkan biaya yang tinggi, stabilitas termal yang rendah, sifat korosif dari produk cair, padatan tersuspensi dalam zat cair, peningkatan viskositas akibat pembentukan *char*, pemekatan alkali dalam *char* yang terlarut dalam produk cair, dan produksi air secara pirolitik (Cornelissen *et al.*, 2008).

Fast pyrolysis merupakan pirolisis yang membutuhkan waktu singkat dan berlangsung pada suhu antara 350-550 °C (Bridgewater and Peacock, 2000). Karakteristik dasar dari *fast pyrolysis* yaitu transfer panas dan laju pemanasan yang tinggi, uap waktu tinggal singkat, pendinginan uap dan aerosol yang cepat untuk menghasilkan bahan bakar cair dengan jumlah yang banyak (Demirbas, 2002).

Wibowo dkk. (2015) telah melakukan penelitian pembuatan *bio-oil* dari rumput gelagah menggunakan proses pirolisis cepat. Suhu pirolisis yang digunakan adalah 550 dan 600 °C. Dari hasil penelitian tersebut, rendemen *bio-oil* tertinggi diperoleh dari rumput gelagah dengan ukuran 40 mesh dan suhu 550 °C yang menghasilkan cairan lebih tinggi dibanding dengan perlakuan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa suhu 550 °C merupakan suhu yang baik untuk mendapatkan produk *bio-oil*.

Napitupulu dkk. (2012) telah melakukan penelitian pirolisis minyak kelapa menggunakan katalis heterogen berbasis silika sekam padi (Ti-silika). Preparasi katalis Ti-silika dilakukan dengan metode sol-gel menggunakan sol silika, sol silika diperoleh dengan cara ekstraksi silika dari sekam padi menggunakan larutan KOH 1,5%. Pirolisis dilakukan pada suhu 200, 300, dan 400 °C dengan variasi waktu 2, 3, dan 4 jam. Bahan bakar cair yang diperoleh dari reaksi pirolisis dihasilkan pada suhu optimum 400 °C dengan waktu 3 jam dengan persen konversi 73%, viskositas kinematik 3,4 mm²/s yang memenuhi SNI yakni 2,3-4,6 mm²/s dan massa jenis 0,889 g/mL dengan standar massa jenis menurut SNI 0,85-0,89 g/mL. Hasil karakterisasi menggunakan XRD menunjukkan bahwa silika berada pada fasa *crystalite* dan karakterisasi menggunakan SEM menunjukkan permukaan yang rapat dan adanya *cluster* dengan ukuran yang lebih kecil dan jumlahnya lebih sedikit.

C. Bahan Baku Bahan Bakar Cair

1. Onggok

Industri tapioka mengolah singkong sebagai bahan baku utama menjadi tepung tapioka dan menghasilkan produk samping berupa ampas yang sering disebut onggok seperti Gambar 1. Komposisi onggok dipengaruhi oleh lokasi penanaman, umur panen, varietas ubi kayu, dan proses ekstraksi yang digunakan. Onggok dari industri besar mengandung selulosa 24,99%, hemiselulosa 6,67%, dan pati 61% (Nugroho dkk., 2015).



Gambar 1. Onggok

Ketersediaan onggok terus meningkat seiring dengan meningkatnya produksi tapioka. Hal ini diindikasikan dengan semakin meluasnya areal penanaman dan produksi ubi kayu. Berdasarkan data BPS (2017) produksi singkong di Provinsi Lampung mencapai 6.481.382 ton. Pada proses pengolahan singkong menjadi tepung tapioka dihasilkan limbah padat tapioka sekitar 75% dari bahan mentahnya (Nugroho dkk., 2015). Berdasarkan laporan tersebut produk onggok cukup melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal, meskipun onggok sudah digunakan sebagai pakan ternak.

Pada umumnya, limbah industri pangan tidak membahayakan kesehatan masyarakat, karena tidak terlibat langsung dalam perpindahan penyakit. Akan tetapi, kandungan bahan organiknya yang tinggi dapat bertindak sebagai sumber makanan untuk pertumbuhan mikroba. Kandungan senyawa organik yang tinggi pada onggok berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar cair guna meningkatkan nilai ekonomis onggok.

2. Minyak Kelapa Sawit

Tanaman kelapa sawit (Gambar 2) merupakan tanaman yang mengandung 50% minyak (Sa'diah, 2009). Minyak kelapa sawit memiliki kandungan asam lemak dengan komposisi 40-46% asam palmitat; 3,6-4,7% asam stearat; 39-45% asam oleat; 7-11% asam linoleat; dan 1,1-2,5% asam miristat (Ketaren, 1986). Seiring dengan penambahan luas areal kelapa sawit serta berkembangnya industri kelapa sawit di Indonesia, maka produksi kelapa sawit nasional dalam wujud minyak sawit juga terus meningkat setiap tahun.



Gambar 2. Tanaman kelapa sawit

Pada tahun 1980 produksi minyak kelapa sawit Indonesia hanya sebesar 721,17 ribu ton, dan naik menjadi 33,50 juta ton pada tahun 2016 (Kementerian Pertanian, 2016). Kelapa sawit merupakan tanaman yang telah dibudidayakan secara intensif di Indonesia, khususnya dalam pembuatan *crude palm oil* (CPO) sebagai penghasil minyak masak, minyak industri, maupun bahan bakar. Oleh karena itu, bila ditinjau terhadap kesiapan

ketersediaan bahan baku, maka kelapa sawit merupakan bahan yang berpotensi untuk dipergunakan sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar terbarukan. Namun, pemanfaatan CPO sebagai bahan baku untuk produksi bahan bakar perlu dilaksanakan secara bijaksana dan hati-hati, karena fungsinya saat ini sebagai bahan baku minyak goreng yang termasuk bahan makanan (Tety dkk., 2012).

D. Zeolit

Zeolit merupakan mineral kristalin aluminosilikat terhidrasi yang tersusun dari silika dan alumina membentuk koordinasi tetrahedral dan dihubungkan oleh atom O. Kerangka dasar struktur zeolit terdiri dari unit-unit tetrahedral AlO_4^- dan SiO_4 yang saling berhubungan melalui atom O dan di dalam struktur tersebut Si^{4+} dapat diganti dengan Al^{3+} . Sehingga rumus empiris zeolit adalah $M_2nO \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$ (Sutarti dan Rachmawati, 1994).

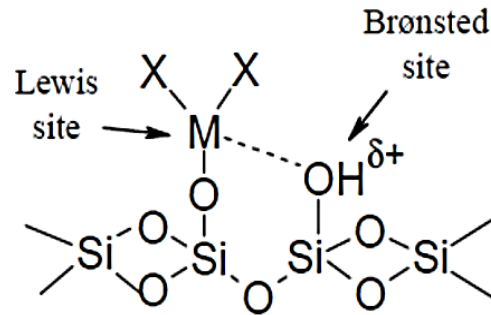
Dimana: M = Kation alkali atau alkali tanah

 n = Valensi logam alkali

 x = Bilangan tertentu (2 s/d 10)

 y = Bilangan tertentu (2 s/d 10)

Secara umum, zeolit memiliki molekular struktur yang unik, dimana atom silikon dikelilingi oleh 4 atom oksigen sehingga membentuk semacam jaringan dengan pola yang teratur seperti pada Gambar 3. (Aguado *et al.*, 2002).



Gambar 3. Struktur ikatan zeolit (Wilson and Clark, 2000)

Dari Gambar 3. terlihat bahwa logam-logam yang disimbolkan dengan ‘M’, memberikan situs asam Lewis kepada zeolit sehingga meningkatkan situs aktifnya. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengembanan logam dalam zeolit sangat berperan besar dalam membentuk situs aktif tersebut. Dimana, situs aktif pada katalis berperan sebagai fasilitator di dalam reaksi pirolisis. Sehingga, semakin banyak situs aktif yang dimiliki oleh suatu katalis, maka *yield bio-oil* yang dihasilkan juga akan semakin besar (Lestari, 2010).

Zeolit dikenal sebagai “saringan molekul” yang dapat mengatur masuknya molekul berdasarkan ukuran. Zeolit dapat berlaku sebagai penukar kation dan sebagai katalis untuk berbagai reaksi. Zeolit juga mudah melepas kation dan diganti dengan kation lainnya, misalnya zeolit melepas ion Na^+ dan digantikan dengan mengikat ion Ca^{2+} atau ion Mg^{2+} (Sirait dkk., 2014). Zeolit mempunyai beberapa sifat antara lain mudah melepas air akibat pemanasan, tetapi juga mudah mengikat kembali molekul air dalam udara lembab (Mukti *et al.*, 2009).

Berikut ini adalah sifat-sifat yang dimiliki oleh zeolit, antara lain (Sutarti *et al.*, 1994):

a. Dehidrasi

Sifat dehidrasi dari zeolit akan berpengaruh terhadap sifat adsorbsinya. Zeolit dapat melepaskan molekul air dari dalam rongga permukaan yang menyebabkan medan listrik meluas ke dalam rongga utama dan akan efektif berinteraksi dengan molekul yang akan diadsorpsi. Jumlah molekul air sesuai dengan jumlah pori-pori atau volume ruang hampa yang akan terbentuk bila unit sel kristal zeolit tersebut dipanaskan.

b. Adsorpsi

Dalam keadaan normal, ruang hampa dalam kristal zeolit terisi oleh molekul air bebas yang berada di sekitar kation. Bila kristal zeolit dipanaskan pada suhu 300-400 °C maka air tersebut akan keluar sehingga zeolit dapat berfungsi sebagai penyerap gas atau cairan. Beberapa jenis mineral zeolit mampu menyerap gas sebanyak 30% dari beratnya dalam keadaan kering. Selain mampu menyerap gas atau zat, zeolit juga mampu memisahkan molekul zat berdasarkan ukuran dan kepolarannya. Meskipun ada dua molekul atau lebih yang dapat melintas, hanya sebuah saja yang dapat lolos karena adanya pengaruh kutub antara molekul zeolit dengan zat tersebut. Molekul yang tidak jenuh atau mempunyai kutub akan lebih mudah lolos daripada yang tidak berkutub atau yang jenuh. Sedangkan untuk faktor yang mempengaruhi kemampuan adsorpsi adalah agitasi, karakteristik adsorbent, daya larut, ukuran molekul zat terlarut, komposisi kimia, pH, suhu, dan waktu. Proses zeolit untuk dapat menyerap logam berat awalnya adalah

ketika zeolit yang telah teraktivasi dengan asam, basa ataupun garam menjadi satu ikatan. Ditambahkan dengan logam berat yang terkandung pada limbah cair maka ikatan zeolit dengan larutan aktivasi akan terurai menjadi zeolit berikatan dengan logam berat tersebut.

c. Penukar Ion

Ion-ion pada rongga atau kerangka elektrolit berguna untuk menjaga kenetralan zeolit. Ion-ion ini dapat bergerak bebas sehingga pertukaran ion yang terjadi tergantung dari ukuran dan muatan maupun jenis zeolitnya. Sifat sebagai penukar ion dari zeolit antara lain tergantung dari sifat kation, suhu, dan jenis anion. Penukaran kation dapat menyebabkan perubahan beberapa sifat zeolit seperti stabilitas terhadap panas, sifat absorpsi dan aktifitas katalitis.

d. Katalis

Ciri paling khusus dari zeolit yang secara praktis akan menentukan sifat khusus mineral ini adalah adanya ruang kosong yang akan membentuk saluran di dalam strukturnya. Bila zeolit digunakan pada proses penyerapan atau katalitis maka akan terjadi difusi molekul ke dalam ruang bebas di antara kristal. Dengan demikian, dimensi serta lokasi saluran sangat penting. Zeolit merupakan katalisator yang baik karena mempunyai pori-pori yang besar dengan permukaan yang maksimum.

e. Penyaring atau Pemisah

Meskipun banyak media berpori yang dapat digunakan sebagai penyerap atau pemisah campuran uap atau cairan, tetapi distribusi diameter dari pori-pori media tersebut tidak cukup selektif seperti halnya penyaring molekul (zeolit)

yang mampu memisahkan berdasarkan perbedaan ukuran, bentuk, dan polaritas dari molekul yang disaring. Zeolit dapat memisahkan molekul gas atau zat lain dari suatu campuran tertentu karena mempunyai ruang hampa yang cukup besar dengan garis tengah yang bermacam-macam. Volume dan ukuran garis tengah ruang hampa dalam kisi-kisi kristal ini menjadi dasar kemampuan zeolit untuk bertindak sebagai penyaring molekul. Molekul yang berukuran lebih kecil dapat melintas sedangkan yang berukuran lebih besar dari ruang hampa akan tertahan atau ditolak. Hubungan antara ukuran garis tengah ruang hampa zeolit dengan molekul gas atau zat yang dapat melintas atau tertahan. Menurut proses pembentukannya, zeolit dapat dibedakan menjadi dua kelompok, yakni zeolit alam dan sintetik.

1. Zeolit Alam

Zeolit alam terbentuk karena adanya perubahan alam (zeolitisasi) dari bahan vulkanik dan dapat digunakan secara langsung untuk berbagai keperluan, namun daya jerap maupun daya tukar ion zeolit ini belum maksimal. Selain itu, zeolit alam banyak bercampur dengan materi pengotor selain zeolit, baik kristalin maupun amorfus (Trisunaryanti *et al.*, 1996). Untuk memperoleh zeolit dengan daya guna tinggi diperlukan suatu perlakuan yakni dengan aktivasi.

Proses aktivasi zeolit alam dapat dilakukan dengan dua cara yaitu secara fisika dan kimia. Proses aktivasi dengan cara fisika melalui pemanasan dengan tujuan untuk menguapkan air yang terperangkap di dalam pori-pori kristal zeolit, sehingga luas permukaannya bertambah. Proses pemanasan

zeolit dikontrol, karena pemanasan yang berlebihan kemungkinan akan menyebabkan zeolit tersebut rusak. Sedangkan proses secara kimia dengan tujuan untuk membersihkan permukaan pori, membuang senyawa pengotor dan mengatur kembali letak atom yang dapat dipertukarkan.

Menurut Weitkamp and Puppe (1999) Proses aktivasi zeolit dengan perlakuan asam klorida pada konsentrasi 0,1 N hingga 11 N menyebabkan zeolit mengalami dealuminasi dan dekationisasi yaitu keluarnya Al dan kation-kation dalam kerangka zeolit. Aktivasi asam menyebabkan terjadinya dekationisasi yang menyebabkan bertambahnya luas permukaan zeolit karena berkurangnya pengotor yang menutupi pori-pori zeolit. Luas permukaan yang bertambah diharapkan meningkatkan kemampuan zeolit dalam proses penjerapan. Proses aktivasi dengan asam dapat meningkatkan kristalinitas, keasaman dan luas permukaan (Srihapsari, 2006). Berikut ini contoh zeolit alam disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Contoh zeolit alam

No.	Zeolit alam	Komposisi
1.	Kabazit	$(\text{Na}_2, \text{Ca})_6(\text{Al}_{12}\text{Si}_{24}\text{O}_{72}) \cdot 40\text{H}_2\text{O}$
2.	Klipnotilolit	$(\text{Na}_4\text{K}_4)(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
3.	Analsim	$\text{Na}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}) \cdot 16\text{H}_2\text{O}$
4.	Heulandit	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
5.	Erionit	$(\text{Na}, \text{Ca}_5\text{K})(\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}) \cdot 27\text{H}_2\text{O}$
6.	Ferrierit	$(\text{Na}_2\text{Mg}_2)(\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$
7.	Natrolit	$\text{Na}_4(\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{20}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
8.	Laumonit	$\text{Ca}(\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48}) \cdot 16\text{H}_2\text{O}$
9.	Mordenit	$\text{Na}_8(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
10.	Filipsit	$(\text{Na}, \text{K})_{10}(\text{Al}_{10}\text{Si}_{22}\text{O}_{64}) \cdot 20\text{H}_2\text{O}$
11.	Wairali	$\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

Sumber: Subagio, 1993.

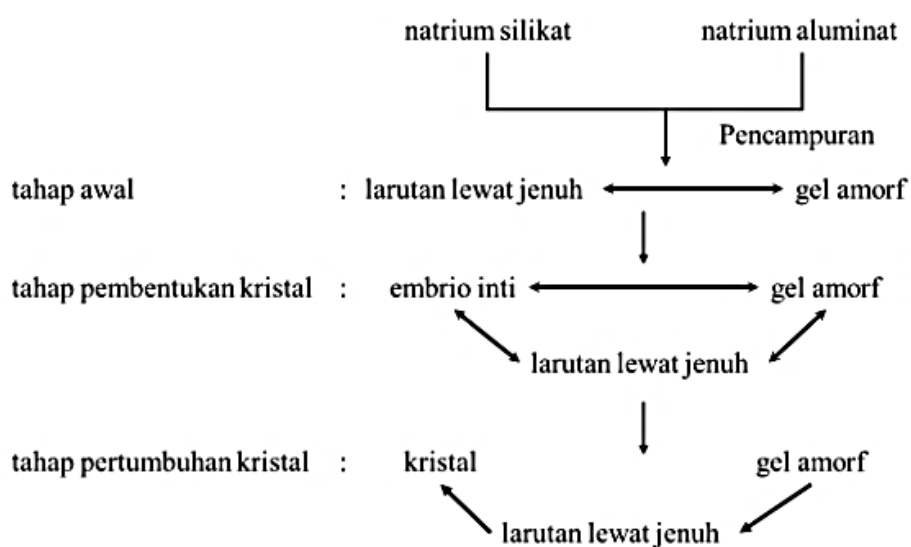
Oktafany dkk. (2016) melaporkan telah berhasil melakukan pirolisis dengan bahan baku limbah tandan kelapa sawit menggunakan katalis zeolit alam teraktivasi H_2SO_4 untuk mengetahui kandungan asap cair. Hasil identifikasi adalah pada asap cair hasil destilasi pertama terdiri dari senyawa asam 45,32% yang didominasi oleh asam asetat 44,70%, senyawa fenol 30,68% serta senyawa karbonil 9,61% yang didominasi oleh 2-furankarboksilaldehid 3,85% dan senyawa 2-propanon 3,60%. Pada asap cair hasil destilasi berulang terdiri dari senyawa asam asetat 46,71%, senyawa fenol 42,08%, dan senyawa karbonil 0,28%. Pengaruh pemurnian menggunakan zeolit teraktivasi H_2SO_4 pada destilasi berulang adalah hilangnya kandungan senyawa yang berbahaya bagi pangan yaitu 2-propanon, 2-butanon, 3,5-dimetilfenol, dan piridin yang terdapat pada destilasi pertama.

2. Zeolit Sintetik

Zeolit sintetik dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dari zeolit alam antara lain karena komposisi mineral yang bervariasi dan ukuran pori-pori yang tidak seragam. Pengembangan zeolit sintetik ini dapat dilakukan dengan mengatur pori-porinya sehingga lebih spesifik pemanfaatannya (Saraswati, 2015). Zeolit dapat dimanfaatkan sebagai penukar ion, katalis, dan adsorben. Reaktan utama dalam sintesis zeolit adalah senyawa silika dan alumina. Terdapat berbagai macam alternatif sumber silika dan sumber alumina yang berasal dari limbah dan mudah diperoleh.

Dewasa ini, penelitian telah banyak dilakukan dengan pemanfaatan silika yang terkandung dalam sekam padi sebagai bahan untuk mensintesis zeolit

(Nur, 2001; Fuadi dkk., 2012). Sekam padi memiliki kandungan silika yang cukup tinggi yaitu sebesar 18-20% (Simanjuntak *et al.*, 2016), memiliki sifat *amorf* dan ukuran *ultrafine*, serta sangat reaktif (Chandrasekhar *et al.*, 2003). Zeolit sintetis umumnya dibuat dengan pencampuran larutan alumina dan pembentukan gel silikat. Sintesis zeolit melibatkan beberapa langkah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema pembentukan zeolit secara umum (Hamdan, 1992)

Dari skema tersebut dapat dijelaskan bahwa ketika larutan aluminat dan larutan silikat dicampur, akan terbentuk dua fase, yaitu fase gel dan fase larutan sebagian larutan lewat jenuh. Kedua fase ini berada dalam kesetimbangan sebagai tahap awal pembentukan zeolit. Pada tahap pembentukan kristal, gel amorf akan mengalami penataan ulang pada strukturnya dengan adanya pemanasan sehingga dapat terbentuk embrio inti kristal. Pada keadaan ini terjadi kesetimbangan antara embrio inti kristal, gel amorf sisa, dan larutan lewat jenuh. Proses ini berada pada keadaan metastabil. Jika gel amorf sisa larut kembali, maka akan terjadi pertumbuhan

kristal dari embrio inti tersebut sampai gel amorf sisa tersebut habis dan terbentuk kristal dalam keadaan stabil. Tahap ini merupakan tahap pertumbuhan kristal (Hamdan, 1992). Dengan perkembangan penelitian, dewasa ini telah dikenal beragam zeolit sintetis, dan beberapa diantaranya disajikan dalam Tabel 2.

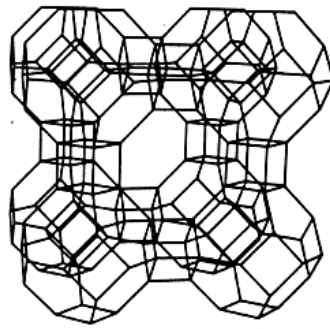
Tabel 2. Rumus oksida beberapa jenis zeolit sintetis

Jenis Zeolit	Rumus Oksida
Zeolit A	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4,5\text{H}_2\text{O}$
Zeolit H	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Zeolit L	$(\text{K}_2\text{Na}_2)\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Zeolit X	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2,5\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Zeolit Y	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4,8\text{SiO}_2 \cdot 8,9\text{H}_2\text{O}$
Zeolit P	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2-5\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Zeolit O	$(\text{Na}, \text{TMA})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$ TMA $(\text{CH}_3)_4\text{N}^+$
Zeolit Ω	$(\text{Na}, \text{TMA})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ TMA- $(\text{CH}_3)_4\text{N}^+$
Zeolit ZK-4	$0,85\text{Na}_2\text{O} \cdot 0,15(\text{TMA})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3,3\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Zeolit ZK-5	$(\text{R}, \text{Na}_2)\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4-6\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Sumber: Georgiev *et al.*, 2009.

3. Zeolit-A

Salah satu tipe zeolit sintetis adalah zeolit-A yang dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dari zeolit alam yang memiliki ukuran pori yang tidak seragam (Saraswati, 2015). Zeolit-A ini memiliki rumus kimia $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4,5\text{H}_2\text{O}$. Zeolit-A adalah salah satu zeolit sintetis dengan kerangka struktur tiga dimensi (seperti pada Gambar 5) dan banyak digunakan dalam aplikasi industri terutama sebagai katalis dan adsorben.



Gambar 5. Kerangka struktur zeolit A (Smith, 1988)

Sintesis zeolit ini umumnya dikerjakan pada kondisi hidrotermal dengan bahan dasar gel reaktif dalam media alkali pada suhu antara 80-200 °C. Kondisi hidrotermal dapat dilakukan dengan metode konvensional menggunakan oven, penangas atau *autoclave* sebagai sumber panas (Wuntu dan Tangkuman, 2008).

Saraswati (2015) telah berhasil mensintesis zeolit-A dengan bahan baku kaca yang direaksikan dengan NaOH dan dipanaskan pada suhu 900 °C selama 4 jam. Hasil dari leburan tersebut dilarutkan dalam akuades dan direaksikan dengan natrium aluminat dengan perbandingan tertentu, kemudian dipanaskan selama 8 jam pada suhu 80 °C. Berdasarkan hasil karakterisasi XRD dan FTIR menunjukkan bahwa diperoleh kristalinitas sampel zeolit-A adalah 96,09% dan terbentuknya kerangka aluminosilikat pada sampel tersebut.

E. Silika Sekam Padi

Sekam padi merupakan bagian terluar dari butir padi yang merupakan hasil samping proses penggilingan padi (seperti Gambar 6). Secara umum sekam

padi dimanfaatkan untuk abu gosok, arang, dan penyimpanan telur (Sembiring dan Karo, 2007).



Gambar 6. Sekam padi

Jika ditinjau dari segi komposisinya sekam padi dapat memiliki nilai ekonomis yang tinggi. Simanjuntak *et al.*, (2016) melaporkan bahwa sekam padi mengandung silika yang cukup tinggi yaitu 18-20%, sehingga sekam padi dapat dimanfaatkan sebagai sumber silika. Komposisi silika sekam padi mengandung senyawa lain seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi silika sekam padi

Komposisi	Kandungan (% Berat)
SiO ₂	94,66
CaO	0,71
Na ₂ O	1,50
K ₂ O	1,01
Al ₂ O ₃	1,56
MgO	0,56

Sumber: Sembiring dan Karo, 2007.

Dewasa ini, silika sekam padi telah dimanfaatkan untuk pembuatan keramik (Sembiring, 2011; Sembiring *et al.*, 2014), katalis (Adam *et al.*, 2006; Saroinsong, 2015), serta berbagai material komposit (Suka dkk., 2008;

Marlina dkk., 2012). Selain itu dapat dimanfaatkan sebagai sumber silika untuk pembuatan zeolit sintetik.

Silika sekam padi dapat diperoleh dengan dua cara yaitu dengan ekstraksi alkalis (Daifullah *et al.*, 2003) atau pengabuan (Kalapathy *et al.*, 2000).

Metode ekstraksi didasarkan pada kelarutan silika amorf yang besar dalam larutan alkalis dan pengendapan silika yang terlarut dalam asam, seperti asam klorida, asam oksalat, dan asam nitrat (Sembiring dan Karo, 2007).

Kristianingrum dkk. (2011) telah melakukan penelitian sintesis silika gel dari abu bagas dan uji sifat adsorptifnya terhadap ion logam tembaga (II).

Pengabuan bagas dilakukan pada suhu 700 °C dilanjutkan dengan pembuatan natrium silikat dengan melarutkan 6 gram abu bagas menggunakan NaOH 1 M disertai pengadukan dan pemanasan selama 1 jam. Filtrat natrium silikat yang terbentuk ditambahkan larutan dengan variasi jenis asam kuat dan lemah yaitu asam klorida, asam sulfat, asam asetat dan asam sitrat dengan konsentrasi masing-masing 3 M hingga larutan mencapai pH 7. Proses adsorpsi dilakukan dengan memasukkan silika gel ke dalam larutan ion logam tembaga (II). Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa nilai keasaman silika gel dengan asam klorida, asam sulfat, asam asetat, dan asam sitrat 3 M berturut-turut sebesar 8,320; 6,554; 6,836 dan 7,574 mmol/g. Sedangkan kadar air sampel masing-masing 12,880; 15,118; 11,085 dan 17,423%. Nilai daya adsorpsi dan efisiensi adsorpsi ion logam tembaga (II) yang berbeda, hal ini didasarkan pada jenis asam kuat dan lemah yang digunakan dalam sintesis.

Simanjuntak *et al.*, (2016) telah melakukan penelitian ekstraksi silika dari sekam padi dengan membandingkan karakteristik silika yang diperoleh dari pengendapan asap cair dan HNO₃ 10%. Hasil analisis morfologi permukaan dari silika yang diperoleh dengan pengendapan menggunakan asap cair menunjukkan morfologi permukaan yang lebih homogen dan ukuran partikel yang lebih kecil jika dibandingkan dengan pengendapan menggunakan HNO₃ 10%. Keuntungan dari metode ekstraksi alkalis yaitu silika yang didapat memiliki kemurnian yang tinggi, yakni sekitar 95%. Sehingga dalam penelitian ini, untuk mendapatkan silika sekam padi menggunakan metode ekstraksi alkalis dan asap cair sebagai pengendap silika.

F. Asap Cair Tempurung Kelapa

Tempurung kelapa dewasa ini sering digunakan sebagai bahan baku pembuatan asap cair, hal ini disebabkan karena tempurung kelapa mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Berikut ini merupakan kandungan tempurung kelapa disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Komposisi kimia tempurung kelapa

Komposisi	Kandungan (% Berat)
Selulosa	34
Hemiselulosa	21
Lignin	27
Protein	2
Lemak	5

Sumber: Bledzki *et al.*, 2010.

Asap cair merupakan bahan kimia yang diperoleh dari pengembunan asap hasil penguraian senyawa-senyawa organik pada proses pirolisis. Asap cair

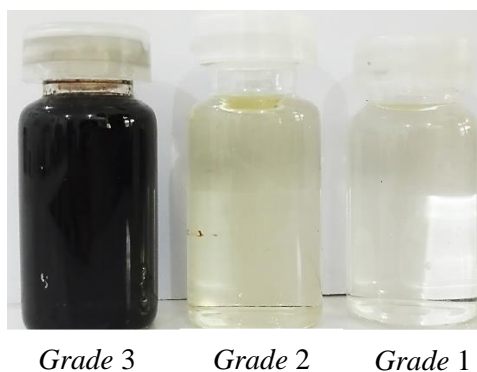
terdiri dari *grade* 3, 2, dan 1. Penggolongan asap cair ini berdasarkan jumlah senyawa berbahaya yang terkandung dalam asap cair, sehingga memengaruhi fungsi dari asap cair tersebut. Asap cair *grade* 3 merupakan asap cair hasil pirolisis yang belum mengalami proses pemurnian. Asap cair *grade* 3 tidak digunakan sebagai pengawet bahan pangan, karena masih banyak mengandung tar yang karsinogenik, tetapi digunakan pada pengolahan karet, penghilang bau, dan pengawet kayu agar tahan terhadap rayap.

Asap cair *grade* 2 merupakan asap cair yang telah melewati tahapan destilasi. Asap cair *grade* 2 tempurung kelapa berwarna lebih kekuningan jika dibandingkan dengan asap cair tempurung kelapa *grade* 3, namun lebih pekat kuningnya daripada asap cair tempurung kelapa *grade* 1. Menurut Himawati (2010) asap cair *grade* 2, memiliki kandungan tar 16,6% jauh lebih rendah jika dibandingkan asap cair *grade* 3, kandungan fenol 9,55%, karbonil 1,67%, dan aroma asapnya sudah berkurang. Kadar fenol, karbonil, dan asam pada asap cair *grade* 2 tidak terlalu berbeda dengan *grade* 3. Namun, pada asap cair *grade* 2 untuk kadar tar dan poliaromatik hidrokarbon (PAH) seperti benzopirena sudah semakin berkurang, hal ini dikarenakan pada saat destilasi suhu 250 °C senyawa tersebut tidak ikut menguap karena titik didih kedua senyawa tersebut berada di atas 250 °C. Asap cair *grade* 2 dapat digunakan untuk pengawetan bahan makanan mentah (Yulistiani, 2008).

Sedangkan asap cair *grade* 1 merupakan asap cair hasil destilasi dari asap cair *grade* 2, sehingga kualitasnya lebih bagus dibandingkan asap cair *grade* 2 dan tidak mengandung senyawa yang berbahaya. Asap cair *grade* 1 memiliki

kadar fenol 0,64% dan kadar asam 43,96-44,24% (Himawati, 2010).

Sehingga dapat diaplikasikan pada produk makanan. Berikut adalah perbedaan asap cair tempurung kelapa *grade* 1, 2, dan 3 ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Asap cair tempurung kelapa

G. Karakterisasi Zeolit

1. X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction merupakan metode analisa yang memanfaatkan interaksi antara sinar-x dengan atom yang tersusun dalam sebuah sistem kristal. Karakterisasi ini dilakukan untuk mengetahui fasa kristal dan amorf secara kualitatif dan kuantitatif, serta persen kristalinitas dari katalis. Pada penelitian Johnson *et al.* (2014) zeolit-A disintesis dari kaolin alami yang diperoleh dari KG. Gating, Bongawan Sabah. Pembentukan zeolit-A dan *sodalite* sangat dipengaruhi oleh konsentrasi NaOH yang digunakan dalam campuran reaksi. Konsentrasi NaOH yang digunakan yaitu 0,02; 0,04; 0,05; 0,06; 0,08 dan 0,1 M. Hasil karakterisasi menggunakan XRD menunjukkan terdapat perbedaan difraktogram pada masing-masing sampel. Ketika NaOH

0,02 M yang digunakan, tidak terdapat puncak zeolit yang terdeteksi pada difraktogram. Sedangkan pada konsentrasi 0,04 dan 0,05 M yang digunakan menunjukkan adanya zeolit-A. Pada konsentrasi 0,06 M terdapat *sodalite* yang terdeteksi pada difraktogram. Jika NaOH 0,08 M yang digunakan menghasilkan puncak *sodalite* dengan intensitas yang tinggi, apabila NaOH 0,1 M yang digunakan maka produk utamanya *sodalite*.

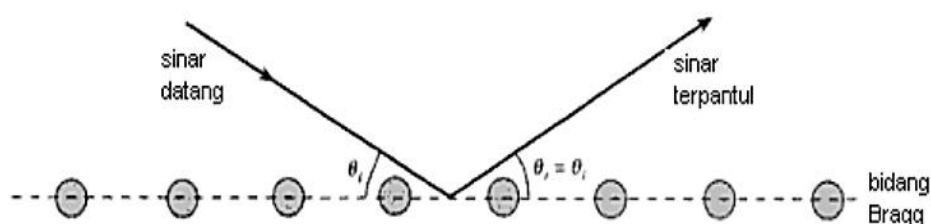
Gougazeh and Buhl (2014) telah melakukan analisis zeolit-A dengan variasi konsentrasi larutan NaOH, yakni 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 dan 4,0 M. Hasil difraktogram sinar-X menunjukkan terdapat karakteristik zeolit-A yang muncul pada sudut 2θ 7,2; 10,3; 12,6; 16,2; 21,8; 24,0; 26,2; 27,2; 30,0; 30,9; 31,1; 32,6; 33,4; dan $34,3^\circ$. Adanya konsentrasi larutan NaOH yang berbeda, menghasilkan tingkat kristalinitas pada masing-masing sampel berbeda.

Prinsip dari karakterisasi XRD didasarkan pada kristal katalis memantulkan sinar-X yang dikirimkan dari sumber dan diterima oleh detektor. Setiap senyawa terdiri dari susunan atom-atom yang membentuk bidang tertentu. Jika sebuah bidang memiliki bentuk tertentu, maka partikel cahaya (foton) yang datang dengan sudut tertentu akan menghasilkan pola pantulan maupun pembiasan yang khas. Dengan kata lain, tidak mungkin foton yang datang dengan sudut tertentu pada sebuah bidang dengan bentuk tertentu akan menghasilkan pola pantulan ataupun pembiasan yang bermacam-macam. Sebagai gambaran, bayangan sebuah objek akan membentuk pola yang sama seandainya cahaya berasal dari sudut datang yang sama. Kekhasan pola difraksi ini yang dijadikan landasan dalam analisa kualitatif untuk

membedakan suatu senyawa dengan senyawa yang lain menggunakan instrumen XRD. Pola unik yang terbentuk untuk setiap difraksi cahaya pada suatu material seperti halnya *fingerprint* (sidik jari) yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi senyawa yang berbeda.

Pada XRD, pola difraksi dinyatakan dengan besar sudut-sudut yang terbentuk sebagai hasil dari difraksi berkas cahaya oleh kristal pada material. Nilai sudut tersebut dinyatakan dalam 2θ , dimana θ merepresentasikan sudut datang cahaya. Sedangkan nilai 2θ merupakan besar sudut datang dengan sudut difraksi yang terdeteksi oleh detektor.

Hukum Bragg merupakan perumusan matematik mengenai proses difraksi yang terjadi sebagai hasil interaksi antara sinar-X yang dipantulkan oleh material. Pantulan tersebut terjadi tanpa mengalami kehilangan energi sehingga menghasilkan pantulan elastis. Bragg menunjukkan bahwa bidang yang berisi atom-atom di dalam kristal akan memantulkan radiasi dengan cara yang sama persis dengan peristiwa pemantulan cahaya di bidang cermin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Pemantulan cahaya pada bidang kristal (Setiabudi dkk., 2012)

Berdasarkan hukum Bragg yang ditulis dengan persamaan berikut:

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

Terdapat dua variabel yang dapat divariasikan untuk menghasilkan pola difraksi, yakni panjang gelombang dan sudut difraksi. Dimana d menyatakan jarak antar lapisan atom atau ion yang berdekatan dan λ menyatakan panjang gelombang. Nilai d tidak dapat divariasikan karena merupakan rusuk yang menghubungkan antara bidang kristal dan bernilai tetap bagi suatu sistem kristal tertentu, kecuali jika struktur kristal tersebut mengalami perubahan.

Kristalinitas dapat ditentukan dengan XRD melalui perbandingan intensitas sampel dengan intensitas standar yang ditunjukkan pada persamaan di bawah ini:

$$\text{Kristalinitas} = \frac{\text{intensitas peak hkl sampel}}{\text{Intensitas peak hkl standar}} \times 100\%$$

Pada metode Laue, sudut θ dibuat tetap sedangkan panjang gelombang sinar-X dibuat berubah. Hal ini dapat dilakukan dengan menetapkan arah sudut datang sinar-X tetapi memvariasikan dengan cara mengubah-ubah plat logam yang menjadi sasaran tembak pada tabung sinar-X. Difraksi hanya akan terjadi jika terbentuk interferensi gelombang yang konstruktif pada saat berkas cahaya dipantulkan oleh material sampel. Sementara itu, interferensi konstruktif hanya dapat terjadi pada panjang gelombang tertentu yang datang dengan sudut tertentu pula. Artinya, tidak semua panjang gelombang yang datang pada sudut tertentu akan menghasilkan interferensi konstruktif.

Kelemahan metode ini adalah kurang praktis karena harus mengubah-ubah plat logam pada tabung sumber sinar-X. Oleh karena itu, dikembangkan metode yang lebih baru oleh Debye-Scherrer, yakni metode serbuk.

Pada metode metode serbuk, sudut θ yang diubah-ubah sedangkan panjang gelombang dibuat tetap. Hal tersebut dapat dilakukan dengan dengan mengubah-ubah arah datangnya berkas sinar-X tanpa mengganti plat logam sumber sinar-X agar dihasilkan yang tetap. Pola interferensi juga dapat dipengaruhi oleh arah datangnya gelombang. Walaupun berkas cahaya yang datang memiliki panjang gelombang yang sama, namun jika arah datangnya berbeda maka pola interferensinya akan berbeda. Berdasarkan Hukum Bragg, jika panjang gelombang dari sinar yang membentur diketahui, kemudian kita bisa mengontrol sudut dari benturan maka dapat ditentukan jarak antar atom/geometri dari kisi (*d-spacing*). Dengan menghitung *d-spacing* yang diperoleh dari rumus Bragg serta mengetahui nilai Indeks Miller (hkl) yang menyatakan posisi atom dalam kristal, maka dapat ditentukan latis parameter (a, b, dan c) sesuai dengan bentuk kristalnya.

2. *Scanning Electron Microscope* (SEM)

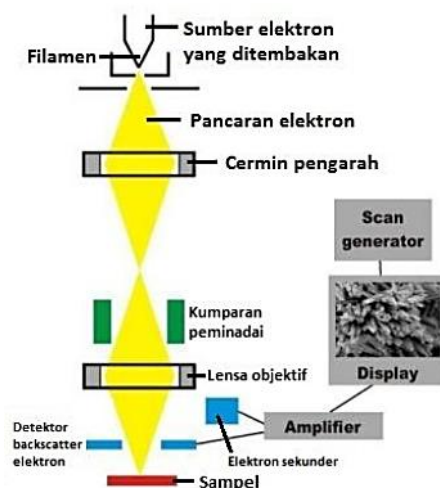
Scanning Electron Microscope (SEM) adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang digunakan untuk mengamati dan menganalisis morfologi permukaan suatu material. Chang and Shih (2000) telah melakukan analisis zeolit-A dengan SEM yang dibuat dengan menggunakan abu layang dengan metode hidrotermal. Hasil dari analisis zeolit-A berbentuk kubik yang menunjukkan adanya *faujasite* dalam zeolit tersebut.

Prinsip kerja alat ini adalah sumber elektron dari *filament* yang terbuat dari tungsten memancarkan berkas elektron. Jika elektron tersebut berinteraksi dengan bahan (*specimen*) maka akan menghasilkan elektron primer dan

elektron sekunder. Elektron primer merupakan elektron berenergi tinggi yang dipancarkan dari sebuah katoda (Pt, In, dan W) yang dipanaskan. Katoda yang biasa digunakan adalah tungsten (W) atau *lanthanum hexaboride* (LaB_6). Tungsten digunakan sebagai katoda karena memiliki titik lebur yang paling tinggi dan tekanan uap yang paling rendah dari semua logam, sehingga memungkinkannya dipanaskan pada temperatur tinggi untuk emisi elektron. Elektron sekunder merupakan elektron berenergi rendah, yang dibebaskan oleh atom pada permukaan. Hasil interaksi antara elektron dengan permukaan *specimen* ditangkap oleh detektor *Secondary Electron* (SE) yang kemudian diolah dan diperkuat oleh *amplifier* dan kemudian divisualisasikan dalam monitor sinar katoda (CRT) (Smallman, 2000). *Scanning* pada permukaan bahan dapat dilakukan dengan mengatur *scanning generator* dan *scanning coils*.

Pada dasarnya, komponen utama SEM terdiri dari dua unit yaitu *electron column* dan *display console*. *Electron column* merupakan model *electron beam scanning* dan *display console* merupakan elektron sekunder yang di dalamnya terdapat CRT. *Electron gun* menghasilkan pancaran elektron energi tinggi yang kedua tipenya berdasar pada pemanfaatan arus. Setiap jumlah sinar yang dihasilkan dari CRT dihubungkan dengan jumlah target, jika terkena berkas elektron berenergi tinggi dan menembus permukaan target, karena terjadi ionisasi atom dari cuplikan padatan. Elektron bebas ini tersebar keluar dari aliran sinar utama, sehingga tercipta lebih banyak elektron bebas, dengan demikian energinya habis lalu melepaskan diri dari target. Elektron ini kemudian dialirkan ke unit demagnifikasi dan dideteksi

oleh detektor dan selanjutnya dicatat sebagai suatu foto. Berikut skema SEM ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Skema alat SEM (Smallman, 2000)

3. *Fourier Transform-InfraRed (FTIR)*

Zeolit dianalisis menggunakan FTIR bertujuan untuk mengetahui jenis ikatan kimia dan gugus fungsi yang mengadsorpsi basa piridin. Jenis situs asam pada zeolit dibagi menjadi dua, yakni situs asam Brönsted Lowry dan Lewis. Situs asam Brönsted Lowry dapat berperan sebagai jembatan pada gugus silanol Si—O(H)—Al antara atom Si dan Al dari struktur kerangka dalam zeolit-A. Jumlah situs asam Brönsted Lowry dapat ditentukan melalui jumlah kerangka $[\text{MO}_4]^-$ yang terhubung dengan silikat dalam zeolit-A. Adanya situs asam Brönsted ditunjukkan oleh pita serapan pada bilangan gelombang sekitar $1540\text{--}1545\text{ cm}^{-1}$, sedangkan situs asam Lewis ditunjukkan oleh pita serapan pada bilangan gelombang sekitar $1440\text{--}1452\text{ cm}^{-1}$ (Platon and Thomson, 2003).

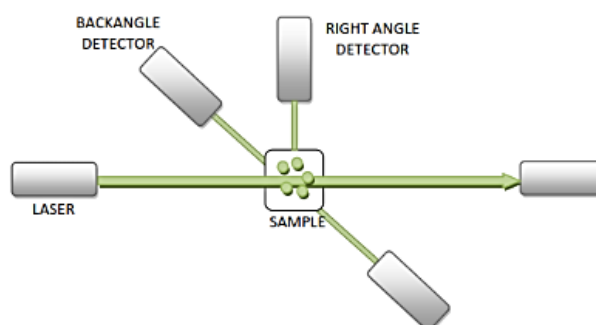
Prinsip dasar dari analisis spektrofotometri IR adalah penyerapan radiasi elektromagnetik oleh gugus-gugus fungsi tertentu, sehingga dari spektrum serapan yang terbaca kita mampu mengetahui gugus fungsi apa saja yang terdapat pada suatu senyawa. Bila sinar inframerah dilewatkan melalui sebuah cuplikan, maka sejumlah frekuensi diserap oleh cuplikan tersebut dan frekuensi lainnya diteruskan atau ditransmisikan tanpa adanya penyerapan. Hubungan antara persen absorbansi dengan frekuensi maka akan dihasilkan sebuah spektrum inframerah (Hardjono, 1990). Untuk zeolit, gugus fungsi yang dapat dideteksi dengan FTIR adalah pita serapan melebar dengan intensitas kuat pada daerah $1095\text{-}1092\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan karakteristik gugus (Si—O—Al), pita serapan sekitar $420\text{-}494\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan adanya gugus Si—O—Si. Pada bilangan gelombang 3300 cm^{-1} terdapat pita serapan gugus fungsi OH dari molekul air. Pada pita serapan sekitar 3400 cm^{-1} tersebut terjadi tumpang tindih pada pita serapan dari *stretching* asimetris dan simetris pada molekul air. Pita serapan yang lebar pada panjang gelombang tersebut disebabkan oleh adanya hidrat dan molekul air yang berikatan langsung dengan kation penyeimbang.

Saraswati (2015) melaporkan hasil karakterisasi zeolit-A menggunakan FTIR. Hasil dari karakterisasi tersebut, daerah serapan muncul sekitar $1000\text{-}950\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi ulur asimetri dari Si—O dan Al—O dari kerangka aluminosilikat. Sedangkan vibrasi ulur simetri Si—O dan Al—O muncul pada daerah serapan sekitar $600\text{-}700\text{ cm}^{-1}$. Pada standar spektra inframerah zeolit-A menunjukkan dua puncak, sedangkan pada sampel zeolit-A

hanya menunjukkan satu puncak saja. Hal ini terjadi karena keberadaan senyawa lain selain zeolit-A dalam sampel tersebut.

4. *Particle Size Analyzer (PSA)*

Particle Size Analyzer (PSA) digunakan untuk menentukan ukuran dan distribusi ukuran partikel dari sampel. Sampel yang digunakan dapat berupa emulsi, suspensi, dan bubuk kering (Totoki *et al.*, 2007). Anita (2018) melaporkan hasil karakterisasi zeolit-A menggunakan PSA. Hasil dari dianalisis, zeolit-A memiliki ukuran distribusi kerangka partikel berada pada rentang 32,67-58,77 nm. Ukuran yang dihasilkan dinyatakan dalam jari-jari untuk partikel yang berbentuk bola. Penentuan ukuran dan distribusi partikel menggunakan PSA dapat dilakukan dengan difraksi sinar laser untuk partikel dari ukuran submikron sampai dengan milimeter, *counter principle* untuk mengukur dan menghitung partikel yang berukuran mikron sampai dengan milimeter, dan penghamburan sinar untuk mengukur partikel yang berukuran mikron sampai dengan nanometer. Skema alat PSA ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Skema alat PSA

Prinsip alat PSA didasarkan pada metode *Dinamyc Light Scattering* (DLS), dimana hamburan inframerah ditembakkan oleh alat ke sampel sehingga sampel akan merespon dengan menghasilkan gerak Brown. Gerak Brown adalah gerak acak dari partikel yang sangat kecil dalam cairan akibat benturan dengan molekul-molekul yang ada dalam zat cair. Semakin kecil ukuran partikel maka semakin cepat gerakannya. Ukuran partikel yang dapat dianalisis yaitu 0,1 nm hingga 10 μm . Distribusi ukuran partikel dianalisis dan diolah menggunakan statistik distribusi dengan parameter *mean* (ukuran rata-rata), *median* (nilai tengah) dan *modus* (ukuran dengan frekuensi tinggi) (Rawle, 2012).

Analisis PSA dapat dilakukan dengan dua metode, yakni metode basah dan metode kering. Metode basah ini menggunakan pelarut sebagai media pendispersi. Jika sampel yang digunakan larut dalam air maka digunakan pelarut organik, begitu sebaliknya digunakan pelarut air jika sampel tersebut larut dalam pelarut organik. Sedangkan metode kering digunakan untuk partikel yang bobotnya tidak terlalu ringan. Metode kering memanfaatkan aliran udara untuk mendispersikan partikel.

H. Analisis Bahan Bakar Cair

GC-MS digunakan untuk mengidentifikasi komponen senyawa-senyawa dalam bahan bakar cair berdasarkan kromatogram pada GC dan interpretasi fragmentasi senyawa pada MS.

1. *Gas Chromathography-Mass Spectrometry (GC-MS)*

Gas Chromathography-Mass Spectrometry (GC-MS) digunakan untuk mengidentifikasi senyawa-senyawa kimia dalam campuran suatu sampel berdasarkan pemisahan komponen dalam campuran sampel pada GC dan berdasarkan hasil fragmentasi senyawa-senyawa pada MS yang berasal dari pemisahan di GC.

Prinsip kerja dari GC-MS yaitu molekul-molekul gas bermuatan akan diseleksi berdasarkan massa dan beratnya, spektrum yang didapat dari pengubahan sampel menjadi ion-ion yang bergerak, kemudian dipisahkan berdasarkan perbandingan massa terhadap muatan (m/e). Ionisasi menghasilkan fragmen-fragmen yang akan menghasilkan spektrum. Spektrum massa merupakan gambar antara limpahan relatif dengan perbandingan massa per muatan (m/e) (McLafferty, 1988). Spektra massa disajikan dari puncak-puncak utama yang diperoleh dengan memuat harga massa per muatan (m/e) terhadap kelimpahan relatif. Kelimpahan tersebut disebut puncak dasar (*base peak*) dari spektra dan dinyatakan sebagai 100%, yang menunjukkan bobot molekul senyawa. Puncak-puncak lain, yang secara umum dikenal sebagai fragmen molekul, memiliki harga relatif terhadap puncak dasar. Dengan data tersebut maka dapat diperkirakan bagaimana struktur molekul dari senyawa yang dianalisis (Cresswell dkk., 1982). Dalam praktiknya, sekarang telah tersedia sistem kepustakaan senyawa berdasarkan analisis GC-MS, dan dapat digunakan untuk mengidentifikasi komponen dalam sebuah sampel dengan cara membandingkan spetrum massa sampel

dengan spektrum massa standar yang ada dalam sistem kepastakaan. Sejumlah besar senyawa sudah dirangkum dalam suatu sistem kepastakaan yang sudah tersedia dalam bentuk perangkat lunak komputer, diantaranya sistem kepastakaan Willey229 LIB, dan Nist12 LIB. Dengan bantuan sistem kepastakaan ini identifikasi senyawa dalam suatu sampel dapat dilakukan dengan membandingkan spektrum MS dari sampel dengan spektrum MS senyawa yang sudah ada dalam sistem kepastakaan.

2. Karakteristik Fisik

Selain komponen kimia, kelayakan bahan bakar cair juga dianalisis berdasarkan beberapa parameter fisik. Berdasarkan Standar *Engineers Edge*, beberapa parameter fisik sebagai acuan kelayakan bahan bakar cair untuk digunakan adalah densitas, viskositas, dan titik nyala.

a. Densitas

Densitas adalah perbandingan antara berat persatuan volume sampel. Karakteristik ini sangat berhubungan erat dengan nilai panas kalor dan daya yang dihasilkan oleh mesin per satuan bahan bakar yang digunakan. Densitas yang disarankan untuk bahan bakar cair berdasarkan Standar *Engineers Edge* yaitu 0,71-0,74 g/mL.

b. Viskositas

Viskositas adalah suatu nilai yang menyatakan besarnya hambatan aliran suatu bahan cair. Viskositas disebabkan adanya gaya kohesi atau gaya tarik menarik antara molekul sejenis. Pengukuran viskositas suatu cairan dapat dilakukan dengan beberapa metode antara lain, metode bola jatuh, silinder konsentrik, metode *plate and cone*, piringan sejajar, dan metode kapilaritas (Hananto *et al.*, 2011). Semakin tinggi viskositas, makin kental maka semakin sukar bahan cair untuk mengalir (Wardan dan Zainal, 2003).

Viskositas merupakan parameter penting dalam menentukan baku mutu suatu bahan bakar. Pada dasarnya, bahan bakar harus memiliki viskositas yang relatif rendah agar mudah mengalir dan teratomisasi. Jika harga viskositas terlalu tinggi maka akan menyebabkan gesekan di dalam pipa akan semakin besar, kerja pompa akan berat, penyaringannya sulit dan kemungkinan besar kotoran ikut terendap, serta sulit mengabutkan bahan bakar (Dyah, 2011).

Viskositas yang disarankan untuk bahan bakar cair berdasarkan Standar *Engineers Edge* yaitu $<0,88$ cSt.

c. Titik Nyala (*Flash Point*)

Titik nyala adalah suatu angka yang menyatakan suhu terendah dari bahan bakar minyak dimana akan timbul nyala api permukaan minyak, jika didekatkan dengan nyala api. Titik nyala ini diperlukan sehubungan dengan adanya pertimbangan-pertimbangan mengenai keamanan dari penimbunan minyak dan pengangkutan bahan bakar minyak terhadap bahaya kebakaran.

Titik nyala yang disarankan untuk bahan bakar cair berdasarkan Standar *Engineers Edge* yaitu $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

III. METODE PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini telah dilakukan di Laboratorium Kimia Dasar Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung pada bulan Januari-April 2019. Analisis sampel bahan bakar cair dan karakterisasi zeolit dilakukan di Laboratorium Kimia Organik FMIPA Universitas Gadjah Mada, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Teknologi Universitas Lampung, Laboratorium Sentral Universitas Padjadjaran, Laboratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia, dan SMK SMTI Bandar Lampung.

B. Alat dan Bahan

1. Alat- alat yang Digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu perangkat pirolisis, kompor, oven, teflon, toples, peralatan gelas, neraca analitik, saringan, alat penggiling, tanur, blender, *Particle Size Analyzer (PSA)*, *Scanning Electron Microscope (SEM)*, *Fourier Transform InfraRed (FTIR)*, *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Differential Thermal Analysis/Thermogravimetric Analysis (DTA/TGA)*, dan *Gas Chromathography-Mass Spectrometry (GC-MS)*.

2. Bahan-bahan yang Digunakan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu onggok, minyak kelapa sawit, aluminium foil *food grade*, sekam padi, larutan NaOH 1,5%, NaOH padat, larutan HNO₃ 1 M, tempurung kelapa, akuades, kertas saring, dan indikator universal.

C. Prosedur Penelitian

1. Pembuatan Asap Cair

Tempurung kelapa dijemur dan dihancurkan hingga berukuran kecil.

Tempurung kelapa dimasukkan ke dalam reaktor dan dipirolisis pada suhu 450 °C selama 3 jam. Produk yang dihasilkan berupa asap cair *grade 3* dan ditampung dalam botol. Asap cair *grade 3* kemudian didestilasi untuk menghasilkan asap cair *grade 2*.

2. Preparasi Sekam Padi

Sekam padi diayak, lalu direndam dalam air panas selama 2 jam untuk menghilangkan pengotor. Sekam padi yang mengapung dan tenggelam dipisahkan, lalu sekam padi yang tenggelam diambil karena mengandung silika yang lebih tinggi dibandingkan sekam padi yang mengapung. Sekam padi kemudian dibilas beberapa kali menggunakan air panas untuk mengurangi bahan organik larut air yang masih terdapat dalam sekam dan dikeringkan. Sekam padi yang telah kering dan bersih direndam menggunakan larutan HNO₃ 1 M selama 24 jam untuk menghilangkan

pengotor anorganik yang terdapat dalam sekam padi, kemudian dicuci beberapa kali menggunakan air bersih hingga pH air netral ($\text{pH} = 7$) dan dijemur hingga kering.

3. Ekstraksi Silika Sekam Padi

Sebanyak 200 gram sekam padi ditambah 2000 mL NaOH 1,5% dan dipanaskan hingga mendidih selama 30 menit. Hasil ekstrak kemudian disaring dan diambil filtratnya. Filtrat ditambahkan asap cair *grade 2* secara bertahap hingga pH 7 atau menjadi gel silika. Gel silika didiamkan selama 24 jam pada suhu kamar, dan dicuci dengan air panas hingga bersih. Silika yang diperoleh dikeringkan dalam oven pada suhu $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan dihaluskan.

4. Sintesis Zeolit

Sebanyak 40 gram NaOH dilarutkan dalam 200 mL akuades, kemudian larutan dibagi menjadi dua bagian dengan volume yang sama. 27 gram alimunium foil *food grade* dilarutkan dalam larutan NaOH untuk menghasilkan larutan natrium aluminat. 60 gram silika sekam padi dilarutkan dalam larutan NaOH untuk menghasilkan larutan natrium silikat. Larutan natrium silikat dan larutan natrium aluminat dicampurkan dan dihomogenkan menggunakan blender. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam oven pada suhu $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk proses kristalisasi. Waktu kristalisasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu 72, 96, dan 120 jam. Untuk penyederhanaan, sampel yang disintesis dengan waktu kristalisasi 72, 96, dan 120 berturut-turut disimbolkan dengan S72, S96, dan S120. Sampel kemudian dikeringkan

dalam oven pada suhu 80 °C dan dihaluskan. Setelah itu dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 6 jam.

5. Karakterisasi Zeolit

a. *X-Ray Diffraction* (XRD)

Karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui fasa dan untuk menentukan sifat kristal atau kristalinitas dari sampel.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam analisis menggunakan XRD adalah sebagai berikut:

1. Sampel disiapkan dan direkatkan pada kaca, kemudian dipasang pada tempatnya yang berupa lempeng tipis berbentuk persegi panjang (sampel *holder*) dengan bantuan lilin perekat.
2. Sampel yang disimpan dipasang pada sampel *holder* kemudian diletakan pada sampel *stand* di bagian goniometer.
3. Parameter pengukuran dimasukkan pada *software* melalui komputer pengontrol meliputi penentuan *scan mode*, penentuan rentang sudut, kecepatan *scan* cuplikan, member nama cuplikan dan member nomer urut file data.
4. Alat difraktometer dioperasikan dengan perintah “*start*” pada menu komputer, dimana sinar-X akan meradiasi sampel yang terpancar dari target Cu dengan panjang gelombang 1,5406 Å.
5. Hasil difraksi dapat dilihat pada komputer dan intensitas difraksi pada sudut 2θ tertentu dan dapat dicetak oleh mesin printer.

6. Sampel dari sampel *holder* diambil setelah pengukuran cuplikan selesai.

b. *Scanning Electron Microscopy (SEM)*

Analisis menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)* digunakan untuk memberikan informasi tentang morfologi permukaan sampel. Adapun langkah-langkah dalam uji SEM ini adalah sebagai berikut:

1. Sampel disiapkan dan direkatkan pada mesin *holder (Dolite, double sticy tape)*.
2. Sampel yang telah dipasang pada *holder* kemudian dibersihkan dengan *Hand Blower*.
3. Sampel dimasukkan dalam mesin *coating* untuk diberi lapisan tipis yang berupa *gold-poladinum* selama 4 menit sehingga menghasilkan lapisan dengan ketebalan 200-400 Å.
4. Sampel dimasukkan ke dalam *Specimen Chamber*.
5. Pengamatan dan pengambilan gambar pada layer SEM dengan mengatur pembesaran yang diinginkan.
6. Penentuan spot untuk analisis pada layer SEM.
7. Pemotretan gambar SEM.

c. *Fourier Transform InfraRed (FTIR)*

Analisis *Fourier Transform InfraRed (FTIR)* digunakan untuk mengidentifikasi gugus-gugus fungsi dari sampel. Langkah-langkah yang dilakukan untuk uji ini adalah sebagai berikut:

1. Disiapkan sampel yang akan diuji, kemudian diletakan sampel pada sampel *holder* dan ditempatkan pada lintasan sinar alat FTIR.
2. Alat disambungkan pada sumber listrik, lalu komputer dan alat dihidupkan.
3. Dilakukan pengukuran dengan alat FTIR dan grafik yang terbentuk diamati.
4. Data yang dihasilkan disimpan dan dilakukan pembahasan terhadap puncak-puncak yang terbentuk.
5. Komputer dan alat FTIR dimatikan dan dilepas dari sumber arus listriknya.

d. Particle Size Analyzer (PSA)

Karakterisasi menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) untuk mengetahui ukuran dan distribusi partikel dari suatu sampel. PSA merupakan salah satu instrumen nanoteknologi yang menggunakan *Laser Diffraction* (LAS) dalam aplikasinya. Metode ini juga dikenal sebagai *Quasi-Elastic Light Scattering* (QELS). Alat ini berbasis *Photon Correlation Spectroscopy* (PCS). PSA menggunakan metode LAS dibagi menjadi 2 metode aplikasi sebagai berikut:

1. Metode basah. Metode ini menggunakan media pendispersi untuk mendispersikan material uji.
2. Metode kering. Metode ini memanfaatkan udara atau aliran udara untuk melarutkan partikel dan membawanya ke *sensing zone*. Metode ini baik digunakan untuk ukuran yang kasar, dimana hubungan antar partikel lemah dan kemungkinan untuk beraglomerisasi kecil.

6. Preparasi Onggok

Onggok yang digunakan diperoleh dari limbah industri tapioka. Onggok yang diperoleh dijemur hingga kering, kemudian dihaluskan menggunakan penggiling.

7. Percobaan Pirolisis

Sebanyak 100 gram onggok yang telah dihaluskan dicampur dengan 300 mL minyak kelapa sawit. Campuran kemudian ditambah sampel katalis sebanyak 10 gram dan dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis. Kemudian dipirolisis selama 3 jam pada suhu optimum onggok yang telah dianalisis menggunakan DTA/TGA. Produk cair yang dihasilkan dari proses pirolisis ditampung dan dipisahkan antara fasa organik (bahan bakar cair) dan fasa air. Fasa organik yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan GC-MS. Hasil analisis bahan bakar cair dengan kandungan hidrokarbon terbanyak kemudian difraksinasi untuk mendapatkan fraksi ringan. Fraksi ringan yang diperoleh kemudian dianalisis.

8. Analisis Bahan Bakar Cair

Analisis bahan bakar cair yang dihasilkan menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) dilakukan untuk mengidentifikasi komponen-komponen penyusun sampel dan uji fisik sebagai acuan kelayakan bahan bakar cair adalah densitas, viskositas, dan titik nyala (*flash point*).

a. *Gas Chromatography-Mass Spectroscopy (GC-MS)*

Produk yang dihasilkan dari uji perengkahan, dianalisis menggunakan *Gas Chromatography-Mass Spectroscopy (GC-MS)*. Analisis ini dilakukan untuk mengidentifikasi komponen dalam produk dan secara khusus untuk melihat apakah senyawa-senyawa dalam sampel mampu diubah menjadi hidrokarbon.

Langkah-langkah penggunaan GC-MS sebagai berikut:

1. Transformator/*power supply* dinyalakan, kemudian tombol *on* ditekan pada alat GC-MS, berturut-turut untuk power pada *Ion Gauge (I.G.)*, MS, dan GC. Gas He dialirkan, dan dihidupkan pula komputer, monitor, dan printer.
2. Dipilih menu *Class-5000*, klik *vacuum control*, dan *auto start up* dijalankan.
3. GC-MS monitor diaktifkan, set temperatur injektor, kolom, dan detektor. Kemudian ditunggu hingga tekanan vakum di bawah 5 kPa.
4. *Tuning* diaktifkan, diklik *auto tune*, *load method* yang akan digunakan, kemudian klik *start* dan ditunggu beberapa saat sampai hasilnya tercetak, setelah selesai klik *close tuning*.
5. *Method development* diaktifkan, set GC parameter, set MS parameter, *save* metode yang telah dideskripsikan, kemudian klik *exit*.
6. *Real time analysis* diaktifkan, dipilih parameter *single sample*, kemudian diisi dengan deskripsi yang diinginkan.
7. Dilakukan *send parameter*, tunggu sampai GC dan MS siap, kemudian dilakukan injeksi sampel.

8. *Post run analysis* diaktifkan, kemudian pilih *browser* untuk analisis sampel secara kualitatif.
9. Dilakukan pengaturan *peak top comment (peak label)* dan reintegrasi *load file* yang dianalisa. Kemudian dipilih *display spectrum search* pada puncak tertentu dan dilakukan *report* pada bagian yang diinginkan.
10. Untuk mengakhiri, temperatur injektor, kolom, dan detektor pada GC-MS monitor didinginkan sampai temperatur ruangan (30 °C). Bila sudah tercapai, *vakum control* diklik dan dilakukan *auto shut down*. Perangkat alat dimatikan dengan urutan: komputer, GC, MS, IG, dan gas He.

b. Uji Fisik Fraksi Ringan Bahan Bakar Cair

Fraksi ringan bahan bakar cair yang dihasilkan pada penelitian ini diuji kualitasnya dengan beberapa parameter, yakni viskositas, densitas, dan titik nyala yang didasarkan pada Engineers Edge dan Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi 2013.

V. SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil XRD menunjukkan zeolit yang dihasilkan terdiri dari dua fasa kristalin pada S72 dan S96, yakni fasa zeolit-A dan sodalit, sedangkan pada S120 dihasilkan fasa kristalin murni yakni sodalit, selain itu terdapat fasa amorf pada ketiga sampel.
2. Hasil SEM menunjukkan ketiga zeolit memiliki morfologi permukaan yang heterogen dan bentuk yang berbeda, dari FTIR menunjukkan adanya gugus O—H, TO4 (T=Si atau Al), dan Si—O—Si, dan hasil PSA menunjukkan ukuran partikel yang dihasilkan masih beragam.
3. Katalis dengan aktivitas terbaik pada proses pirolisis yaitu S96, karena bahan bakar cair yang dihasilkan memiliki kandungan hidrokarbon tertinggi, yakni 98,68%.
4. Bahan bakar cair yang memiliki kandungan hidrokarbon tertinggi dihasilkan dari pirolisis campuran onggok dan minyak kelapa sawit menggunakan katalis S96, yakni sebesar 98,68%.
5. Fraksi ringan bahan bakar cair yang dihasilkan merupakan senyawa hidrokarbon yang termasuk *biogasoline* dengan panjang rantai C₇-C₁₄

dengan persen relatif 97,37% dan C₁₅ sebagai produk minor dengan persen relatif 2,63%.

6. Karakteristik fisik fraksi ringan bahan bakar cair dalam penelitian ini secara umum belum memenuhi persyaratan berdasarkan Standar *Engineers Edge*.

B. Saran

Beberapa hal yang disarankan pada penelitian selanjutnya antara lain:

1. Mempelajari metode sintesis zeolit-A agar zeolit yang dihasilkan lebih murni.
2. Mempelajari faktor lain yang berpengaruh pada proses pirolisis, diantaranya jumlah katalis.
3. Mempelajari pengaruh suhu kalsinasi terhadap unjuk kerja zeolit.
4. Mengembangkan desain perangkat pirolisis untuk memperoleh produk cair yang optimal.
5. Meningkatkan karakteristik fisik bahan bakar cair agar sesuai dengan standar.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, F., S. Balakrishnan, and P. Wong. 2006. Rice Husk Ash Silica as a Support Material for Ruthenium Based Heterogenous Catalyst. *Journal of Physical Science*. 17(2): 1-13.
- Aguado, J., P. D. Serrano, M. J. Escola, and Garagorri. 2002. Catalytic Conversion of Low Density Polyethylene Using a Continuous Screw Kiln Reactor. *Catalytic Today*. 75: 257-262.
- Anita, R. J. 2018. Pengolahan. Campuran Bagas Tebu dan Minyak Biji Karet Menjadi Bahan Bakar Cair (Liquid Fuel) dengan Metode Pirolisis Menggunakan Zeolit-A Berbasis Silika Sekam Padi sebagai Katalis. (Skripsi). Universitas Lampung. Bandar Lampung. 109 hlm.
- Antono, A. W. 2018. Pengolahan Minyak Kelapa Sawit Liquid Fuel dengan Metode Pirolisis Menggunakan Zeolit Sintetik Berbasis Silika Sekam Padi sebagai Katalis. (Skripsi). Universitas Lampung. Bandar Lampung. 108 hlm.
- Auerbach, S. M., K. A. Carrado, and P. K. Dutta. 2003. *Handbook of Zeolite Science and Thechnology*. 1st Edn. M. Dekker. New York. USA. ISBN-10:0824740203. 1184 pp.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. 2018. *Outlook Energi Indonesia 2018: Energi Berkelanjutan untuk Transportasi Darat*. Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi. Jakarta. 94 hlm.
- Badan Pusat Statistik. 2015. Statistik Ubi Kayu. <https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/880>. Diakses pada 10 Januari 2019.
- Badan Pusat Statistik. 2017. *Statistik Kelapa Sawit Indonesia*. Jakarta. 100 hlm.
- Badan Pusat Statistik. 2018. *Luas Panen dan Produksi Padi di Indonesia*. Jakarta. 12 hlm.
- Bledzki, A. K., A. A. Mamun, and J. Volk. 2010. Barley Husk and Coconut Shell Reinforced Polypropylene Composites: The effect of Viber Physical, Chemical and Surface Properties. *Composites Science and Technology*. 70: 840-846.

- Bridgewater, A. V. and G. V. C. Peacocke. 2000. Fast Pyrolysis Processes of Biomass. *Renewable and Sustainable Energy Review*. 4: 1-73.
- Chandrasekhar, S., P. N. Pramada, and J. Majeed. 2003. Effect of Calcination Temperature and Heating Rate on The Optical Properties and Reactivity of Rice Husk Ash. *Journal of Materials Science*. 41: 7926-7933.
- Chang, H. L. and Shih, W. L. 2000. Synthesis of Zeolite A and X from Fly Ashes and Their Ion-Exchange Behavior with Cobalt Ions. *Journal of Chemical Engineering*. 39: 4185-4191.
- Cornelissen, T., Y. Yerman, G. Reggers, S. Schreurs, and R. Carleer. 2008. Flash Co-Pyrolysis of Biomass with Polylactic Acid. Part 1: Influence on Bio-Oil Yield and Heating Value. *Fuel*. 87: 1031–1041.
- Cresswell, C. J., A. O. Runquist, Campbel, dan M. Malcom. 1982. *Analisis Spektrum Senyawa Organik Edisi ke-2*. ITB Press. Bandung. 145 hlm.
- Cwik, A. 2014. Fuel from Waste-Catalytic Degradation of Plastic Waste to Liquid Fuels. (Thesis). Instituto Superior Técnico Lisboa. Portugal. 86 pp.
- Daifullah, A. A. M., B. S. Girgis, and H. M. H. Gad. 2003. Utilization of Agroresidue (Rice Husk) in Small Waste Treatment Plans. *Material Letters*. 55: 1723-1731.
- Demirbas, A. 2000. Conversion of Biomass Using Glycerine to Liquid Fuel for Blending Gasoline as Alternative Engine Fuel. *Energy Conversion and Management*. 41: 1741-1748.
- Demirbas, A. 2002. Partly Chemical Analysis of Liquid Fraction of Flash Pyrolysis Products from Biomass in the Presence of Sodium Carbonate. *Energi Conversion and Management*. 43: 1801-1809.
- Dyah, P. S. 2011. Produksi Biodiesel dari Mikroalga *Chlorella sp* dengan Metode Esterifikasi In-Situ. (Tesis). Universitas Diponegoro. Jawa Tengah. 45 hlm.
- Engineers Edge. 2019. *Fluid Characteristics Chart Table*. Engineers Edge. Georgia.
- Fuadi, A. M., M. Musthofa, K. Harismah, Haryanto, dan N. Hidayati. 2012. Pembuatan Zeolit Sintesis dari Sekam Padi. *Simposium Nasional RAPI XI FT UMS-2K012*. Universitas Muhammadiyah Surakarta. 55-92.
- Georgiev, D., B. Bogdanov, K. Angelova, I. Markovska, and Y. Hristov. 2009. Synthetic Zeolites Structure, Classification, Current Trends In Zeolite Synthesis Review. *International Science Conference*. 7: 1-5.

- Gougazeh, M. and J. C. Buhl. 2014. Synthesis and Characterization of Zeolite A by Hydrothermal Transformation of Natural Jordanian Kaolin. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Science*. 15: 35-42.
- Hamdan, H. 1992. *Introduction to Zeolites Synthesis, Characterization, and Modification*. Universiti Teknologi Malaysia. Kuala Lumpur. 54 pp.
- Hananto, F. S., D. R. Santoso, and Julius. 2011. Application of Piezoelectric Material Film PVDF (Polyvenylidene Flouride) as Liquid Viscosity Sensor. *Journal of Neutrino*. 3(2): 129-142.
- Hardjono, S. 1990. *Spektroskopi Inframerah*. Liberti. Yogyakarta. 146 hlm.
- Himawati, E. 2010. Pengaruh Penambahan Asap Cair Tempurung Kelapa Destilasi dan Redestilasi Terhadap Sifat Kimia, Mikrobiologi, dan Sensoros Ikan Pindang Layang Selama Penyimpanan. (Skripsi). Universitas Sebelas Mater. Surakarta. 71 hlm.
- Herawati, N., M. Rifdah, dan A. Pratama. 2017. Pembuatan Biogasoline Dari Limbah Ampas Tebu dan Eceng Gondok dengan Proses Thermal Catalytic. *Distilasi*. 2(2): 15-22.
- Hubber, G. W., S. Iborra, and A. Corma. 2006. Synthesis of Transportation Fuels from Biomass Chemistry, Catalysts, and Engineering. *Chemistry Reviews*. 106(9): 4044-4098 hlm.
- Hums, E. 2017. Synthesis of Phase-Pure Zeolite Sodalite from Clear Solution Extracted from Coal Fly Ash. *Journal of Thermodynamics & Catalysis*. 8(2): 1-6.
- Ismail, A. A., R. M. Mohamed, I. A. Ibrahim, G. Kini, and B. Koopman. 2010. Synthesis, Optimization and Characterization of Zeolite-A and its Ion-Exchange Properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 366: 80-87.
- Johnson, E. B. G., E. Sazmal, and J. Asyik. 2014. Hydrothermal Synthesis of Zeolite A Using Natural Kaolin from KG. Gading Bongawan Sabah. *Journal of Applied Science*. 14(3): 3282-3287.
- Kalpathy, U., A. Proctor, and J. Schultz. 2000. A Simple Method for Production of Pure Silika from Rice Husk Ash. *Bioresource Technology*. 73 (3): 257-268.
- Kementerian Pertanian. 2016. *Outlook Kelapa Sawit*. Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian Sekretariat Jenderal. Jakarta. 94 hlm.

- Ketaren, S. 1986. *Pengantar Teknologi Minyak dan Lemak Pangan*. Universitas Indonesia Press. Jakarta. 57 hlm.
- Kristianingrum, S., E. D. Siswani, dan A. Fillaeli. 2011. Pengaruh jenis Asam Pada Sintesis Silika Gel dari Abu Basasse dan Uji Sifat Adsorptifnya terhadap Ion Logam Tembaga (II). *Prosiding Seminar Nasional Kimia*. 281-191.
- Lestari, D. Y. 2010. Kajian modifikasi dan karakterisasi zeolit alam dari berbagai Negara. *Prosiding seminar nasional Kimia dan Pendidikan Kimia Universitas Muhammadiyah*. 1-6.
- Marlina, L. I., F. Sriyanti, Iskandar, dan Kharurizal. 2012. Pengaruh Komposisi Sekam Padi dan Nano Silika Terhadap Kuat Tekan Material Nanokomposit. *Jurnal Penelitian Sains*. 15: 3.
- Maulidiyah., M. Nurdin, F. Fatma, M. Natsir, and D. Wibowo. 2017. Chractionization of Methyl Ester Coumpound of Biodiesel from Industrial Liquid Waste of Crude Palm Oil Processing. *Journal of Chemistry*. 1-15.
- McLafferty. 1988. *Interpretasi Spektra Massa*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta. 45: 14-30.
- Mukti, R. R., H. Hirahara, A. Sugawara, A. Shimojima, and T. Okubo. 2009. Direct hydrothermal Synthesis of Hierarchically Porous Siliceous Zeolite by Using Alkoxyisilylated Nonionic Surfactant. *Langmuir*. 26(4): 2731-2735.
- Napitupulu, R., K. D. Pandiangan, dan W. Simanjuntak. 2012. Studi Pendahuluan Katalitik (Catalytic-Cracking) Minyak Kelapa Menjadi Bahan Bakar Cair (Liquid Fuel) Generasi Kedua dengan Nano Katalis Ti-Silika Berbasis Sekam Padi. *Prosiding SNSMAIP III*. 499-503.
- Nugroho, A., E. Effendi, dan T. Novaria. 2015. Pengolahan Limbah Padat Tapioka Menjadi Etanol dengan Menggunakan *Aspergillus niger*, *Bacillus licheniformis* dan *Saccharomyces cerevisiae*. *Jurnal Teknik Lingkungan*. 7(1): 17-23.
- Nur, H. 2001. Direct Synthesis of Na A Zeolite From Rice Husk and Carbonaceous Rice Husk Ash. *Indonesian Journal of Agricultural Science*. 1: 40-45.
- Oktafany, E., N. Idiawati, dan Harlia. 2016. Pengaruh Destilasi Berulang dan Pemurnian Menggunakan Zeolit Teraktivasi H₂SO₄ Terhadap Komposisi Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). *Jurnal Kimia*. 5(4): 62-67.
- Oster. 2015. *Chemical Composition Limits of Alumunium Purity Grades & Alloys*. Oster. America.

- Pandiangan, K. D., N. Jamarun, S. Arief, and W. Simanjuntak. 2016. Transesterification of Castor Oil Using MgO/SiO₂ Catalyst and Coconut Oil as C0-reactant. *Oriental Journal of Chemistry*. 32(1): 385-390.
- Pandiangan, K. D., S. Arief, N. Jamarun, and W. Simanjuntak. 2017. Synthesis of Zeolit-X from Rice Husk Silica and Aluminum Metal as a Catalyst for Transesterification of Palm Oil. *Journal of Material and Environmental Sciences*. 8(5): 1797:1802.
- Pandiangan, K. D., W. Simanjuntak, M. Rilyanti, N. Jamarun, and S. Arief. 2017. Influence of Kinetic Variables on Rubber Seed Oil Trans-esterification Using Bifunctional Catalyst CaO-MgO/SiO₂. *Oriental Journal of Chemistry*. 33(6): 2891-2898.
- Pisarello, M. L., M. Maquirrian, P. S. Olalla, V. Rossi, and C. A. Querini. 2018. Biodiesel Production by Transesterification in two steps: Kinetic Effect or Shift in the Equilibrium Conversion. *Fuel Processing Technology*. 181: 244-251.
- Platon, A. and J. W. Thomson. 2003. Quantitative Lewis/ Brønsted Ratios using DRIFTS. *Applied Catalysis Industrial Engineering Chemistry Research*. 42: 5988-5992.
- Pratiwi, E. 2015. Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Buah Ketapang dengan Metode Reactive Extraction. (Skripsi). Universitas Lampung. Bandar Lampung. 57 hlm.
- Pratiwi, E. 2018. Pengolahan Campuran Bagas Tebu dan Minyak Jarak Kaliki (*Ricinus communis L.*) Menjadi Liquid Fuel dengan Metode Pirolisis Menggunakan Zeolit Sintetik Berbasis Silika Sekam Padi sebagai Katalis. (Tesis). Universitas Lampung. Bandar Lampung. 123 hlm.
- Rawle, A. 2012. A Basic Guide to Particle Characterization. *Malvern Instrument Limited*. Malaysia. 8 hlm.
- Rizky, M., S. Bahri, dan Yusnimar. 2014. Konversi Kayu Ketapang (*Terminalia Catappa L.*) Menjadi Bio-Oil Menggunakan Metode Pirolisis dengan Katalis Co-Mau/NZA. *Jurnal Teknik Industri*. 1(2): 1-10.
- Sa'diah, H. 2009. Pengaruh Proses Pengepresan (Screw Press) Terhadap Presentase Kehilangan Minyak Kelapa Sawit yang Terdapat pada Ampas Press di PT. Socfin Indonesia Kebun Aek Loba. (Skripsi). Universitas Sumatera Utara. Medan. 30 hlm.
- Saraswati, I. 2015. Sintesis Zeolit-A dari Kaca. *Jurnal Sains dan Matematika*. 23(4): 112-115.

- Saroinsong, J. P. 2015. Pembuatan Silika dari Sekam Padi dengan Metoda Sol Gel Menggunakan Asap Cair Sebagai Pengganti Asam Mineral dan Aplikasinya sebagai Katalis Heterogen. (Skripsi). Universitas Lampung. Bandar Lampung. 64 hlm.
- Seftian, D., F. Antonius, dan M. Faizal. 2012. Pembuatan Etanol dari Kulit Pisang Menggunakan Metode Hidrolisis Enzimatis dan Fermentasi. *Jurnal Teknik Kimia*. 18(1): 10-16.
- Sembiring, S. 2011. Synthesis and Characterisation of Rice Silica Based Borosilicates (B₂SiO₃) Ceramic by Sol-Gel Routes. *Indonesian Journal of Chemistry*. 11(1): 85-89.
- Sembiring, S. dan P. K. Karo. 2007. Pengaruh Suhu Sintering Terhadap Karakteristik Termal dan Mikrostruktur Silika Sekam Padi. *Jurnal Sains MIPA*. 13(3): 233-239.
- Sembiring, S., W. Simanjuntak, P. Manurung, D. Asmi, and M. I. Low. 2014. Synthesis and Characterisation of Gel-Derived Mullite Precursor from Rice Husk Silica. *Ceramic International*. 40: 7067-7072.
- Setiabudi, A., R. Hardian, dan A. Muzaki. 2012. *Karakterisasi Material; Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia*. UPI Press. Bandung. 146 hlm.
- Shamsul, S. N., S. K. Kamarudin, and N. A. Rahman. 2017. Conversion of Bio-Oil to Bio Gasoline Via Pyrolysis and Hydrothermal: A Review. *Renewable and Sustainable Energi Reviews*. 80: 538-549.
- Simanjuntak, W. and S. Sembiring. 2016. The Use of Liquid Smoke as a Substitute for Nitric Acid for Extraction of Amorphous silica from Rice huskthrough Sol-Gel Route. *Oriental Journal of Chemistry*. 32(4): 2079-2085.
- Simanjuntak, W., K. D. Pandiangan, Z. Sembiring, and A. Simanjuntak. 2019. Liquid Fuel Production by Zeolite-A Catalyzed Pyrolysis of Mixed Cassava Solid Waste and Rubber Seed Oil. *Oriental Journal Chemistry*. 35(1): 71-76.
- Simanjuntak, W., S. Sembiring, K. D. Pandiangan, E. Pratiwi, and F. Syani. 2017. Hydrocarbon Rich Liquid Fuel Produced by C₀-pyrolysis of Sugarcane Bagasse and Rubber Seed Oil Using Aluminosilicates Derived from Rice Husk Silica and Aliminum Metal as Catalyst. *Oriental Journal of Chemistry*. 33(6): 3218-3224.
- Simanjuntak, W., S. Sembiring, P. Manurung, R. T. M. Situmeang, and I. M. Low. 2013. Characteristic of Aluminosilicates Prepared from Rice Husk Silica and Aluminum Metal. *Ceramic International*. 39: 9369-9375.

- Simanjuntak, W., S. Sembiring, and K. Sebayang. 2012. Effect of Pyrolysis Temperatures on Composition and Electrical Conductivity of Carbosil Prepared from Rice Husk. *Indonesian Journal of Chemistry*. 12(2): 119-125.
- Simbolon, B., K. Pakpahan, dan M. Z. Siswarni. 2013. Kajian Pemanfaatan Biji Kopi (Arabika) sebagai Bahan Baku Pembuatan Biodiesel. *Jurnal Teknik Kimia*. 2(3): 44-50.
- Sing, K. S. W., D. H. Everett, R. A. W. Haul, L. Moscou, R. A. Pierotti, J. Rouquerol, and Siemieniewska. 1985. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure Applied Chemistry*. 57: 603-619.
- Sirait, M., N. Bukit, dan U. Simarmata. 2014. Sintesis Nanozeolit Alam Menggunakan Metode Ball Milling. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 16(1): 7-11.
- Smallman, R. E. 2000. *Metalurgi Fisik Modern Edisi Keempat*. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. 140 hlm.
- Smith, J. V. 1988. Topochemistry of Zeolites and Related Materials; Topology and Geometry. *Chemistry Review*. 88(1): 149-182.
- Srihapsari, D. 2006. Penggunaan Zeolit Alam yang Telah Diaktivasi dengan Larutan HCl untuk Menjerap Logam-logam Penyebab Kesadahan Air. (Skripsi). Universitas Negeri Semarang. Semarang. 96 hlm.
- Subagjo. 1993. *Zeolit: Struktur dan Sifat-Sifat*. Warta Insinyur Kimia. 3(7): 1-12.
- Sudrajat, R., R. I. Yulita, dan D. Setiawan. 2010. Pembuatan Polioliol dari Minyak Jarak Pagar Sebagai Bahan Baku Poliuretan. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 28(3): 231-240.
- Suka, I. G., W. Simanjuntak, S. Sembiring, dan E. Trisnawati. 2008. Karakteristik Silika Sekam Padi dari Provinsi Lampung yang Diperoleh dengan Metode Ekstraksi. *Jurnal Sains MIPA*. 37(1): 47-52.
- Susmiati, Y., D. Setyaningsih, dan T. C. Sunarti. 2011. Rekayasa Proses Hidrolisis Pati dan Serat Ubi Kayu (Manihot Utilisimia) untuk Produksi Bioetanol. *Jurnal Teknologi Pertanian*. 31(4): 1-7.
- Sutarti dan Rachmawati. 1994. *Zeolit: Tinjauan Literatur*. Pusat Dokumentasi dan Informasi Ilmiah. Jakarta.
- Tety, E., S. Hutabarat, dan F. M. Putra. 2012. Prospek Komoditas Minyak Kelapa Sawit (CPO) dalam Pengembangan Biodiesel sebagai Alternatif Bahan Bakar di Indonesia. *Pekbis Jurnal*. 4(3): 152-162.

- Tippaywong, N., J. Kinorn, and S. Thavornun. 2008. Yields and Gaseous Composition from Slow Pyrolysis of Refuse-Derived Fuels. *Energi Source Part A*. 30: 1572-1578.
- Totoki, S. M., N. Wada, Moriya, and H. Shimaoka. 2007. Active Grating Method: A New Approach for Size Analysis of Nano-Sized Particles. *Shimadzu Review*. 62: 173-179.
- Trisunaryanti, W., R. Shiba, M. Miura, M. Nomura, N. Nishiyama, dan M. Matsukata. 1996. Characterization and Modification of Natural Zeolite and Their Properties for Hydrocracking of a Paraffin. *Journal of The Japan Petroleum Institute*. 39(1): 20-25.
- Wahono, S. K., V. T. Rosyida, C. Darsih, D. Pratiwi, A. Frediansyah, and Hernawan. 2015. Optimaztion of Simultaneous Saccharification and Fermentation Incubation Time Using Cellulose Enzyme for Suggarcane Bagasse on The Second-Generation Bioethanol Production Technology. *Energi Procedia*. 65: 331-336.
- Wahyudi, E., Zuitniar, dan E. Saputra. 2016. Pengolahan Sampah Plastik Polipropilena (PP) Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Metode Perengkahan Katalitik Menggunakan Katalis Sintesis. *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*. 11(1): 17-23.
- Wang, T., Q. Zhang, M. Ding, C. Wang, Y. Li, Q. Zhang, and L. Ma. 2017. Bio-Gasoline Production by Coupling of Biomass Catalytic Pyrolysis and Oligomerization Process. *Energi Procedia*. 105: 858-863.
- Wardan, S. dan A. Zainal. 2003. *Bahan Bakar dan Pelumas*. Fakultas Teknik UNY. Yogyakarta. 56 hlm.
- Wardana, N. Y., N. Caroko, dan Thoharudin. 2016. Pirolisis Lambat Campuran Cangkang Sawit dan Plastik dengan Katalis Zeolit Alam. *Jurnal Teknik Industri*. 22(5): 361-366.
- Wardani, A. K. dan F. N. E. Pertiwi. 2013. Produksi Etanol dari Tetes Tebu Oleh *Saccharomyces cerevisiae* Pembentuk Flok (NRRL-Y 265). *Jurnal Teknik Pertanian*. 33(2): 131-139.
- Weitkamp, L. and L. Puppe. 1999. *Catalysis and Zeolite*. Springer. New York. 17 hlm.
- Wibowo, S. 2013. Karakterisasi Bio-Oil Serbuk Gergaji Sengon (*Paraserianthes Falcataria* L. Nielsen) Menggunakan Proses Pirolisis Lambat. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 31(4): 258-270.

- Wibowo, S. dan D. Hendra. 2015. Karakterisasi Bio-Oil dari Rumput Gelagah (*Saccharum spontaneum* Linn.) Menggunakan Proses Pirolisis Cepat. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 33(4): 347-363.
- Wilson, K. and J. H. Clark. 2000. Solid Acids and Their Use as Enviromentally Friendly Catalysts Inorganic Synthesys. *Journal Pure Application Chemistry*. (72): 1313-1319.
- Wuntu, A. D. dan H. D. Tangkuman. 2008. Derajat Kristalisasi sebagai Fungsi Waktu Ageing dan Waktu Kristalisasi pada Sintesis Zeolit-A dengan Radiasi Gelombang Mikro. *Jurnal Kimia MIPA UNSRAT Manado*. 1(1): 19-24.
- Yakub, M. I., A. Y. Abdalla, K. K. Feroz, Y. Suzana, A. Ibrahim, and S. A. Chin. 2015. Pyrolysis of Oil Palm Residues in a Fixed Bed Tubular Reactor. *Journal of Power and Energi Engineering*. 3: 185-193.
- Yulstiani, R. 2008. *Monograf Asap Cair Sebagai Bahan Pengawet Alami pada Produk Daging dan Ikan*. Cetakan Pertama, Edisi 1. UPN Veteran. Surabaya. 66 hlm.