



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN ARANG BATUBARA HASIL PIROLISA
COAL – $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ UNTUK OKSIDASI PARSIAL METANA**

SKRIPSI

**NAEMA SIAHAAN
0706200415**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
DESEMBER 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN ARANG BATUBARA HASIL PIROLISA
COAL – Fe(NO₃)₃ UNTUK OKSIDASI PARSIAL METANA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik

**NAEMA SIAHAAN
0706200415**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
DESEMBER 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Naema Siahaan
NPM : 0706200415
Tanda Tangan :
Tanggal : 29 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Naema Siahaan
NPM : 0706200415
Program Studi : Ekstensi Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pemanfaatan arang batubara hasil pirolisa *coal*
 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ untuk oksidasi parsial metana

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Dijan Supramono, MSc

Ir. Dewi Tristantini, MT., PhD

Penguji : Ir. Setiadi, M.Eng

Penguji : Ir. Tilani Hamid, M.Si

(*[Signature]*)

(*[Signature]*)

(*[Signature]*)

(*[Signature]*)
29/12/09

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya haturkan kepada Yesus Kristus Tuhan dan Juru Selamat saya karena kasih karunianya, saya telah diberi berkat dan karunia untuk dapat menyelesaikan skripsi ini.

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi persyaratan untuk mendapat gelar Sarjana yang ada di Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Pada kesempatan ini, saya ingin mengucapkan terima kasih pada :

1. Ir. Dijan Supramono, M.Sc dan Ir. Dewi Tristantini, MT., PhD, selaku pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan materi bimbingan dan motivasi buat penulisan skripsi ini.
2. Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku ketua Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
3. Orangtua saya N. Siahaan dan N. Nainggolan yang telah membantu semua kelengkapan dan kebutuhan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini baik doa, dukungan dan pengertiannya.
4. Saudara – saudara saya, Kak Debbie dan abang Siregar, adik saya, Arina Siahaan, Boy Siahaan dan Evalentina Siahaan atas doa dan dukungannya.
5. Sahabat saya Rosalina dan Kak Ibeth, untuk setiap semangat yang telah diberikan, dan kepada Rony Sibarani atas setiap doa, kesetiaan dan kesabarannya dalam membantu penulis menyelesaikan skripsi ini.
6. Sahabat saya Ekstensi Teknik Kimia '07 yang telah banyak membantu dan seluruh kru yang ada di laboratorium RPKA .

Saya menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna dengan segala keterbatasan yang ada. Oleh karena itu, semua saran dan kritik yang membangun sangat saya harapkan.

Akhirnya semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan memberikan arti bagi semua pihak pada umumnya dan bagi saya sendiri pada khususnya.

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Naema Siahaan

NPM : 0706200415

Program Studi : Ekstensi Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Jurusan : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

Pemanfaatan Arang Batubara Hasil Pirolisa $Coal-Fe(NO_3)_3$

Untuk Oksidasi Parsial Metana

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok, Jawa Barat, Indonesia

Pada tanggal : 29 Desember 2009

Yang menyatakan

(Naema Siahaan)

ABSTRAK

Nama : Naema Siahaan
Program Studi : Ekstensi Teknik Kimia
Judul : Pemanfaatan Arang Batubara Hasil Pirolisa *Coal* – $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$
Untuk Oksidasi Parsial Metana

Sebagai sumber energi, batu bara dapat direkayasa dalam berbagai bentuk atau penggunaan. Ia dapat diubah menjadi cair melalui pencairan (liquefaction), gas melalui gasifikasi, atau sesuai dengan aslinya (padat). Pemanfaatan batubara ini dapat digunakan untuk menghasilkan gas sintesa yang digunakan sebagai *chemical feedstock* dalam pembuatan sintesa metanol maupun amonia. Produksi gas sintesis ini dilakukan dengan melibatkan reaksi oksidasi parsial metana dengan menggunakan proses *Chemical Looping Reforming* menggunakan oksida logam Fe_2O_3 sebagai oksigen pembawa untuk menggantikan oksigen murni yang sangat mahal. Sumber oksigen yang disediakan oleh Fe_2O_3 dalam char batubara yang dipreparasi dengan pertukaran antara ion-ion Fe^{3+} dan gugus fungsi karboksilat pada kondisi $\text{pH} > 11$ yang telah tersedia dalam batubara lignit dan pirolisis batubara. Reaksi oksidasi parsial antara Fe_2O_3 dengan metana yang dilakukan pada variasi suhu pirolisis suhu 700, 800 dan 900 °C dan suhu reaksi oksidasi (700, 800 dan 900°C).

Kata kunci : sintesis gas, parsial oksidasi, *Chemical Looping Reforming*, pertukaran ion Fe, pirolisis.

Abstract

Name : Naema Siahaan
Study Program : Extension of Chemical Engineering
Title : Utilization Of Charcoal From Pyrolysis Coal- $Fe(NO_3)_3$
For Partial Oxidation Methane

As an energy source, coal can be fabricated in various shapes. It can be converted into a liquid through melting process (liquefaction), gas through gasification, or inwite (solid). Utilization of this coal can be used to produce synthesis gas which is used as a chemical feedstock to manufacturing methanol or ammonia synthesis. Production of synthesis gas was done by involve the partial oxidation methane using Chemical Looping reforming process with metal oxide Fe_2O_3 as an oxygen carrier to replace the pure oxygen which is very expensive. Oxygen source provided from Fe_2O_3 in coal char prepared by ion-exchange between Fe^{3+} and carboxylate functional groups on the condition of $pH > 11$ which are already available in lignite coal and the coal pyrolysis of partial oxidation reaction between Fe_2O_3 with methane was done at a variations temperature pyrolysis 700, 800 and 900 °C and the reaction temperature oxidation (700, 800 and 900°C).

Keyword : gas syntesis, partial oxidation, Chemical Looping Reforming, Fe-ion exchange, pyrolysis.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Batubara	5
2.2 Gas Sintesa.....	7
2.2.1. Partial Oxidation Chemical Looping Reforming Methode	9
2.2.1.1 <i>Chemical Looping Combustion (CLC)</i>	9
2.2.1.2 <i>Chemical Looping Reforming (CLR)</i>	10
2.3 Analisa Termodinamika Untuk Oksida Logam	11
2.4 Pirolisis.....	13
2.4.1 Pengaruh Pirolisis Batubara Lignit.....	14
2.4.2 Pembentukan Fe ₂ O ₃ dari Gugus Karboksilat Batubara.....	16
2.4.3 Pertukaran Ion pada Batubara	17
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Metode Penelitian.....	19

3.2 Diagram Alir Penelitian	19
3.3 Prosedur Penelitian.....	21
3.3.1 Persiapan Alat dan Bahan Dasar.	21
3.3.2 Pembuatan Katalis Batubara dengan Pertukaran ion Ferrious. ...	21
3.4 Pengambilan Data	24
3.4.1 Analisis Proksimat Arang Batubara.	24
3.4.2 <i>Chemical Characterization</i>	25
3.4.3 Pengukuran Luas Permukaan	25
3.4.4 Pengukuran Kinerja Katalis, Komposisi Gas Keluaran dan Ratio H ₂ /CO.....	25
3.5 Pengolahan Data.....	25
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Analisis Proksimat Batubara	27
4.1.1 Analisa Luas Permukaan.....	28
4.1.2 Analisis <i>X Ray Fluorences</i> (X-RF) arang batubara.....	28
4.2 Reaksi Oksidasi Parsial Metana	29
4.3 Hasil Pengujian.....	30
4.3.1 Pengujian sampel batubara pada suhu pirolisis 700°C.....	31
4.3.2 Pengujian sampel batubara pada suhu pirolisis 800°C.....	33
4.3.3 Pengujian sampel batubara pada suhu pirolisis 900°C.....	34
4.3.4 Profil rasio H ₂ /CO sebagai produk reaksi reformasi metana.	35
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	37
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN.....	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proporsi Kandungan karbon, <i>moisture</i> dan <i>volatile matter</i> pada berbagai jenis batubara	6
Gambar 2.2	Regenerasi Logam Oksida.....	9
Gambar 2.3	Konsep dan reaksi sistematis pada proses <i>Chemical Looping Combustion</i>	10
Gambar 2.4	Konsep <i>reformer</i> dan reaksi sistematis pada proses <i>Chemical Looping Reforming</i> , dimana garis putus-putus warna biru adalah batas dari reaktor dan garis panah warna merah adalah arah <i>oxygen carrier</i> (OC) dan pergerakan Reforming Catalyst (RC).....	11
Gambar 2.5	Data Hasil Kesetimbangan Berdasarkan Perbedaan Ratio O ₂ dan Temperatur	13
Gambar 3.1	Diagram tahapan penelitian.....	20
Gambar 3.2	Rangkaian Alat Pembuatan Gas Sintesa	20
Gambar 3.3	Prosedur Pembuatan Arang Batubara	23
Gambar 3.4	Reaktor yang digunakan dalam penelitian	24
Gambar 3.5	Alat Kromatografi Gas.....	26
Gambar 4.1	Grafik komposisi produk terhadap waktu reaksi pada suhu pirolisis 700 °C dengan variasi suhu reaksi (a. T : 700 °C; b. T : 800 °C; c. T: 900 °C)	31
Gambar 4.2	Grafik komposisi produk terhadap waktu reaksi pada suhu pirolisis 800 °C dengan variasi suhu reaksi (a. T:700 °C; b. T:800 °C; c. T:900 °C)	33
Gambar 4.3	Grafik komposisi produk terhadap waktu reaksi pada suhu pirolisis 900 °C dengan variasi suhu reaksi (a. T : 700 °C; b. T : 800 °C; c. T: 900 °C)	34
Gambar 4.4	Profil rasio H ₂ /CO terhadap waktu reaksi dengan variasi suhu reaksi 700-900 °C (a. T pirolisis : 700°C ; b. T pirolisis : 800°C ; c.T pirolisis: 900°C).....	35

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Proximate Analyses</i> untuk lignit	15
Tabel 3.1 Analisa Proksimat Arang Batubara.....	24
Tabel 4.1 Hasil Analisis Proksimat.....	27
Tabel 4.2 Hasil Analisis X-RF Arang Batubara.	29



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber energi di Indonesia ditandai dengan keterbatasan cadangan minyak bumi, cadangan gas alam yang mencukupi serta cadangan batubara yang melimpah. Batubara, sebagai bahan bakar yang kaya zat karbon, merupakan komponen yang sangat penting didalam *energy mix* di banyak negara. Indonesia sendiri, yang memiliki cadangan batu bara cukup besar (lebih dari 6,756 miliar ton), hanya memanfaatkan batubara sekitar 40% (setara 28 juta ton pertahun) untuk keperluan pembangkit listrik. (Widodo Wahyu, *et al* , 2006)

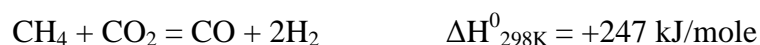
Sebagai sumber energi, batu bara dapat direkayasa dalam berbagai bentuk atau penggunaan. Ia dapat diubah menjadi cair melalui pencairan (liquefaction), gas melalui gasifikasi, atau sesuai dengan aslinya (padat). Semua rekayasa ini tercipta melalui teknologi yang beraneka ragam, mulai dari yang paling sederhana sampai modern, serta telah bersifat komersil di hampir seluruh penjuru dunia. Konsep baru tersebut adalah teknologi pembakaran *fluidized bed* dan teknologi gasifikasi batubara.

Gas sintesis atau *SynGas* adalah istilah yang diberikan kepada campuran gas karbonmonoksida (CO) dengan hidrogen (H₂) yang digunakan untuk mensintesis berbagai macam zat seperti metanol dan ammonia. Proses pembuatan gas sintesis yang telah komersial adalah : proses *steam reforming*, oksidasi parsial metana, dan *CO₂ reforming*.

1. *Steam reforming*



2. *CO₂ reforming*



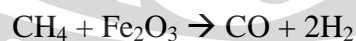
3. CPO (*catalytic partial oxidation*)



Pada proses reaksi steam reforming dibutuhkan energi yang cukup besar yaitu 206 kJ/mol. Karena reaksi ini bersifat endotermik maka dibutuhkan energi yang besar sehingga biaya operasi untuk pembuatan gas sintesis dengan menggunakan metode steam reforming menjadi sangat mahal. Proses pembuatan gas sintesis (syngas) melalui reaksi katalitik oksidasi parsial metana merupakan proses yang lebih menguntungkan daripada menggunakan reaksi katalitik reformasi kukus (steam reforming). Keuntungan utama reaksi oksidasi parsial metana ini adalah :

- (1) Dalam reaksi ini terjadi reaksi eksotermik,
- (2) Memberikan perbandingan H_2/CO yang lebih rendah ($\text{H}_2/\text{CO}=2$),
- (3) Mempunyai selektifitas yang tinggi terhadap gas sintesis.

Namun reaksi ini juga mempunyai kekurangan yaitu bahwa reaksi oksidasi parsial metana ini membutuhkan oksigen murni untuk digunakan sebagai reaktan dalam proses reaksi. Oksigen murni yang biasa digunakan merupakan oksigen murni yang diperoleh dari pemisahan antara O_2 dan N_2 dari udara yang prosesnya membutuhkan biaya yang sangat besar. Namun hal ini dapat diatasi dengan melakukan modifikasi proses yaitu dengan menggunakan *Chemical Looping Reforming*. Oksigen murni dalam *Chemical Looping Reforming* dapat digantikan oleh oksigen yang berasal dari oksida metal sebagai berikut :



Penambahan ion Fe kedalam arang batubara merupakan langkah yang efektif dalam menghasilkan Fe_2O_3 sebagai metal oksida yang berfungsi sebagai katalis dalam reaksi oksidasi parsial metana. Untuk itu dilakukan pembuatan logam oksida yang dapat digunakan baik sebagai sumber oksigen maupun sebagai katalis dalam proses *Chemical looping reforming* yang selanjutnya dapat diregenerasi sehingga dapat menghemat energi sekaligus memperkecil biaya produksi. Dengan adanya proses leaching, pertukaran ion Fe dan pirolisis maka oksida yang terbentuk lebih seragam dan luas permukaan inti aktif katalis akan

semakin luas. Hal ini berarti dengan banyaknya Fe_2O_3 yang terbentuk akan membuat sumber oksigen sebagai reaktan dalam reaksi oksidasi parsial metana akan semakin banyak dan mendorong reaksi ke arah pembentukan gas sintesis. Selain itu semakin luas permukaan inti aktif katalis maka semakin luas pula permukaan kontak antara reaktan dan katalis sehingga bisa membuat reaksi berjalan lebih cepat.

1.2 Perumusan Masalah

Dengan menggunakan Fe_2O_3 -arang batubara yang dibuat dari hasil pertukaran ion, sebagai sumber oksigen untuk menggantikan oksigen murni yang dibutuhkan dalam parsial oksidasi metana.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Memperoleh kinerja Fe_2O_3 sebagai katalis untuk pertukaran ion dalam mengikat oksigen yang terdapat di batubara.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Batubara yang digunakan untuk pembuatan Fe_2O_3 adalah batubara muda jenis Lignit dari Kalimantan dengan komposisi hasil analisis proximate tercantum.
2. Ukuran partikel batubara yang digunakan sebagai parameter pada penelitian ini dipilih pada harga 0.3 mm – 0.5 mm.
3. Proses pirolisis yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan *fixed bed reactor* dengan temperatur 700°C, 800°C dan 900°C
4. Penelitian ini dibatasi dengan menggunakan Fe_2O_3 untuk bereaksi dengan metana menghasilkan gas sintesis.
5. Reaktan yang digunakan adalah campuran 10 % CH_4 dan N_2 , laju alir reaktan sebesar 39, 11 ml/det.
6. Gas inert yang digunakan pada proses pirolisis adalah N_2 .

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah serta sistematika penulisan yang digunakan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi informasi dan tinjauan lebih lanjut tentang segala sesuatu yang berhubungan dengan penelitian ini, seperti batubara, partial oksidasi metana, *chemical looping*, pirolisa.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menginformasikan penjelasan tentang metodologi dan tahap-tahap penelitian yang akan dilakukan dari awal hingga akhir dan memuat bahan/alat yang digunakan, serta prosedur penelitian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini berisi tentang data hasil penelitian, pengolahan data, analisis dan pembahasan terhadap hasil yang diperoleh.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Bagian ini berisi tentang kesimpulan penelitian secara keseluruhan serta saran yang diperlukan untuk kelanjutan penelitian berikutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

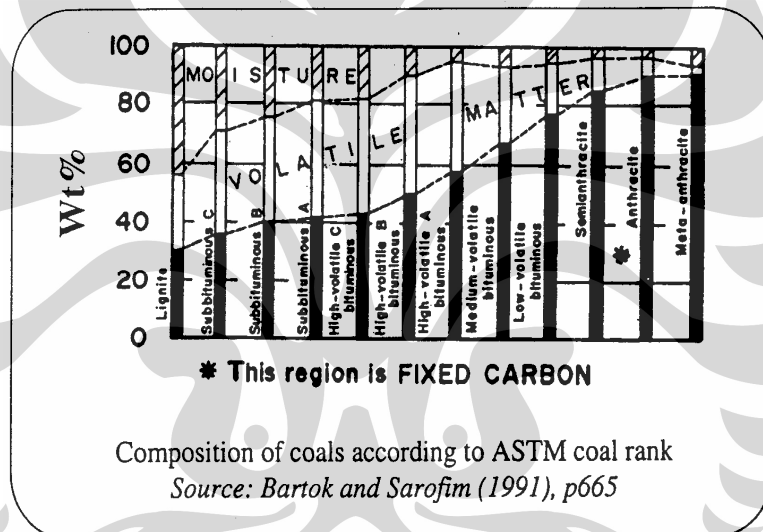
Batu bara adalah salah satu bahan bakar fosil. Pengertian umumnya adalah batuan sedimen yang dapat terbakar, terbentuk dari endapan organik, utamanya adalah sisa-sisa tumbuhan dan terbentuk melalui proses pembatu baraan. Unsur-unsur utamanya terdiri dari karbon, hidrogen dan oksigen. Batu bara juga adalah batuan organik yang memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang kompleks yang dapat ditemui dalam berbagai bentuk. Analisa unsur memberikan rumus formula empiris seperti $C_{137}H_{97}O_9NS$ untuk bituminus dan $C_{240}H_{90}O_4NS$ untuk antrasit.

Berdasarkan tingkat proses pembentukannya yang dikontrol oleh tekanan, panas dan waktu, batu bara umumnya dibagi dalam lima kelas: antrasit, bituminus, sub-bituminus, lignit dan gambut.

- Antrasit adalah kelas batu bara tertinggi, dengan warna hitam berkilauan (*luster*) metalik, mengandung antara 86% - 98% unsur karbon (C) dengan kadar air kurang dari 8%.
- Bituminus mengandung 68 - 86% unsur karbon (C) dan berkadar air 8-10% dari beratnya. Kelas batu bara yang paling banyak ditambang di Australia.
- Sub-bituminus mengandung sedikit karbon dan banyak air, dan oleh karenanya menjadi sumber panas yang kurang efisien dibandingkan dengan bituminus.
- Lignit atau batu bara coklat adalah batu bara yang sangat lunak yang mengandung air 35-75% dari beratnya.
- Gambut, berpori dan memiliki kadar air di atas 75% serta nilai kalori yang paling rendah. (www.wikipedia.com)

Produksi batubara pada tahun 1995 mencapai sebesar 44 juta ton. Sekitar 33 juta ton diekspor dan sisanya sebesar 11 juta ton untuk konsumsi dalam negeri. Dari jumlah 11 juta ton tersebut 60 % atau sekitar 6.5 juta ton digunakan untuk pembangkit listrik, 30 % untuk industri semen dan sisanya digunakan untuk rumah tangga dan industri kecil.

Batubara mengandung 3 komponen utama, yaitu karbon, air (*moisture*) dan material mudah menguap (*volatile matter*). Tergantung jenis batubara proporsi antara ketiga komponen tersebut berbeda-beda. Gambar 1. menunjukkan proporsi yang umumnya ditemukan di kebanyakan batubara. Gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai kalori batubara, semakin tinggi kandungan karbon, semakin rendah kandungan *volatile matter* dan semakin kecil kandungan *moisture*. Batubara lignit dan sub-bituminus pada umumnya mengandung karbon kurang dari 40%. Panas pembakaran diperoleh baik dari reaksi antara karbon dan oksigen pada permukaan batubara maupun dari reaksi antara senyawa hidrokarbon yang terkandung dalam *volatile matter*. *Volatile matter* mempunyai nilai kalori per satuan massa lebih rendah dibanding karbon.



Gambar 2.1 Proporsi kandungan karbon, *moisture* dan *volatile matter* pada berbagai jenis batubara

Dengan adanya komposisi tersebut, pembakaran material karbon mengalami proses yang berbeda yang berlangsung seiring dengan kenaikan temperatur material karbon:

1. Proses pirolisa (*devolatilization*), yang terjadi ketika batubara mengalami pemanasan. Material *volatile* (material yang mudah menguap) termasuk tar terlepas dari permukaan dan pori-pori partikel material karbon sehingga terbentuk *char* (arang). Pada material batubara, proses ini mulai terjadi pada temperatur sekitar 150°C dan mencapai kecepatan pelepasan material *volatile*

maksimum pada temperatur antara 300 hingga 400°C dan berlanjut hingga temperatur sekitar 800°C. (Murray, J.B., 1969).

Sebagai sumber energi, batu bara dapat direkayasa dalam berbagai bentuk atau penggunaan. Ia dapat diubah menjadi cair melalui pencairan (liquefaction), gas melalui gasifikasi, atau sesuai dengan aslinya (padat). Ia juga dapat digunakan secara langsung atau melalui proses pengemasan. Semua rekayasa ini tercipta melalui teknologi yang beraneka ragam, mulai dari yang paling sederhana sampai modern, serta telah bersifat komersil di hampir seluruh penjuru dunia.

2.2 Gas Sintesa

Gas sintesis atau *SynGas* adalah istilah yang diberikan kepada campuran gas karbonmonoksida (CO) dengan hidrogen (H₂) yang digunakan untuk mensintesis berbagai macam zat seperti metanol dan ammonia. Proses pembuatan gas sintesis yang telah komersial adalah : proses *steam reforming*, oksidasi parsial metana, dan *CO₂ reforming*. Beberapa metode pembuatan gas sintesis yaitu :

1. *Steam reforming*



Hidrokarbon yang berasal dari gas alam, LPG atau hidrokarbon cair akan bereaksi dengan cara seperti di atas :



2. *CO₂ reforming*



3. CPO (*catalytic partial oxidation*)



4. ATR (*auto thermal reforming*) (*combination of steam reforming and CPO*)



5. *Methane cracking:*6. *Coal gasification reactions*

Jika batubara diumpankan ke dalam reaktor bersama-sama dengan metana, maka reaksi-reaksi yang mungkin terjadi adalah sebagai berikut:

7. *Combustion reactions*

(J.R. Rostrup-Nielsen, 1993)

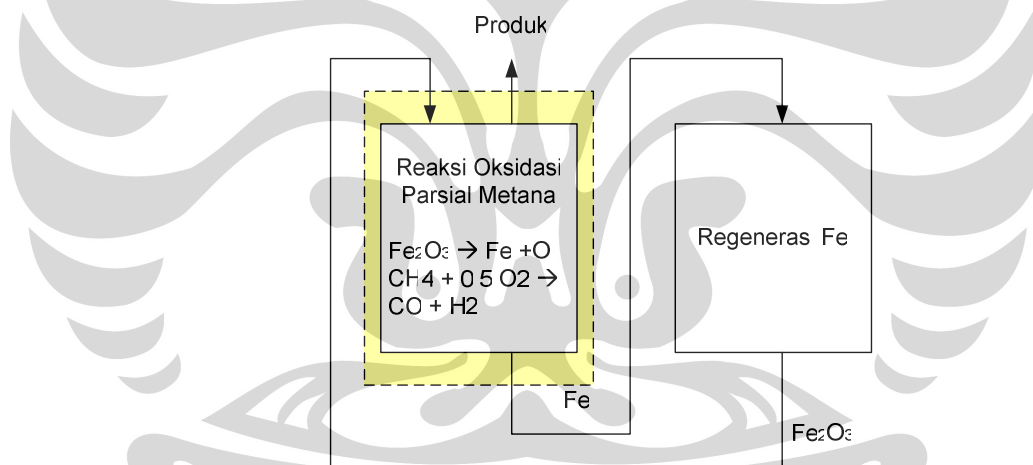
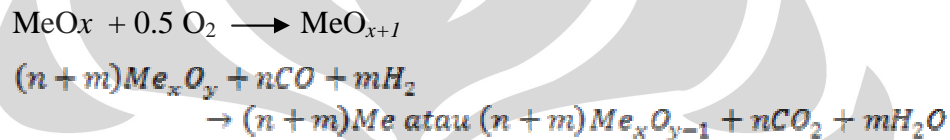
Pada proses reaksi steam reforming dibutuhkan energi yang cukup besar yaitu 206 kJ/mol. Karena reaksi ini bersifat endotermik maka dibutuhkan energi yang besar sehingga biaya operasi untuk pembuatan gas sintesis dengan menggunakan metode steam reforming menjadi sangat mahal. Metode pembuatan gas sintesis dengan *Carbon dioxide (CO₂) reforming* juga lebih endotermis dari proses *steam reforming* . Namun beberapa hal yang pantas dipertimbangkan akhir-akhir ini dari metode (CO₂) *reforming* karena mempunyai beberapa keuntungan diantaranya dapat menurunkan rasio H₂/CO = 1, dan dapat menggunakan kembali CO₂ sehingga dapat mengurangi efek rumah kaca, dan sebagai penyimpan energi (*energi storage / transmission*). Salah satu kelemahan yang ditemui pada CO₂ *reforming* adalah katalis menjadi tidak aktif (*deactivation of the catalysts*) terutama yang berkaitan dengan pembentukan komposit karbon. Proses pembuatan gas sintesis (syngas) melalui reaksi katalitik oksidasi parsial metana merupakan proses yang lebih menguntungkan daripada menggunakan reaksi katalitik reformasi kukus (steam reforming). Keuntungan utama reaksi oksidasi parsial metana ini adalah :

- (1) Dalam reaksi ini terjadi reaksi eksotermik,
- (2) Memberikan perbandingan H₂/CO. yang lebih rendah (H₂/CO=2),
- (3) Mempunyai selektifitas yang tinggi .

Kelemahan dari reaksi ini adalah oksigen yang biasa digunakan dalam proses reaksi ini berharga mahal karena diperoleh melalui proses pemisahan O_2 dan N_2 dari udara yang membutuhkan energi yang sangat besar. Namun hal ini dapat diatasi dengan melakukan modifikasi proses yaitu dengan menggunakan *Chemical Looping Reforming*. (J.R. Rostrup-Nielsen, 1993)

2.2.1 Partial Oxidation Chemical Looping Reforming Methode

Konsep oksidasi parsial dengan CLR berasal dari konsep *Chemical Looping Combustion* dimana terjadi reaksi antara bahan bakar (*fuel*) dengan oksigen untuk menghasilkan CO_2 dan H_2O . Oksigen ini berasal dari oksida logam sebagai *oxygen carrier* yang dihasilkan dari reaksi antara udara dan logam.



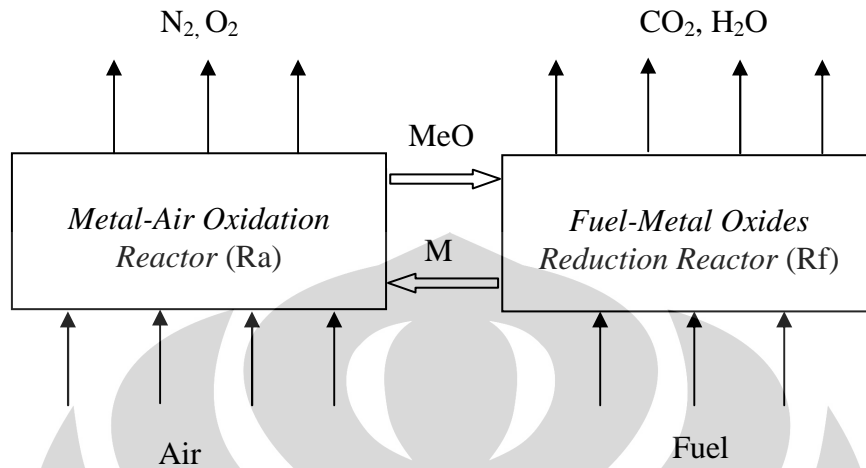
Gambar 2.2 Regenerasi Logam Oksida

Chemical Looping Reforming menghasilkan oksida logam yang akan bereaksi dengan udara sehingga dapat meregenerasi pembentukan Fe_2O_3 .

2.2.1.1 Chemical Looping Combustion (CLC)

Chemical Looping Combustion (CLC) adalah suatu teknologi yang berpotensi mengurangi biaya dengan penggunaan CO_2 yang dihasilkan dari proses sehingga tidak ada energy yang hilang dan tidak ada biaya yang berhubungan

dengan peralatan separasi gas dan operasi. *Chemical Looping Combustion (CLR)* menggunakan gas sintesa untuk menghasilkan CO_2 dan H_2O .

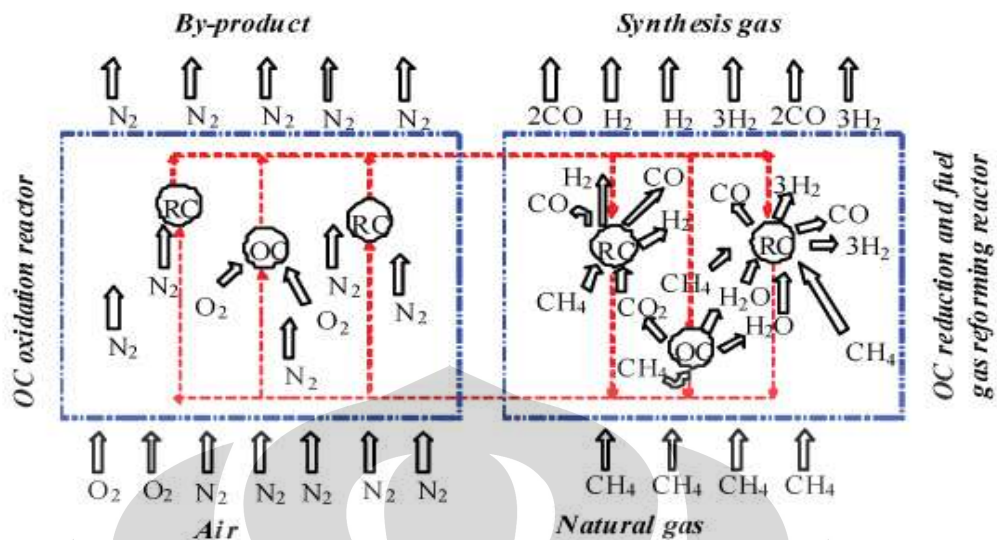


Gambar 2.3 Konsep dan reaksi sistematis pada proses *Chemical Looping Combustion*. (Zhu et al,2005).

Pada CLC, oksigen ditransfer dari pembakaran udara ke bahan bakar gas dengan bantuan *oxygen carrier* padat yaitu suatu oksida logam. Sistem terdiri atas dua reaktor yang saling berhubungan yaitu reaktor bahan bakar (Rf) dan reaktor udara (Ra).

2.2.1.2. *Chemical Looping Reforming (CLR)*

Berdasarkan konsep CLC inilah dikembangkan suatu metode melalui penggantian bahan bakar dengan gas alam (metana) untuk direaksikan dengan oksigen. Metode ini disebut *Chemical Looping Reforming (CLR)* yaitu pengolahan gas alam dengan cara *methane reforming* untuk menghasilkan gas sintesa menggunakan oksida logam sebagai *oxygen carrier*, misalnya CaO , Fe_2O_3 , NiO , BaO , CuO , Al_2O_3 dan sebagainya. *Chemical Looping Reforming* menggunakan gas alam untuk menghasilkan gas sintesa. Pada proses CLR dapat juga terbentuk CO_2 dan H_2O namun idealnya dalam kasus ini CO_2 dan H_2O akan bereaksi dengan kelebihan gas alam. Sehingga dalam hal ini, oksida logam juga bertindak sebagai *Reforming Catalyst (RC)* untuk membentuk gas sintesa melalui *CO_2 Reforming (R2)* dan *Steam Reforming (R3)*.

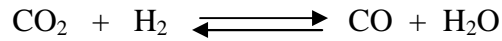
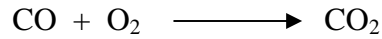
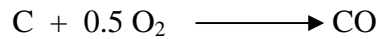
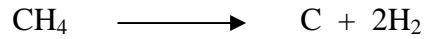


Gambar 2.4 : Konsep *reformer* dan reaksi sistematis pada proses *Chemical Looping Reforming*, dimana garis putus-putus warna biru adalah batas dari reaktor dan garis panah warna merah adalah arah *oxygen carrier* (OC) dan pergerakan Reforming Catalyst (RC).

2.3 Analisis Termodinamika Untuk Oksida Logam

Analisa termodinamika telah dilakukan yang dikhususkan untuk reaksi oksida logam sebagai *oxygen carrier* (OC) dan CH₄ dengan menggunakan data termodinamika Glenn dari NASA. Data termodinamika ini didasarkan pada Al₂O₃, BaO, CaO, Fe₂O₃, GeO₂, MgO, MoO₃, NbO, Pb₂O₃ yang telah diuji. Dimana semua hasil didasarkan pada satu mol CH₄ sebagai *feed* dan *oxidation potential ratio* (perbandingan potensial oksidasi) digunakan untuk menentukan reaksi stoikiometri secara kuantitatif. Dimana *oxidation potential ratio* (perbandingan potensial oksidasi) adalah perbandingan banyaknya mol *oxygen carrier* (OC) mula-mula dibagi banyaknya OC yang dibutuhkan untuk membentuk satu mol CH₄. Jika *oxidation potential ratio* (perbandingan potensial oksidasi) lebih besar dari 1 sehingga dihasilkan keadaan setimbang pada CH₄, CO₂, CO, H₂O, dan H₂ dan metal/metal oksida yang digunakan pada produksi gas sintesis. secara umum oksida logam dapat dibagi menjadi tiga kelas yaitu :

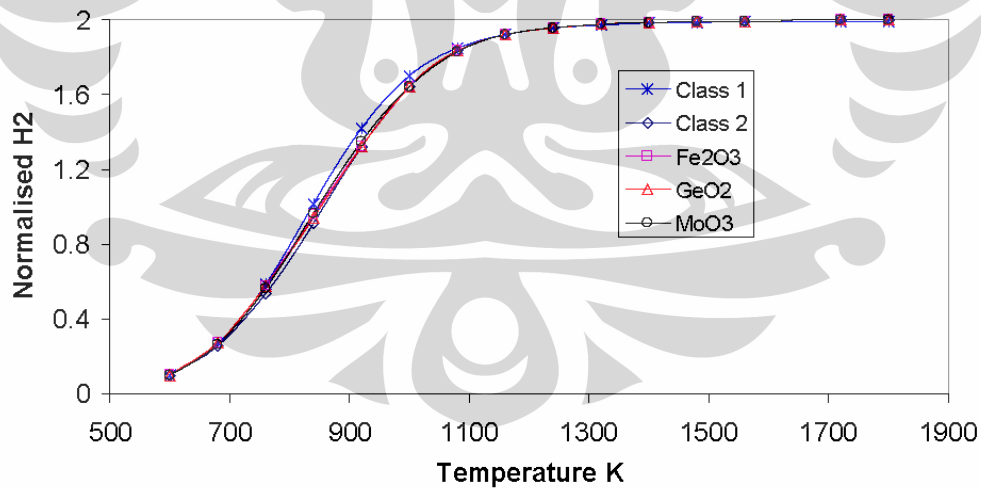
- a. Kelas 1 meliputi oksida logam yang hanya kontak dibagian permukaan dan tidak mampu bereaksi dengan CH₄. Jenis oksida logam ini digunakan untuk proses pirolisis atau *cracking* CH₄, misalnya Al₂O₃, BaO, CaO, MgO dan NbO.

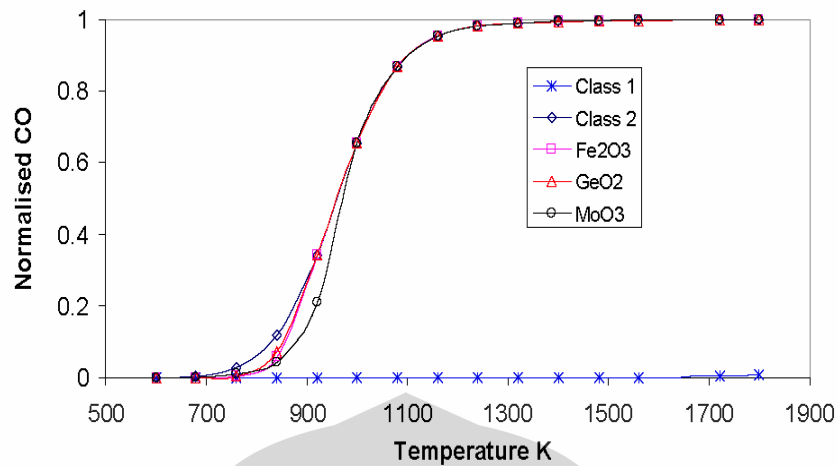


- b. Kelas 2 meliputi oksida logam yang bereaksi dengan gas alam dan dapat berfungsi sebagai *oxygen carrier* pada *partial oxidation reforming*, misalnya CuO dan Pb_2O_3 .



- c. Kelas 3 meliputi oksida logam yang berada diantara kelas 1 dan kelas 2. Tetapi jika suhu lebih besar dari 1000 K, oksida logam ini akan mempunyai sifat yang sama dengan kelas 2 yaitu sebagai *oxygen carrier* pada oksidasi parsial metana, misalnya Fe_2O_3 , GeO_2 dan MoO_3 .





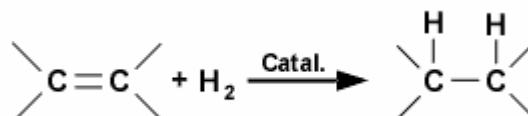
Gambar 2.5 Data Hasil Kesetimbangan Berdasarkan Perbedaan Ratio O₂ dan Temperatur Reaksi

(Zhu, J.N.,*et al*, 2005)

Pembentukan karbon yang tinggi terjadi pada temperature rendah dengan potensial oksidasi lebih kecil dari 1. Tetapi jika suhu dinaikkan hingga 1200 K, pembentukan karbon dapat dikurangi kecuali untuk oksida logam kelas 1. Tetapi melalui *chemical looping reforming* sebagai proses reforming yang baru dikembangkan efek pembentukan karbon dapat dihilangkan dengan mengalirkan oksida logam untuk membakar habis karbon yang terbentuk selama siklus udara melalui reaktor yang dikembangkan pada *chemical looping reforming*. (Zhu, J.N.,*et al*, 2005)

2.4 Pirolisis

Pirolisis adalah dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa atau sedikit oksigen atau reagen lainnya, di mana material mentah akan mengalami pemecahan struktur kimia menjadi fase gas. Pirolisis adalah kasus khusus termolisis. Pirolisis ekstrim, yang hanya meninggalkan karbon sebagai residu, disebut karbonisasi.



Pada proses pirolisis, batubara dipanaskan dalam kondisi tanpa oksigen. Pada keadaan demikian, zat terbang (*volatile matter*) di dalamnya akan terusir keluar. Bila suhu pemanasannya rendah, proses ini disebut pirolisis suhu rendah (*low temperature pyrolysis*), menghasilkan produk berupa bahan bakar padat non asap (*coalite*). Sedangkan pada pirolisis suhu tinggi, bila batubara yang diproses adalah batubara kokas, maka akan dihasilkan kokas yang keras. Selain padatan yang disebut char ataupun kokas, produk sampingan berupa gas dan material cair yang disebut tar juga akan dihasilkan pada pirolisis. Pada awalnya, gas dan tar ini tidak dimanfaatkan.

Gas hasil pirolisis ini dimulai dimanfaatkan sejak tahun 1800an, yang digunakan untuk keperluan penerangan. Pemanfaatannya bahkan meluas hingga untuk bahan bakar (*fuel gas*), sehingga industri pirolisis yang bertujuan untuk menghasilkan gas dari batubara pun berkembang pesat. Pada industri ini, gas merupakan produk utama, sedangkan char atau kokas dan tar merupakan produk sampingan. Sebelum tahun 1960an ketika bahan baku migas mulai menggeser peranan batubara, suplai gas kota (*town gas*) terutama berasal dari pirolisis batubara ini.

2.4.1 Pengaruh Pirolisis Batubara Lignit

Demineralisasi dan *Ca-exchanged* batu bara (Dem + Ca-coal) telah di devolatilisasi menggunakan Nitrogen, baik oleh proses pirolisis yang lambat dan cepat. Pirolisis lambat (dengan K 10 menit) digunakan pada tabung pembakaran dengan diameter horisontal 50 mm dimana 2 g dari ukuran-batu bara ditempatkan di sebuah quartz boat. Laju alir pada 500 cm³/menit. Suhu dimonitor dengan menggunakan *chromel-alumel thermocouple*.

Pirolisis cepat dilakukan dalam *isothermal entrained* – aliran tanur, yang dijelaskan sebelumnya oleh Scaroni *et al*, di mana partikel pemanasan rata – rata diperkirakan dari 10⁴ K/s. Temperatur gas diukur dengan menggunakan sedotan pyrometry. Waktu maksimum dari batubara (char) di salah satu partikel yang melewati reaktor adalah diperkirakan menjadi 0,3 detik untuk 70 x 100 US fraksi mesh pada 1275 K.

Dengan menggunakan rancangan yang baru dari char kolektor, dimana partikel char dikumpulkan dalam keramik percobaan di dalam zona panas dari tanur, waktu diam Pirolisis dapat diperpanjang lebih lama.

(Ljubiga R. Radovik, Philip L. Walker, Jr. and Robert G. Jenkins, 1983)

Hanzade Haykiri *et al* melakukan penelitian pada 25 sampel lignit dengan ukuran partikel 250 μ m. Analisis thermogravimetric dilakukan dengan menggunakan *Shimadzu TG41 thermal analyzer* dimana 40 mg sampel arang batubara lignit disebarkan secara acak di bawah wadah yang terbuat dari logam alumina. Udara digunakan sebagai gas oksidasi dengan laju alir udara 40 cc/menit. Temperatur dinaikkan hingga 1273 K dengan laju pemanasan 40 K/menit selama 30 menit. (Hanzade Haykiri *et al*, 1999)

Hasil analisa ditunjukkan pada tabel 2.1 :

Tabel 2.1 *Proximate Analyses* untuk lignit

Sample code	Moisture (wt.%)	Volatile matter (wt.%)	Fixed carbon (wt.%)	Ash (wt.%)
L 01	10.5	32.2	25.1	32.2
L 02	4.4	22.2	32.8	40.6
L 03	15.7	36.1	16.4	31.8
L 04	9.6	39.2	40.2	11.0
L 05	10.5	36.8	40.6	12.1
L 06	19.9	30.3	35.8	14.0
L 07	27.6	39.8	22.8	9.8
L 08	24.2	38.4	31.2	6.2
L 09	2.0	32.0	51.6	14.4
L 10	14.0	36.1	23.3	26.6
L 11	7.2	46.4	39.1	7.3
L 12	25.3	28.7	16.7	29.3
L 13	16.2	40.9	10.3	32.6
L 14	15.9	41.0	36.4	6.7
L 15	35.4	32.2	23.4	9.0
L 16	12.5	32.3	32.3	22.9
L 17	17.9	37.3	26.1	18.7
L 18	27.0	34.4	18.0	20.6
L 19	14.1	33.4	39.8	12.7
L 20	13.9	24.6	22.3	39.2
L 21	40.4	32.1	12.3	15.2
L 22	6.4	28.6	37.4	27.6
L 23	5.9	31.8	53.4	8.9
L 24	27.5	34.4	24.0	14.1
L 25	48.0	28.2	11.8	12.0

Sumber : Hanzade Haykiri *et al*, 1999

Dari tabel diatas dapat dilihat kandungan *volatile matter* untuk arang batubara lignit sangat besar sehingga luas permukaan porinya juga besar. Tidak

ada kesulitan dalam menangani partikel CaO karena partikel CaO terdispersi pada permukaan char yang sangat besar. Lignit juga memiliki gugus fungsional oksigen dalam jumlah yang besar dan proton dari gugus karboksil dapat ditukar dengan mudah oleh logam kation. (Benjamin Garcia, Takayuki Takarada, 1998)

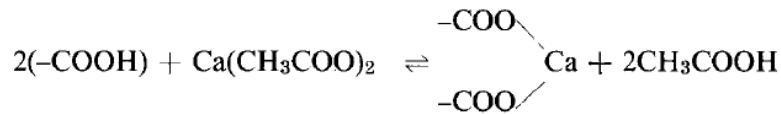
2.4.2 Pembentukan Fe_2O_3 dari gugus karboksilat batubara

Pertukaran ion dari bahan batubara telah dipelajari untuk melihat bagaimana mendapatkan kondisi optimal untuk penentuan kelompok karboksil dari grup phenol. Efek pH, suhu, dan atmosfer pada pertukaran ion ini telah dianalisa. Prosedur alternatif untuk memperkirakan komposisi *carboxyl* diikuti sebagai nilai tukar awal, misalnya titrasi untuk asam telah dilakukan, perkiraan kation dalam pertukaran batu bara dan asam dihasilkan di *back-exchange*.

Kesimpulan yang dihasilkan yaitu bahwa dengan pertukaran barium acetate pada pH di bawah 8,25 yang diikuti oleh titrasi potensiometri pada pH 8,25. Tidak ada bukti yang diperoleh untuk mendukung saran dari literatur yang menyatakan bahwa pertukaran dengan acetate dari kation bivalent (misalnya Ca^{++} , Ba^{++}) dapat mengakibatkan formasi setengah garam dimana salah satu atom kation diasosiasikan dengan hanya satu group karboksil. (H. N. S. Schafer, 1969).

Karakteristik dari batu bara berkadar rendah, dan yang terkait dengan bahan-bahan *humic* dimana sebagian besar oksigen yang terkait dengan struktur ini hadir sebagai group karboksil. Group karboksil memberi pertukaran ion ke bahan-bahan ini, dan jumlah yang cukup besar dari konstituen anorganik dimana yang lebih penting adalah sering hadir sebagai garam dalam grup asam ini. Dalam proses *coalification*, group karboksil yang muncul yang mempunyai batas (jika diasumsikan bahwa batubara bituminous telah melewati tahap yang sama) dan hilang sebelum oksigen phenolic sebagai berkurangnya komposisi oksigen.

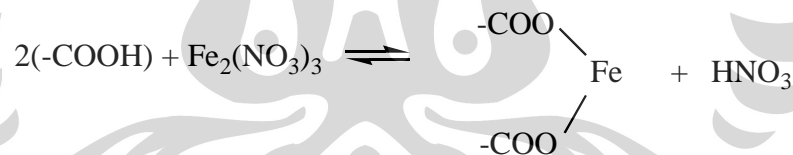
Pertimbangan telah diberikan kepada sejumlah prosedur pertukaran ion yang digunakan untuk menentukan grup karboksil. Prosedur awalnya diusulkan oleh W. Fuchs melibatkan reaksi antara group karboksil dengan kalsium asetat sebagai berikut:



Setelah pemisahan batu bara oleh penyaringan, asam asetat ditentukan dengan titrasi oleh basa. Berbagai perubahan dalam detail percobaan memiliki usulan untuk memastikan kelengkapan reaksi. Staemmler *et al* menggunakan refluxing berulang-ulang dengan kalsium dan barium acetates. Setelah batubara disaring, asam dalam filtrat dititrasi. Proses ini diulang dengan menggunakan larutan asetat sampai tidak ada jumlah asam yang terbentuk. (Schafer, 1969).

Batubara jenis lignit mempunyai gugus oksigen dalam jumlah yang besar dan proton dari gugus karboksil dapat dengan mudah dipertukarkan dengan logam kation. Ketika *Ca-exchanged* batubara dipirolisa, asam karboksilat akan terdisosiasi, karbon dioksida akan lepas, dan meninggalkan senyawa kalsium yang terdispersi dengan banyak seperti CaO dan CaCO₃. (Benjamin Gracia,1998)

Pemutusan ikatan karbon dapat memperlambat kereaktifan arang yang tidak tersusun teratur bahan anorganik yang dapat dinyatakan sebagai katalis dan pengurangan luas permukaan yang terdapat pada proses.



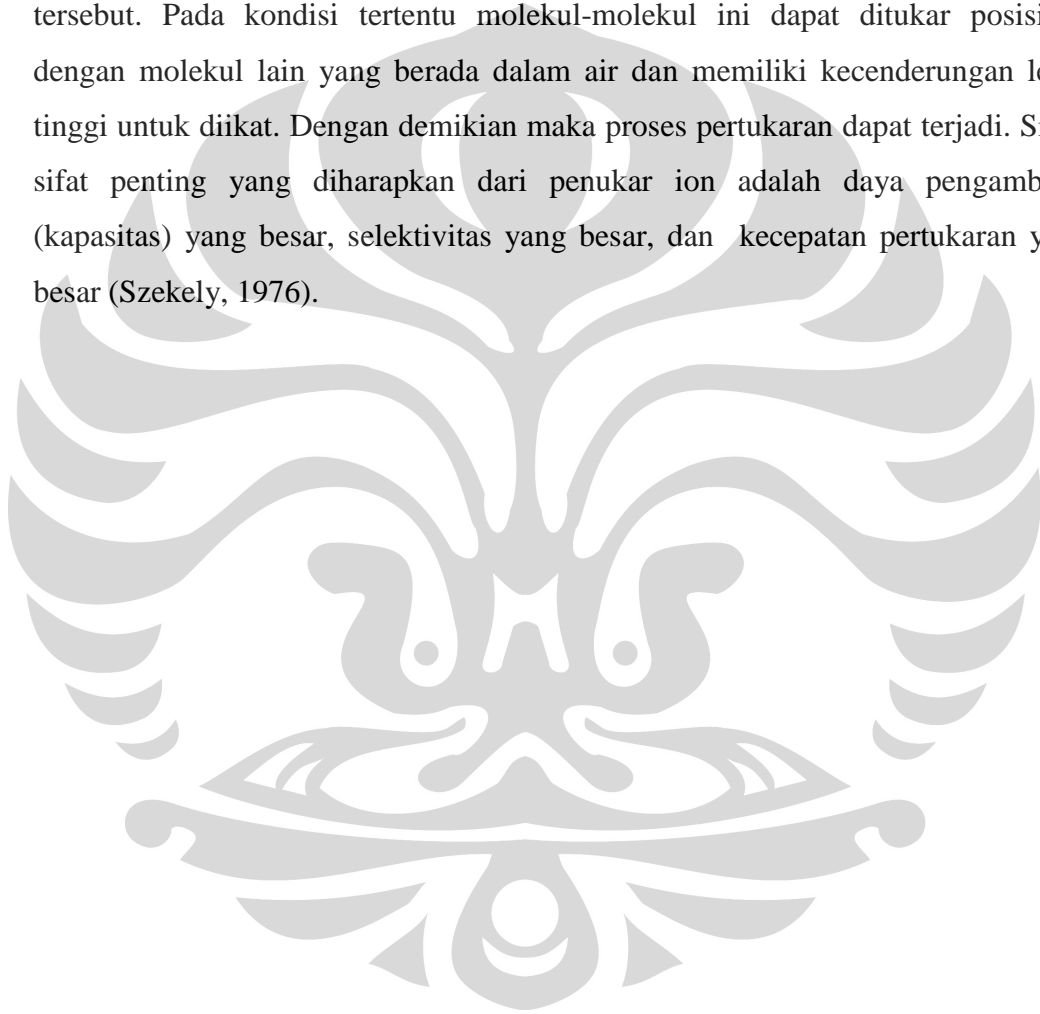
(Morgan, *et al*, 1981).

2.4.3 Pertukaran ion pada batubara

Batubara dapat melakukan proses pertukaran ion. Penelitian ini menggunakan jenis batubara lignit yang mempunyai jumlah oksigen yang tinggi sekitar 20% hingga 30% berat. Batubara ini mempunyai gugus fenol dan karboksil. Gugus ini termasuk ke dalam golongan asam yang terdapat di alam. Untuk memperkirakan komposisi dari karboksil ini dapat dilakukan dengan titrasi asam basa. Gugus karboksil memberi pertukaran ion dalam jumlah yang cukup besar dari unsur anorganik. Beberapa gugus karboksil akan diubah ke dalam bentuk logam karboksilat dengan cara pertukaran ion yang larut dalam komponen

logam air tanah. Kehadiran dari logam *ion exchange* ini berpengaruh terhadap proses pirolisis batubara. (Schafer, 1970).

Pertukaran ion merupakan proses dimana ion yang terserap pada suatu permukaan filter ditukar dengan ion yang berada dalam air, yang dimungkinkan dengan fenomena tarik menarik antara permukaan media bermuatan. Apabila suatu molekul bermuatan menyentuh suatu permukaan yang memiliki muatan berlawanan maka molekul tersebut akan terikat secara kimiawi pada permukaan tersebut. Pada kondisi tertentu molekul-molekul ini dapat ditukar posisinya dengan molekul lain yang berada dalam air dan memiliki kecenderungan lebih tinggi untuk diikat. Dengan demikian maka proses pertukaran dapat terjadi. Sifat-sifat penting yang diharapkan dari penukar ion adalah daya pengambilan (kapasitas) yang besar, selektivitas yang besar, dan kecepatan pertukaran yang besar (Szekely, 1976).



BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

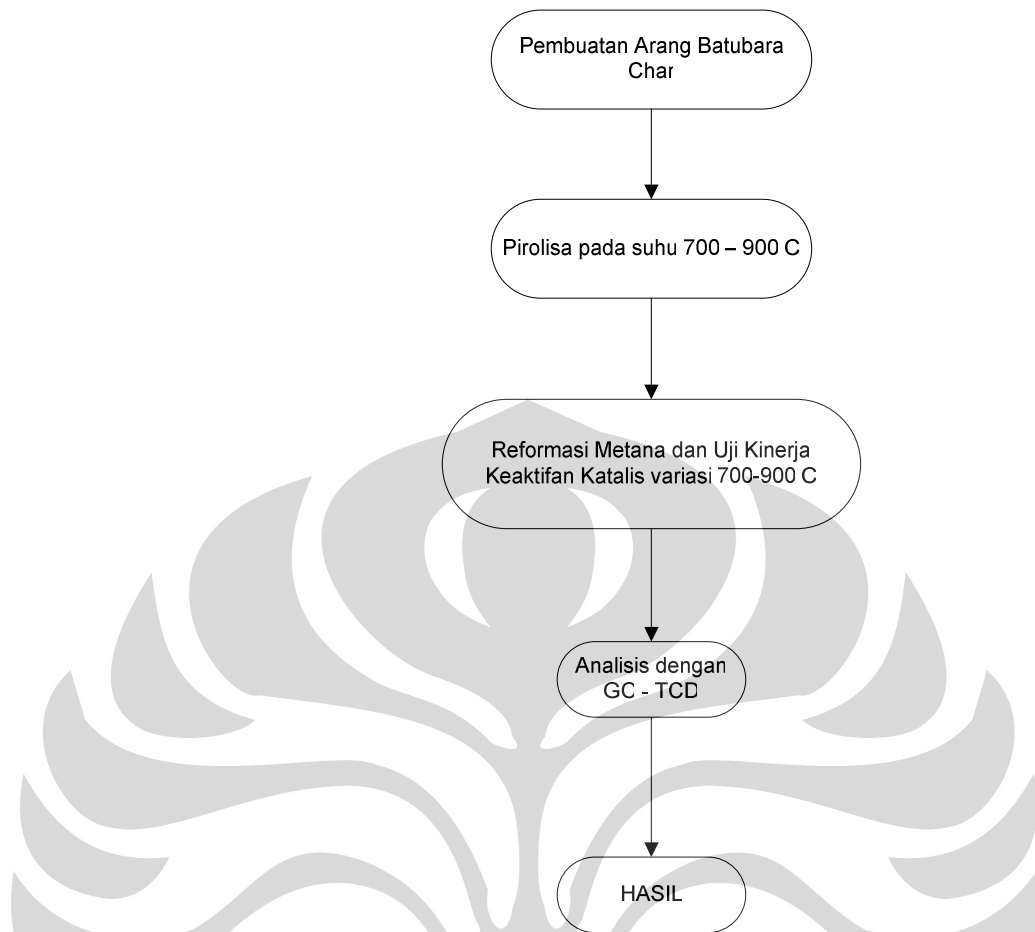
3.1 Metode Penelitian

Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah untuk mendapatkan gas sintesis yang diperoleh dari pertukaran ion antara Fe dengan oksigen yang berasal dari batubara. Penelitian ini dilakukan mengikuti tahapan pembuatan Fe_2O_3 dalam batubara sebagai sumber oksigen dan katalis dalam produksi gas sintesis dengan berbahan dasar batubara yang mengandung metal oxide Fe dan dilakukan uji kinerja Fe_2O_3 tersebut dalam reaktor unggun tetap dengan variasi suhu pirolisa dan suhu reaksi sebesar 700-900 °C.

Pada bab ini akan dibahas diagram alir proses, peralatan dan bahan yang digunakan, variabel penelitian dan prosedur penelitian. Penelitian dilakukan di laboratorium Rekayasa Reaksi Kimia dan Konversi Gas Alam, Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Alur penelitian ini dilakukan dengan persiapan bahan dasar batubara terlebih dahulu yaitu dengan melakukan penumbukan dan penyaringan agar diperoleh variasi ukuran partikel yang diinginkan kemudian dipirolisa sehingga didapat arang batubara. Alur penelitian ini dilakukan dengan persiapan bahan dasar batubara terlebih dahulu yaitu dengan melakukan penumbukan dan penyaringan agar ukuran partikel yang diperoleh seragam, selanjutnya batubara dibuat dengan pertukaran ion Fe menjadi arang batubara char yang selanjutnya direaksikan dengan metana, dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3.1 Diagram tahapan Penelitian



Gambar 3.2. Rangkaian alat pembuatan Gas Sintesa

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Persiapan Alat dan Bahan Dasar

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. *Fix Bed Reactor*
2. Seperangkat alat *furnace*
3. Termokopel
4. Timbangan
5. Pengontrol Suhu
6. GC TCD
7. Tabung Gas N₂
8. Tabung Gas NH₄
9. *Water trap*

Bahan-bahan yang digunakan antara lain :

1. Batubara muda jenis Lignit
2. Air deionisasi
3. Na(HPO₄)₃ 1M
4. NaOH 2M
5. Fe(NO₃)₃
6. Gas NH₄
7. Gas N₂

3.3.2 Pembuatan katalis batubara dengan pertukaran ion Ferrious

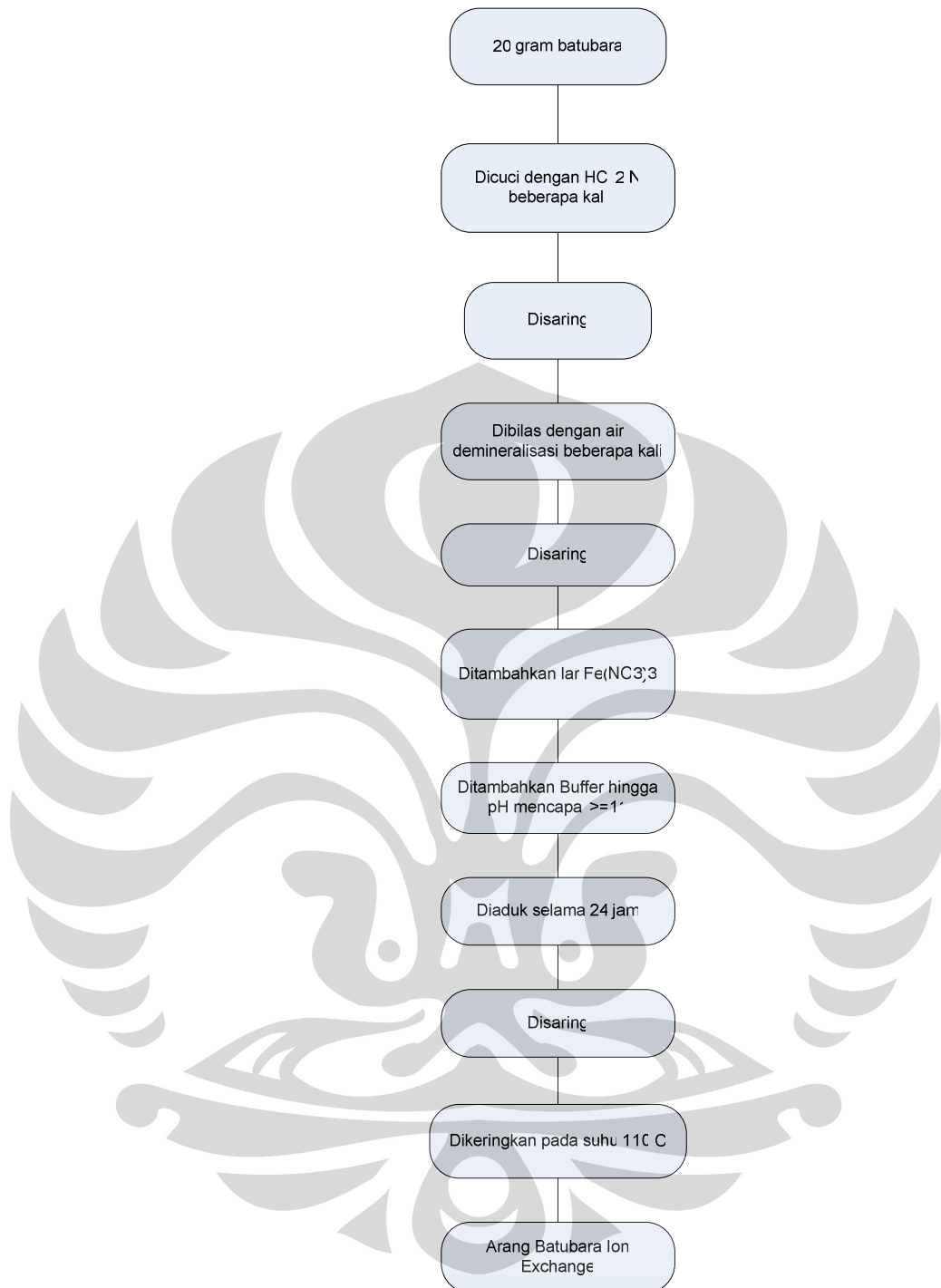
Bongkahan batubara muda jenis lignit dihaluskan dan diayak dengan tujuan agar diperoleh ukuran partikel batubara yang kecil dan seragam yaitu antara 0,25 mm – 0,45 mm. Untuk menghilangkan senyawa logam yang terdapat dalam batubara, dilakukan proses demineralisasi. Batubara di cuci dengan menggunakan HCl 2 N untuk menghilangkan zat – zat yang mudah menguap yang terdapat dalam batubara. Kemudian batubara dicuci dengan aquadest sampai pH netral, lalu disaring. Sebanyak 4.17 gram

$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ditimbang lalu dilarutkan dalam 250 ml aquadest, kemudian larutan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ dicampur dengan batubara yang telah mengalami demineralisasi kemudian ditambahkan buffer hingga pH mencapai angka 11. Setelah itu dikeringkan pada suhu 110°C dan dipirolisa di dalam reaktor unggun tetap yang terbuat dari bahan kuarsa.

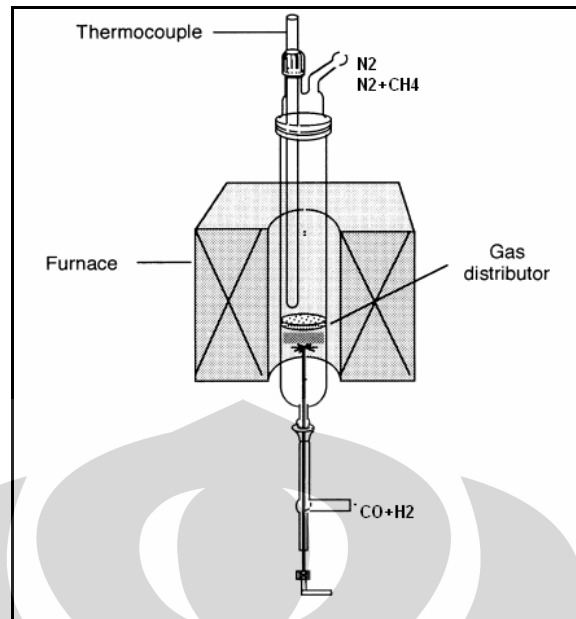
Posisi batubara dalam reaktor diatur pada posisi tertentu dengan bantuan tahanan dari *quartzwool* pada dasar reaktor. Termokopel dipasang didalam reaktor untuk memonitor suhu aktual yang berada didalam reaktor yang tertutup rapat dengan penutupnya yang terbuat dari silikon.

Reaktor unggun tetap yang telah siap di pasang di dalam sebuah *furnace* yang dilengkapi pemanas dan bisa diatur hingga suhu 1000°C . Penelitian ini dilakukan dengan kondisi operasi pada tekanan atmosfer dengan temperatur $700 - 900^\circ\text{C}$. Penghilangan zat-zat yang mudah menguap dilakukan dengan mengalirkan gas N_2 murni kedalam reaktor unggun tetap selama 1 jam pada suhu yang sama. Arang batubara yang dihasilkan disimpan dalam densikator.

Pengujian kinerja katalis arang batubara dilakukan dengan pengaliran umpan campuran metana dan nitrogen (10 % v/v) pada variasi temperatur yang telah ditentukan selama sekitar 3 jam. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui keaktifan arang batubara dalam reaksi oksidasi metana dengan mengamati persen perolehan (*yield*) dari gas H_2 , CO sebagai gas hasil reaksi dan CH_4 sisa yang tidak bereaksi. Analisa gas produk hasil reaksi dilakukan dengan menggunakan gas kromatograph TCD dengan pengambilan sampel yang dilakukan setiap 15 menit.



Gambar 3.3 Prosedur Pembuatan Arang Batubara



Gambar 3.4 Reaktor yang digunakan dalam penelitian

3.4. Pengambilan Data

3.4.1. Analisis proksimat arang batubara

Karakterisasi bahan baku batubara dilakukan dengan analisis proksimat. Analisis proksimat dilakukan di PT.Geoservices, LTD. Dari analisis ini akan diperoleh data tentang persentase berat dari abu, cairan, zat-zat yang mudah menguap dan karbon seperti tabel berikut :

Tabel 3.1 Analisa proksimat arang batubara

Parameter	Kandungan (%)
<i>Total Moisture</i> (Total Kelembaban)	31,57
<i>Inherent Moisture</i> (Uap air terperangkap)	16,25
<i>Ash</i> (Abu)	7,51
<i>Volatile Matters</i> (Zat yang mudah menguap)	36,73
<i>Fixed Carbon</i> (Karbon Aktif)	39,51
<i>Total Sulphur</i> (Total Sulfur)	1,03
<i>Gross caloric value</i> (Berat Kalori)	5423 kcal/kg

Sumber : Geoservice, LTD

3.4.2 Chemical Characterization

Untuk mengetahui jumlah ferrious oksida (Fe_2O_3) dari sampel *Fe-ion exchange coal char* ditentukan dengan menggunakan XRF (X Ray Fluorescent) sehingga kadar Fe_2O_3 dari batubara dapat diketahui.

3.4.3 Pengukuran Luas Permukaan

Luas permukaan diukur dengan metode BET menggunakan alat pengukur luas permukaan *Quadrasorb* terhadap arang batubara dengan potassium.

3.4.4 Pengukuran kinerja katalis, komposisi gas keluaran dan rasio H_2/CO

Reaksi oksidasi parsial metana dalam penelitian ini berkaitan dengan 4 macam gas yaitu H_2 , CO , CH_4 dan CO_2 . Analisis terhadap gas keluaran reaktor dengan khromatograph dilakukan terhadap komposisi keempat gas tersebut. Pengukuran dilakukan setiap 15 menit sekali selama 180 menit. Dari data yang diperoleh dapat diketahui komposisi H_2 , CO , CH_4 dan CO_2 . Percobaan akan dilakukan pada 3 variasi temperature pirolisa dan 3 variasi temperature reaksi yaitu 700, 800 dan 900°C. data dan hasil perhitungan akan disusun dalam tabel berikut.

3.5 Pengolahan Data

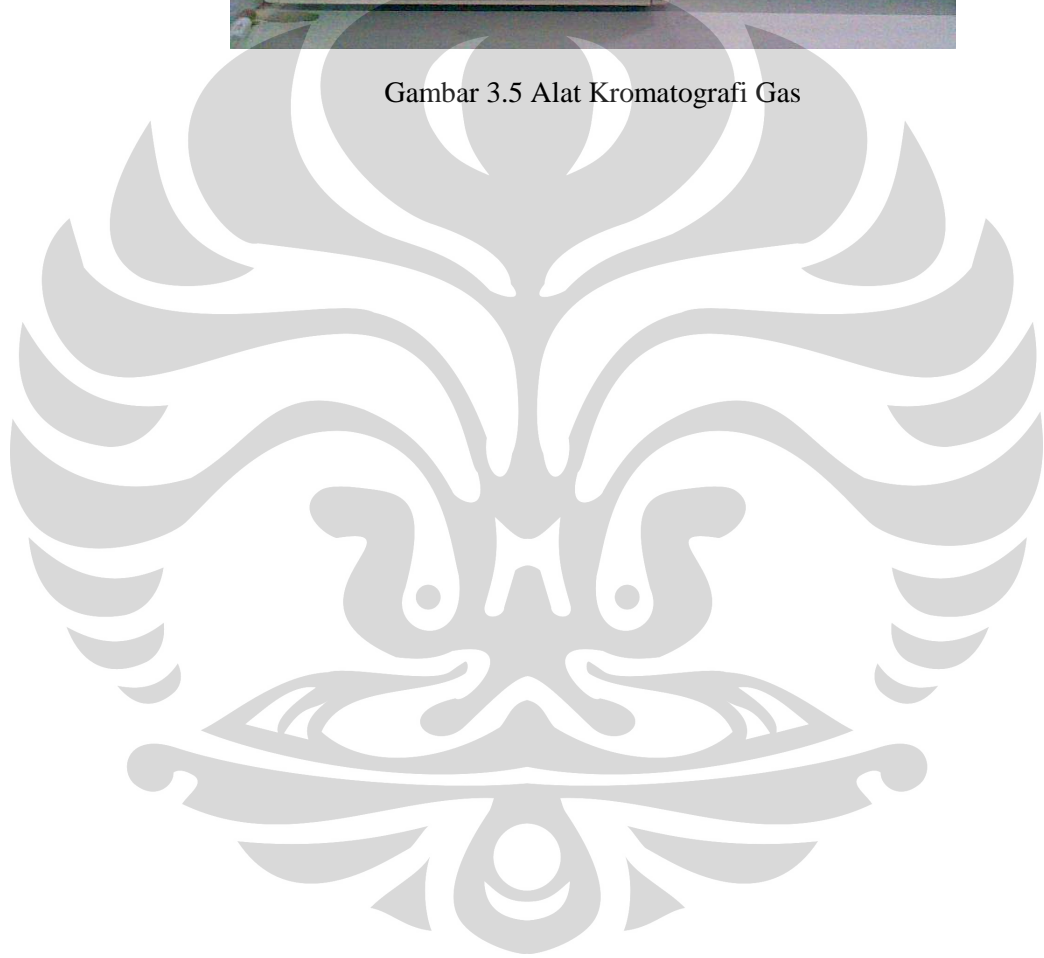
Pengolahan data meliputi perhitungan komposisi gas hasil reaksi reformasi metana, adapun dalam pengolahannya membutuhkan data-data tambahan selain data yang diperoleh langsung dalam percobaan seperti :

a. Data kalibrasi

Kalibrasi gas kromatografi dilakukan untuk mengetahui waktu retensi dari masing-masing senyawa standar. Gas yang digunakan pada kalibrasi GC ini adalah H_2 , CO_2 , CH_4 dan CO .



Gambar 3.5 Alat Kromatografi Gas



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas hasil pengujian yang dilakukan di Laboratorium Rekayasa Reaksi Kimia dan Konversi Gas Alam, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Kimia, Universitas Indonesia. Pada penelitian ini dilakukan preparasi terhadap batubara lignit melalui proses pertukaran ion Fe dan pirolisis pada 3 variasi suhu yaitu 700, 800 dan 900 °C dengan tujuan untuk mendapatkan logam oksida (Fe_2O_3) sebagai sumber O_2 . Selanjutnya Fe_2O_3 yang telah terbentuk diuji kinerjanya melalui reaksi oksidasi parsial metana dengan variasi suhu reaksi yaitu 700, 800 dan 900 °C untuk menghasilkan gas sintesis. Pada oksidasi parsial metana rasio gas sintesa ($\text{H}_2:\text{CO}$) yang dihasilkan adalah 2, sehingga pada penelitian ini tentu rasio yang diharapkan terbentuk adalah 2.

4.1 Analisa Proksimat Batubara

Pada uji analisa proksimat batubara mempunyai tujuan untuk mengetahui kandungan persentase berat dari abu, cairan, zat-zat yang mudah menguap dan karbon. Analisa XRF mempunyai tujuan untuk mengetahui seberapa banyak kandungan oksida logam Fe_2O_3 yang terbentuk selama proses preparasi. Sedangkan pada analisa BET bertujuan untuk mengetahui luas permukaan struktur batubara. Berikut ini adalah data hasil uji analisa proksimat :

Tabel 4.1 Proximate analysis

Parameter	Kandungan (%)
<i>Total Moisture</i> (Total Kelembaban)	31,57
<i>Inherent Moisture</i> (Uap air terperangkap)	16,25
<i>Ash</i> (Abu)	7,51
<i>Volatile Matters</i> (Zat yang mudah menguap)	36,73
<i>Fixed Carbon</i> (Karbon Aktif)	39,51
<i>Total Sulphur</i> (Total Sulfur)	1,03
<i>Gross caloric value</i> (Berat Kalori)	5423 kcal/kg

Karakterisasi bahan baku batubara dilakukan dengan analisis proksimat. Analisis proksimat dilakukan di PT.Geoservices, LTD. Dari analisis ini akan diperoleh data tentang persentase berat dari abu, cairan, zat-zat yang mudah menguap dan karbon.

Hasil analisis proksimat diatas menunjukkan jumlah cairan dan zat-zat yang mudah menguap yang akan teruapkan selama pirolisis. Pemanasan menyebabkan penambahan luas area sehingga memungkinkan perengkahan metana terjadi di permukaan arang.

Batubara yang dipilih pada penelitian ini adalah batubara lignit dengan alasan karena batubara lignit lebih banyak mengandung zat yang mudah menguap yang akan terlarut saat dilakukan pencucian dengan menggunakan HCl. Semakin banyak zat yang mudah menguap yang terlarut berarti semakin lebar pori-pori batu bara maka semakin luas ruang yang dapat digunakan untuk pertukaran ion ferry menjadi oksida logam sehingga luas permukaan kontak antara gas metana dan oksigen semakin luas.

4.1.1 Analisa luas permukaan

Analisa luas permukaan yang dilakukan adalah dengan metode BET dimana temperatur pirolisa yang dianalisa adalah 700°C. Luas permukaan dari Fe₂O₃ arang batubara didapat sebesar 4,667 m²/gram.

4.1.2 Analisis X Ray Flourences (X-RF) arang batubara

Analisis X-RF dilakukan di Pusat Laboratorium Forensik Mabes POLRI. Analisis XRF dilakukan untuk mengetahui seberapa banyak kandungan oksida logam Fe₂O₃ yang terbentuk. Dari hasil analisis dapat diperoleh data tentang konsentrasi oksida logam Fe₂O₃ yang terbentuk selama proses pirolisis pada tiga variasi suhu yang dilakukan yaitu 700, 800 dan 900°C. Data hasil analisis uji XRF Tabel 4.2 :

Suhu Pirolisis (°C)	Konsentrasi Fe ₂ O ₃ (%)
700	1,710
800	1,205
900	1,406

Tabel 4.2 Hasil analisis X-RF arang batubara (Puslabfor Mabes Polri, 2009)

Sampel yang digunakan untuk diuji menggunakan analisa XRF adalah sebanyak 0,5 gram pada setiap variasi suhu pirolisis. Hasil uji ditunjukkan pada Tabel 4.2. Suhu pirolisis 700°C kandungan Fe₂O₃ yang diperoleh yaitu 1,710 %. Pada suhu pirolisis 800 °C kandungan Fe₂O₃ yang diperoleh yaitu 1,205 % sedangkan pada suhu pirolisis 900 °C kandungan Fe₂O₃ yang diperoleh yaitu 1,406 %.

Kandungan Fe₂O₃ semakin menurun seiring naiknya suhu dapat disebabkan karena tingginya temperatur pada saat proses pirolisis sehingga mempermudah terjadinya volatilisasi. Nukman, dalam prakteknya menjelaskan bahwa komposisi dan jumlah zat yang mudah menguap berubah melepaskan diri pada temperatur 800 – 850°C. Chun-Zhu Li, *et al*, menjelaskan semakin tinggi suhu yang digunakan maka semakin tinggi pula volatilitas logam tersebut.

4.2 Reaksi Parsial Oksidasi Metana

Pada penelitian ini digunakan sebanyak 2 gram sampel batubara yang telah dipirolisis yang berarti telah mengandung Fe₂O₃ sebagai sumber oksigen yang digunakan pada reaksi oksidasi parsial metana. Sampel batubara diletakkan sedemikian rupa di dalam reaktor yang terbuat dari bahan kuarsa dan telah dirangkai di dalam sebuah *furnace* kemudian direaksikan dengan campuran gas metana 10 % dengan laju alir konstan sebesar 39, 11 ml/menit pada temperatur bervariasi mulai dari 700-900 °C.

Reaksi CH₄ dengan O₂ pada temperatur tinggi dapat menghasilkan CO, CO₂, H₂O dan H₂. Komposisi produk gas yang dihasilkan tergantung pada temperatur, tekanan, komposisi gas masuk dan juga faktor kinetika. Beberapa reaksi penting yang terjadi pada oksidasi parsial adalah :

- $\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \leftrightarrow 2 \text{H}_2 + \text{CO}$
- $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
- $\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \leftrightarrow 2 \text{H}_2 + \text{CO}$
- $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2 \text{H}_2 + \text{CO}_2$
- $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 3 \text{H}_2 + \text{CO}$
- $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2 \text{H}_2 + 2 \text{CO}$
- $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$

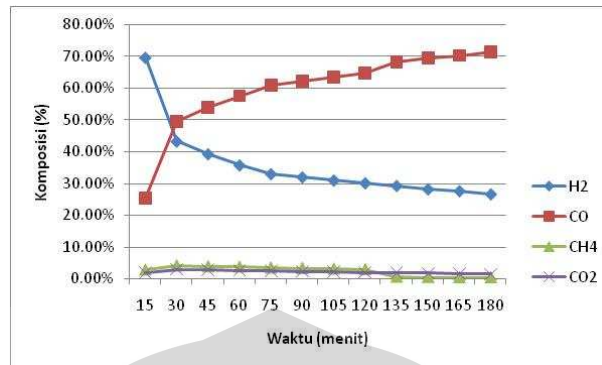
4.3. Hasil Pengujian

Pada penelitian proses reaksi dilakukan dengan memvariasikan suhu pirolisis dan suhu reaksi dengan variasi suhu 700 °C , 800 °C dan 900 °C. Pada proses awal, reaktor diisi dengan batubara hasil pertukaran ion Fe, tujuan pertukaran ion Fe pada batubara adalah :

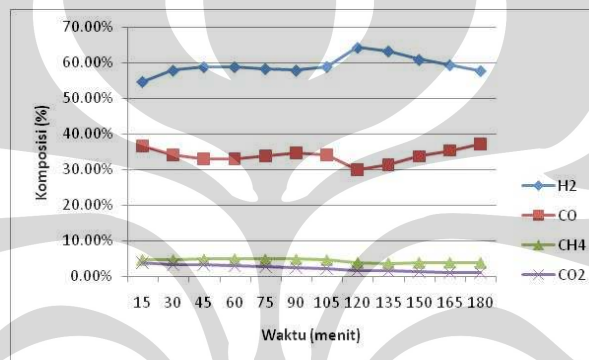
- Mendapatkan inti aktif katalis yang seragam sekaligus dapat mengetahui efek dari satu jenis metal oksida yang dipilih
- Dengan adanya pertukaran ion Fe berarti inti aktif katalis yang terkandung dalam batubara menjadi terdispersi lebih luas sehingga luas permukaan kontak antara reaktan dan katalis juga akan semakin luas.
- Dengan terdispersi lebih banyak dan seragam maka membuat metal pengganti relatif lebih aktif dibandingkan dengan tanpa adanya pertukaran ion.

Dari penelitian yang telah dilakukan reaksi oksidasi parsial metana terhadap batubara yang mengandung Fe_2O_3 maka diperoleh hasil sebagai berikut :

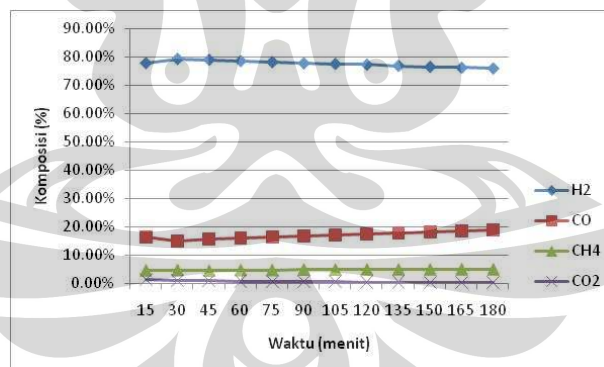
4.3.1 Pengujian sampel batubara dengan suhu pirolisa 700 °C



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.1 Grafik komposisi produk terhadap waktu reaksi pada suhu pirolisis 700°C dengan variasi suhu reaksi (a. T : 700°C; b. T : 800°C; c. T : 900°C)

1. Profil Komposisi untuk suhu reaksi 700 °C

Dari grafik (a) pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa konsentrasi H₂ menurun secara signifikan dari 69,7% hingga 43,3 % seiring meningkatnya konsentrasi CO. Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur reaksi 700°C

ini telah terjadi proses metana cracking yang menghasilkan karbon pada proses reformasi metana yang dilakukan. Seperti yang telah diketahui bahwa pembentukan karbon yang terjadi pada proses *metane cracking* adalah sebagai berikut:



Dengan adanya pembentukan karbon pada proses reformasi metana ini dapat memicu reaksi antara C dengan O₂ yang terdapat dalam Fe₂O₃ membentuk CO₂ yang selanjutnya memicu terjadinya reaksi *water gas shift* dimana reaksi yang terjadi diperkirakan bahwa pada awal reaksi, produksi CO₂ yang diperoleh hanya sedikit, dan terus bertambah dengan seiring berjalannya waktu reaksi sehingga bertambahnya CO₂ ini dapat mendorong reaksi *water gas shift* yang bersifat reversible ke arah pembentukan CO dan H₂O. sebagai berikut :



2. Profil Komposisi untuk suhu reaksi 800 °C

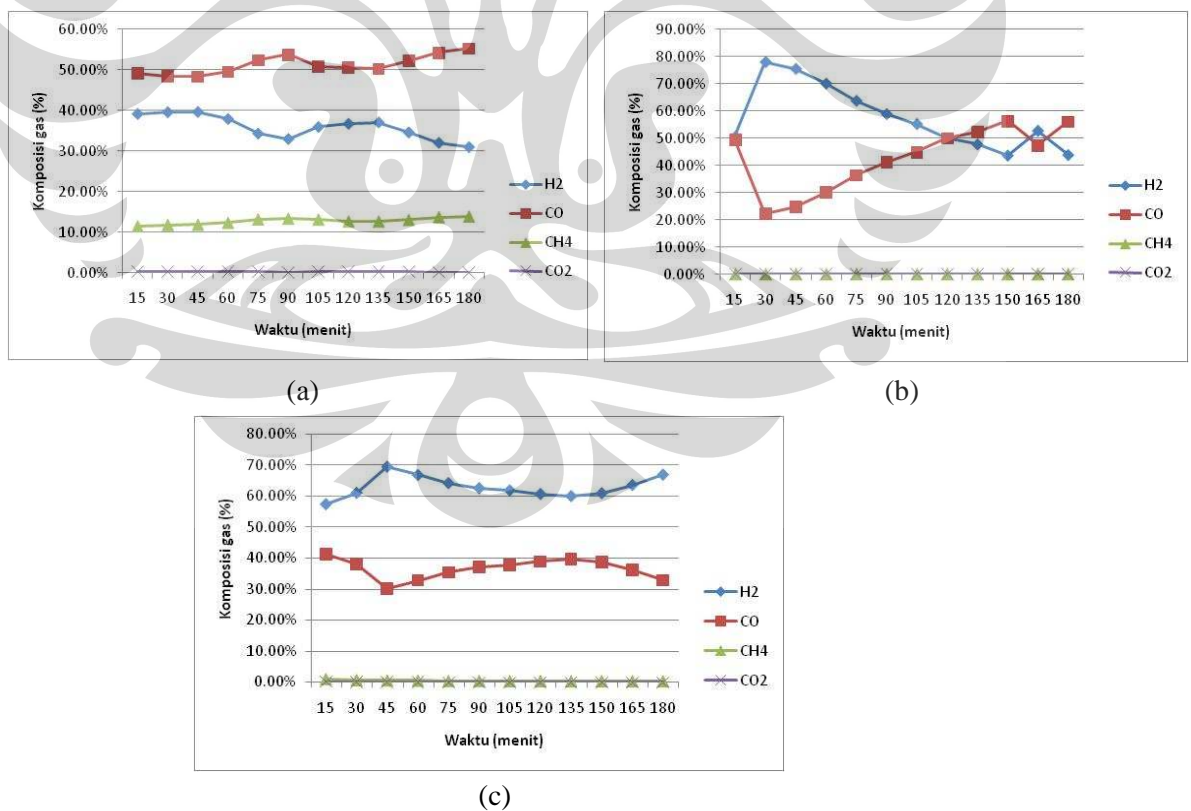
Dari grafik (b) pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa konsentrasi H₂ naik secara perlahan dari konsentrasi 54,66% hingga 64,34% dan mengalami penurunan konsentrasi di menit ke 135 dari 63,31% hingga 57,75% berbeda halnya dengan grafik (a). Ratio antara H₂ dan CO pada temperatur reaksi 800°C ini mendekati atau sama dengan 2. Hal ini dapat dijelaskan pada reaksi 800°C reaksi yang dominan terjadi merupakan reaksi oksidasi parsial metana yang menghasilkan H₂ dan CO. Hal ini dipertegas dengan adanya pernyataan Anne M. Gaffney, West Chester dalam jurnalnya yang berjudul *Catalytic Partial Oxidation Process and Promoted Nickel Based Catalyst Supported On Magnesium Oxide* bahwa katalis logam dari grup VIII seperti Nikel (Ni) yang mengandung MgO atau CaO pada reaksi temperatur reaktor 885°C selama 6 jam akan menghasilkan konversi 95% CH₄ dan 100% O₂, 98% CO *selectivity*, 97% H₂ *selectivity*, 2% CO₂ *selectivity* dan mol ratio H₂:CO adalah 1.98.

Dapat disimpulkan bahwa reaksi antara Fe_2O_3 dengan metana terjadi pada temperatur tinggi yaitu diatas 800°C .

3. Profil Komposisi untuk suhu reaksi 900°C

Dari grafik (c) pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa konsentrasi H_2 semakin tinggi seiring naiknya temperatur reaksi yaitu $77,9\%$ dan mengalami penurunan yang tidak terlalu signifikan hingga $75,99\%$. Apabila profil komposisi ini dibandingkan dengan profil komposisi pada suhu 700°C maka terlihat bahwa pada kondisi suhu reaksi 900°C diperoleh komposisi H_2 dan CO yang lebih tinggi pada awal berlangsungnya reaksi yaitu sekitar $75 - 79\%$ untuk komposisi H_2 dan sekitar 16% untuk komposisi CO . Namun dari keseluruhan grafik yang dibandingkan antara suhu reaksi 700°C dan suhu reaksi 800°C maka dapat diambil kesimpulan bahwa dari keduanya memiliki kondisi optimum untuk suhu reaksi 900°C

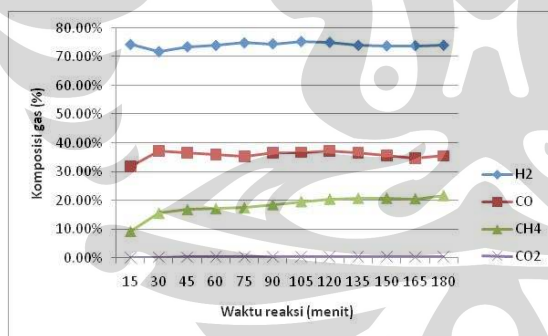
4.3.2 Pengujian sampel batubara dengan suhu pirolisa 800°C



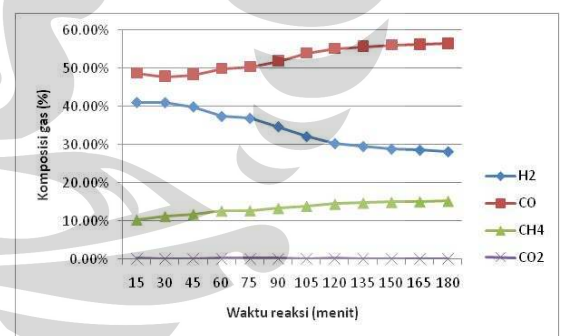
Gambar 4.2 Grafik komposisi produk terhadap waktu reaksi pada suhu pirolisis 800°C dengan variasi suhu reaksi (a. T : 700°C ; b. T : 800°C ; c. T : 900°C)

Berdasarkan gambar 4.2 tersebut secara keseluruhan terlihat bahwa pada semua variasi suhu reaksi memberikan tren grafik yang sama yaitu menurunnya konsentrasi gas H₂ terhadap waktu, meningkatnya konsentrasi gas CO terhadap waktu dan konsentrasi gas CO₂ serta H₂O yang relative konstan. Pada profil komposisi produk dengan kondisi suhu pirolisa 800°C ini menunjukkan penurunan konsentrasi H₂ dan kenaikan konsentrasi CO yang lebih besar dibandingkan dengan profil komposisi produk pada suhu pirolisa 700°C. Namun dari keseluruhan grafik yang dibandingkan antara suhu pirolisa 700°C dan suhu pirolisa 800°C maka dapat diambil kesimpulan bahwa dari keduanya memiliki kondisi optimum untuk suhu reaksi 900°C. Hal ini terlihat dari grafik yang disajikan bahwa pada suhu reaksi 900°C baik pada suhu pirolisa 700°C maupun suhu pirolisa 800°C memiliki komposisi H₂ yang paling besar serta kenaikan gas CO yang lebih sedikit dibandingkan dengan profil komposisi pada suhu reaksi 700 dan 900 °C.

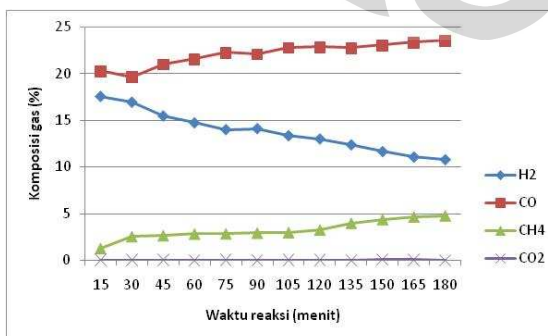
4.3.3 Pengujian sampel batubara dengan suhu pirolisa 900 °C



(a)



(b)

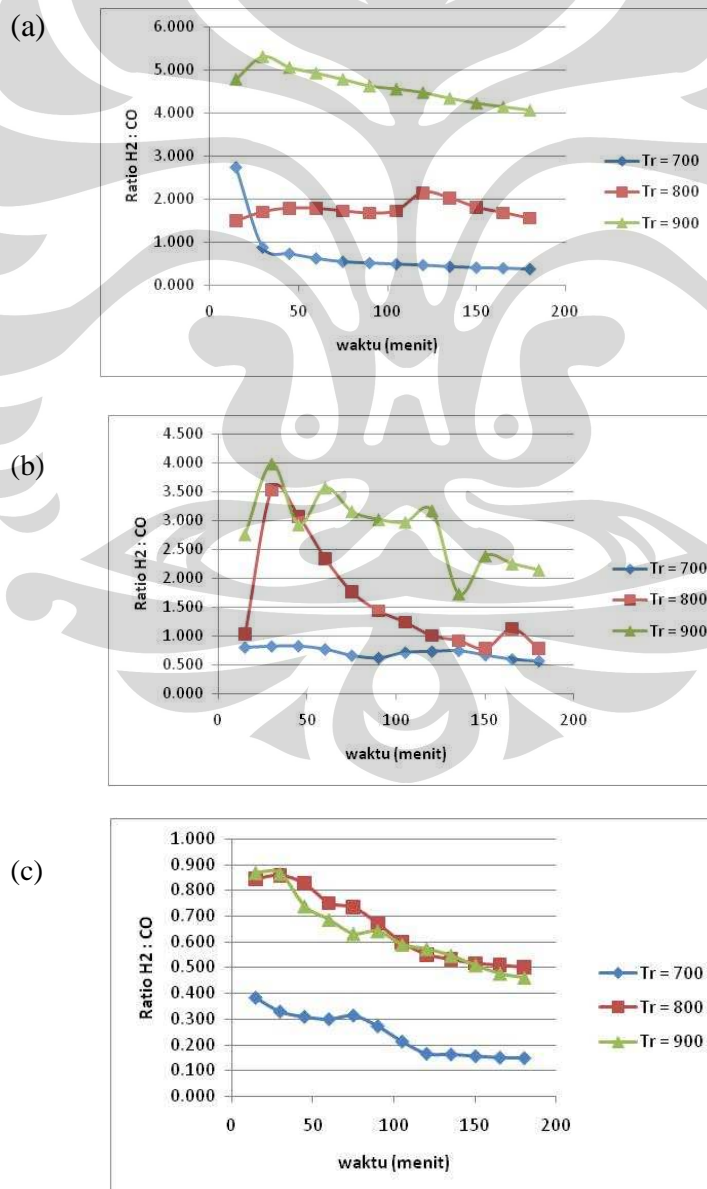


(c)

Gambar 4.3 Grafik komposisi produk terhadap waktu reaksi pada suhu pirolisis 800°C dengan variasi suhu reaksi (a. T : 700°C; b. T : 800°C; c. T : 900°C)

Pada suhu pirolisa 900 °C terlihat bahwa komposisi H₂ menurun secara signifikan terutama pada suhu reaksi 900 °C. Hal ini terlihat dari grafik profil H₂ yang menurun drastis pada suhu reaksi 700 – 900°C. Dari keseluruhan grafik dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur pirolisa maka konsentrasi H₂ semakin menurun dimana pada temperatur pirolisa 900°C dan suhu reaksi 900°C, konsentrasi H₂ semakin kecil seiring naiknya konsentrasi CO₂.

4.3.4 Profil Rasio H₂/CO sebagai produk reaksi reformasi metana



Grafik 4.4 Profil ratio H_2 : CO

Grafik (a) pada gambar 4.4 menunjukkan profil rasio H_2/CO terhadap waktu pada suhu pirolisis 700 °C, terlihat bahwa rasio H_2/CO cenderung menunjukkan kenaikan seiring dengan berjalannya waktu reaksi. Pada suhu reaksi 700-700 °C kenaikan rasio H_2/CO terjadi pada rentang 0,374 – 2,736, pada suhu reaksi 700-800 °C kenaikan rasio berada pada rentang 1,489 – 1,786 sedangkan pada suhu reaksi 900 °C kenaikan rasio berada pada rentang 4,050 – 5,304.

Grafik (b) pada gambar 4.4 terlihat bahwa rasio H_2/CO cenderung menunjukkan penurunan rasio terhadap waktu reaksi pada masing-masing suhu reaksi. Pada kondisi suhu pirolisa 800 °C dan suhu reaksi 700°C rentang rasio yang diperoleh antara 0,561 – 0,820, sedangkan kondisi suhu pirolisa 800 °C dan suhu reaksi 800°C rentang rasio yang diperoleh antara 0,771 – 1,320 serta kondisi suhu pirolisa 800 °C dan suhu reaksi 900°C rentang rasio yang diperoleh 1,729 – 3,558.

Grafik (c) pada gambar 4.4 menunjukkan kestabilan rasio terhadap waktu reaksi pada masing-masing suhu reaksi. Pada kondisi suhu pirolisa 900 °C dan suhu reaksi 700°C rentang rasio yang diperoleh antara 0,148 – 0,381, sedangkan pada kondisi suhu pirolisa 900 °C dan suhu reaksi 800°C rentang rasio yang diperoleh antara 0,5 – 0,842 serta pada kondisi suhu pirolisa 900 °C dan suhu reaksi 900°C diperoleh rentang rasio 0,4582 – 0,8672. Dari ketiga grafik tersebut terlihat semakin tinggi suhu pirolisa maka rasio H_2/CO yang diperoleh semakin turun.

Temperatur mempunyai pengaruh yang penting pada produk H_2 dan CO yang dihasilkan. Tingginya temperatur pada saat proses pirolisis dapat mempermudah terjadinya volatilisasi. Temperatur merupakan salah satu faktor penting dalam proses pirolisis sehingga dapat mempengaruhi volatilisasi dari logam transisi.

Pada proses chemical looping reforming dapat terbentuk CO_2 dan H_2O namun idealnya dalam kasus ini CO_2 dan H_2O akan bereaksi dengan kelebihan

gas alam. Sehingga dalam hal ini, oksida logam juga bertindak sebagai *reforming catalyst* (RC) untuk membentuk gas sintesa melalui CO₂ reforming dan steam reforming [Zhang.*et al*, 2000].



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Reaksi dari hasil pirolisa *coal* – $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ untuk oksidasi parsial metana didapatkan hasil:

- Temperatur pirolisa 700°C konsentrasi CO menurun dan sebaliknya konsentrasi H_2 cenderung meningkat.
- Temperatur pirolisa 800°C konsentrasi CO cenderung menurun dan sebaliknya konsentrasi H_2 cenderung meningkat.
- Temperatur pirolisa 900°C konsentrasi CO menurun dan sebaliknya konsentrasi H_2 meningkat.
- Luas permukaan arang batubara hasil pirolisa kecil sehingga reaksi terjadi hanya di permukaan pori arang batubara.
- Kemungkinan reaksi yang terjadi pada arang Fe_2O_3 yang dipirolisa pada temperatur 700°C adalah reaksi perengkahan metana. Sedangkan pada arang yang dipirolisa pada temperatur 800°C reaksi yang terjadi adalah perengkahan metana dan *water gas shift reaction*.
- Kemungkinan reaksi yang terjadi pada arang Fe_2O_3 dipirolisa pada temperatur 900°C adalah reaksi gabungan antara perengkahan metana, parsial oksidasi metana dan *water gas shift reaction*.

5.2 Saran

- Dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap arang batubara untuk meningkatkan luas permukaan pori char sehingga nantinya oksida logam yang terdispersi pada permukaan char semakin banyak yang dapat membentuk gas sintesis dengan ratio mol H_2/CO mendekati 2.

- Meningkatkan temperatur pada saat *ion exchange* supaya diperoleh Fe_2O_3 dengan konsentrasi lebih tinggi.
- Dilakukan uji titrasi Boehm untuk mengetahui besarnya kandungan oksigen dalam batubara. Setelah demineralisasi untuk meyakinkan bahwa kandungan gugus karboksilat dan fenolat yang mengandung oksigen cukup tinggi.



DAFTAR PUSTAKA

- Garcia, B, Takayuki Takarada. (1998). *Ca ion-exchanged coal char as H₂S sorbent*, Department of Biological and Chemical Engineering, Gunma University, 1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu 376, Gunma, Japan
- Garcia, B, Y. Yamazaki, T. Takarada. (1998). *Oxidation behavior of CaS produced from Ca ion-exchanged coal*, Department of Biological and Chemical Engineering, Gunma University, 1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu 376, Gunma, Japan
- Grindley, T.; Kim, S. S.; Gorski, E. E.; Steinfeld, G.(1985). *Aspects of the Design of a Process Development Unit for High-Temperature Coal Gas Desulfurization*, Technical Report; DOE/METC-85/6025,
- Schafer, H. N. S., (1969). *Carboxyl groups and ion exchange in low-rank coals*. Fuel. Vol 49. Pp 197 – 213.
- Hanzade Haykiri-Ac,ma, Reha Yavuz, AyseguÈ Ersoy-Meric,boyu, Sadriye KuÈcuÈkbayrak. (1999). *Effect of mineral matter on the reactivity of lignite*, Istanbul Technical University, Chemical and Metallurgical Engineering Faculty, 80626, Maslak, Istanbul, Turkey
- Higman, C., Van der Burgt, M. (2003). *Gasification*, New York : Gulf Professional Publishing.
- Jalan, V. (1983). *Studies Involving High Temperature Desulfuration/ Regeneration Reactions of Metal Oxides for Fuel Cell Development*, Technical Report, DOE/MC/16021-1486.
- Ljubiga R. Radovik, Philip L. Walker, Jr. and Robert G. Jenkins. (1983). *Effect of lignite pyrolysis conditions on calcium oxide dispersion and subsequent char reactivity* Department of Materials Science and Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA
- Murray, J.B. (1969). *The yields and properties of chars and volatiles from carbonised Morwell brown coals*, Report MR 191, State Electricity Commission of Victoria, Australia.
- Nukman. (2008). *Dekomposisi Volatile Matter dari Batubara Tanjung Enim dengan Menggunakan Alat Thermogravimetry Analyzer (TGA)*. Fakultas Teknik Universitas Sriwijawa : Sumatera Selatan.
- Rostrup-Nielsen, Jens R. (2000). *New Aspects of Syngas Production and Use*. Catalysis Today. vol. 63. pp. 159–164

- Krishnan S. V, *et al.* (1994). *Experimental and Theoretical Investigation of Factors Affecting the Direct Limestone-H₂S Reaction*, Department of Chemical Engineering, University of Rochester, Rochester, New York 14627
- Sun, Zhiqiang, *et al* (2005). *Methane Cracking over a Chinese Coal Char in a Fixed-Bed Reactor*. 5th Asia-Pacific Conference on Combustion. The University of Adelaide. Australia.
- Szekely, *et al.* (1976). *Gas Solid Reactions*, Academic Press, New York. p. 108
- Wahyudi Budi Setiawan. (1998). *Berbagai Teknologi Proses Pemisahan*, Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Widodo W. Purwanto, *et al.* (2006). *Indonesia Energy Outlook & Statistics*, Pengkajian Energi Universitas Indonesia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok.
- www.wikipedia.com. *Batubara*, accessed : 16 Mei 2009.
- Zhu, J.N., Zhang, D.K., Bromly. (2000). *Study of CH₄ Partial Oxidation Reforming with Detailed Mechanisms*. International Journal of Thermal and Fluid Sciences.

Lampiran A. Prosedur penelitian

A.1 Prosedur pembuatan larutan HCl 2N

1. Siapkan labu takar 500 ml.
2. Ambil sebanyak 83 ml HCl pekat 37% (12 N) dengan menggunakan pipet Mohr dan masukan ke dalam labu takar 500 ml sedikit demi sedikit
3. Tambahkan aquades ke dalam labu ukur hingga garis batas.
4. Menutup labu takar
5. Homogenkan agar larutan teraduk rata.

A.2 Prosedur pembuatan larutan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$

1. Ditimbang $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ sebanyak 4,17 gram
2. Dilarutkan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ yang telah ditimbang dengan aquades ke dalam labu takar
3. Ditambahkan aquades ke dalam labu takar 250 ml hingga volumenya mendekati batas takar
4. Dihomogenkan agar larutan teraduk rata.

A.3 Prosedur pembuatan larutan buffer pH 11,19

1. Dipipet sebanyak 100 ml larutan Na_2HPO_4 1 M kemudian ditambahkan 10,1 ml larutan NaOH 2 M

A.4 Prosedur preparasi katalis batubara

1. Ditumbuk bongkahan batubara hingga ukurannya menjadi kecil
2. Diayak batubara agar ukuran partikelnya menjadi seragam yaitu sekitar 0,325-0,5 mm
3. Dicuci batubara dengan menggunakan larutan HCl untuk melarutkan *volatile matter* yang terkandung di dalam batubara
4. Disaring campuran batubara dan HCl dengan menggunakan kertas saring
5. Dibilas batubara dengan menggunakan air demin untuk menghilangkan sisa asam yang terkandung
6. Disaring larutan dengan menggunakan corong *Buchner*

A.5 Prosedur ion exchange

1. Ditimbang sebanyak 20 gram partikel batubara yang telah dicuci
2. Disiapkan sebanyak 250 ml larutan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$
3. Dicampurkan 20 gram batubara dengan larutan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$
4. Diaduk campuran dengan menggunakan *magnetic stirrer* selama 24 jam pada suhu kamar
5. Diamati perubahan pH setiap 30 menit pada menit ke 0, 30, 60, 90 dan 120 menit
6. Setelah 24 jam proses pertukaran ion Fe batubara disaring menggunakan corong *Buchner* dan dikeringkan dengan menggunakan oven.

A.6 Prosedur pirolisa dan reaksi oksidasi parsial metana

1. Ditimbang sebanyak 2 gram batubara berkalsium
2. Dimasukan batubara tersebut ke dalam reaktor yang terbuat dari kuarsa
3. Dirangkai reaktor yang telah berisi batubara ke dalam *furnace*
4. Dipanaskan batubara dengan menggunakan *furnace* dengan aliran N_2 murni pada variasi suhu 700, 800, dan 900°C selama sekitar 60 menit
5. Setelah 60 menit, diganti aliran umpan menjadi campuran 10% metana dan nitrogen dengan laju alir sebesar 39,11 ml/det
6. Dianalisa aliran gas produk dengan menggunakan GC TCD setiap 15 menit selama 3 jam

A.7 Prosedur Penggunaan GC

A.7.1 Preparasi gas chromatografi

Dipanaskan GC kurang lebih 1 hari untuk yang sudah lama tidak dipakai dan kurang lebih 15 menit untuk GC yang sering dipakai untuk menstabilkan dan memanaskan agar kotoran-kotorannya terbawa.

A.7.2 Prosedur mengalirkan gas argon

Prosedur mengalirkan gas argon sebagai gas pembawa adalah sebagai berikut:

1. Dipastikan tekanan *input* dan *output* di regulator berada pada angka ϕ dan tidak ada kebocoran pada sambungan-sambungannya
2. Dibuka *valve* utama , hingga tekanan akan langsung naik
3. Dibuka *valve* regulator dari kendur menjadi kencang sehingga tekanan akan naik perlahan-lahan.

A.7.3 Prosedur membuka tabung gas

Untuk alasan keamanan maka untuk membuka tabung gas perlu dilakukan dengan mengikuti prosedur berikut :

1. Dipastikan tekanan *input* dan *output* di regulator, jarum *pressure gauge* menunjukkan ϕ dan *valve* dalam keadaan tertutup (posisi *valve* longgar)
2. Dibuka *valve* induk di tabung dengan memutar kearah kiri (arah kebalikan jarum jam) dan dilihat tekanan gas, yang menunjukkan tekanan dalam tabung
3. Dibuka *vavle* regulator perlahan-lahan kearah kanan (searah jarum jam), lalu atur tekanan gas yang diinginkan
4. Dipastikan instalasi gas baik dari tabung sampai perpipaan tidak bocor (cek kebocoran menggunakan pipa sabun)
5. Untuk gas-gas yang beracun dan mudah terbakar (CO , H_2 , CH_4), langkah 4 harus dilakukan terlebih dahulu sebelum langkah 1 menggunakan gas inert N_2 .

A.7.4 Prosedur menutup gas

1. Ditutup *valve* induk pada tabung dengan memutar kearah kanan (searah jarum jam) ditunggu hingga tekanan gas pada *pressure gauge* menunjukkan nol
2. Ditutup *valve* pada regulator pelan-pelan kearah kiri (arah kebalikan jarum jam) sampai *valve* longgar dan ditunggu tekanan gas pada *pressure gauge* sampai menunjukkan angka nol.

A.7.5 Prosedur menyalakan GC

1. Dipastikan tekanan *primary* 600 kPa, *carrier gas* \pm 150-180 kPa
2. Diatur suhu menjadi 130 – 100 – 100 (°C)
3. Ditunggu hingga stabil (lampu berkedip-kedip)
4. Dyalakan *current* 6 mA

A.7.6 Prosedur menyalakan *chromatopac*

1. Dihubungkan *chromatopac* dengan GC, ditekan : *shift down* bersama dengan I,N,I, lalu ditekan enter, dan akan muncul *initialized*.
2. Diatur tinta di sebelah kiri, Ditekan : *shift down* bersama dengan plot, lalu tekan enter, untuk mengatur gunakan “*coarse*” kemudian ditekan kembali *shift down* bersama dengan plot, lalu ditekan .
3. Input Attenuasi, jika attenuasi kecil maka segala impurities akan terlihat “*peak*”nya, sehingga digunakan attenuasi yang agak besar, ditekan : *atten* bersama dengan angka 7, lalu ditekan *enter*.
4. Diatur kecepatan kertas, ditekan : *speed* bersama dengan angka 10, lalu ditekan *enter*.
5. Diatur *stop time*, ditekan : *stop time* bersama angka 5 lalu ditekan *enter*.
6. Untuk melihat parameter-parameter yang ada, ditekan : *shift down* bersama dengan *print width*, lalu ditekan *enter*.
7. Mengetahui apakah GC sudah stabil (garis lurus), ditekan : *shift* bersama dengan plot, lalu ditekan *enter*. Kestabilan juga dapat dilihat dari ditekan : *print* bersama *control* dan *width* secara bersamaan. Nilai yang keluar harus lebih besar dari 100, jika belum mencapai, maka *coarse* atau *fine* diputar untuk mendapatkan hasil yang diinginkan.

A.7.7 Prosedur mematikan GC

1. Dimatikan *current*.
2. Diturunkan temperatur menjadi 30-30-30 kemudian GC dibuka agar pendinginan terjadi lebih cepat
3. Setelah suhu kolom menjadi 80 °C (pada indikator) kemudian GC baru dapat dimatikan.

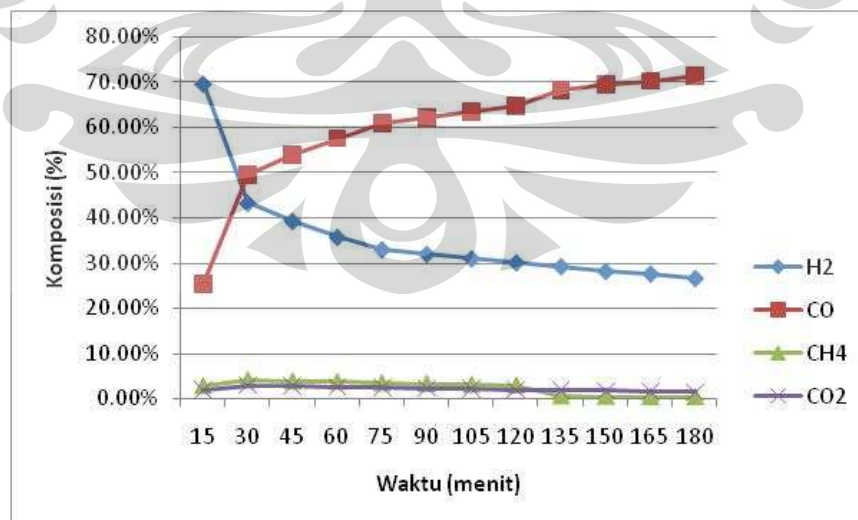
Lampiran B. Data penelitian

B.1 Data penelitian dengan variasi temperatur pirolisa 700 °C

Variasi suhu reaksi 700 °C

P reaktor 1 atm
 R 82,057 atm.mL/gmol.K
 Flow 39,11343 ml/min
 T pirolisa 700 C
 Treaksi 700 C

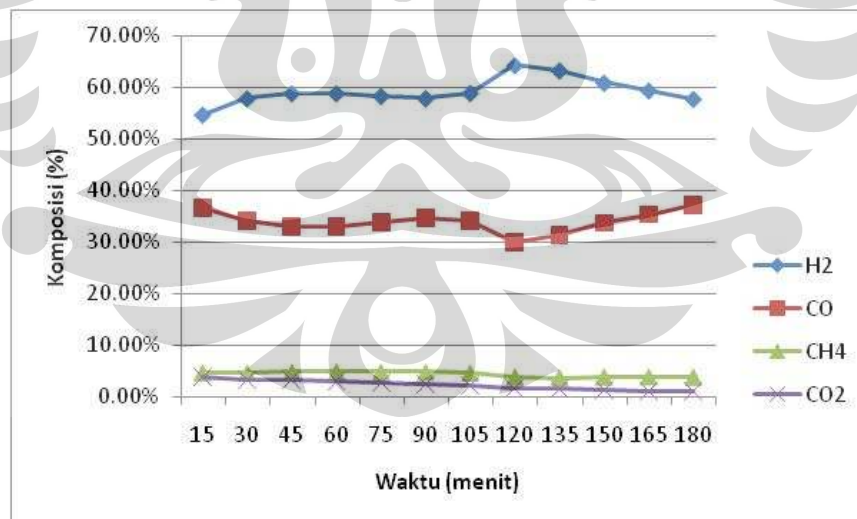
t (min)	T act (K)	Peak Area				Komposisi (%) (Yi)			
		H2	CO	CH4	CO2	H2	CO	CH4	CO2
15	770	46355	16942	1930	1276	69.70%	25.48%	2.90%	1.92%
30	776	306958	350613	30378	20938	43.30%	49.46%	4.29%	2.95%
45	780	197974	271338	20254	14154	39.30%	53.87%	4.02%	2.81%
60	780	193057	310920	21149	14553	35.77%	57.61%	3.92%	2.70%
75	781	191855	353124	20909	14586	33.05%	60.83%	3.60%	2.51%
90	782	137583	266972	14782	10105	32.04%	62.17%	3.44%	2.35%
105	780	114039	233573	11932	8055	31.02%	63.54%	3.25%	2.19%
120	781	103023	221175	10537	6910	30.15%	64.74%	3.08%	2.02%
135	781	93575	217770	1962	5957	29.31%	68.21%	0.61%	1.87%
150	782	92887	228493	1809	5644	28.25%	69.49%	0.55%	1.72%
165	783	78931	200423	1389	4557	27.67%	70.25%	0.49%	1.60%
180	782	78061	208849	1269	4366	26.68%	71.39%	0.43%	1.49%



- Variasi suhu reaksi 800 °C

P reaktor 1 atm
 R 82,057 atm.mL/gmol.K
 Flow 39,11343 ml/min
 T pirolisa 700 C
 Treaksi 800 C

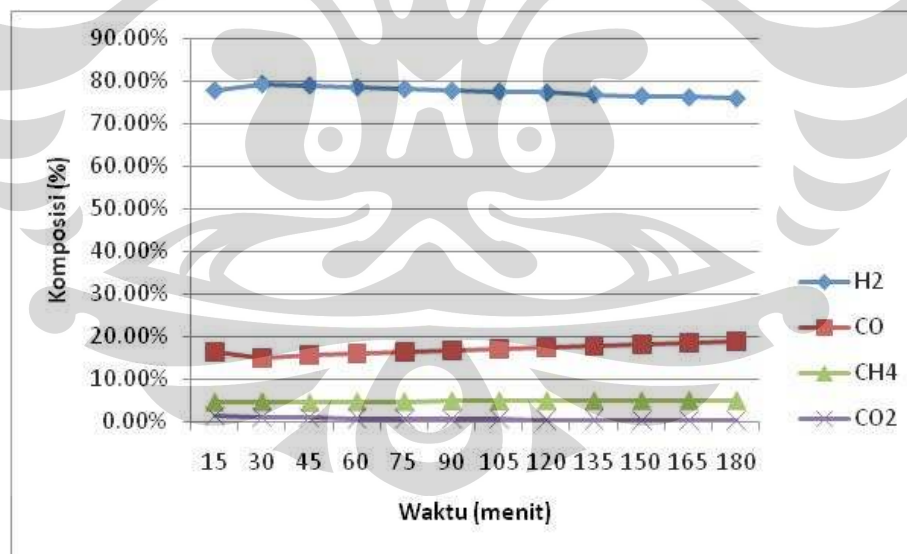
t (min)	T act (K)	Peak Area				Komposisi (%) (Yi)			
		H2	CO	CH4	CO2	H2	CO	CH4	CO2
15	881	338039	227012	29123	24305	54.66%	36.70%	4.71%	3.93%
30	883	375334	220857	30228	22296	57.86%	34.05%	4.66%	3.44%
45	883	379527	212547	31180	21461	58.87%	32.97%	4.84%	3.33%
60	885	361371	203269	30049	19359	58.85%	33.10%	4.89%	3.15%
75	886	318936	185301	26513	15937	58.34%	33.90%	4.85%	2.92%
90	885	252496	151160	21088	11589	57.87%	34.64%	4.83%	2.66%
105	887	149844	86804	11780	5972	58.90%	34.12%	4.63%	2.35%
120	886	69550	32391	4184	1977	64.34%	29.96%	3.87%	1.83%
135	886	68480	33908	4038	1736	63.31%	31.35%	3.73%	1.60%
150	886	67958	37637	4326	1630	60.92%	33.74%	3.88%	1.46%
165	886	60814	36218	3991	1332	59.41%	35.38%	3.90%	1.30%
180	886	55021	35452	3678	1129	57.75%	37.21%	3.86%	1.18%



- Variasi suhu reaksi 900 °C

P reaktor	1	atm
R	82,057	atm.mL/gmol.K
Flow	39,11343	ml/min
T pirolisa	700	C
Treaksi	900	C

t (min)	T act (K)	Peak Area				Komposisi (%) (Yi)			
		H2	CO	CH4	CO2	H2	CO	CH4	CO2
15	966	813325	170246	47424	13104	77.90%	16.31%	4.54%	1.26%
30	973	857967	161754	50221	11128	79.36%	14.96%	4.65%	1.03%
45	973	843975	167071	46985	9666	79.05%	15.65%	4.40%	0.91%
60	974	823091	167351	48294	8178	78.62%	15.99%	4.61%	0.78%
75	973	804548	168510	47866	7029	78.27%	16.39%	4.66%	0.68%
90	973	785734	170150	48542	5427	77.81%	16.85%	4.81%	0.54%
105	973	779064	171357	48458	5157	77.59%	17.07%	4.83%	0.51%
120	972	765792	171568	48525	4683	77.31%	17.32%	4.90%	0.47%
135	971	752430	173923	47570	4272	76.92%	17.78%	4.86%	0.44%
150	970	735696	174594	46915	3820	76.55%	18.17%	4.88%	0.40%
165	970	727077	176176	47130	3474	76.22%	18.47%	4.94%	0.36%
180	969	715306	176623	46210	3151	75.99%	18.76%	4.91%	0.33%

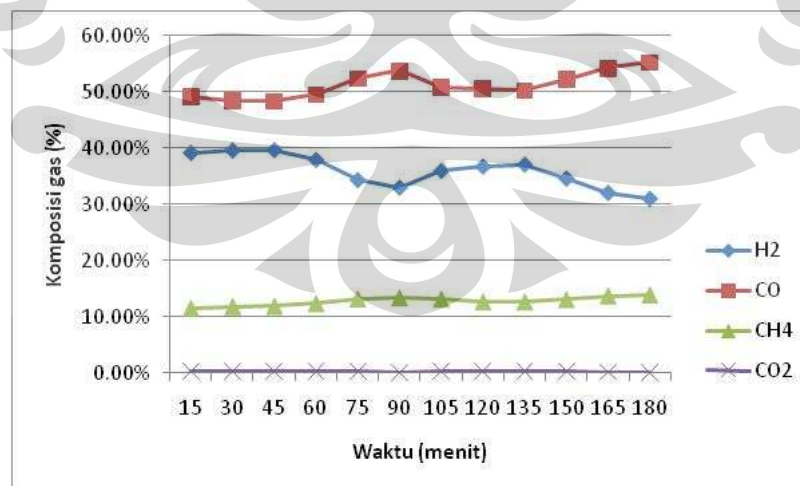


B.2 Data penelitian dengan variasi temperatur pirolisa 800 °C

- Variasi suhu reaksi 700 °C

P reaktor 1 atm
 R 82,057 atm.mL/gmol.K
 Flow 39,11343 ml/min
 T pirolisa 800 C
 Treaksi 700 C

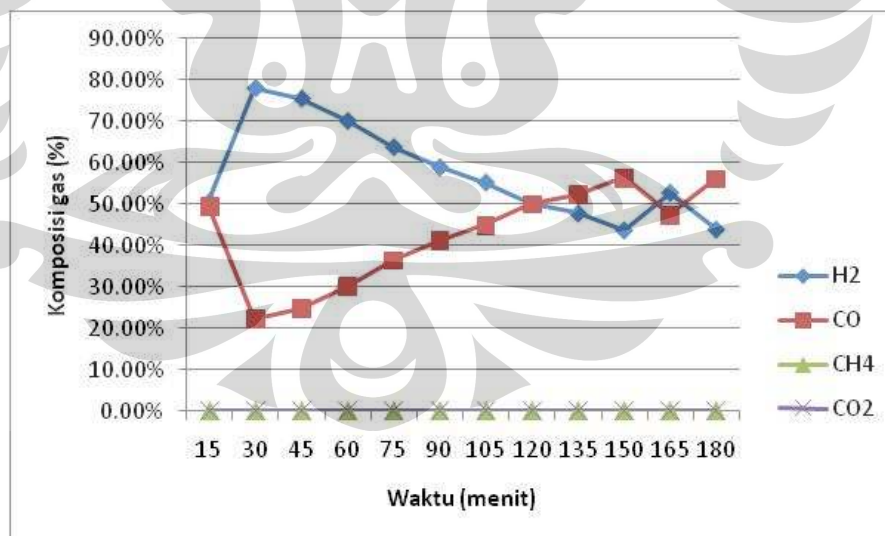
t (min)	T act (K)	Peak Area				Komposisi (%) (Yi)			
		H2	CO	CH4	CO2	H2	CO	CH4	CO2
15	770	105940	132982	31206	608	39.13%	49.12%	11.53%	0.22%
30	776	106454	130299	31907	489	39.55%	48.41%	11.85%	0.18%
45	780	106331	129631	31944	471	39.62%	48.30%	11.90%	0.18%
60	780	101084	132115	33021	655	37.88%	49.50%	12.37%	0.25%
75	781	86744	132385	33360	526	34.28%	52.32%	13.18%	0.21%
90	782	80104	130545	32554	0	32.94%	53.68%	13.39%	0.00%
105	780	93136	131658	34084	478	35.91%	50.76%	13.14%	0.18%
120	781	94588	130172	32671	337	36.70%	50.50%	12.67%	0.13%
135	781	95840	129777	32774	453	37.03%	50.14%	12.66%	0.18%
150	782	86459	130649	32703	418	34.55%	52.21%	13.07%	0.17%
165	783	77726	131514	33316	289	32.01%	54.16%	13.72%	0.12%
180	782	73866	131779	33134	0	30.93%	55.19%	13.88%	0.00%



- Variasi suhu reaksi 800 °C

P reaktor	1	atm
R	82,057	atm.mL/gmol.K
Flow	39,11343	ml/min
T pirolisa	800	C
Treaksi	800	C

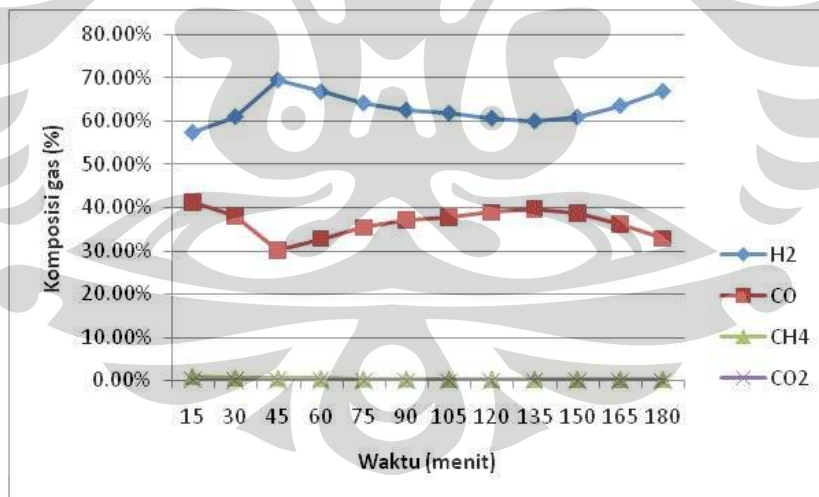
t (min)	T act (K)	Peak Area				Komposisi (%) (Yi)			
		H2	CO	CH4	CO2	H2	CO	CH4	CO2
15	881	36369	35464	0	0	50.63%	49.37%	0.00%	0.00%
30	883	8161	2310	0	0	77.94%	22.06%	0.00%	0.00%
45	883	4594	1496	0	0	75.44%	24.56%	0.00%	0.00%
60	885	3102	1327	0	0	70.04%	29.96%	0.00%	0.00%
75	886	2133	1214	0	0	63.73%	36.27%	0.00%	0.00%
90	885	1610	1125	0	0	58.87%	41.13%	0.00%	0.00%
105	887	1221	991	0	0	55.20%	44.80%	0.00%	0.00%
120	886	907	907	0	0	50.00%	50.00%	0.00%	0.00%
135	886	802	877	0	0	47.77%	52.23%	0.00%	0.00%
150	886	604	780	0	0	43.64%	56.36%	0.00%	0.00%
165	886	2212	1982	0	0	52.74%	47.26%	0.00%	0.00%
180	886	485	621	0	0	43.85%	56.15%	0.00%	0.00%



- Variasi suhu reaksi 900 °C

P reaktor	1	atm
R	82,057	atm.mL/gmol.K
Flow	39,11343	ml/min
T pirolisa	800	C
Treaksi	900	C

t (min)	T act (K)	Peak Area				Komposisi (%) (Yi)			
		H2	CO	CH4	CO2	H2	CO	CH4	CO2
15	966	295126	212512	4576	846	57.52%	41.42%	0.89%	0.16%
30	973	334671	209041	3066	674	61.13%	38.18%	0.56%	0.12%
45	973	451801	195347	2865	451	69.46%	30.03%	0.44%	0.07%
60	974	408446	200534	2302	215	66.79%	32.79%	0.38%	0.04%
75	973	376011	207663	1802	0	64.22%	35.47%	0.31%	0.00%
90	973	357441	211736	1505	0	62.63%	37.10%	0.26%	0.00%
105	973	347439	212320	1424	0	61.91%	37.83%	0.25%	0.00%
120	972	333830	214268	1335	0	60.76%	39.00%	0.24%	0.00%
135	971	326934	215815	1208	0	60.10%	39.68%	0.22%	0.00%
150	970	338432	214910	1142	0	61.04%	38.76%	0.21%	0.00%
165	970	372891	211970	1069	0	63.64%	36.18%	0.18%	0.00%
180	969	429189	211019	1170	0	66.92%	32.90%	0.18%	0.00%

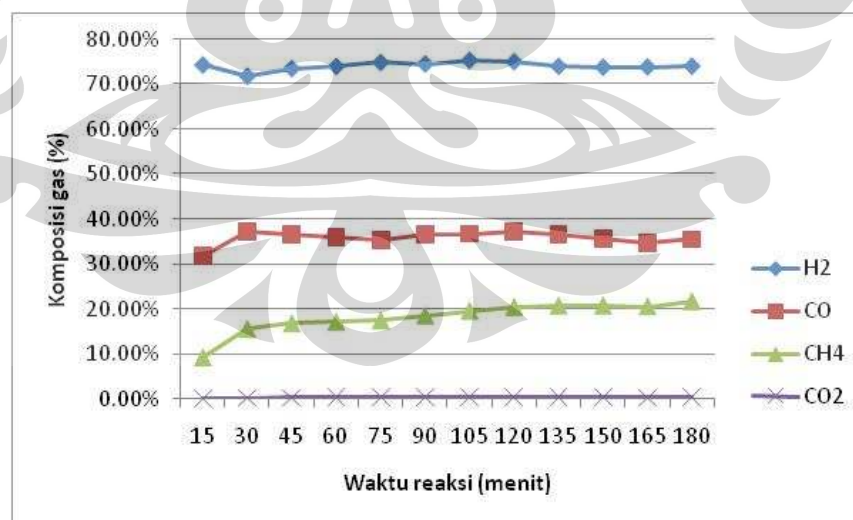


B.3 Data penelitian dengan variasi temperatur pirolisa 900 °C

- Variasi suhu reaksi 700 °C

P reaktor 1 atm
 R 82,057 atm.mL/gmol.K
 Flow 39,11343 ml/min
 T pirolisa 900 C
 Treaksi 700 C

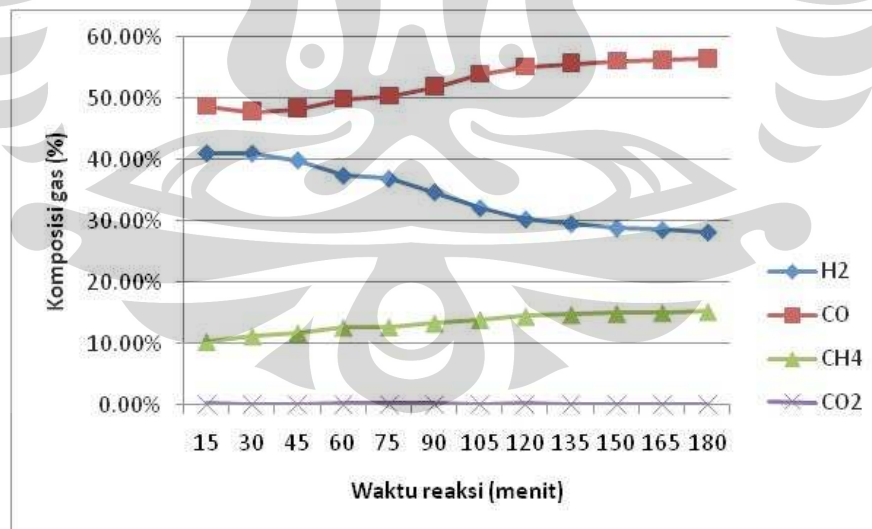
t (min)	Tact (K)	Peak Area				Komposisi (%) (Yi)			
		H2	CO	CH4	CO2	H2	CO	CH4	CO2
15	770	52654	138251	19564	227	74.26%	31.75%	9.29%	0.11%
30	776	43431	132593	32596	576	71.83%	37.26%	15.58%	0.28%
45	780	40616	132197	35095	638	73.47%	36.61%	16.83%	0.31%
60	780	39580	132771	35885	701	73.95%	36.02%	17.18%	0.34%
75	781	41180	131981	36790	755	74.83%	35.37%	17.46%	0.36%
90	782	35492	131065	38064	740	74.50%	36.58%	18.54%	0.36%
105	780	28089	132795	39400	658	75.29%	36.69%	19.61%	0.33%
120	781	21668	131763	39735	701	75.00%	37.13%	20.50%	0.36%
135	781	21570	133296	40766	804	74.00%	36.58%	20.75%	0.41%
150	782	20749	134036	40799	754	73.79%	35.69%	20.78%	0.38%
165	783	19693	131772	39413	579	73.86%	34.74%	20.59%	0.30%
180	782	19388	131372	42038	923	74.01%	35.50%	21.70%	0.48%



- Variasi suhu reaksi 800 °C

P reaktor	1	atm
R	82,057	atm.mL/gmol.K
Flow	39,11343	ml/min
T pirolisa	900	C
Treaksi	800	C

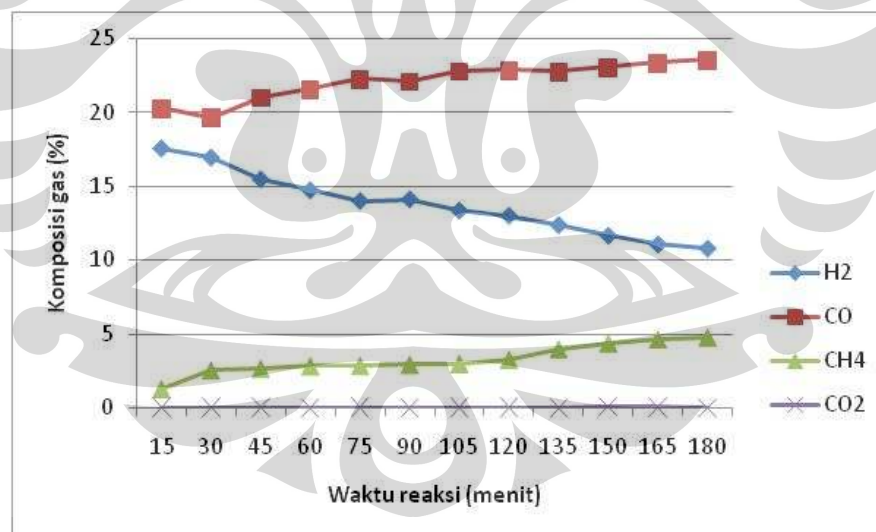
t (min)	T act (K)	Peak Area				Komposisi (%) (Yi)			
		H2	CO	CH4	CO2	H2	CO	CH4	CO2
15	868	112925	134065	28286	461	40.95%	48.62%	10.26%	0.17%
30	869	112550	131396	30750	343	40.92%	47.77%	11.18%	0.12%
45	869	108120	131253	31856	333	39.81%	48.33%	11.73%	0.12%
60	871	98100	130940	33128	463	37.35%	49.86%	12.61%	0.18%
75	872	96291	131464	33163	463	36.84%	50.30%	12.69%	0.18%
90	872	88203	131687	33850	486	34.69%	51.80%	13.31%	0.19%
105	871	78711	131927	34013	339	32.13%	53.85%	13.88%	0.14%
120	873	72705	132010	34678	362	30.32%	55.06%	14.46%	0.15%
135	873	70278	132231	35065	295	29.54%	55.59%	14.74%	0.12%
150	872	68264	132295	35349	256	28.91%	56.02%	14.97%	0.11%
165	871	67004	131536	35273	261	28.63%	56.19%	15.07%	0.11%
180	871	65856	131588	35478	304	28.24%	56.42%	15.21%	0.13%



- Variasi suhu reaksi 900 °C

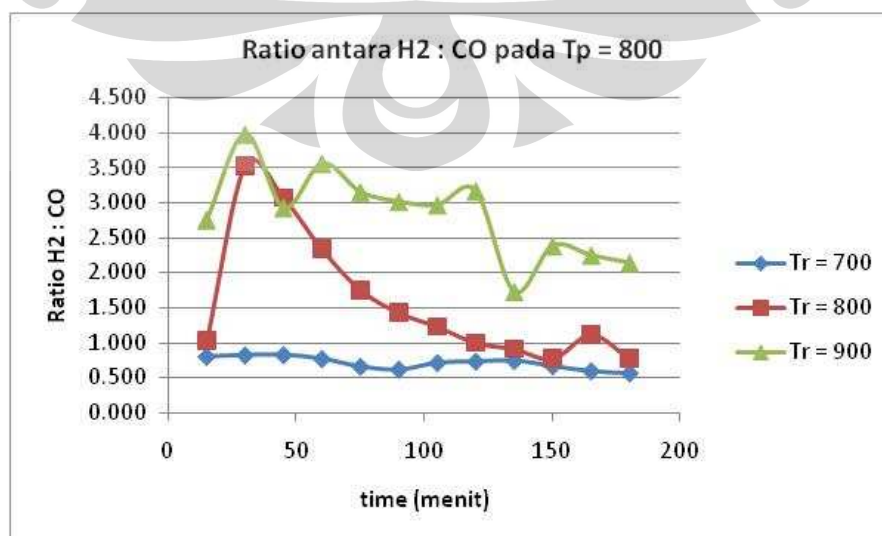
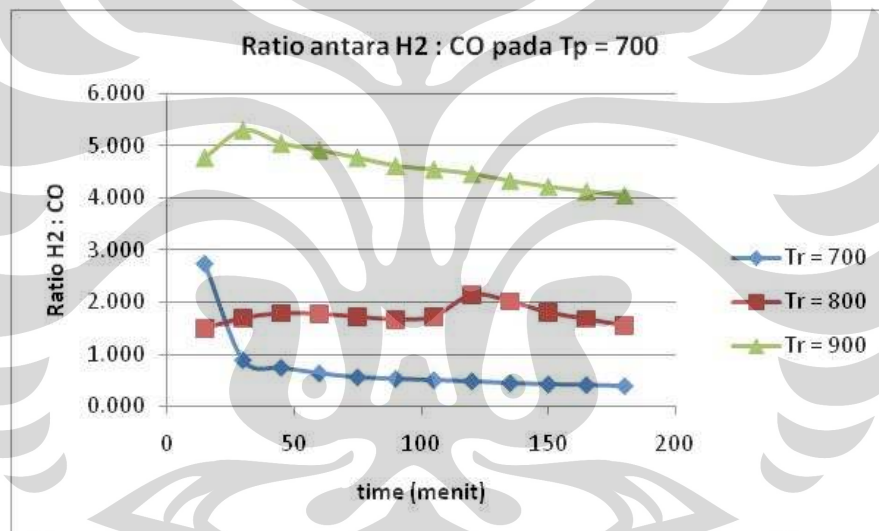
P reaktor 1 atm
 R 82,057 atm.mL/gmol.K
 Flow 39,11343 ml/min
 T pirolisa 900 C
 Treaksi 900 C

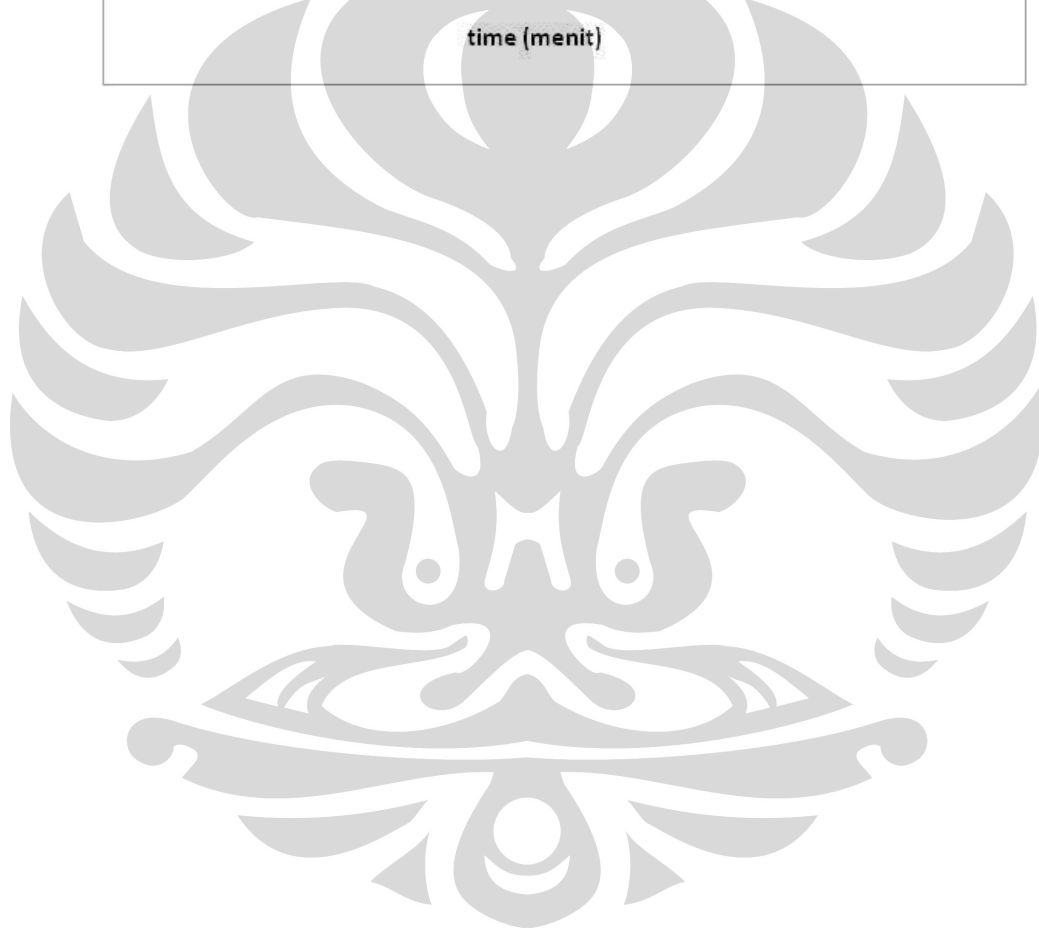
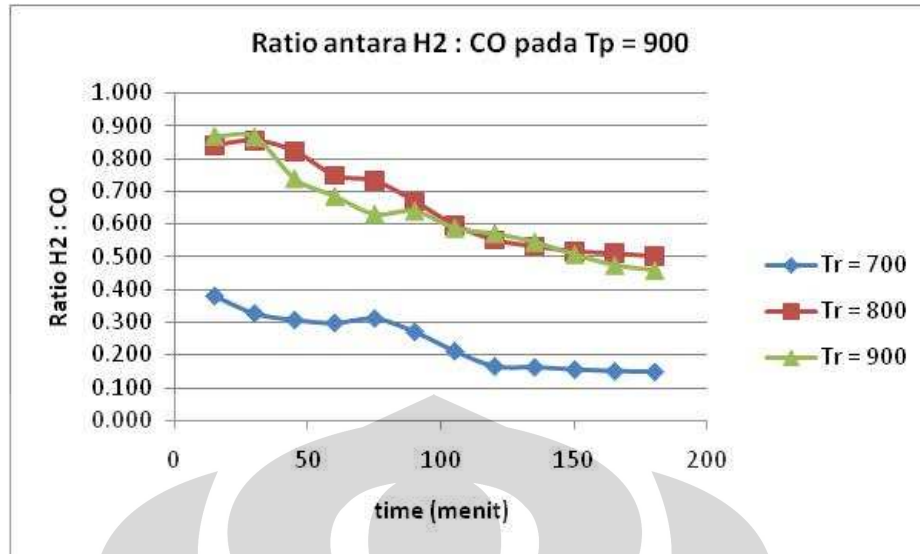
t (min)	T act (K)	Peak Area				Komposisi (%) (Yi)			
		H2	CO	CH4	CO2	H2	CO	CH4	CO2
15	868	1.22E+05	140225	8741	122	44.92%	51.80%	3.23%	0.05%
30	869	1.20E+05	138446	17850	87	43.35%	50.15%	6.47%	0.03%
45	869	1.03E+05	140310	17560	68	39.57%	53.69%	6.72%	0.03%
60	871	9.55E+04	139681	18253	0	37.69%	55.11%	7.20%	0.00%
75	872	8.90E+04	141338	17956	69	35.83%	56.92%	7.23%	0.03%
90	872	8.99E+04	140689	18589	0	36.09%	56.45%	7.46%	0.00%
105	871	8.32E+04	141739	18488	68	34.17%	58.21%	7.59%	0.03%
120	873	8.05E+04	141259	20162	78	33.27%	58.37%	8.33%	0.03%
135	873	7.47E+04	137300	24005	0	31.66%	58.17%	10.17%	0.00%
150	872	6.96E+04	137501	26108	301	29.81%	58.88%	11.18%	0.13%
165	871	6.51E+04	137385	27329	252	28.30%	59.71%	11.88%	0.11%
180	871	6.26E+04	136573	27644	0	27.59%	60.22%	12.19%	0.00%



B.4 Profil rasio H₂/CO gas sintesis

t (min)	700			800			900		
	700	800	900	700	800	900	700	800	900
15	2.736	1.489	4.777	0.797	1.026	2.752	0.381	0.842	0.8672
30	0.875	1.699	5.304	0.817	3.533	3.974	0.328	0.857	0.8643
45	0.730	1.786	5.052	0.820	3.071	2.922	0.307	0.824	0.7371
60	0.621	1.778	4.918	0.765	2.338	3.558	0.298	0.749	0.6840
75	0.543	1.721	4.774	0.655	1.757	3.149	0.312	0.732	0.6294
90	0.515	1.670	4.618	0.614	1.431	3.013	0.271	0.670	0.6392
105	0.488	1.726	4.546	0.707	1.232	2.965	0.212	0.597	0.5870
120	0.466	2.147	4.463	0.727	1.000	3.164	0.164	0.551	0.5700
135	0.430	2.020	4.326	0.738	0.914	1.729	0.162	0.531	0.5443
150	0.407	1.806	4.214	0.662	0.774	2.382	0.155	0.516	0.5063
165	0.394	1.679	4.127	0.591	1.116	2.249	0.149	0.509	0.4740
180	0.374	1.552	4.050	0.561	0.781	2.140	0.148	0.500	0.4582





Lampiran C : Perhitungan Kalibrasi Gas Kromatografi

Data Hasil Kalibrasi

Komponen Gas	Persamaan	Response Factor (RF)	Required Response Factor (RRF)
CH ₄	$Y = 68626 x + 1477$	68626	1
H ₂	$Y = 2644561 x + 29635,13$	2644561	38,46938
CO	$Y = 25986 x + 1740$	25986	0,3786
CO ₂	$Y = 743,6 x + 15936$	743,6	0,0108

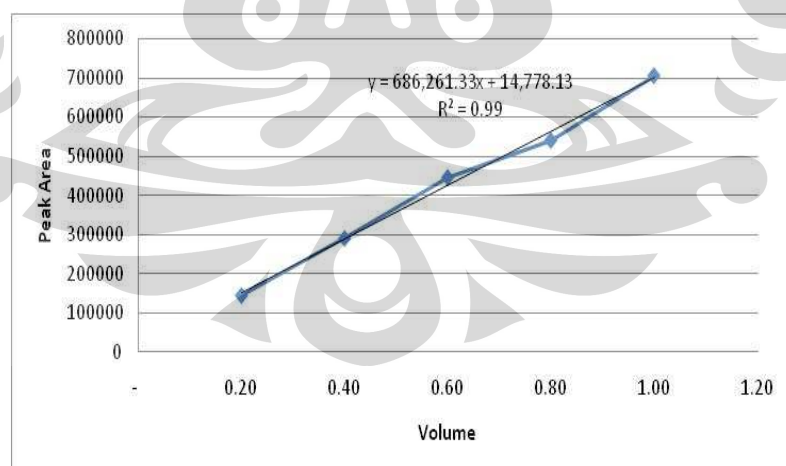
Komposisi Gas Produk

Pengolahan data meliputi perhitungan komposisi produk dengan persamaan :

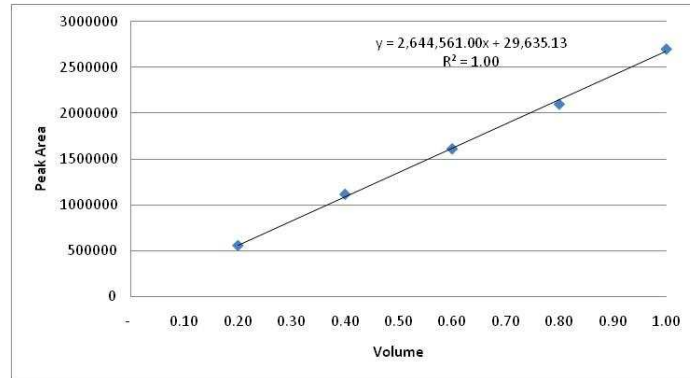
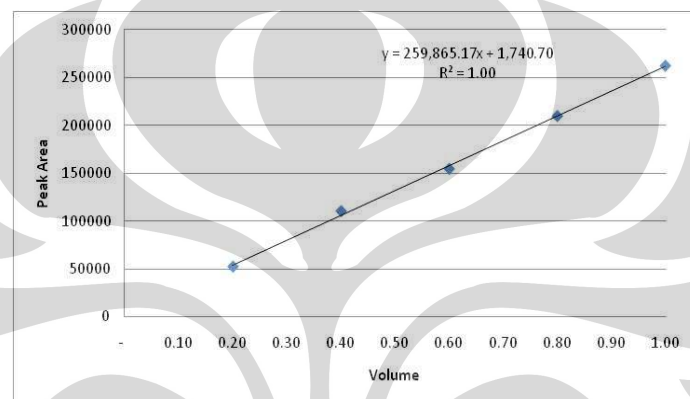
$$\text{Komposisi gas (\%)} = \frac{\frac{P}{RF_i / RRF_i}}{\frac{P}{RF_i / RRF_i}} \times 100\%$$

Keterangan : RF_i = response factor gas

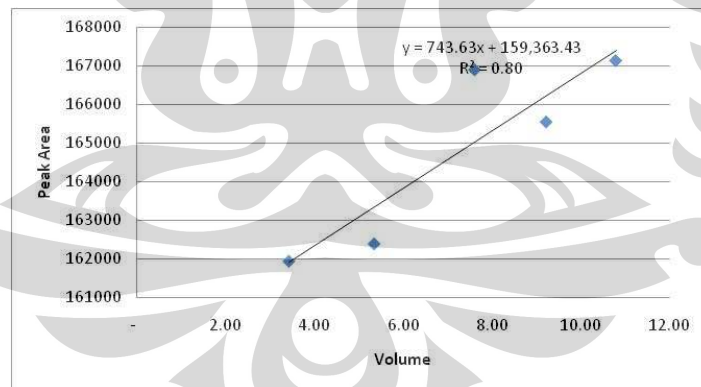
RRF_i = required response factor gas



a. Grafik Kalibrasi CH₄

b. Grafik Kalibrasi H₂

c. Grafik Kalibrasi CO

d. Grafik Kalibrasi CO₂