



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH *SPACE TIME*, TEMPERATUR, DAN
RASIO UMPAN TERHADAP KINERJA REAKTOR *GAUZE*
UNTUK PRODUKSI HIDROGEN DAN NANOKARBON
MELALUI REAKSI DEKOMPOSISI METANA**

SKRIPSI

**DWI YULIANTI
0405060253**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH *SPACE TIME*, TEMPERATUR, DAN
RASIO UMPAN TERHADAP KINERJA REAKTOR *GAUZE*
UNTUK PRODUKSI HIDROGEN DAN NANOKARBON
MELALUI REAKSI DEKOMPOSISI METANA**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
gelar Sarjana Teknik**

**DWI YULIANTI
0405060253**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Dwi Yulianti

NPM : 0405060253

Tanda Tangan :

Tanggal : 7 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Dwi Yulianti
NPM : 0405060253
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pengaruh *Space Time*, Temperatur, dan Rasio Umpan terhadap Kinerja Reaktor *Gauze* untuk Produksi Hidrogen dan Nanokarbon melalui Reaksi Dekomposisi Metana

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Widodo W.P., DEA ()

Pembimbing : Dr.rer.nat. Ir. Yuswan Muharam, MT ()

Penguji : Dr. Ir. Asep Handaya Saputra, M.Eng()

Penguji : Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc., PhD ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2009

KATA PENGANTAR

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

1. Prof. Dr. Ir. Widodo W.P., DEA dan Dr. rer. Nat. Yuswan Muharam, MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Ir. Praswasti PDK Wulan, MT (Bu Wulan) yang banyak membantu dalam penyediaan literatur dan berbagi cerita,
3. Kang Jajat dan Mang Izal selaku teknisi laboratorium yang telah membantu saya secara teknis,
4. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
5. Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini: Tya, Rizka dan Estu sebagai teman seperjuangan; geng “ubur-ubur” sebagai teman gila-gilaan; Renda, yang sudi membagi kamarnya selama minggu *deadline*, dan juga kepada teman-teman lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Akhir kata, saya berharap semoga semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu kedepannya.

Depok, 7 Juli 2009

Penulis

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

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

Nama : Dwi Yulianti
NPM : 0405060253
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

“Pengaruh *Space Time*, Temperatur, dan Rasio Umpan terhadap Kinerja Reaktor *Gauze* untuk Produksi Hidrogen dan Nanokarbon melalui Reaksi Dekomposisi Metana”

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 7 Juli 2009

Yang menyatakan

(Dwi Yulianti)

ABSTRAK

Nama : Dwi Yulianti
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pengaruh *Space Time*, Temperatur, dan Rasio Umpan terhadap Kinerja Reaktor *Gauze* untuk Produksi Hidrogen dan Nanokarbon melalui Reaksi Dekomposisi Metana

Banyak penelitian telah dilakukan dalam mengembangkan reaktor dekomposisi metana untuk produksi hidrogen dan nanokarbon. Penggunaan reaktor *gauze* pada dekomposisi metana terbukti dapat mengatasi masalah penyumbatan pada reaktor unggun diam dan ketinggian *gauze* dan laju alir umpan dapat diatur dengan mudah tanpa mempengaruhi hidrodinamika sehingga dapat menambah waktu tinggal reaktan yang pada akhirnya meningkatkan kinerja reaktor. Oleh karena itu, penelitian dilakukan lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh kondisi operasi (*space time*, temperatur, dan rasio umpan) terhadap kinerja reaktor. Berdasarkan hasil uji diketahui bahwa kinerja reaktor paling tinggi pada *space time* 0.006 gr min/mL (range 0.006-0.0006), temperatur 700°C (range 700°C-800°C), dan dengan umpan metana.

Kata kunci:
Reaktor *gauze*, *space time*, temperatur, rasio umpan

ABSTRACT

Name : Dwi Yulianti
Study Program : Chemical Engineering
Title : Effect of Space Time, Temperature, and Feed Ratio to Gauze Reactor Performance for producing Hydrogen and Carbon nano By Methane Decomposition Reaction

There are lots of experiments have been made in developing methane decomposition reactor to produce hydrogen and nanocarbon. Utilizing gauze reactor in methane decomposition have been proved in solving agglomeration problem of spouted bed and gauze height and feed flowrate can be managed easily without affecting hydrodynamic results in increasing reactant residence time that finally raising reactor performance. Therefore, deeper experiment has been done to find effects of operation condition (space time, temperature, and feed ratio) to reactor performance. Due to experiment, that the highest reactor performance at space time 0,006 gr min/mL (range 0.006-0.0006), temperature 700°C (range 700⁰C-800⁰C), and by methane as feed.

Key words:

Gauze reactor, space time, temperature, feed ratio

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	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 Reaksi Dekomposisi Metana	5
2.2 Produk Reaksi Dekomposisi Metana	6
2.2.1 Gas Hidrogen	6
2.2.2 Nanokarbon	7
2.3 Mekanisme Pertumbuhan Karbon Nanotube	9
2.4 Katalis Pada Reaksi Dekomposisi Metana	12
2.4.1 Katalis Ni-Cu-Al ₂ O ₃	12
2.4.2 Katalis Terstruktur	15
2.5 Deaktivasi Katalis	17
2.5 Reaktor Gauze Untuk Reaksi Dekomposisi Metana	18
2.6 Faktor-faktor yang mempengaruhi Kinerja Reaktor	21

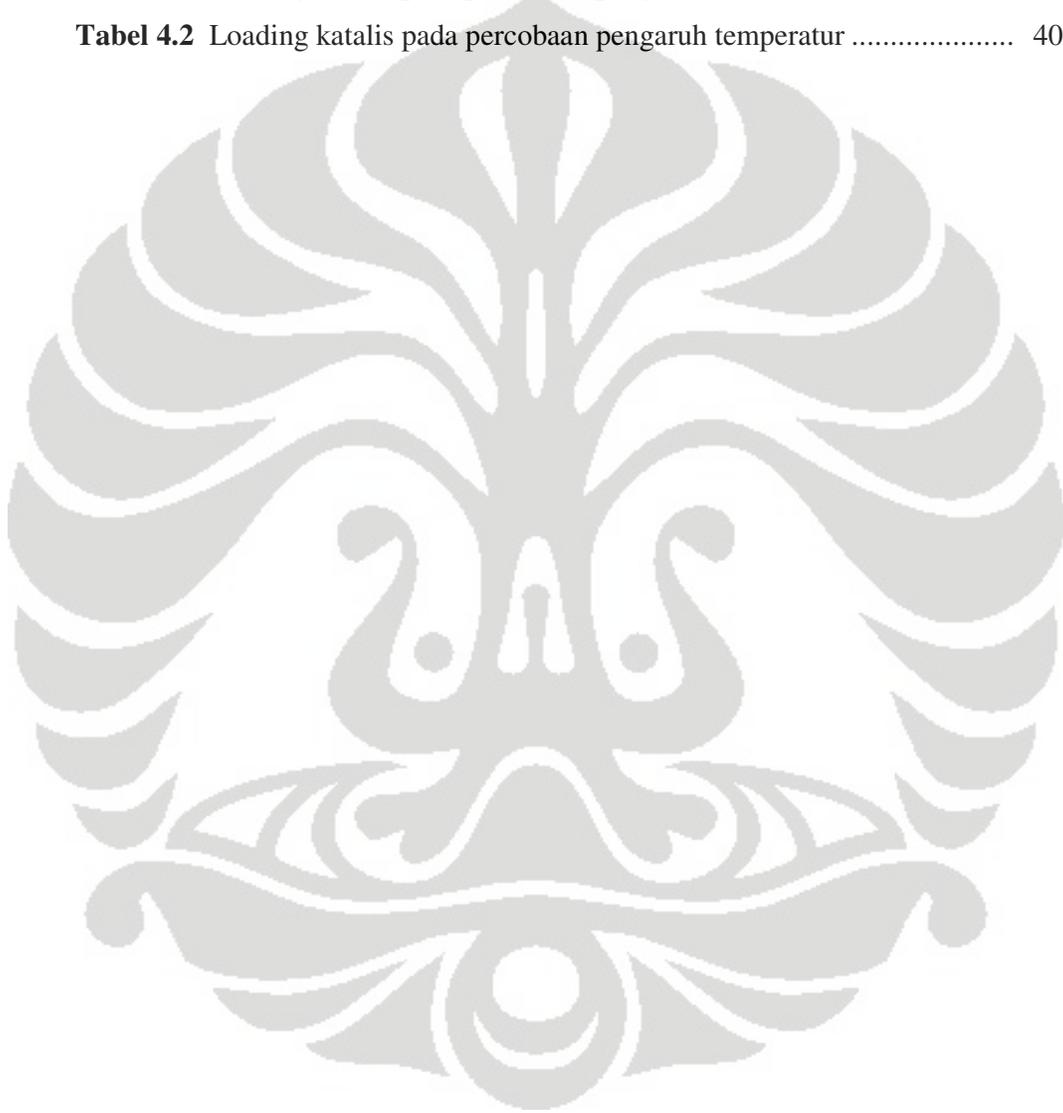
2.7 Teknik Preparasi Katalis dengan Metode Sol-Gel.....	25
2.8 Teknik Pelapisan Dip-Coating.....	25
BAB 3 METODE PENELITIAN	27
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	27
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	28
3.3 Penjelasan Tahap-Tahap Penelitian	29
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1. Uji panjang efektif reaktor.....	34
4.1 Pengaruh Space Time.....	35
4.1.1 Pengaruh <i>Space Time</i> Terhadap Konversi.....	36
4.1.2 Pengaruh <i>Space Time</i> Terhadap Kemurnian Hidrogen.....	37
4.1.3 Pengaruh <i>Space Time</i> Terhadap Yield Karbon.....	38
4.2 Pengaruh Temperatur	40
4.2.1 Pengaruh Temperatur Terhadap Konversi	41
4.2.2 Pengaruh Temperatur Terhadap Kemurnian hidrogen.....	43
4.2.3 Pengaruh Temperatur Terhadap Yield Karbon.....	44
4.3 Pengaruh Rasio Umpan	45
4.3.1 Pengaruh Rasio Umpan terhadap Konversi.....	45
4.3.2 Pengaruh Rasio Umpan terhadap Kemurnian Hidrogen	47
4.3.3 Pengaruh Rasio Umpan terhadap Yield Karbon.....	48
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	50
5.1 Kesimpulan	50
5.2 Saran.....	50
DAFTAR REFERENSI	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme reaksi permukaan dekomposisi katalitik metana	6
Gambar 2.2 Jenis nanotube karbon: (a) SWNT, (b) MWNT	9
Gambar 2.3 Mekanisme pembentukan nukleus	11
Gambar 2.4 Skema pertumbuhan CNT	11
Gambar 2.6 Skema yang menunjukkan kebergantungan struktur nanokarbon .	14
Gambar 2.7 (a) katalis <i>gauze</i> , (b) aplikasi katalis <i>gauze</i> pada industri	15
Gambar 2.8. Katalis terstruktur.....	16
Gambar 2.9 Mekanisme deaktivasi	18
Gambar 2.10 <i>Gauze</i> , reaktor katalis terstruktur dan nanotube karbon.....	19
Gambar 2.11 Hasil rancangan reaktor katalis terstruktur bentuk <i>gauze</i>	20
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	27
Gambar 3.2 Rangkaian alat.....	19
Gambar 3.3 Katalis terstruktur dalam reaktor	30
Gambar 4.1 Profil temperatur dalam reaktor	34
Gambar 4.2 Profil konversi metana terhadap waktu untuk berbagai <i>space time</i>	36
Gambar 4.3 Profil konversi metana maksimum terhadap waktu.....	38
Gambar 4.4 Profil kemurnian hidrogen terhadap <i>space time</i>	39
Gambar 4.5 Perbandingan Yield karbon terhadap variasi <i>space time</i>	39
Gambar 4.6 Konversi metana terhadap waktu.....	41
Gambar 4.7 Profil konversi metana terhadap waktu	42
Gambar 4.8 Profil kemurnian hidrogen terhadap temperatur	43
Gambar 4.9 Perbandingan Yield karbon terhadap variasi temperatur	44
Gambar 4.10 Profil konversi metana terhadap waktu	45
Gambar 4.11 Konversi metana terhadap rasio umpan	46
Gambar 4.12 Profil kemurnian hidrogen terhadap waktu	47
Gambar 4.13 Profil kemurnian hidrogen terhadap rasio umpan.....	48
Gambar 4.14 Perbandingan Yield karbon terhadap variasi temperatur	49

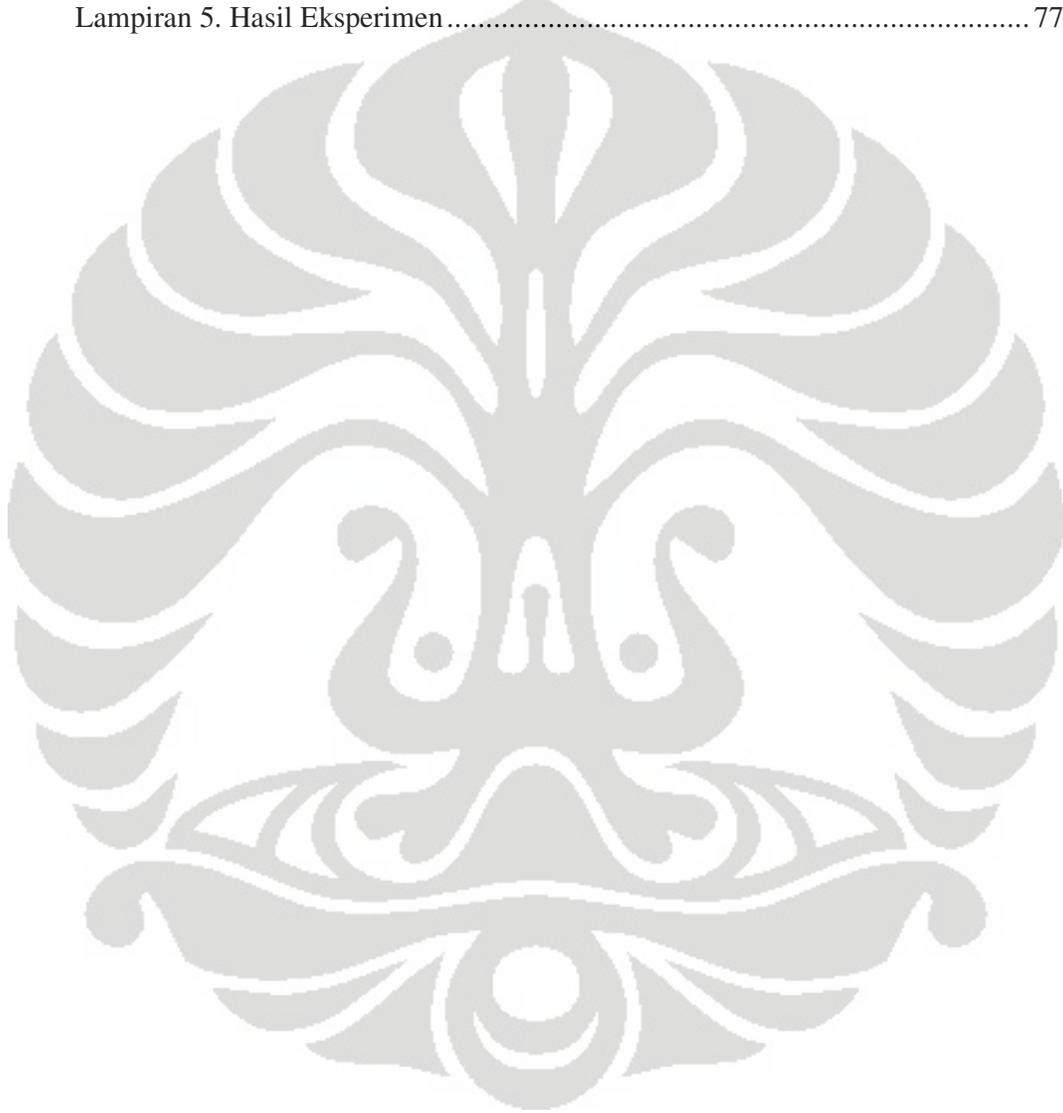
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kemurnian hydrogen pada berbagai aplikasi.....	7
Tabel 2.2 Rangkuman hasil penggunaan reaktor di atas sebagai berikut.....	20
Tabel 4.1 Loading katalis pada percobaan pengaruh <i>space time</i>	35
Tabel 4.2 Loading katalis pada percobaan pengaruh temperatur	40



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data kalibrasi laju alir	56
Lampiran 2. Data kalibrasi Gas Chromatography	57
Lampiran 3. Data Hasil Uji Kinerja.....	61
Lampiran 4. Kesetimbangan termodinamik	75
Lampiran 5. Hasil Eksperimen.....	77



BAB 1

PENDAHULUAN

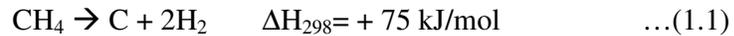
1.1 Latar Belakang Masalah

Ada dua hal pada dua bidang berbeda yang mendapat sorotan dunia dalam beberapa tahun terakhir.

Pertama, pada bidang teknologi, penelitian tentang nanoteknologi menjadi sorotan karena peningkatan kemampuan fisikal dan kemampuan modifikasi dari material nano. Nanokarbon, khususnya yang berbentuk tabung (*tube*) adalah contoh nanopartikel material paling terkenal untuk mewujudkan nanoteknologi karena memiliki karakteristik yang luar biasa sebagai material sehingga menjanjikan pemanfaatan yang luas. Produksi nanokarbon secara komersial umumnya menggunakan proses *arch-discharge* penguapan graphite. Namun, proses tersebut membutuhkan energi yang sangat besar dan memerlukan pemurnian produk sehingga biaya produksinya sangat mahal dan sulit di *scale-up* [1].

Kedua, pada bidang lingkungan, pemanasan global menjadi permasalahan yang mendapat sorotan. Konsumsi energi besar-besaran, terutama yang berasal dari fosil adalah salah satu sumber timbulnya gas rumah kaca penyebab pemanasan global. Hidrogen merupakan salah satu alternatif sumber energi yang dapat menghasilkan energi yang besar dan efisien serta ramah lingkungan. Penggunaan hidrogen dilakukan melalui aplikasi H_2-O_2 *fuel cell* yang menuntut tingkat kemurnian hidrogen sangat tinggi dari senyawa CO karena bersifat meracuni anode-elektrokatalis pada *fuel cell* tersebut [2]. Proses produksi hidrogen yang banyak digunakan saat ini adalah reformasi kukus metana: $(CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3 H_2, \Delta H_{298K} = +206 \text{ kJ/mol})$. Proses ini menghasilkan senyawa CO melebihi toleransi yang diperkenankan untuk aplikasi *fuel cell* (10-20 ppm) [2], sehingga membutuhkan unit tambahan untuk proses pemurnian yang terbilang cukup kompleks dan mahal.

Dekomposisi katalitik metana telah terbukti sebagai salah satu alternatif untuk memproduksi hidrogen dan nanokarbon bermutu tinggi secara ekonomis dan simultan dengan reaksi sebagai berikut [3]:



Pada reaksi ini, hidrogen yang dihasilkan bebas kontaminan CO dan berlangsung pada temperatur yang lebih rendah sehingga proses pemurnian CO tidak diperlukan dan kebutuhan energi lebih sedikit dibandingkan proses *steam reforming* [1,4]. Produk lain yang berupa produk nanokarbon juga sekaligus dapat dihasilkan melalui reaksi ini. Dengan demikian, dekomposisi katalitik metana menjadi solusi menarik untuk menjawab kedua permasalahan yang telah dipaparkan sebelumnya.

Beberapa penelitian telah dilakukan dalam merancang reaktor dekomposisi katalitik metana untuk produksi skala besar diantaranya dengan menggunakan jenis reaktor *fixed bed*, *spouted bed* atau *fluidized bed*. Penggunaan reaktor jenis *fixed bed* (unggun diam) mengalami masalah penyumbatan akibat deposit karbon pada katalis yang menyebabkan kenaikan *pressure drop* [5]. Penggunaan *spouted bed reaktor* membuat pencampuran katalis tidak homogen sehingga konversi metana yang dihasilkan sangat kecil, 7% [3]. Reaktor jenis *fluidized bed* memberikan konversi metana yang rendah pula, < 40% karena waktu tinggal reaktan yang singkat sehingga tidak mendapatkan hidrogen murni, disamping itu sulit mengontrol laju alir umpan dikarenakan perubahan ukuran partikel katalis selama reaksi dan terjadi aglomerasi dan *sticking* dari partikel-partikel nano karbon [3, 6, 7,8].

Dalam rangka mencari solusi permasalahan jenis reaktor diatas, tahun 2007 lalu telah dimulai riset menggunakan reaktor katalitik terstruktur skala kecil (diameter 16 mm) untuk reaksi dekomposisi metana. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada reaktor katalis terstruktur, katalis Ni-Cu-Al₂O₃ mampu bertahan sampai 1400 menit (~24 jam) dengan penurunan laju alir yang relatif kecil (sekitar 10%) yang berarti dapat mengatasi permasalahan penyumbatan (*pressure drop*) pada reaktor ungun diam dan ketinggian *wire mesh (gauze)* dan laju alir umpan dapat diatur dengan mudah tanpa mempengaruhi hidrodinamika

sehingga dapat menambah waktu tinggal reaktan yang pada akhirnya meningkatkan konversi [9]. Dengan hidrodinamika fluida yang tidak terlalu kompleks pada reaktor jenis ini, maka akan memudahkan dalam *scaling up* ke skala industri. Penelitian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan dimensi reaktor yang lebih besar. Namun, hasil yang diharapkan kurang maksimal dilihat dari target kapasitas produk yang diharapkan.

1.2 Rumusan Masalah

Proses produksi skala besar *nanotube* karbon dan hydrogen melalui dekomposisi katalitik metana masih dihadapkan pada permasalahan krusial dalam pengembangan peralatan produksi (reaktor). Berdasarkan hasil penelitian tentang reaktor *gauze* untuk produksi nanokarbon dan hidrogen melalui dekomposisi katalitik metana masih perlu ditelaah lebih jauh lagi mengenai kondisi operasi yang paling baik. Oleh karena itu, yang menjadi rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana kondisi operasi untuk mencapai kinerja yang tinggi pada produksi hidrogen dan nanotube karbon melalui dekomposisi katalitik metana dengan menggunakan reaktor *gauze*.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mencari kondisi operasi (*space time*, temperatur, dan rasio umpan) yang memberikan hasil kinerja yang tinggi dari reaktor katalitik *gauze* skala laboratorium agar dapat memudahkan dalam pengembangan reaktor ke skala pilot.

1.4 Batasan Masalah

Batasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dimensi reaktor yang digunakan adalah tabung kuarsa dengan diameter 4.5 OD.
2. Katalis yang digunakan dalam penelitian ini adalah katalis Ni-Cu-Al₂O₃ dengan perbandingan atomik Ni-Cu-Al adalah 2:1:1 yang dipreparasi dengan metode sol-gel.

3. Substrat katalis berupa anyaman kawat *stainless steel* dengan ukuran 16 mesh.
4. Pelapisan katalis menggunakan metode *dip-coating*.
5. Tinjauan uji kinerja reaktor tanpa memperhitungkan kualitas karbon yang dihasilkan.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan

Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Berisikan studi literatur secara umum dan secara khusus mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian yaitu mengenai reaksi dekomposisi metana beserta produknya, mekanisme pertumbuhan nanokarbon, katalis pada reaksi dekomposisi metana, reaktor untuk reaksi dekomposisi metana, hal-hal yang mempengaruhi kinerja reaktor, metode sol-gel untuk preparasi katalis, serta teknik pelapisan katalis.

BAB III Metodologi Penelitian

Berisikan diagram alir penelitian, alat & bahan yang digunakan dalam penelitian, prosedur penelitian yang meliputi persiapan uji operasi, pengoperasian rangkaian alat, dan serta pengolahan data.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Berisi uraian dan analisa terhadap data uji kinerja reaktor yang meliputi konversi, kemurnian hidrogen, dan yield karbon dari berbagai variasi *space time*, temperatur, dan laju alir.

BAB VI Kesimpulan dan Saran

Berisikan kesimpulan dan saran dari hasil penelitian dan pembahasan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Reaksi Dekomposisi Metana

Dekomposisi didefinisikan sebagai salah satu dari reaksi kimia yang menguraikan atau memutuskan ikatan rantai suatu senyawa menjadi unsur-unsur atau senyawa yang lebih sederhana [3]. Dekomposisi metana atau yang dikenal dengan *Methane Decomposition Reaction* (MDR) memutuskan ikatan H-C dari metana menjadi komponen yang lebih sederhana yaitu hidrogen dan karbon. Reaksinya [3]:



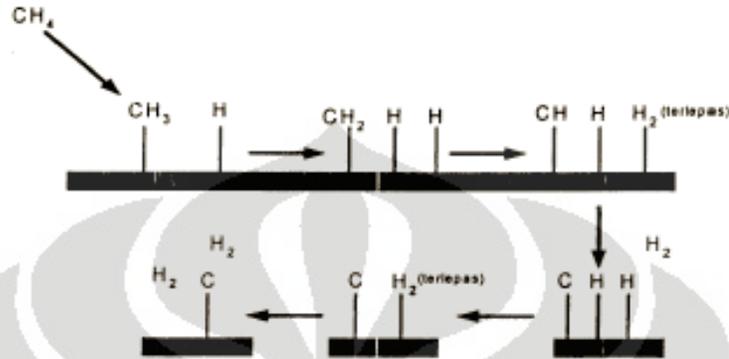
Nilai ΔH_r° yang positif menandakan reaksi bersifat endotermis. Konversi akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur reaksi sehingga reaksi ini harus dilakukan pada temperatur sangat tinggi. Oleh karena itu, untuk menurunkan temperatur reaksi perlu ditambahkan katalis yang dapat menurunkan energi aktivasi. Temperatur yang pas untuk reaksi dekomposisi metana adalah 700°C [10].

Proses ini menghasilkan dua jenis produk yang bernilai tinggi yaitu *gas hidrogen free CO-CO₂* dan material karbon dengan jenis yang berbeda. Perkembangan MDR pertama kalinya bertujuan untuk mendapatkan gas H₂ yang murni dan memiliki konsentrasi yang lebih besar. Setelah diketahui ada material nano yang dapat terbentuk dari reaksi ini, maka perkembangan penelitian dekomposisi metana pun semakin pesat.

Reaksi perengkahan metana (*methane cracking*) dapat dibedakan menjadi dua, yaitu perengkahan metana secara langsung (*direct methane cracking*) dan perengkahan metana secara tidak langsung (*indirect methane cracking*). Reaksi dekomposisi metana tergolong dalam reaksi perengkahan metana secara langsung.

Pada reaksi dekomposisi metana, sebuah molekul metana direngkah (*cracking*) menjadi sebuah molekul karbon dan dua buah molekul hidrogen seperti ditunjukkan pada gambar 2.1. Atom hidrogen terputus satu persatu membentuk

ion karbonium. Dan pada akhirnya didapatkan sebuah molekul atom karbon dan dua molekul hidrogen pada akhir reaksi.



Gambar 2. 1 Mekanisme reaksi permukaan dekomposisi katalitik metana [39]

2.2 Produk Reaksi Dekomposisi Metana

2.2.1 Gas Hidrogen

Hidrogen bersifat sangat mudah terbakar. Kehadiran senyawa H_2 pada konsentrasi 4% saja dalam udara dapat menimbulkan reaksi pembakaran berikut[2] :



Pembakaran dengan hidrogen memiliki kelebihan dari pembakaran metana atau hidrokarbon lainnya, yaitu tidak dihasilkannya polutan CO_x sebagai produk pembakaran dan dapat dilakukan pada temperatur ignisi yang lebih rendah.

Pemanfaatan hidrogen sebagai bahan bakar bebas polutan diaplikasikan melalui teknologi *Proton-Exchange Membrane Cells* (PEMFC). Namun demikian, aplikasi ini mensyaratkan hidrogen yang bebas dari CO karena CO sangat kuat meracuni anode-elektrokatalis pada sel [2]. Selain itu, hydrogen yang digunakan untuk aplikasi ini menuntut kemurnian yang tinggi, mencapai 99,99%. Sedikit kandungan diperbolehkan dalam aplikasi ini. Kualitas kemurnian hidrogen awal 70-90% paling ekonomis ditingkatkan kemurniannya hingga 99,9+% dengan menggunakan teknologi *Pressure Swing Adsorber* (PSA) [44]. Gas hidrogen murni dapat diproduksi dari air dengan menggunakan proses elektrolisis. Selain itu, hidrogen dapat diproduksi dari bahan baku gas bumi (metana) melalui reaksi-

reaksi reformasi kukus/metana, oksidasi parsial metana dan reformasi CO₂/metana. Semua reaksi diatas menghasilkan produk gas sintesis yaitu campuran H₂ dan CO. Alternatif lain untuk memproduksi hidrogen adalah dengan *Methane Decomposition Reaction* (MDR). Pada proses ini tidak terbentuk CO₂ dan tidak diperlukan proses penghilangan CO.

Aplikasi hidrogen secara lebih luas dapat dilihat dari tabel berikut:

Tabel 2.1 Kemurnian hydrogen pada berbagai aplikasi

No.	Aplikasi	Kemurnian gas H ₂ [%]	Sumber
1	Sebagai media pendingin pada <i>electricity generator</i>	98-95	[34]
2	Aplikasi industry secara umum	99.95	
3	Sebagai bahan bakar, hidrogenasi, dan aplikasi <i>water chemistry</i>	99.99	[35]
4	Pada instrumentasi analitik dan propellant	99.995	
5	Semikonduktor, analitikal, dan aplikasi khusus	99.999	
6	Aplikasi hydrotreatment : hydrodesulphurization (HDS), hydrodenitrogenation (HDN), hydrodearomatization (HAD)	>= 80%	[36]

Sumber: [34,35,36]

2.2.2 Nanokarbon

Nanokarbon didefinisikan sebagai material karbon yang diproduksi dengan ukuran dan struktur berskala nanometer. Berdasarkan bentuknya, nanokarbon terbagi menjadi tiga, yaitu *fullerene* (berbentuk bulat), karbon nanotube berbentuk pipa, dan yang terakhir karbon nanofiber yang berbentuk serabut dan tidak teratur [3].

Nanokarbon secara umum diproduksi melalui tiga metoda, yaitu *arch discharge*, *laser ablation* dan *chemical vapour deposition/CVD* [M.A.J. Veld, et. Al. *The wondrous World of CNT*, 2003). Reaksi dekomposisi metana untuk memproduksi nanokarbon termasuk dalam metoda *chemical vapour deposition*. Keuntungan menggunakan metoda CVD, diantaranya:

- Kontrol posisi baik sehingga menghasilkan deretan yang bagus pada nanokarbon yang dihasilkan sampai skala nanometrik. [11]
- Kontrol diameter sebgas laju pertumbuhan dari nanotube karbon [12]
- Dapat memilih penggunaan katalis yang tepat untuk tumbuhnya single walled CNT daripada multi-walled CNT. [12]
- Lebih mudah di-*scale up* untuk produksi level industry dibandingkan metode *arch discharge* dan *laser ablation*.

Metoda CVD menggunakan sumber karbon pada fasa gas dan sumber panas untuk mentransfer energi ke molekul karbon yang berwujud gas. Sumber karbon yang biasa digunakan adalah metana, karbon monoksida, dan asetilen. Pada penelitian ini digunakan metana sebagai sumber karbon. Berdasarkan penelitian Li et al. [13] yang mempelajari efek dari precursor hidrokarbon pada formasi CNT diketahui bahwa dari enam precursor hidrokarbon yang dipakai (metana, heksana, sikloheksana, benzene, naptalen dan antrasin), metana menjadi pilihan yang bagus sebagai prekursor/sumber karbon pada metoda CVD. Hal ini karena metana mempunyai komposisi yang sederhana dan lebih stabil dibanding hidrokarbon lain yang diuji. Pada metoda CVD, setelah sumber karbon dialirkan, maka selanjutnya sumber energi yang diberikan akan memecah molekul menjadi karbon dalam bentuk atomik. Karbon lalu berdifusi melalui substrat, yang dipanaskan dan dilapisi oleh katalis kemudian terikat disitu [14].

Umumnya reaksi dekomposisi katalitik metana menghasilkan dua jenis nanokarbon yaitu nanotube karbon (*carbon nanotube*; CNT) dan *carbon nanofiber/filament* (CNF). CNT lebih disukai dari CNF karena kelebihan-kelebihan yang dimilikinya, yaitu:

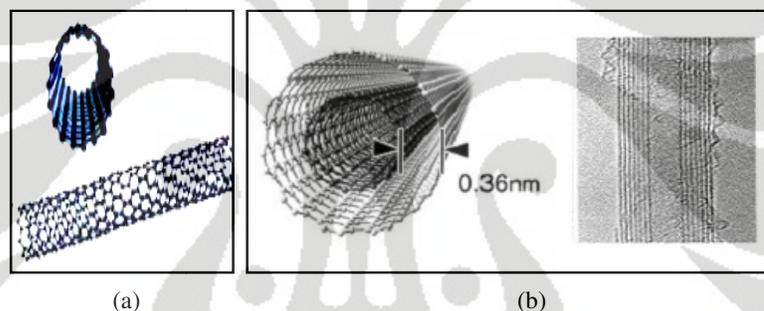
- Mempunyai kapasitas elektrokimia empat kali lebih tinggi [15]
- Lebih ringan
- Ketahanan terhadap panas lebih tinggi

- Kemampuan penyimpanan hidrogen lebih besar (sekitar 280 gr/l) dibanding CNF (sekitar 14-20 gr/l) [Grujicic, 2002].

Nanotube karbon pertama kali ditemukan oleh Sumio Iijima pada tahun 1991. Nanotube karbon memiliki kombinasi sifat struktur yang sempurna, yaitu ukuran yang kecil, densitas yang rendah, kekuatan yang tinggi (kekuatan tensil dari MWCNT sekitar 10 kali lebih kuat daripada aluminium), dan sifat elektronik yang bagus [16].

Nanotube karbon berupa lembaran grafit yang digulung membentuk tabung. Berdasarkan jumlah lapisan grafitnya, CNT terbagi menjadi dua jenis, yaitu:

- Single-Walled Nanotubes* (SWNT) : mempunyai satu lapisan grafit
- Multi-walled nanotubes* (MWNT) : mempunyai multi-lapisan grafit



Gambar 2.2 Jenis nanotube karbon: (a) SWNT, (b) MWNT [14]

Sifat mekanik dan elektrik yang unik membuat CNT menjadi material menjanjikan untuk peralatan elektrik berskala nano. Kontrol densitas dan kemampuan manipulasi yang dimiliki CNT juga menjadi isu penting pada banyak aplikasi potensial seperti pada antenna optic, biosensor, bioprobe, peralatan luar angkasa NASA [16], dan banyak aplikasi lainnya.

2.3 Mekanisme Pertumbuhan Karbon Nanotube

Beberapa model pertumbuhan telah dikemukakan untuk CNT yang dihasilkan dari pirolisis hidrokarbon pada permukaan logam. Safronov dan Kovaleski menyatakan bahwa mekanisme pertumbuhan karbon diawali dengan pembentukan lapisan karbon yang membungkus partikel katalis yang meleleh, lalu diikuti dengan pecahnya lapisan karbon tersebut akibat tekanan uap logam

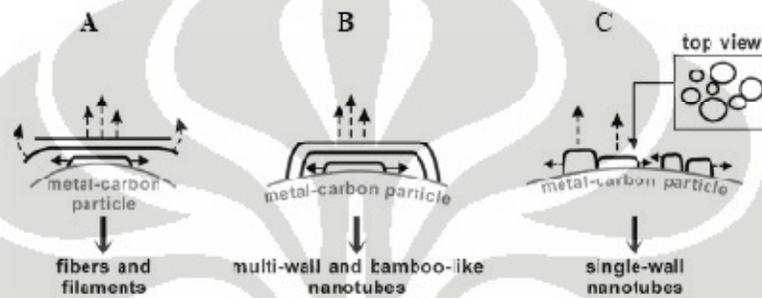
katalis dan impuls mekanik yang diterima katalis. Selanjutnya jika kecepatan partikel logam lebih cepat dari pembentukan lapisan karbon maka nanokarbon yang diperoleh berbentuk *nanochains* atau *torn shells*, namun jika hal yang sebaliknya terjadi maka nanokarbon yang diperoleh adalah *bamboo-shaped carbon*. Karbon nanotube baru diperoleh bila laju pembentukan lapisan karbon dan laju pergerakan logam sama (Chen, 2001). Chen menyatakan bahwa laju pembentukan karbon dan laju pergerakan katalis dipengaruhi baik oleh keadaan katalis pada saat reaksi terjadi maupun komposisi umpan. Karbon *bamboo-shaped* baru terbentuk bila partikel logam berada dalam keadaan *quasi-liquid*, yaitu keadaan dimana logam setengah meleleh. Keadaan *quasi-liquid* itu memungkinkan logam untuk bergerak sepanjang struktur grafit, namun karena hanya sedikit meleleh, laju pergerakan logamnya tidak lebih cepat daripada laju pembentukan lapisan karbon.

Penelitian Kuznetov menyatakan bahwa faktor yang menentukan jenis karbon yang dihasilkan suatu proses dekomposisi metana adalah proses nukleasi karbon pada logam (Kuznetov, 2001). Proses nukleasi ini merupakan proses presipitasi beberapa karbon pada permukaan partikel logam yang jenuh karbon (*carbon-saturated metal particles*). Karbon-karbon tersebut selanjutnya bergabung membentuk ikatan heksagonal yang kemudian bertransformasi menjadi lembaran grafit.

Apabila permukaan partikel logam kurang jenuh karbon, nukleus yang dihasilkan berukuran relatif besar dan tumbuh secara berkesinambungan menghasilkan pembentukan lembaran grafit yang menutupi sebagian besar permukaan partikel logam. Karena permukaan logam kurang jenuh karbon, nukleus berikutnya tumbuh di bawah nukleus yang pertama tanpa berikatan dengan partikel logam di permukaan. Hal ini berlangsung terus-menerus sehingga didapatkan tumpukan lembaran grafit menuju sudut tertentu atau sejajar arah aksial dan fiber (Gambar 2.4 (a)). Bentuk nanokarbon yang dihasilkan ini dinamakan nanofilamen.

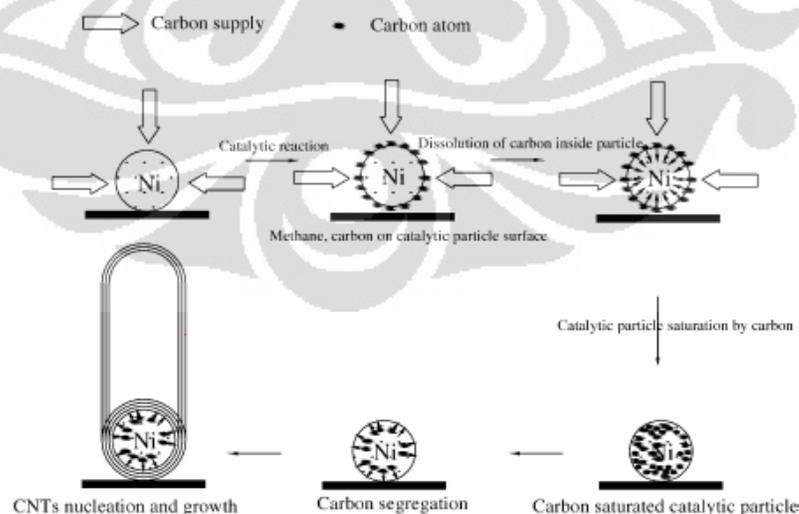
Proses pembentukan *Multi-Walled Nanotube* (MWNT) hampir sama dengan pembentukan nanofilamen. Hanya saja MWNT terbentuk pada permukaan partikel logam yang lebih jenuh karbon. Selain itu, ujung dari nukelus berikutnya

akan selalu berikatan dengan permukaan partikel logam. Pada mekanisme pertumbuhan MWNT, sebelum terbentuk nukleus yang baru, terjadi difusi atom karbon membentuk nanotube, begitu seterusnya sehingga didapat dinding nanotube berlapis-lapis (Gambar 2.4 (b)). Berbeda dengan proses pertumbuhan nanofilamen dan MWNT, pada pertumbuhan SWNT, beberapa nukleus mengendap pada permukaan partikel logam yang sama. Hal ini dapat terjadi jika karbon permukaan partikel logam sangat jenuh karbon (Gambar 2.4 (c)).



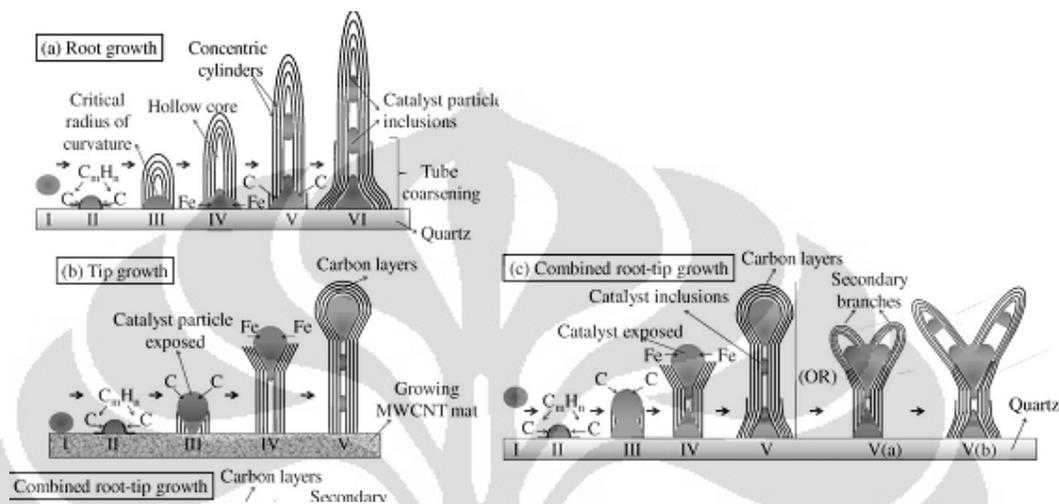
Gambar 2.3 Mekanisme pembentukan nukleus pada pertumbuhan (a) karbon nanofilamen; (b) MWNT; dan (c) SWNT [42]

Gambar 2.4 menunjukkan mekanisme pertumbuhan karbon nanotube. Setelah terjadi reaksi katalitik, terjadi penjenuhan karbon pada partikel nikel yang digunakan sebagai katalis. Pada suatu saat, partikel nikel akan jenuh dengan karbon dan pemisahan karbon terjadi. Dengan pemisahan karbon yang terjadi secara berkesinambungan, terjadi pertumbuhan karbon nanotubes.



Gambar 2.4 Skema pertumbuhan CNT [41]

Illayathambi [27] mengajukan mekanisme pertumbuhan MWCNT untuk proses CVD dengan umpan kontinu dan katalis Fe seperti terlihat pada Gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.5 Skema pertumbuhan MWCNT (a) Tipe pertumbuhan akar, (b) Tipe pertumbuhan ujung (c) Tipe kombinasi. [27]

Dari gambar terlihat bahwa untuk semua tipe mekanisme, baik tipe pertumbuhan ujung, pertumbuhan akar, maupun kombinasi keduanya, selalu diawali oleh difusi karbon ke katalis.

2.4 Katalis Pada Reaksi Dekomposisi Metana

Reaksi dekomposisi katalitik metana merupakan reaksi yang sangat endotermis, sehingga diperlukan temperatur yang sangat tinggi agar tercapai konversi maksimum. Temperatur yang sangat tinggi ini tidak disukai dalam aplikasi industri karena mengakibatkan tambahan biaya untuk kebutuhan energi dan biaya perawatan. Penambahan katalis dalam reaksi dekomposisi metana memungkinkan tercapainya konversi yang maksimum pada temperatur yang lebih rendah. Selain meningkatkan kuantitas yield yang dihasilkan, katalis juga berperan dalam hal kualitas nanokarbon.

2.4.1 Katalis Ni-Cu- Al_2O_3

Produksi nanotube karbon dengan kuantitas dan kualitas yang tinggi hanya dapat diperoleh dari penggunaan desain katalis pada kondisi operasi optimum.

Demi alasan tersebut, maka penting untuk mengembangkan katalis yang efisien dari segi aktivitas, stabilitas, dan selektivitas katalis yang tinggi, serta kebutuhan energi aktivasi yang lebih rendah.

Inti aktif suatu katalis merupakan unsur utama penentu aktivitas katalis dalam reaksi. Pada reaksi dekomposisi metana yang paling banyak dipakai adalah logam Ni, Co, dan Fe. Diantara ketiga logam tersebut, Ni memiliki beberapa kelebihan, yaitu: aktivitas, kapasitas ukuran pori, dan yield karbon yang relatif tinggi, toksisitas yang relative rendah, dan harga yang relative murah. Selain itu, titik leleh terendah dibanding logam Co dan Fe sehingga pembentukan *nanotube* karbon dapat dilakukan pada temperatur yang lebih rendah [4]. Selain inti aktif, katalis juga terdiri dari penyangga (*support*) agar kualitas nanokarbon lebih baik karena partikel sangat terdispersi [17]. Biasanya penyangga alumina menghasilkan produk CNT sementara silika cenderung menghasilkan CNF [18].

Permasalahan yang masih timbul dalam dekomposisi katalitik metana, salah satunya adalah umur katalis yang pendek (cepat terdeaktivasi). Salah satu alternatif adalah dengan penambahan promotor. Penambahan promotor dalam jumlah yang relatif sedikit meningkatkan aktivitas, selektivitas, ataupun stabilitas [19]. Penambahan promotor yang tepat pada sistem katalis akan meningkatkan kapasitas karbon, mempengaruhi tipe dan morfologi nanotube karbon yang terbentuk, juga meningkatkan *lifetime* katalis. Promotor dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu *structural promoter* dan *textural promoter*.

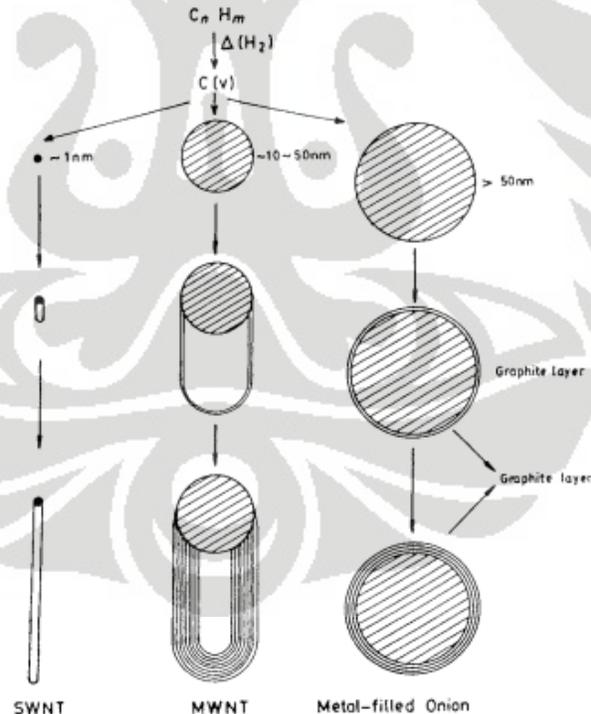
Structural promoter mempengaruhi sifat kimia dari katalis. Hal ini terjadi karena mengubah komposisi kimia dari katalis tersebut. Pada reaksi dekomposisi katalitik metana, *structural promoter* yang digunakan adalah logam transisi seperti Cu dan Mo. Logam Cu lebih banyak digunakan dalam penelitian reaksi dekomposisi katalitik metana [17,20]. Hal ini disebabkan sifat logam Cu yang memiliki afinitas yang tinggi terhadap struktur grafit yang dapat menghambat terbentuknya lapisan grafit pada permukaan inti aktif [17] sehingga deaktivasi katalis yang disebabkan pembungkusan katalis akibat akumulasi karbon yang terlalu cepat dapat dihindari.

Textural promoter lebih bersifat sebagai penstabil, yang merupakan bahan *inert* yang mencegah terjadinya *sintering* pada partikel katalis yang berbentuk

mikrokristal. Agar efektif ukuran *textural promoter* harus lebih kecil daripada inti aktif [18,21]. Selain itu juga harus terdispersi dengan baik, dan tidak bereaksi atau membentuk larutan padat dengan inti aktif katalis, serta memiliki titik lebur yang tinggi karena jumlahnya yang sedikit [21]. Keseluruhan sifat tersebut terdapat pada senyawa oksida logam Hard-to-Reduced Oxide (HRO), termasuk alumina (Al_2O_3).

Berdasarkan hasil penelitian Astika [23] disimpulkan bahwa penggunaan katalis Ni-Cu- Al_2O_3 menghasilkan produk nanokarbon dengan kualitas baik. Penelitian lainnya menunjukkan bahwa komposisi terbaik untuk katalis Ni-Cu- Al_2O_3 adalah 2:1:1 baik dari jumlah karbon yang didapat maupun dari kualitas karbon yang dihasilkan [24].

Diameter logam yang dilapisi pada penyangga mempengaruhi pertumbuhan nanotube karbon. Diameter nanotube karbon yang disintesis pada dasarnya sama dengan diameter partikel logam yang didoping pada penyangga katalis seperti terlihat pada Gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6 Skema yang menunjukkan kebergantungan struktur nanokarbon yang dihasilkan dari pirolisis hidrokarbon terhadap ukuran nanopartikel logam [40]

2.4.2 Katalis Terstruktur

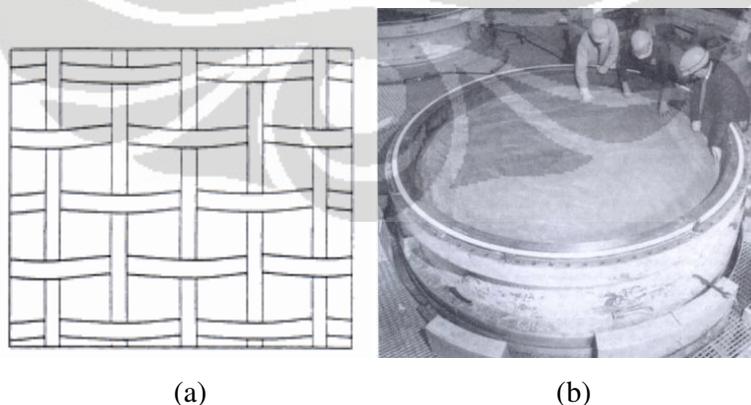
Katalis terstruktur adalah katalis yang dibentuk dengan struktur tertentu sebagai alternatif pengganti katalis bentuk konvensional yang masih mempunyai kekurangan dalam aplikasinya [28]. Susunan, bentuk, dan ukuran katalis terstruktur menentukan dinamika aliran dan *pressure drop*. Secara umum kriteria yang harus dipenuhi dalam merancang struktur katalis sebagai berikut [29]:

1. luas permukaan yang besar agar kontak interfacial menjadi tinggi
2. struktur yang “terbuka” agar hambatan terhadap aliran fluida menjadi kecil
3. memungkinkan aliran gas yang seragam pada *cross-section* kolom

Penggunaan katalis terstruktur mempunyai keunggulan dibanding dengan katalis bentuk konvensional seperti bubuk, antara lain:

1. *pressure drop* yang rendah
2. luas permukaan spesifik yang tinggi
3. distribusi katalis yang teratur

Logam atau campuran logam dengan bentuk struktur tertentu telah lama digunakan sebagai katalis. Ada pula logam atau campuran logam yang dilapisi katalis dan dibentuk sesuai kegunaannya. Contoh logam terstruktur yang telah lama digunakan adalah katalis logam-*gauze* (anyaman kawat). Katalis *gauze* biasa digunakan untuk oksidasi ammonia dengan udara menjadi nitrat oksida untuk produksi asam nitrat, yang merupakan salah satu proses oksidasi paling selektif yang dioperasikan pada skala industri. Jenis *gauze* yang digunakan tersebut terbuat dari platinum/rhodium (biasanya 10% rhodium).



Gambar 2.7 (a) katalis *gauze*, (b) aplikasi katalis *gauze* pada industry [28]

Ada beberapa jenis katalis terstruktur yang umum digunakan :

1. Katalis Monolitik

Katalis mempunyai struktur dengan kesatuan yang seragam, dengan saluran-saluran sempit yang teratur baik paralel maupun zig-zag. Katalis ini memungkinkan untuk mengontrol selektivitas dari reaksi yang kompleks, mempunyai hambatan difusi internal yang kecil, *pressure drop* yang lebih kecil 2-3 kali dari reaktor *fixed bed*, serta mudah di *scale-up*. Unsur yang aktif secara katalitik terdispersi diseluruh struktur monolitik. Katalis ini sering diaplikasikan pada proses perlakuan gas seperti katalitik konverter pada kendaraan bermotor.

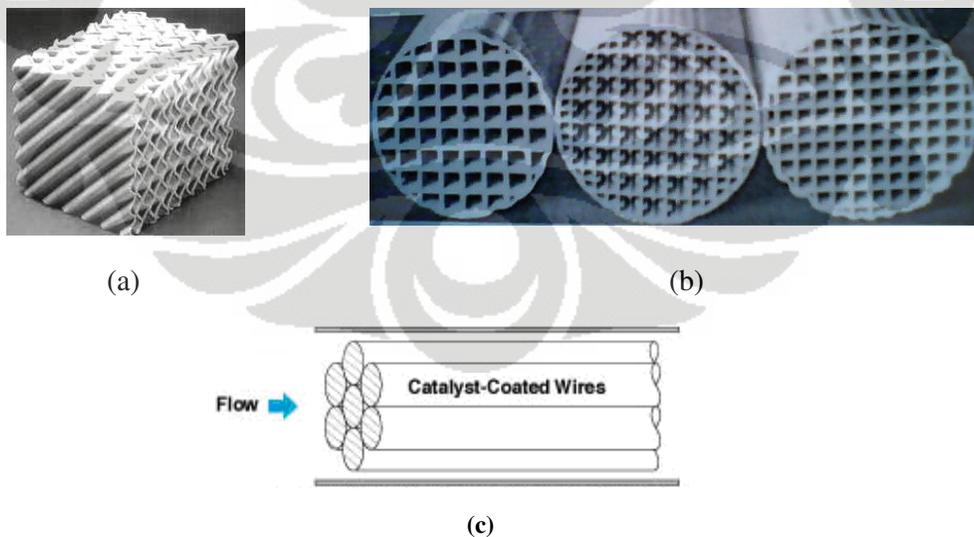
2. Katalis Membran

Pada katalis jenis ini terjadi perpindahan massa melewati dinding yang permeabel (difusi) yang memiliki pori-pori yang kecil. Membran dapat menjadi rintangan bagi komponen yang tidak diinginkan, seperti partikulat agar tidak kontak dengan katalis. Reaktor membrane merupakan teknologi untuk mendorong reaksi reversible ke kanan untuk mendapat konversi yang sangat tinggi.

3. Arranged Catalyst

Katalis terstruktur yang memberikan perpindahan massa yang relatif cepat melalui zona reaksi yang tegak lurus terhadap aliran dan biasanya untuk reaksi katalitik dua fasa.

Gambar dari contoh katalis terstruktur dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.8. Katalis terstruktur: (a) Bentuk katalis terstruktur katalis dengan paten KATAPAK; (b) reaktor berisikan kawat yang dilapisi katalis dengan posisi lurus [30]; (c) katalis monolitik [31]

2.5 Deaktivasi Katalis

Deaktivasi katalis berarti hilangnya aktivitas katalis dan/atau selektivitas terhadap waktu selama reaksi berlangsung. Hal ini menjadi permasalahan utama dalam penggunaan katalis heterogen pada proses dekomposisi hidrokarbon, termasuk metana. Secara umum terdapat tiga kategori penyebab terjadinya deaktivasi katalis, yaitu [17]:

a. Deaktivasi karena *sintering* (*Aging*)

Deaktivasi katalis yang terjadi karena katalis kehilangan luas permukaan aktif sebagai hasil dari penggunaan temperatur reaksi yang tinggi (biasanya di atas 500⁰C). Luas permukaan ini bisa hilang baik oleh agglomerasi kristal katalis, maupun menyempit atau tertutupnya pori-pori di dalam pellet katalis. Eksperimen membuktikan bahwa sintering sangat bergantung pada suhu. Laju sintering meningkat secara eksponensial seiring naiknya temperatur. Temperatur Huttig atau Raman mengindikasikan temperatur dimulainya sintering. Korelasi semi-empirik di bawah ini biasa digunakan untuk mengetahui temperatur Huttig atau Raman.

$$T_{\text{Huttig}} = 0.3 T_{\text{melting}} \quad \dots(2.2)$$

$$T_{\text{Tammann}} = 0.5 T_{\text{melting}} \quad \dots(2.3)$$

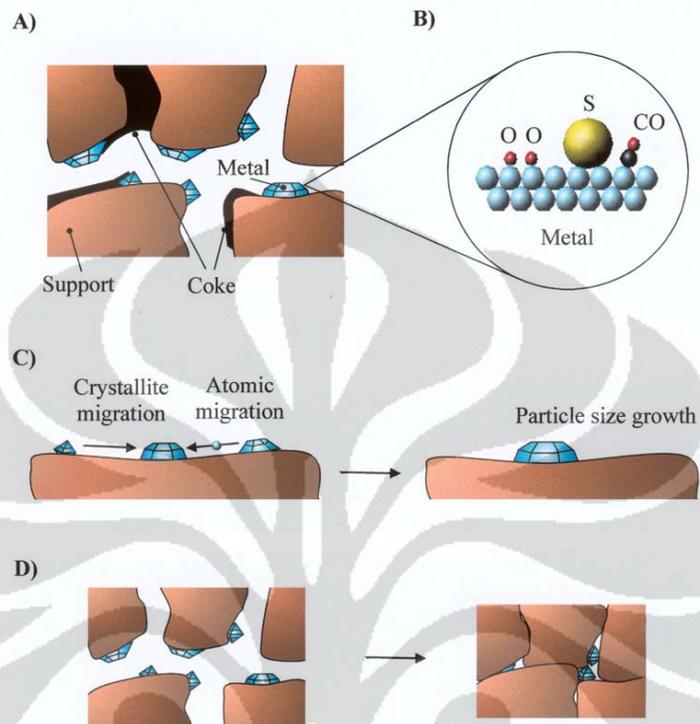
b. Deaktivasi karena *coking* atau *fouling*

Terjadi karena terdapatnya *coke* atau material yang menutupi permukaan pori-pori katalis. *Coking* dapat diatasi dengan menaikkan tekanan. *Coking* akan mempengaruhi kecepatan deaktivasi yang disebabkan adanya proses difusi karbon ke dalam pori-pori katalis Ni dengan ditandai terbentuknya deposit karbon [16].

c. Deaktivasi karena *poisoning*

Terjadi karena terdapatnya senyawa yang bersifat racun katalis. Senyawa ini ditemukan karena terbawa pada saat *fresh feed*, atau karena terbentuk pada saat reaksi, misalnya kandungan sulfur dalam metana.

Gambar 2.9 di bawah ini menggambarkan proses terjadinya deaktivasi katalis secara umum.



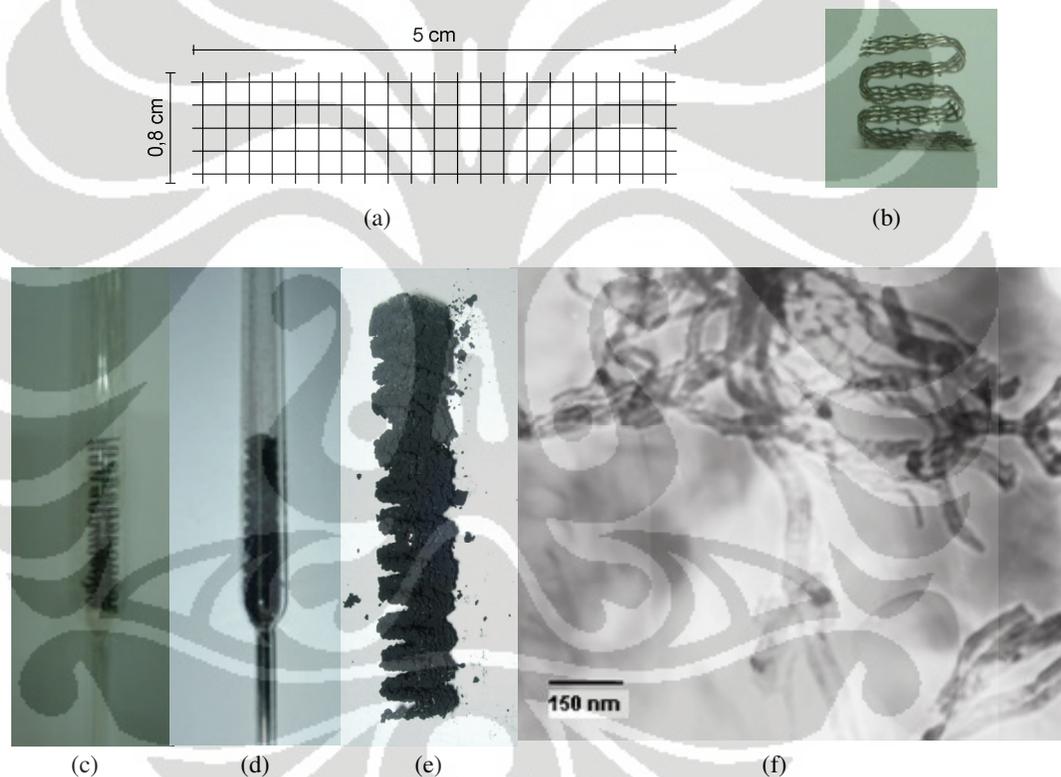
Gambar 2.9 Mekanisme deaktivasi: A) pembentukan *coke*, B) *Poisoning*, C) Sintering pada partikel logam aktif, and D) Sintering dan transisi fasa solid-solid pada lapisan serta penutupan partikel logam aktif . [43]

2.5 Reaktor Gauze Untuk Reaksi Dekomposisi Metana

Beberapa penelitian yang pernah dilakukan dalam merancang reaktor untuk produksi skala besar diantaranya menggunakan jenis reaktor *fixed bed*, *spouted bed* dan *fluidized bed*. Penggunaan reaktor jenis *fixed bed* (unggun diam) mengalami masalah penyumbatan akibat deposit karbon pada katalis yang menyebabkan kenaikan *pressure drop* [5]. Penggunaan *spouted bed reaktor* membuat pencampuran katalis tidak homogen sehingga konversi metana yang dihasilkan sangat kecil, 7% [3]. Reaktor jenis *fluidized bed* memberikan konversi metana yang rendah pula, yaitu < 40%. Hal ini terjadi karena waktu tinggal reaktan yang singkat sehingga tidak mendapatkan hidrogen murni, disamping itu itu sulit mengotrol laju alir umpan dikarenakan perubahan ukuran partikel katalis

selama reaksi dan terjadi aglomerasi dan *sticking* dari partikel-partikel nano karbon [3, 6, 7,8].

Riset mengenai penggunaan reaktor gauze untuk dekomposisi katalitik metana dilakukan pertama kali oleh Muharam dan Purwanto, 2007, untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan di atas, khususnya permasalahan *pressure drop*. Riset pertama kali dilakukan dalam skala kecil dengan menggunakan reaktor mikro seperti terlihat pada Gambar 2.10. Katalis yang dipakai adalah katalis heterogen Ni-Cu-Al yang mana logam Ni sebagai inti aktif, logam Cu yang baik sebagai *structural promoter*, dan logam Al sebagai *textural promoter*.



Gambar 2.10 Gauze, reaktor katalis terstruktur dan nanotube karbon: (a) Substrat anyaman kawat (gauze) baja sebelum, (b) setelah dibentuk (c) Reaktor katalis terstruktur sebelum reaksi, (d) dan (e) setelah reaksi, (f) hasil *nanotube* karbon. [9]

Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis Ni-Cu-Al mampu bertahan sampai 1400 menit (24 jam) dengan penurunan laju alir yang relatif kecil sekitar 10% sehingga dapat disimpulkan reaktor katalis terstruktur dapat mengatasi permasalahan penyumbatan (*pressure drop*) pada reaktor unggun diam dan

ketinggian *wire mesh (gauze)* dan laju alir umpan dapat diatur dengan mudah tanpa mempengaruhi hidrodinamika sehingga dapat menambah waktu tinggal reaktan yang pada akhirnya meningkatkan konversi. Disamping itu kualitas nanotube yang dihasilkan cukup baik dengan diameter 30-50 nm dan ketebalan dinding 10-20 nm dan kemurnian hidrogen mencapai 99%. Dikarenakan *voidage* yang besar kelemahan reaktor jenis ini *loading* katalis per satuan volume kecil.

Karena prospek penggunaan reaktor gauze untuk reaksi dekomposisi katalitik metana cukup memuaskan, maka penelitian dilanjutkan oleh Ira (2008) dengan basis skala produksi yang lebih besar, yaitu 150 gr/hari. Untuk membuat *loading* katalis yang lebih besar, maka pada penelitian lanjutan ini, gauze dibuat lebih rapat, seperti terlihat pada gambar di bawah:



Gambar 2.11 Hasil rancangan reaktor katalis terstruktur bentuk *gauze*. [32]

Temperatur reaksi diuji untuk dua keadaan, yaitu 650°C dan 700°C. Penggunaan katalis terstruktur pada dua temperatur berbeda ini dapat menghasilkan konversi metana hingga 87.55 % dan 94.87%. Produk dari reaksi dekomposisi katalitik metana berupa hidrogen memiliki kemurnian hingga 87.53% dan 95.14%. Karbon yang dihasilkan memiliki yield 28.45 dan 32.85 gr karbon/gr katalis untuk waktu reaksi 8.4 jam. Untuk reaksi selama 33 jam menghasilkan 201 gr karbon/gr katalis. Karakterisasi dengan menggunakan TEM menunjukkan karbon yang dihasilkan berbentuk nanotube dengan diameter 50-100. Lifetime katalis dapat mencapai 33 jam dan masih dapat berlanjut.

Tabel 2.1 Rangkuman hasil penggunaan reaktor di atas sebagai berikut:

Peneliti	Tahun	Jenis Reaktor	Konversi	Pressure drop	Lifetime katalis	Penyumbatan
Muradov	2000	Spouted bed	7%	Rendah	-	Tidak
	2001	Fluidized bed	20%	Rendah	-	Tidak

Peneliti	Tahun	Jenis Reaktor	Konversi	Pressure drop	Lifetime katalis	Penyumbatan
Qian, dkk	2003	2-stage fluidized bed	20-40%	Rendah	~ 17 jam	Tidak
Siang-Pao, dkk	2006	Fixed bed	47%	Tinggi	~ 1 jam	Ya
Muharam dan Purwanto	2007	Mikroreaktor katalis Gauze	59,57%	Rendah	~ 24 jam	Tidak
Ira Yulianti	2008	Reaktor Gauze skala bench	~ 94,87%	rendah	~ 33 jam	Tidak

2.6 Pengaruh Kondisi Operasi terhadap Kinerja Reaktor

Selain pemilihan katalis yang dipakai, kondisi operasi pun berpengaruh terhadap kinerja reaktor. Aspek termodinamika dan kinetika lah yang berperan dalam hal ini. Aspek termodinamika dapat menjawab apakah suatu reaksi dapat terjadi secara spontan atau tidak, serta menjawab seberapa banyak reaktan dan produk saat kesetimbangan tercapai. Pada kinetika reaksi, ditinjau mekanisme reaksi yang menunjukkan laju dimana reaktan pada sistem reaktor bereaksi pada kondisi yang dipengaruhi oleh temperatur, tekanan, komposisi, pencampuran, aliran, energi, dan transfer massa. Jadi pada aspek kinetika, akan dijawab seberapa cepat laju dan bagaimana mekanisme reaksi tersebut. Kondisi operasi yang optimum akan memberikan hasil kinerja yang optimum pula. Adapun beberapa parameter kondisi operasi tersebut adalah:

- Temperatur Operasi

Reaksi dekomposisi katalitik metana terjadi pada temperatur yang tinggi. Temperatur terbukti mempengaruhi hasil reaksi baik kualitas maupun kuantitas nanokarbonnya. Laju reaksi kimia, termasuk reaksi dekomposisi metana, akan bertambah seiring naiknya temperatur sampai kondisi

kesetimbangan tercapai. Konstanta kesetimbangan (K) sendiri akan meningkat seiring naiknya temperatur (T) untuk reaksi endotermik (ΔH° positif):

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \dots(2.4)$$

Pada kondisi kesetimbangan, dicapai konversi kesetimbangan, yaitu konversi ideal yang dapat dicapai suatu reaksi pada saat temperatur dan tekanan tertentu.

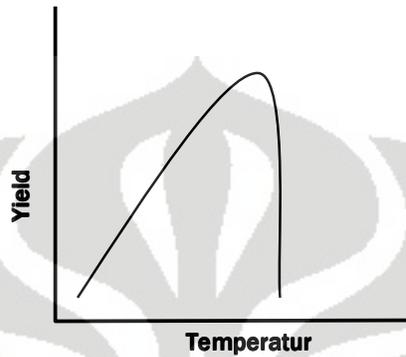
Adapun pengaruh temperatur (T) dan energi aktivasi (E_a) terhadap konstanta laju reaksi (k) dikorelasikan dalam persamaan Arrhenius.

$$E_a = -RT \ln\left(\frac{k}{A}\right) \quad \dots(2.5)$$

dimana A merupakan faktor pre-eksponensial. Persamaan di atas menunjukkan bahwa laju bisa meningkat tajam secara eksponensial terhadap kenaikan temperatur, bergantung seberapa besar energi aktivasi. Persamaan tersebut berlaku untuk reaksi elementer, dan berlaku untuk reaksi secara umum pada kisaran temperatur tertentu jika tidak ada batasan transfer massa.

Kesetimbangan akan bergeser ke arah reaksi yang menyerap kalor (endoterm). Jadi, semakin tinggi temperatur maka metana akan semakin cepat terdekomposisi. Namun, pada temperatur yang tinggi membuat katalis lebih mudah mengalami *sintering* dan semakin banyak karbon yang terbentuk maka deaktivasi katalis juga semakin cepat terjadi. Hal ini karena temperatur sangat berpengaruh pada aktivitas katalis atau waktu hidup katalis. Pada temperatur tinggi, dipercaya bahwa katalis akan berada dalam keadaan *quasi-liquid* dimana partikel katalis dengan mudah terpotong menjadi partikel kecil dan partikel kecil tersebut dengan mudah tertutupi oleh lapisan karbon yang terbentuk selama dekomposisi metana, sehingga berkontribusi pada deaktivasi katalis yang lebih cepat terjadi. Di sisi lain, pada temperatur rendah, katalis cenderung tetap dalam keadaan solid daripada keadaan *quasi liquid* [17] dan hal itu menjaga aktivitas proses katalisis. Namun, temperatur rendah tidak cocok untuk proses dekomposisi metana karena waktu reaksi yang lama akibat pengurangan konversi metana. Sewajarnya keputusan penggunaan temperatur reaksi yang diinginkan ditentukan berdasarkan optimasi profitabilitas antara

biaya pemakaian kembali metana yang tidak bereaksi yang dihasilkan dari konversi metana yang rendah pada temperatur yang rendah pula dan biaya penggantian katalis karena deaktivasi yang cepat pada kondisi operasi dengan temperatur yang tinggi.



Gambar 2.12. Perbandingan Yield Produk terhadap temperatur reaksi [24]

Gambar 2.12 menunjukkan jumlah yield karbon yang dihasilkan dengan penambahan temperatur. Reaksi dekomposisi akan meningkat terus dengan pertambahan temperatur, dimana sampai mencapai temperatur maksimal tertentu, yield karbon akan berkurang drastis. Hal ini dikarenakan katalis telah mencapai titik kejenuhannya terhadap karbon dan mengalami deaktivasi.

Pertimbangan lain pada pemilihan temperatur reaksi adalah untuk memproduksi morfologi nanokarbon yang diinginkan. Hasil uji produk membuktikan bahwa karbon jenis *nanotube*, yang menjadi tujuan dari penelitian ini, hanya akan terbentuk pada temperatur lebih tinggi daripada temperatur terbentuknya karbon *nanofiber* pada umumnya. Selain itu, karbon yang terbentuk pada temperatur yang lebih tinggi akan mempunyai bentuk yang lebih teratur dengan ketebalan yang seragam [20]. Pertambahan temperatur juga akan menyebabkan diameter dan ketebalan dinding dari *nanotube* yang telah terbentuk semakin mengecil [12], sedangkan yang diharapkan adalah *nanotube* karbon dengan dinding yang tebal. Semua hal ini membuat tidak ada temperatur tertentu yang mutlak untuk reaksi ini. Temperatur optimal untuk reaksi dekomposisi metana agar terbentuk produk karbon *nanotube* yang diharapkan berada pada temperatur antara 650-750°C.

- Tekanan Operasi

Tekanan operasi untuk reaksi ini adalah tekanan rendah atau tekanan atmosferik. Hal ini karena reaksi dekomposisi metana adalah reaksi endotermis dimana penambahan tekanan akan menggeser kesetimbangan reaksi ke arah kiri (menambah reaktan), sesuatu yang tidak diharapkan. Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Sergei [33] menginformasikan bahwa penambahan tekanan parsial dari gas yang tidak bereaksi/inert pada dekomposisi metana, akan menurunkan laju spesifik pembentukan karbon.

Adanya hidrogen pada umpan juga dapat mempengaruhi kualitas nanokarbon yang dihasilkan. Kandungan hydrogen pada umpan memperlama periode induksi untuk pembentukan karbon, dimana pada periode ini berlangsung proses pembentukan *bulk* dan struktur permukaan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Chen dkk tersebut, penambahan hidrogen pada umpan menyebabkan peralihan bentuk nanokarbon dari *filament* menjadi *bamboo-shaped*. Hal ini terjadi karena pada umpan yang mengandung hidrogen sedikit, terjadi pembentukan lapisan karbon dalam jumlah yang banyak pada permukaan partikel katalis, sehingga tidak memungkinkan katalis bergerak. Sedangkan pada umpan yang mengandung lebih banyak hidrogen, lapisan karbon yang menutupi partikel katalis lebih tipis daripada sebelumnya, sehingga memungkinkan pergerakan logam menerobos lapisan tersebut.

- Space Time

Space time adalah waktu yg diperlukan oleh suatu zat berada dalam kolom.

$$\tau = \frac{V}{v} \quad \dots(2.6)$$

Dimana V adalah volume kolom (m^3) dan v adalah laju volumetric (m^3/s).

Jika kolom itu adalah reaktor, maka definisi ini identik dengan *residence time*. Dan jika reaktor tersebut merupakan reaktor katalitik dengan katalis padat, maka *space time* bisa dinyatakan dlm W/F reaktan, dimana F adalah laju alir molar, bukan laju volumetrik. Namun untuk reaktan tunggal fasa gas, hal itu sama saja, karena mol sebanding dengan volum pada fasa gas.

Semakin besar W/F, maka konversi juga akan semakin besar karena waktu kontak antara reaktan dengan katalis semakin lama sehingga kesempatan reaktan untuk saling bertemu dan bereaksi semakin besar. Akan tetapi, suatu saat konversi akan konstan meskipun W/F semakin diperbesar. Kejadian ini dimungkinkan karena reaktan yang tersisa sudah tidak mampu lagi untuk bereaksi lebih lanjut, karena telah mencapai konversi kesetimbangan.

2.7 Teknik Preparasi Katalis dengan Metode Sol-Gel

Teknik preparasi katalis berpengaruh pada sifat partikel katalis yang dihasilkan, seperti luas permukaan kontak dan diameter partikel katalis. Teknik preparasi yang paling sering digunakan pada dekomposisi katalitik metana adalah impregnasi, presipitasi atau ko-presipitasi, dan sol-gel. Pada penelitian ini akan digunakan metode sol-gel agar katalis dapat dilapiskan pada kawat stainless steel.

Proses sol-gel didefinisikan sebagai sintesis jaringan anorganik melalui reaksi kimia dalam larutan dengan temperatur yang rendah. Dalam proses tersebut terjadi perubahan fasa dari suspensi koloidal (sol) membentuk fasa cair kontinyu (gel). Keuntungan memakai metode sol-gel yaitu [24]:

- Stabilitas termal yang tinggi
- Luas permukaan katalis yang tinggi
- Ketahanan terhadap pelarut yang tinggi
- Stabilitas mekanik yang tinggi
- Permukaan dapat dimodifikasi

Pada proses sol-gel digunakan bahan prekursor. Prekursor adalah substrat yang digunakan untuk membuat katalis dengan komposisi awal yang sesuai secara stoikiometrik sehingga komposisi katalis yang dihasilkan didapat dari dekomposisi substrat yang digunakan. Prekursor yang umum digunakan adalah logam garam anorganik atau senyawa logam organik yang dikelilingi oleh ligan yang reaktif seperti logam alkoksida ($M(OR)_y$), dimana R untuk gugus alkil.

2.8 Teknik Pelapisan Dip-Coating

Beberapa teknik pelapisan (*coating*) yang dapat digunakan untuk membentuk lapisan tipis katalis pada substrat, antara lain: pencelupan (*dip*

coating), *spin coating*, dan *spraying*. Pada penelitian ini digunakan teknik pencelupan atau *dip coating*.

Teknik *dip-coating* merupakan teknik pelapisan *sol-gel* yang paling sederhana. Pada prinsipnya, teknik *dip-coating* ini dilakukan dengan mencelupkan substrat yang akan dilapisi ke dalam larutan sol dan diangkat dengan kecepatan tertentu pada temperatur dan kondisi atmosfer yang terkontrol. Metode ini telah luas digunakan terutama untuk mendapatkan lapisan yang seragam dengan ketebalan kurang lebih 100 nm. Ketebalan lapisan yang dihasilkan dari metode *dip-coating* merupakan fungsi dari beberapa variabel, yaitu: viskositas, kecepatan pengangkatan, tegangan permukaan cairan-udara, dan gravitasi. Cara yang paling mudah untuk mendapatkan variasi ketebalan adalah dengan mengatur kecepatan pengangkatan. Korelasi antara variabel tersebut sebagai berikut:

$$h = 0,94 \times \frac{(\eta \times v)^{2/3}}{\gamma^{1/6} (\rho \times g)^{1/2}} \dots(2.7)$$

dimana: h = ketebalan lapisan

η = viskositas

v = kecepatan pengangkatan

γ = tegangan permukaan

ρ = densitas

g = percepatan gravitasi

Prosedur *dip-coating* secara umum dibagi menjadi tiga tahap, yaitu:

- Pencelupan material yang akan dilapisi ke dalam sol
- Pengangkatan material dari larutan sol
- Pengeringan sol, air, dan alkohol berlebih

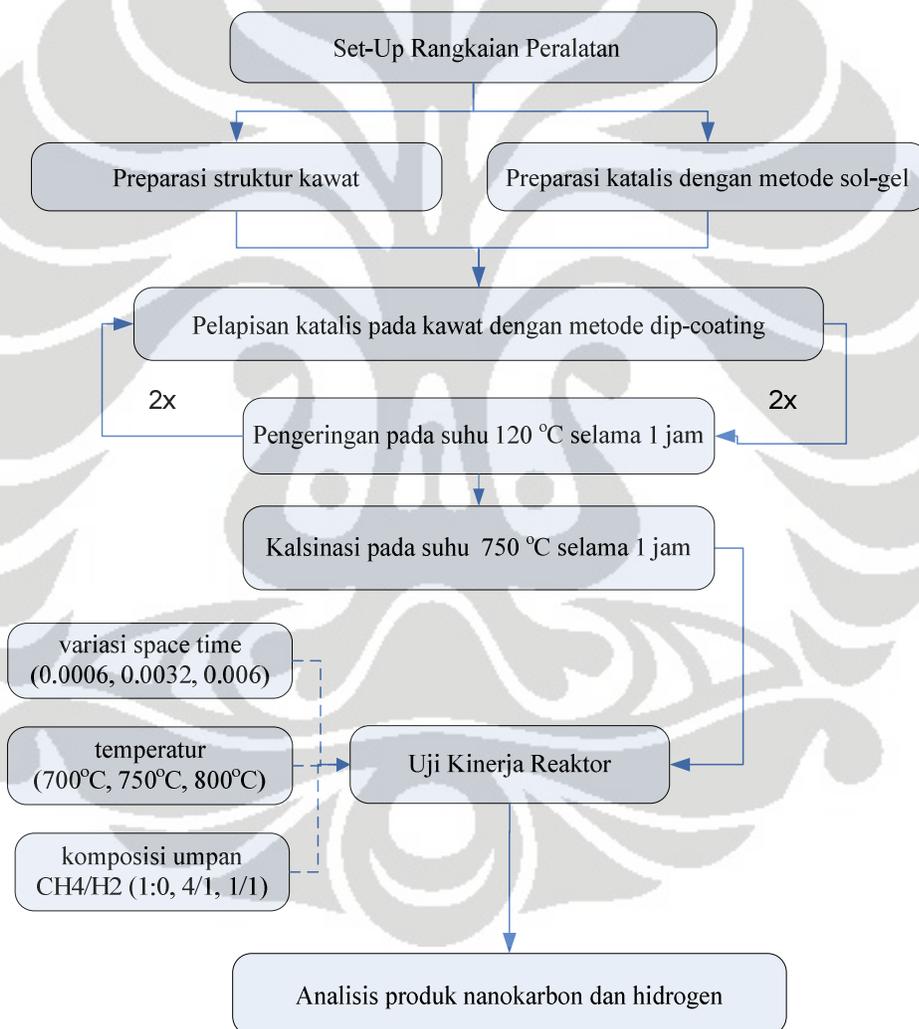
Prosedur tersebut dapat diulang beberapa kali untuk mendapatkan ketebalan yang diinginkan.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian akan dilakukan di laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.

Adapun diagram alir untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan yang digunakan selama penelitian adalah sebagai berikut:

- Beaker glass
- Glass
- Gelas ukur
- Spatula
- Pinset
- Hotplate & Magnetic Stirrer
- Timbangan digital
- Cawan keramik
- Stop watch
- Termokopel
- Tabung kuarsa
- Soap bubbler
- Flowmeter dengan Mass Flow Controller
- Digital atmospheric furnace
- Digital tube furnace
- GC (Gas Chromatograph)

Bahan-Bahan yang digunakan selama penelitian ini adalah sebagai berikut:

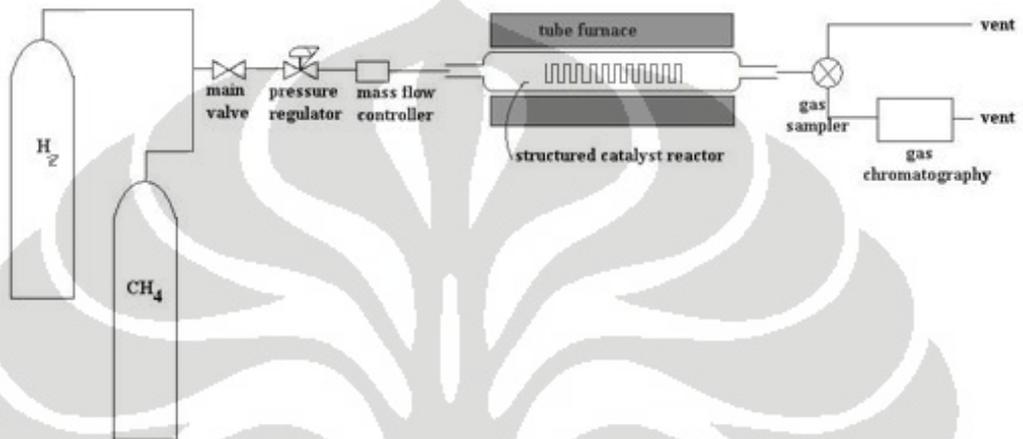
- Nickel nitrate hexahydrate, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Merck
- Aluminium nitrate trihydrate, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, Merck
- Copper nitrate nonahydrate, $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, Merck
- Citric Acid, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$, JT Baker
- Kawat stainless steel (bentuk wire mesh 16')
- Gas Metana
- Gas Nitrogen
- Gas Argon
- Gas Hidrogen
- Aseton
- Deionized (demineralized) water
- Grease Siliko

3.3 Penjelasan Tahap-Tahap Penelitian

Tahap 1: *Set-Up* Rangkaian Peralatan

Merangkai peralatan yang akan dipakai lalu menyambungkannya: tabung gas, *mass flow meter*, *mass flow controller*, reaktor, GC.

Rangkaian peralatan dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3.2 Rangkaian Peralatan

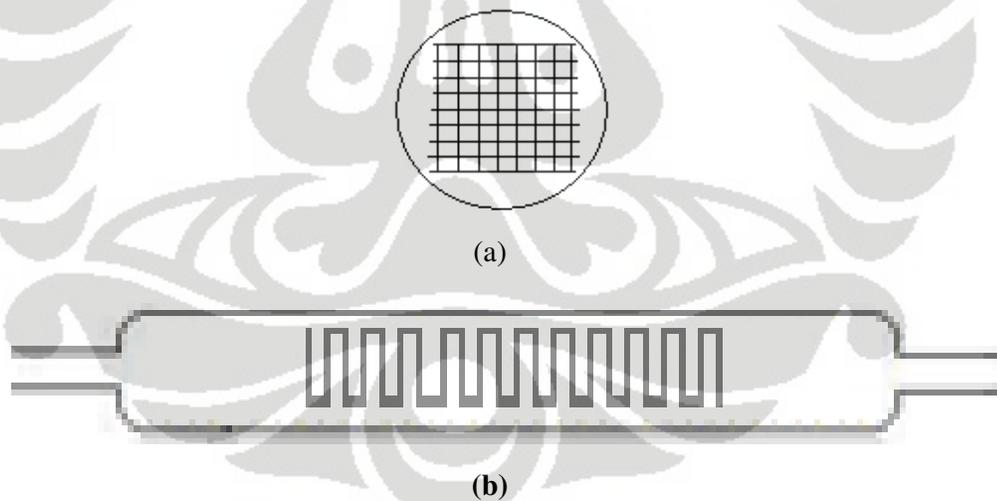
Tahap 2: Pembentukan struktur kawat dan lempeng *stainless steel* sebagai konfigurasi internal reaktor

Beberapa hal yang diperhatikan dalam pembentukan konfigurasi internal reaktor:

- disain memungkinkan *loading* katalis per satuan volume yang besar sehingga luas kontak per satuan volume reaktor menjadi besar pula
- disain tidak menghambat aliran gas sehingga *pressure drop* yang terjadi menjadi kecil
- disain sederhana sehingga memudahkan pada proses coating katalis dan purifikasi produk
- memudahkan untuk dibuat pemodelan

Adapun cara pembentukan struktur kawat sebagai berikut:

- Memotong wiremesh yang akan dipakai dengan lebar yang dapat masuk dalam reaktor, yaitu 2.5 cm dan panjang sesuai kebutuhan.
- Menekuk kawat wiremesh yang sudah dipotong dengan jarak antar kawat vertikal dari arah samping sebesar 0.96 mm dengan struktur seperti pada gambar berikut.



Gambar 3.3 Katalis terstruktur dalam reaktor: (a) *cross section*, (b) tampak samping

Katalis yang digunakan pada eksperimen hanya sekali pakai. Pada eksperimen ini dilakukan tujuh kali uji kinerja sehingga minimal dibuat tujuh buah struktur kawat untuk dilapisi katalis.

Tahap 3: Preparasi Katalis

Katalis yang digunakan dalam penelitian ini adalah katalis Ni/Cu/Al₂O₃ yang dipreparasi dengan metode sol-gel sebagai berikut:

- 1) Seluruh logam nitrat yang terdiri dari 26,173 gram Ni(NO₃)₂.6H₂O, 7,248 gram Cu(NO₃)₂.6H₂O, dan 11,254 gram Al(NO₃)₃.9H₂O dilarutkan ke dalam *deionized water* 50 mL.
- 2) Asam sitrat sebanyak 31,521 gram ditambahkan ke dalam larutan tersebut.
- 3) Larutan diaduk selama 2 jam pada temperatur 80 °C hingga membentuk larutan berbentuk sol yang sangat *viscous*.
- 4) Jika kurang, maka dilakukan pembuatan katalis lagi sesuai urutan cara 1, 2, dan 3.

Tahap 4: Pelapisan Katalis

- 1) Wiremesh dan lempeng (substrat) yang telah dibentuk direndam di dalam aseton untuk menghilangkan pengotornya, lalu dicuci dengan air untuk membilas aseton yang masih menempel di permukaan kawat
- 2) Substrat dikeringkan dan direndam dalam larutan katalis sol-gel selama 30 menit
- 3) Substrat diangkat dengan kecepatan tertentu lalu dikeringkan di dalam oven pada temperature 130⁰C selama 1 jam.
- 4) Substrat direndam dan dikeringkan kembali agar loading katalis yang melekat pada kawat lebih besar
- 5) Substrat dikalsinasi pada temperatur 700⁰C selama 1 jam

Tahap 5: Uji Kinerja Reaktor

Sebelum dilakukan uji aktivitas katalis, dilakukan kalibrasi kromatografi gas dan kalibrasi *flowmeter*. Kalibrasi kromatografi gas dilakukan untuk menentukan retention time dari gas umpan dan gas produk dan juga kuantitas gas yang dihasilkan. Kalibrasi kromatografi gas ini dilakukan dengan menginjeksikan gas secara langsung ke GC dengan menggunakan *syringe*, dan dengan melewati gas melalui reaktor kosong lalu ke GC.

Sedangkan kalibrasi *flowmeter* dilakukan untuk mengetahui laju alir yang sebenarnya dari angka yang tertera di *flowmeter*. Kalibrasi ini dilakukan dengan mengalirkan gas umpan, yaitu metana ke *bubble soap* sesuai dengan laju alir yang tertera pada *flowmeter*. Lamanya waktu yang dibutuhkan oleh gelembung udara melewati jarak tertentu dapat dikonversikan menjadi besaran laju alir.

Variabel yang divariasikan dalam uji produksi adalah *space time*, temperature, dan rasio gas umpan (komposisi reaktan) dengan tahapan sebagai berikut:

- 1) Menimbang berat wiremesh yang telah dilapisi katalis
- 2) Masukkan katalis terstruktur ke dalam reaktor
- 3) Alirkan umpan metana pada suhu atmosferik dengan *space time* 0.0006, 0.0032, dan 0.006 gr min/mL.
- 4) Set temperature reaksi 700⁰C
- 5) Mengambil data laju alir produk, komposisi gas produk setiap periode tertentu sampai reaksi harus dihentikan
- 6) Menimbang berat wiremesh setelah produksi dan reaksi dihentikan, menghitung berat nanotube karbon yang telah terbentuk dan menempel pada katalis terstruktur
- 7) Mengolah data untuk menghitung parameter kinerja produksi.
- 8) Mengulang langkah 1-7 dengan perubahan pada langkah 3, yaitu variasi temperatur menjadi 700⁰C, 750⁰C, dan 800⁰C dan dengan *space time* yang paling optimal dari hasil pengolahan data variasi *space time*
- 9) Mengulang langkah 1-7 dengan perubahan pada langkah 3, yaitu variasi rasio gas umpan CH₄: H₂ sebesar 1:0, 4:1, dan 1:1 dan dengan *space time* yang paling optimal dari hasil pengolahan data variasi *space time* serta menggunakan temperature operasi yang optimal dari hasil uji kinerja untuk variasi temperatur.

Kinerja produksi yang diamati meliputi kemampuan konversi metana, yield nanotube karbon, kemudian kemurnian hidrogen.

Kinerja reaktor diketahui dari banyaknya produk hidrogen dan karbon yang dihasilkan. Hasil keluaran berupa gas akan dialirkan secara online ke GC

(Gas Chromatography) untuk mengetahui komposisinya dengan data *peak area* yang diberikan. Dengan mengetahui komposisinya, maka dapat dihitung besarnya konversi dan kemurnian hidrogen yang merupakan beberapa parameter kinerja reaktor.

Konversi metana didefinisikan sebagai persentase metana yang bereaksi terhadap metana yang dimasukkan ke reaktor.

$$X_{CH_4} = \frac{[(CH_4 in) - (CH_4 out)]}{(CH_4 in)} \times 100\% \quad (3.1)$$

Sementara itu definisi yield karbon didefinisikan sebagai massa karbon yang dihasilkan dibandingkan dengan massa katalis.

$$Yield C_4 = \frac{\text{massa karbon yang dihasilkan}}{\text{masa katalis}} \times 100\% \quad (3.3)$$

dan kemurnian hidrogen dalam penelitian ini didefinisikan jumlah hidrogen yang dihasilkan dibandingkan jumlah total produk gas dan sisa metana yang tidak bereaksi (dalam satu mol).

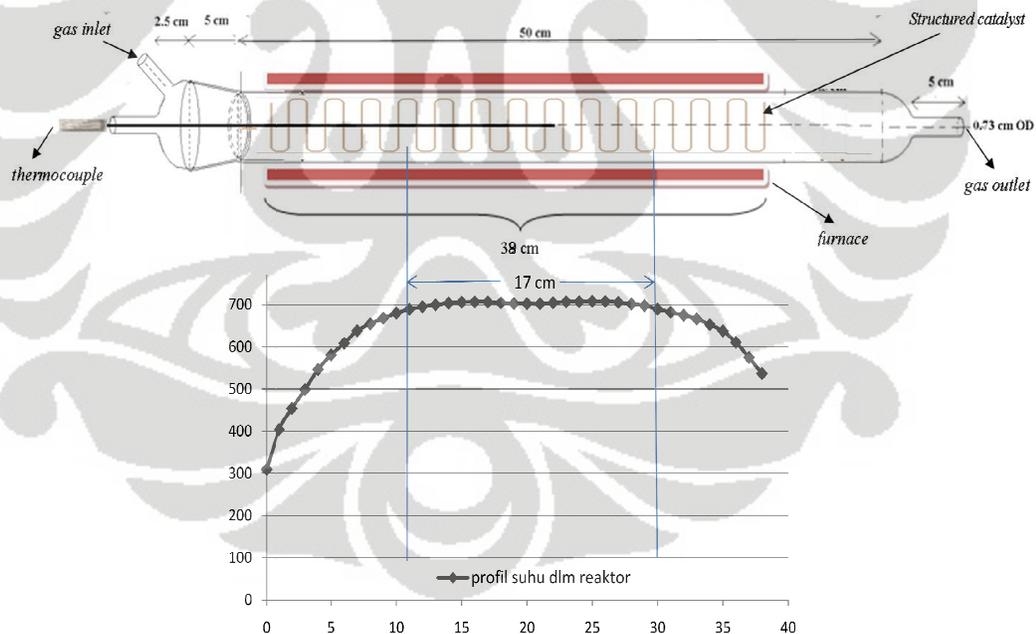
$$Kemurnian H_2 = \frac{[H_2] \text{ produk}}{\text{total produk gas dan sisa reaktan}} \times 100\% \quad (3.4)$$

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dipaparkan hasil penelitian yang telah dijalankan sesuai metode penelitian pada bab sebelumnya.

4.1. Uji panjang efektif reaktor

Panjang efektif reaktor perlu diketahui untuk menentukan letak katalis di dalam reaktor dimana distribusi temperatur hampir seragam. Karena reaksi dekomposisi metana merupakan reaksi endotermik yang membutuhkan suplai panas, maka panjang reaktor efektif diketahui dengan mengukur temperatur di sepanjang reaktor yang terpanasi oleh *furnace* saat terjadi reaksi. Katalis ditempatkan di sepanjang reaktor yang berbatasan dengan *furnace* dan pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termokopel yang bisa digerakkan setiap 1 cm sepanjang reaktor.



Gambar 4. 1 Profil temperatur dalam reaktor

Dari uji ini, diketahui bahwa panjang efektif reaktor adalah sebesar 17 cm

ditengah *furnace* sepanjang 38 cm seperti terlihat pada Gambar 4.1. Lebih tepatnya lagi, peletakkan katalis yaitu 12 cm dari ujung kiri *furnace* atau 9 cm dari ujung kanan *furnace*. Adapun kisaran temperatur untuk daerah ini adalah 687-700°C.

Jadi pada percobaan selanjutnya, katalis akan diletakkan sesuai dengan panjang efektif reaktor seperti terlihat pada gambar di atas.

4.1 Pengaruh *Space Time*

Uji pengaruh *space time* terhadap kinerja reaktor dilakukan dengan memvariasikan laju alir umpan (metana). Adapun variabel yang dianggap konstan adalah berat katalis yang berkisar pada nilai 0,2 gr seperti terlihat pada Tabel 1. Loading katalis harus dijaga konstan karena berpengaruh terhadap kinerja reaktor. Semakin banyak loading katalis berarti semakin banyak inti aktif Ni yang terdapat pada katalis. Semakin banyak inti aktif maka semakin banyak metana yang teradsorb dan bereaksi menghasilkan karbon dan hidrogen.

Tabel 4.1 Loading katalis pada percobaan pengaruh

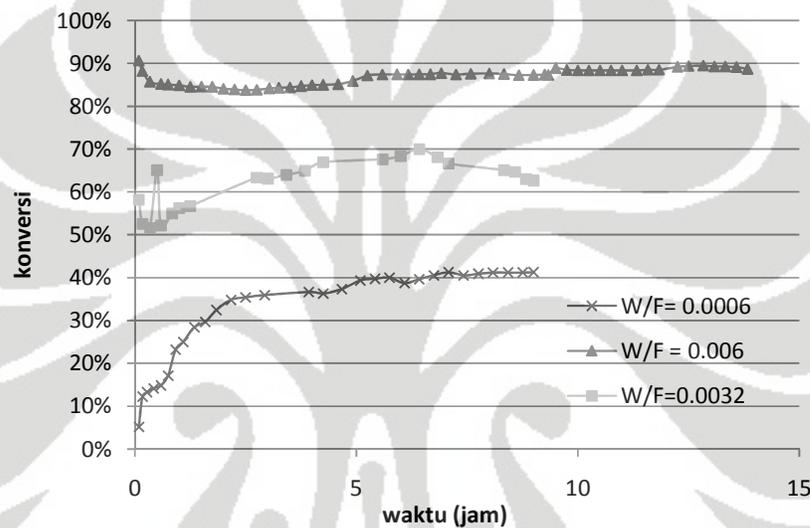
Percobaan	W/F (gr min/mL)		
	0,0006	0,0032	0,006
Loading			
W ₀ (g)	11,35	11,06	11,042
W ₁ (g)	11,613	11,31	11,4
W ₂ (g)	11,625	11,35	11,42
T _{kalsinasi} (°C)	750	750	750
W ₃ (g)	11,55	11,25	11,24
W ₃ -W ₀ (g)	0,2	0,19	0,198
A _{wiremesh} (cm ²)	190,3316	190,3316	190,3316
W/A (g/cm ² wiremesh)	0,001050798	0,000998	0,001050798

Dimana W₀ adalah berat kawat, W₁ adalah berat kawat dilapisi katalis setelah pengeringan pertama, W₂ adalah berat setelah pengeringan kedua, dan W₃ adalah berat setelah kalsinasi. Dari W/F yang telah ditentukan, maka didapat besarnya laju alir sebagai berikut:

W/F (gr min/mL)	0,0006	0,0032	0,006
F (mL/min)	326.905	57.66	33

4.1.1 Pengaruh *Space Time* Terhadap Konversi

Pengaruh *space time* terhadap konversi sepanjang waktu dapat dilihat pada grafik di bawah ini:

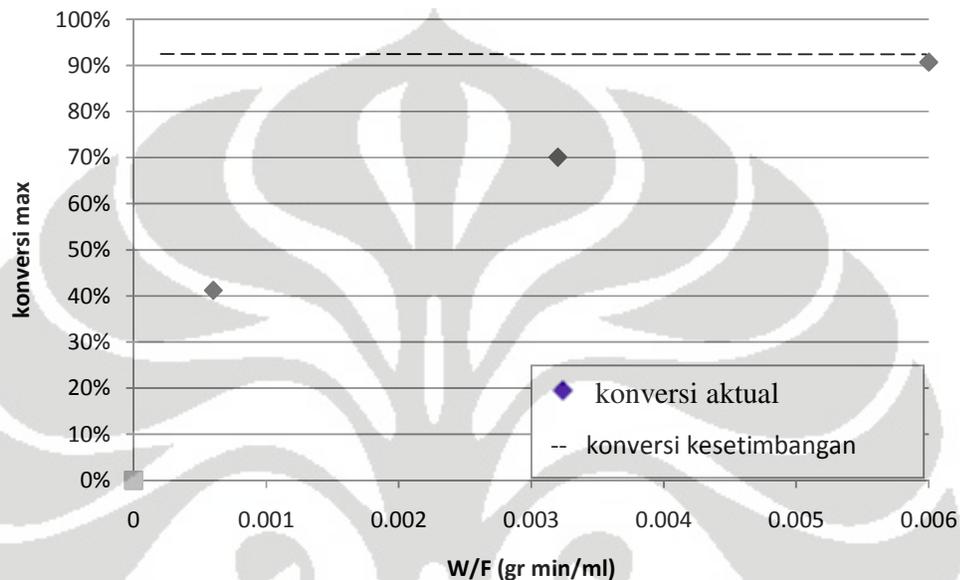


Gambar 4. 2 Profil konversi metana terhadap waktu untuk berbagai *space time*

Dapat diperhatikan pula bahwa untuk masing-masing *space time*, dengan katalis yang sama, tidak terjadi penurunan konversi yang signifikan untuk 9 jam pertama selama proses berlangsung. Hal ini mengindikasikan kestabilan katalis cukup baik untuk temperatur operasi 700°C sehingga reaksi dapat terus berlanjut dengan baik sampai waktu tertentu, dan *space time* tidak terlalu berpengaruh pada hal ini. Keaktifan katalis dapat dilihat juga dari laju alir produk yang masih cukup konstan dari mulai sampai reaksi dihentikan.

Pada pengujian dengan *space time* 0.0006, konversi metana tertinggi adalah 41.21 % dan konversi rata-ratanya 31,90%. Sedangkan pada pengujian dengan *space time* 0,0032 konversi tertinggi metana adalah 70.03%, dengan

konversi rata-rata 62.10%. Dan pada pengujian dengan *space time* 0.006, konversi tertinggi metana adalah 90.66%, dengan konversi rata-rata 87,05%. Adapun besar konversi secara teoritis dengan pendekatan kesetimbangan termodinamika pada temperatur 700 °C dan tekanan 1 atmosfer yaitu sebesar 91.86%.



Gambar 4. 3 Profil konversi metana maksimum terhadap waktu

Terlihat bahwa semakin tinggi *space time*, maka hasil konversi reaksi akan semakin mendekati konversi kesetimbangan, yang merupakan nilai konversi maksimal yang dapat dicapai pada kondisi ideal dengan temperatur 700°C dan tekanan 1 atm. Hal ini terjadi karena semakin tinggi *space time*, dengan loading katalis yang sama, berarti semakin kecil laju alir. Artinya, waktu kontak katalis dengan reaktan akan semakin lama sehingga lebih banyak metana yang dapat terkonversi.

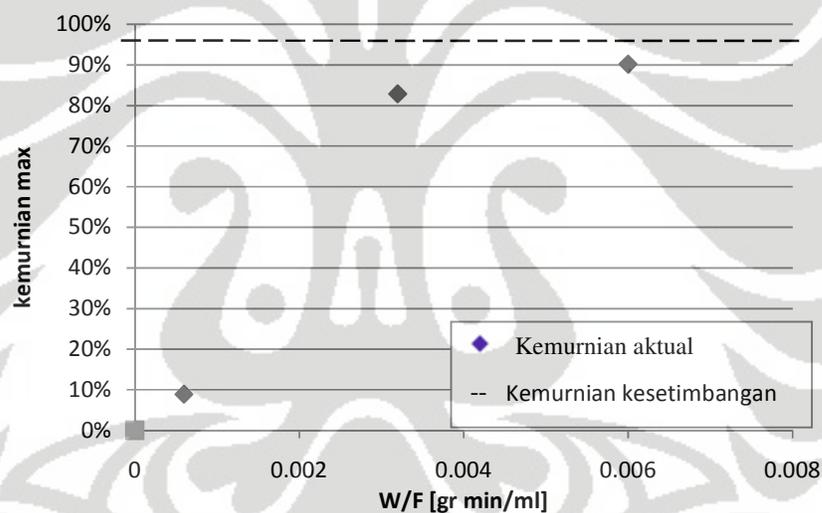
4.1.2 Pengaruh *Space Time* Terhadap Kemurnian Hidrogen

Kemurnian hidrogen adalah rasio antara volume hidrogen pada keluaran terhadap volume total keluaran. Dengan kata lain, parameter ini menggambarkan berapa banyak produk hidrogen yang terbentuk. Oleh karena itu, nilai kemurnian hidrogen berbanding lurus dengan konversi metana. Semakin tinggi konversi

metana, berarti semakin banyak hidrogen yang terbentuk sehingga kemurnian hidrogen pun semakin tinggi pula.

Pada pengujian dengan *space time* 0,006 kemurnian hidrogen tertinggi adalah 90,16 %. Sedangkan pada pengujian dengan *space time* 0,0032 kemurnian hidrogen tertinggi adalah 82,84% . Dan pada pengujian dengan *space time* 0,0006 kemurnian hidrogen tertinggi hanya mencapai 8,86%. Adapun besar kemurnian secara teoritis dengan pendekatan kesetimbangan termodinamika pada temperatur 700 °C dan tekanan 1 atmosfer yaitu sebesar 95,76%.

Sama seperti konversi, terlihat bahwa semakin tinggi *space time*, maka kemurnian hidrogen akan semakin mendekati nilai kemurnian hidrogen pada kondisi ideal. Penjelasan yang sama seperti pada fenomena hasil konversi terhadap *space time* berlaku pula dalam hal ini.



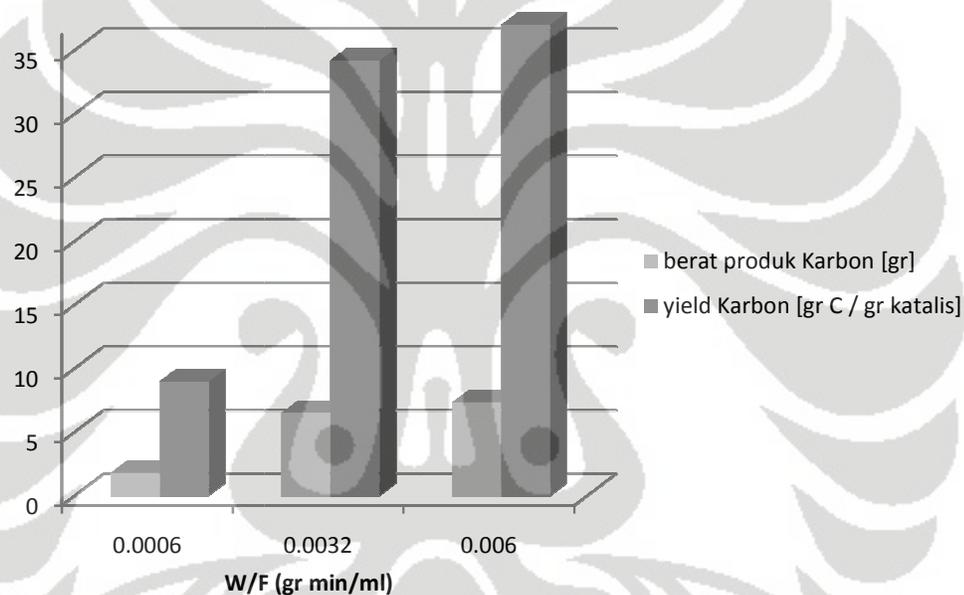
Gambar 4. 4 Profil kemurnian hidrogen terhadap *space time*

4.1.3 Pengaruh *Space Time* Terhadap Yield Karbon

Yield karbon adalah banyaknya karbon yang terbentuk per berat katalis yang terpakai. Dari penelitian, didapatkan bahwa untuk waktu proses yang sama, yaitu 9 jam, yield karbon setelah uji reaksi pada *space time* 0.0032 lebih besar daripada yield karbon pada *space time* 0.0006. Yield karbon pada pada *space time* 0.0032 sebanyak 34,21 gr karbon/gr katalis sedangkan yield karbon pada pada *space time* 0.0006 hanya 8,98 gr karbon/gr katalis. Hal ini dapat terjadi karena

konversi reaksi pada space time 0.0032 lebih besar daripada konversi reaksi pada space time 0,0006 sehingga produk karbon yang dihasilkan lebih besar.

Pada space time 0.006 dihasilkan yield sebanyak 37.07 gr karbon/gr katalis setelah reaksi berlangsung selama hampir empat belas jam. Dari hasil tersebut, jika dibandingkan hasil konversi selama 9 jam dengan hasil konversi selama 13,83 jam didapat yield karbon selama 9 jam sebesar 24,45 gr karbon/gr katalis. Hasil ini masih lebih besar daripada hasil sebelumnya untuk *space time* yang lebih kecil. Fenomena ini menggambarkan bahwa konversi metana menjadi karbon semakin kecil seiring waktu.



Gambar 4.5 Perbandingan Yield karbon terhadap variasi *space time*

Setelah reaksi dihentikan dan hasilnya diamati, dapat dilihat bahwa untuk semua percobaan, katalis terstruktur di bagian ujung reaktor sebelah kiri (searah umpan masuk) terdeposisi paling banyak oleh karbon. Hal ini dapat dikarenakan saat awal reaksi dimulai, dimana konversi maksimal biasa terjadi, reaktan masuk mengalami kontak pertama kali dengan bagian katalis terstruktur yang paling dekat dengan masukan reaktor. Hal ini juga disebabkan hidrodinamika yang terjadi dalam reaktor yang memungkinkan bagian muka dan sisi-sisi katalis terstruktur yang paling dekat dengan masukan reaktor yang akan paling merata

dan paling sering kontak dengan reaktan. Selain itu, konsentrasi metana akan berkurang sepanjang reaktor karena telah bercampur dengan produk hidrogen yang dihasilkan. Ini berakibat pula pada semakin kecilnya kemungkinan reaktan yang kontak dengan katalis sehingga karbon yang terbentuk semakin sedikit mulai dari masukan sampai keluaran reaktor.

Hal yang dapat memperbesar yield karbon adalah waktu proses. Mengingat konversi reaksi yang masih tinggi dan cukup stabil untuk space time 0,0034 dan 0,006, maka bila reaksi diteruskan untuk kedua percobaan ini, produk karbon dapat bertambah, demikian pula dengan yield karbon yang dihasilkan.

4.2 Pengaruh Temperatur

Perlakuan katalis yang akan dipakai pada uji ini sama seperti pada uji *space time*, yang mana berat katalis dijaga cukup konstan agar pengaruhnya terhadap kinerja reaktor dapat diabaikan.

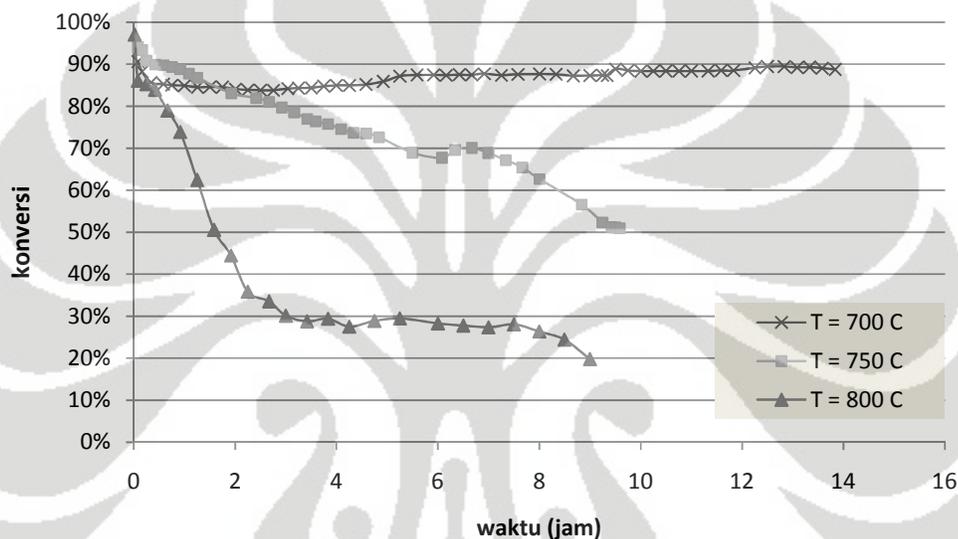
Tabel 4. 2. Loading katalis pada percobaan pengaruh temperatur

Percobaan	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)		
	700	750	800
Loading			
W_0 (g)	11,04	10,642	10,952
W_1 (g)	11,4	10,84	11,13
W_2 (g)	11,42	10,87	11,12
$T_{\text{kalsinasi}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	750	750	750
W_3 (g)	11,24	10,84	11,15
$W_3 - W_0$ (g)	0,2	0,198	0.198
A_{wiremesh} (cm^2)	190,3316	190,3316	190,3316
W/A (g/cm^2 wiremesh)	0,001050798	0,00104	0.00104

Dengan loading yang relatif sama, maka demikian pula besarnya laju alir. Dengan kata lain, pada percobaan kali ini, *space time* dijaga konstan yang besarnya diambil dari hasil percobaan sebelumnya yang memberikan hasil kinerja reaktor paling optimum, yaitu 0,006.

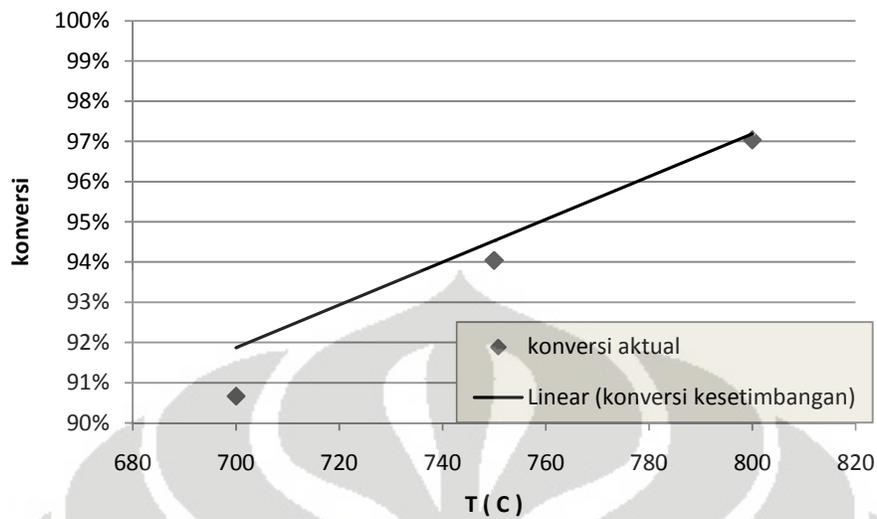
4.2.1 Pengaruh Temperatur Terhadap Konversi

Hasil eksperimen menggambarkan pengaruh temperatur reaksi terhadap konversi seperti pada grafik berikut ini:



Gambar 4. 6 Profil konversi metana terhadap waktu

Pada pengujian dengan temperatur 700⁰C, konversi metana tertinggi adalah 90,66%, dengan konversi rata-rata 87,05%. Sedangkan pada pengujian dengan temperatur 750⁰C konversi tertinggi metana adalah 94,04%, dengan konversi rata-rata 76,80%. Dan pada pengujian dengan temperatur 800⁰C, konversi tertinggi metana adalah 97,04%, dengan konversi rata-rata 45,32%. Adapun besar konversi secara teoritis dengan pendekatan kesetimbangan termodinamika pada tekanan 1 atmosfer dan temperatur 700⁰C, 750⁰C, 800⁰C secara berturut-turut yaitu sebesar 91,86%, 94,52%, dan 97,14%.



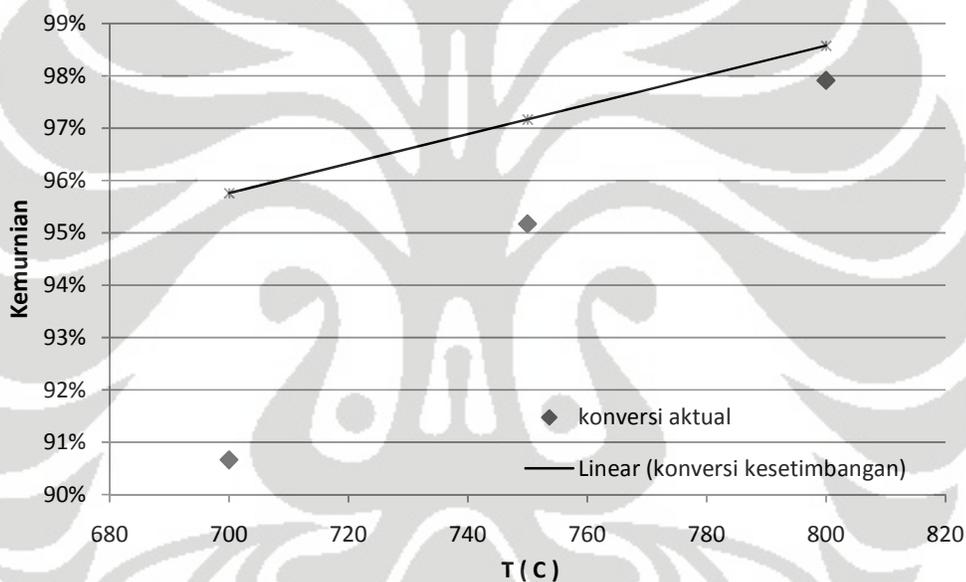
Gambar 4.7 Profil konversi metana terhadap temperatur

Terlihat bahwa semakin tinggi temperatur, maka hasil konversi reaksi akan semakin mendekati konversi kesetimbangan. Hal ini terjadi karena reaksi dekomposisi metana merupakan reaksi endotermik sehingga peningkatan temperatur mengakibatkan konversi semakin tinggi. Selisih yang semakin tinggi antara nilai konversi maksimum dengan nilai konversi rata-rata menunjukkan bahwa katalis semakin cepat terdeaktivasi. Deaktivasi yang terjadi kemungkinan besar terjadi karena sintering. Sintering bisa diabaikan bila temperatur operasi berada di bawah temperatur Huttig atau Raman, yaitu 0,3 atau 0,5 titik lebur logam katalis yang dipakai. Pada percobaan ini, digunakan inti aktif nikel yang paling banyak komposisinya di dalam katalis dan memiliki titik lebur 1452°C . Jadi, agar aman dari proses sintering, seharusnya temperatur operasi berada di bawah $435,6^{\circ}\text{C}$ atau 726°C . Pada temperatur 700°C , konversi cukup stabil bahkan sampai jam ke-14 karena masih berada di bawah temperatur Raman. Saat temperatur 750°C dan 800°C , deaktivasi terlihat semakin cepat seiring meningkatnya temperatur. Hal ini karena temperaturnya sudah melebihi temperatur yang aman dari sintering.

Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Sergei [33]. Dari eksperimen yang telah dilakukan oleh beliau untuk melihat pengaruh temperatur terhadap laju spesifik pembentukan karbon, diketahui bahwa laju reaksi awal semakin tinggi namun juga semakin cepat turun seiring meningkatnya temperatur.

4.2.2 Pengaruh Temperatur Terhadap Kemurnian hidrogen

Pada pengujian dengan temperatur 700°C , kemurnian hidrogen tertinggi adalah $90,16\%$, dengan kemurnian hidrogen rata-rata $83,38\%$. Sedangkan pada pengujian dengan temperatur 750°C kemurnian hidrogen tertinggi adalah $95,17\%$, dengan kemurnian hidrogen rata-rata $72,36\%$. Dan pada pengujian dengan temperatur 800°C , kemurnian hidrogen tertinggi adalah $97,91\%$, dengan kemurnian hidrogen rata-rata $47,20\%$. Adapun besar kemurnian hidrogen secara teoritis dengan pendekatan kesetimbangan termodinamika pada tekanan 1 atmosfer dan temperatur 700°C , 750°C , 800°C secara berturut-turut yaitu sebesar $95,76\%$, $97,17\%$, dan $98,57\%$.



Gambar 4. 8 Profil kemurnian hidrogen terhadap temperature

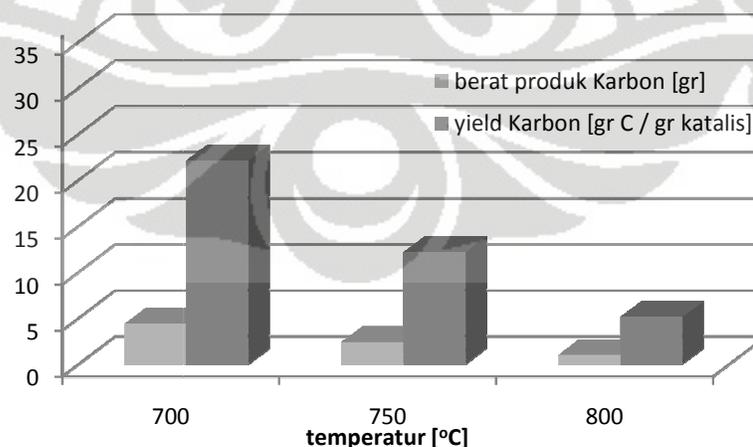
Terlihat bahwa semakin tinggi temperatur, maka kemurnian hidrogen akan semakin mendekati kemurnian hidrogen ideal. Hal ini karena besarnya kemurnian hidrogen sejalan dengan besarnya konversi yang mana seperti ditunjukkan sebelumnya bahwa konversi berbanding lurus dengan temperatur. Hal ini juga menyebabkan penurunan nilai kemurnian yang semakin cepat turun seiring naiknya temperatur reaksi seperti bisa dilihat pada selisih yang semakin tinggi antara nilai kemurnian hidrogen maksimum dengan nilai hidrogen rata-rata.

Pada uji 700°C, kemurnian hidrogen yang dihasilkan cukup stabil di atas 80% selama hampir 14jam bereaksi. Dengan demikian, diharapkan hidrogen tersebut dapat digunakan untuk proses *hydrotreatment*.

4.2.3 Pengaruh Temperatur Terhadap Yield Karbon

Dari penelitian, didapatkan bahwa untuk waktu proses yang sama, yaitu 9 jam, yield karbon setelah uji reaksi pada temperatur 750°C lebih besar daripada yield karbon pada temperatur 800°C. Yield karbon pada pada temperatur 750°C sebanyak 12,172 gr karbon/gr katalis sedangkan yield karbon pada pada temperatur 800°C hanya 5,152 gr karbon/gr katalis. Hal ini dapat terjadi karena walaupun konversi maksimum reaksi pada temperatur 750°C lebih kecil daripada konversi reaksi pada temperatur 800°C, namun laju penurunan konversi pada temperatur 750°C lebih lambat sehingga produk karbon yang dihasilkan lebih besar dibandingkan yield karbon pada temperatur reaksi 800°C.

Pada temperatur 700°C dihasilkan yield sebanyak 37.07 gr karbon/gr katalis setelah reaksi berlangsung selama hampir empat belas jam. Dari hasil tersebut, jika dibandingkan hasil konversi selama 9 jam dengan hasil konversi selama 13,83 jam didapat yield karbon selama 9 jam sebesar 24,45 gr karbon/gr katalis. Hasil ini masih lebih besar daripada hasil sebelumnya untuk temperatur 750°C dan 800°C. Fenomena ini menggambarkan bahwa penurunan laju konversi metana menjadi karbon semakin cepat seiring naiknya temperatur.



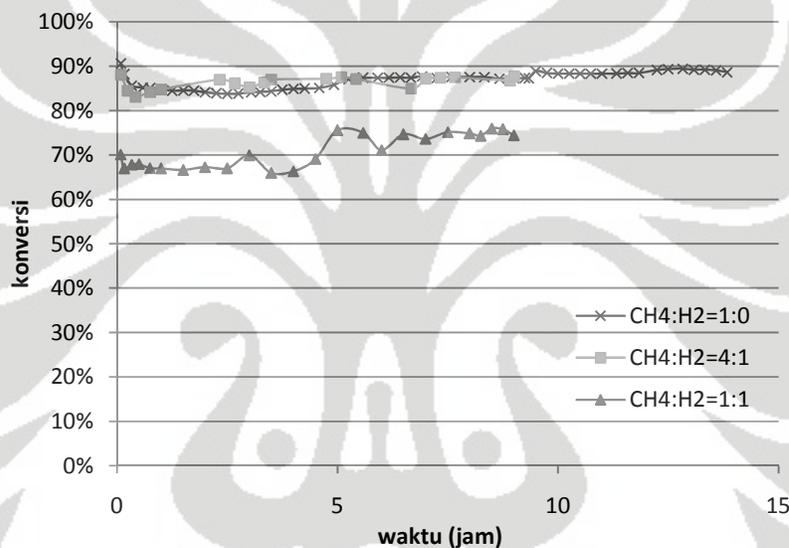
Gambar 4. 9 Perbandingan Yield karbon terhadap variasi temperatur

Hal ini sejalan dengan penelitian Yan Ju [37] bahwa untuk penggunaan katalis Ni-Cu-Al, yield karbon semakin menurun seiring naiknya temperatur dari 873 K-1073K (dari kisaran temperatur 773-1073K).

4.3 Pengaruh Rasio Umpan

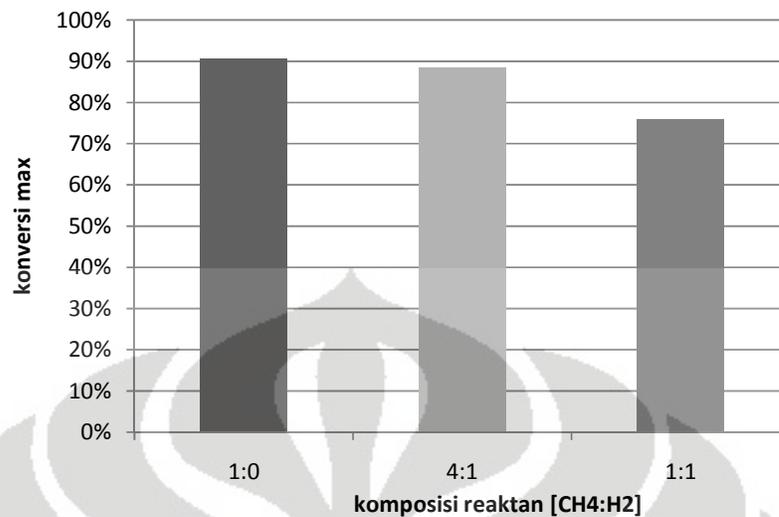
4.3.1 Pengaruh Rasio Umpan terhadap Konversi

Gambar 4.10 menunjukkan pengaruh rasio umpan pada konversi metana terhadap waktu.



Gambar 4. 10 Profil konversi metana terhadap waktu

Pada pengujian dengan rasio umpan (CH₄/H₂) yang berbeda, didapat bahwa komposisi 1:0 memberikan nilai konversi maksimum yang paling tinggi, yaitu 90.66% dengan konversi rata-rata 87,05%. Sedangkan pada pengujian dengan komposisi CH₄:H₂ = 4:1 konversi maksimum metana adalah 88.45%, dengan konversi rata-rata 86.75%. Dan pada pengujian dengan CH₄:H₂ = 1:1, konversi tertinggi metana adalah 90.66%, dengan konversi rata-rata 70.83%.

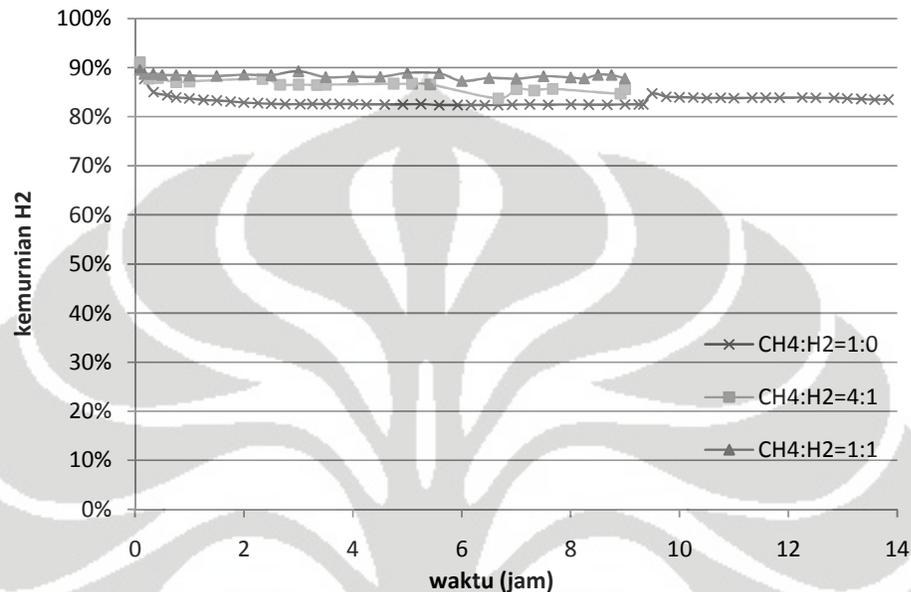


Gambar 4. 11 Konversi metana terhadap rasio umpan

Dari grafik terlihat bahwa penambahan hidrogen pada reaktan mempengaruhi konversi. Semakin besar komposisi hidrogen pada reaktan, maka konversi maksimum yang bisa dicapai semakin kecil. Hidrogen merupakan gas inert dan hasil reaksi pada dekomposisi katalitik metana. Sejalan dengan eksperimen yang telah dilakukan oleh Sergei [34], bahwa peningkatan tekanan parsial hidrogen dalam aliran reaktan akan menurunkan laju maksimal pembentukan karbon. Dengan kata lain, konversi maksimal yang dapat dicapai semakin kecil seiring peningkatan konsentrasi (tekanan parsial) hidrogen pada reaktan. Semakin banyaknya partikel hydrogen dalam reaktor akan semakin menghalangi kontak metana dengan inti katalis dan mengakibatkan kemungkinan metana terkonversi menjadi lebih kecil.

4.3.2 Pengaruh Rasio Umpan terhadap Kemurnian Hidrogen

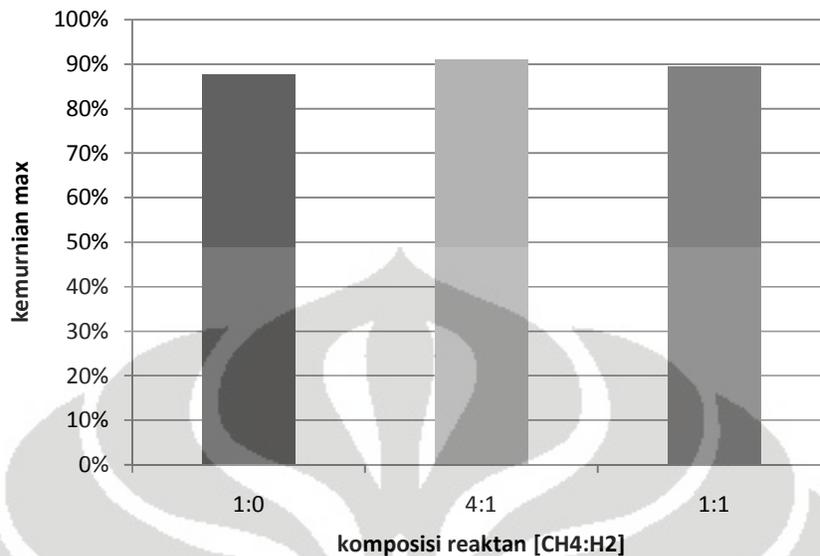
Hasil eksperimen menunjukkan bahwa rasio umpan berpengaruh terhadap kemurnian hidrogen seperti ditunjukkan pada gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Profil kemurnian hidrogen terhadap waktu

Grafik di atas dibuat berdasarkan pengolahan data komposisi keluaran reaktor. Dari grafik terlihat pengaruh penambahan hidrogen terhadap kemurnian hidrogen yang dihasilkan. Jika penambahan jumlah hidrogen pada reaktan tidak diperhitungkan pada keluaran reaktor, maka akan didapati bahwa kemurnian hidrogen akan semakin kecil seiring penambahan hidrogen pada reaktan. Hal ini karena kemurnian hidrogen berbanding lurus dengan konversi sehingga pengaruh yang dihasilkan dari variasi rasio umpan juga menjadi sejalan.

Kemurnian hidrogen yang dihasilkan dari percobaan ini untuk variasi komposisi metana 50-100% mempunyai kemurnian lebih dari 80% sehingga dapat diplikasikan pada proses *hydrotreatment*. Nilai kemurnian ini bisa ditingkatkan sampai 99,99% dengan proses pemurnian lebih lanjut, misalnya dengan menggunakan teknologi *Pressure Swing Adsorber* (PSA) sehingga bisa diaplikasikan sebagai bahan bakar.



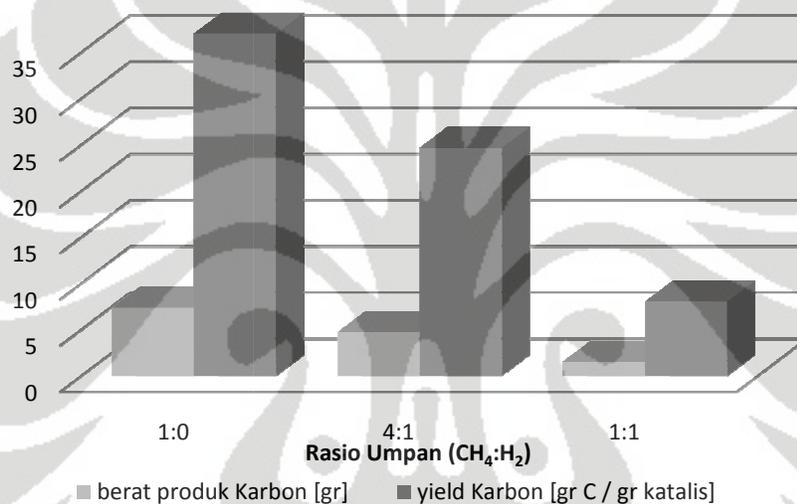
Gambar 4.13 Profil kemurnian hidrogen terhadap rasio umpan

Nilai kemurnian hidrogen pada komposisi 4:1 yang lebih besar dari nilai kemurnian hidrogen pada komposisi 1:1 disebabkan nilai konversi metana yang lebih besar pada komposisi 4:1 walaupun jumlah hidrogen pada masukannya lebih kecil.

4.3.3 Pengaruh Rasio Umpan terhadap Yield Karbon

Dari penelitian, didapatkan bahwa untuk waktu proses yang sama, yaitu 9 jam, uji reaksi dengan komposisi hidrogen yang lebih kecil memberikan yield karbon yang lebih besar. Yield karbon pada komposisi CH₄:H₂= 4:1 sebanyak 24,63 gr karbon/gr katalis sedangkan yield karbon pada komposisi CH₄:H₂= 1:1 hanya 8 gr karbon/gr katalis. Hal ini dapat terjadi karena konversi reaksi pada komposisi CH₄:H₂= 4:1 lebih besar daripada konversi reaksi pada komposisi CH₄:H₂= 1:1 sehingga produk karbon yang dihasilkan lebih besar. Hasil ini juga sejalan dengan hasil eksperimen Sergei [34] seperti diungkapkan sebelumnya bahwa peningkatan tekanan parsial hydrogen akan membuat penurunan laju spesifik pembentukan karbon semakin cepat sehingga karbon yang dihasilkan pun semakin sedikit.

Pada reaktan tanpa hidrogen (100% metana), dihasilkan yield sebanyak 37.07 gr karbon/gr katalis setelah reaksi berlangsung selama hampir empat belas jam. Dari hasil tersebut, jika dibandingkan hasil konversi selama 9 jam dengan hasil konversi selama 13,83 jam didapat yield karbon selama 9 jam sebesar 24,45 gr karbon/gr katalis. Hasil ini masih lebih besar daripada hasil sebelumnya untuk komposisi $\text{CH}_4:\text{H}_2 = 4:1$ dan $1:1$. Metana yang semakin murni sebagai reaktan (tanpa kandungan hidrogen) membuat kemungkinan kontak dengan katalis lebih besar tanpa halangan partikel lain (hidrogen) sehingga konversi semakin besar dan pada akhirnya akan meningkatkan jumlah yield karbon.



Gambar 4. 14 Perbandingan Yield karbon terhadap variasi rasio umpan

BAB 5 KESIMPULAN

5.1. KESIMPULAN

Dari penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. Pada kisaran *space time* 0,0006-0,006 gr min/mL semakin tinggi *space time*, kinerja reaktor semakin baik. Jadi pada kisaran tersebut, *space time* yang paling optimal adalah 0,006 gr min/mL. Hal ini terlihat dari kestabilan reaksi dan hasil yang paling besar dari konversi, kemurnian hidrogen, serta yield karbon secara berturut-turut 90.66%, 90.16%, dan 37.071 gr karbon/gr katalis.
2. Pada kisaran temperatur 700⁰C-800⁰C, konversi maksimal dan kemurnian hidrogen maksimal yang didapat semakin tinggi seiring naiknya temperatur. Namun, kenaikan konversi maksimal dan kemurnian hidrogen maksimal yang dicapai tidak signifikan laju penurunannya terhadap waktu. Hal ini berakibat pada hasil yield karbon yang semakin kecil seiring naiknya temperatur. Dengan demikian, temperature reaksi yang paling optimal pada kisaran 700⁰C-800⁰C adalah 700⁰C.
3. Dari hasil eksperimen didapat kondisi optimum untuk dekomposisi metana yaitu pada temperature 700⁰C, W/F =0,006 gr min/mL
4. Semakin tinggi tekanan parsial hidrogen pada laju umpan masuk, mengakibatkan semakin kecilnya konversi maksimum dan yield yang didapat.
5. Produk hydrogen dari hasil eksperimen pada temperatur 700⁰C, dan *space time* 0,006 gr min/mL, serta rasio umpan 50%-100% metana (sisanya hydrogen) dapat diaplikasikan pada proses *hydrotreatment* [(hydrodesulphurization (HDS), hydrodenitrogenation (HDN), dan hydrodearomatization (HDA)] karena mempunyai kemurnian >80%. Nilai kemurnian ini dapat ditingkatkan dengan proses pemurnian lebih lanjut hingga mencapai 99,99% sehingga dapat diaplikasikan sebagai *fuel cell*.

5.2. SARAN

Hasil penelitian ini yang berupa nanokarbon sebaiknya ditindaklanjuti dengan karakterisasi agar dapat diketahui jenis morfologinya. Dengan demikian, dapat diketahui pengaruh variasi temperatur dan rasio umpan terhadap kualitas nanokarbon yang dihasilkan.



DAFTAR REFERENSI

- [1] Li, Yongdan *et al.* (2000). *Simultaneous Production of Hydrogen and Nanocarbon from Decomposition of Methane on a Nickel-Based Catalyst*. *Energy & fuels*, 14, 1188 – 1194
- [3] Muradov, N. (2001). Catalysis of Methane Decomposition over Elemental Carbon. *Catalysis Communication* 2, 89 – 94
- [4] Ermakova, M.A., D.Yu Ermakov, G.G. Kuvshinov. (2000). *Effective Catalyst for Direct Cracking of Methane to Produce Hydrogen and Filamentous Carbon*. *Applied Catalysis A* Vol. 201, 61-70.
- [5] Purwanto W.W. (2005). Catalysis Role in Solving Future Energy Problems. Clean combustion, Hydrogen, Synthetic Fuels and Fuel Cells, *Berita Iptek LIPI* Tahun ke 44 Nomor 1 - Teknologi Katalisis dalam Penyediaan Energi
- [6] Wang Y., F. Wei, G. Luo, H. Yu, G. Gu (2002). The large scale production of carbon nanotubes in a nano agglomerate fluidized bed reactor, *Chemical Physics Letters*, 364, 568-572.
- [7] Morançais A, Causat B, Kihn Y, Kalck P, Plee D, Gaillard P, Bernard D et al. (2007). A parametric study of the large scale production of multi-walled carbon nanotubes by a fluidized bed catalytic chemical vapour deposition. *Carbon*, 45, 624-635.
- [8] Weizhong, Qian, et al. (2004). Production of Hydrogen and Carbon Nanotubes from Methane Decomposition in a Two-Stage Fluidized Bed Reactor. *Applied Catalysis*, 260, 223-228.
- [9] Muharam, Y., W.W Purwanto., and Afianty, A., (2007), Production of Carbon Nanotubes and Hydrogen from Methane Decomposition in the Reactor with a Structured Catalyst, 14th Regional Symposium of Chemical Engineering (RSCE).
- [10] Chai SP, et al. (2006). *Moderate temperature synthesis of single-walled carbon nanotubes on alumina supported nickel oxide catalyst*. Elsevier,MLBLUE-08079, page 3.

- [11] Z.F. Ren, Z.P.Huang , D.Z. Wang, J.G. Wen, J.W. Xu, J.H. Wang, L.E. Calvet, J. Chen, J.F. Klemic dan M.A. Reed. (1999). *Appl. Phys. Lett.* 75, 1086.
- [12] S.B. Sinnott, et al. (1999). *Chem. Phys. Lett.* 315, 25.
- [13] Q.W. Li, et al. (2004) . *Carbon* 42, 829.
- [14] Dai, Liming. (2006). *Carbon Nanotechnology*. Dayton : Elsevier.
- [15] Chen, X.*et all.* D.Y. *Electrochemical hydrogen storage of carbon nanotubes and carbon nanofibers*. Songa Institute of New Energy Material Chemistry, N&T Joint Academy, Nankai University
- [16] Qian, Dong., Gregory J Wagner, Wing Kam Liu. (2002). *Mechanics of Carbon Nanotubes*. *Applied Mechanics Rev*, Vol. 55 No.6, 495-533. American Society of Mechanical Engineers.
- [17] Chen, Jiuling., Yongdan Li., Zongquan Li., Xixiang Zhang. (2004). *Production of CO_x-free Hydrogen and Nanocarbon by Direct Decomposition of Undiluted Methane on Ni-Cu-Alumina Catalyst*. *Applied Catalysis A* Vol. 269, 179-186.
- [18] Ermakova, M. A. *et al.* (1999). New Nickel Catalyst for the Formation of Filamentous Carbon in the Reaction of Methane Decomposition. *Journal of Catalysis*, 187, 77 – 84
- [19] Satterfield, Charles N. (1991). *Heterogenous Catalysis in Industrial Practical Industries* (2nded). Mc Graw-Hill.
- [20] Resketenko, T.V. , et al. (2003). *Carbon capacious Ni-Cu-Al₂O₃ catalyst for high temperature methane decomotition*. *Applied Catalyst A: General*, 247, 51-63.
- [21] Kim, D H, Woo SI, Yang OB. *Effect of pH in sol-gel synthesis in the physiochemical properties of Pd-alumina three-waycatalyst*.
- [22] Walas, S.M. *Chemical Process Equipment Selection and Design*. Washington: Butterworth-Heinemann Series
- [23] Siregar, Astika Oktaviani. (2007). Pengaruh *Textural Promoter* (Al₂O₃, SiO₂, MgO) pada katalis berbasis Ni-Cu terhadap Kualitas dan Kuantitas Nanokarbon melalui Reaksi Dekomposisi Katalitik Metana. Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia.

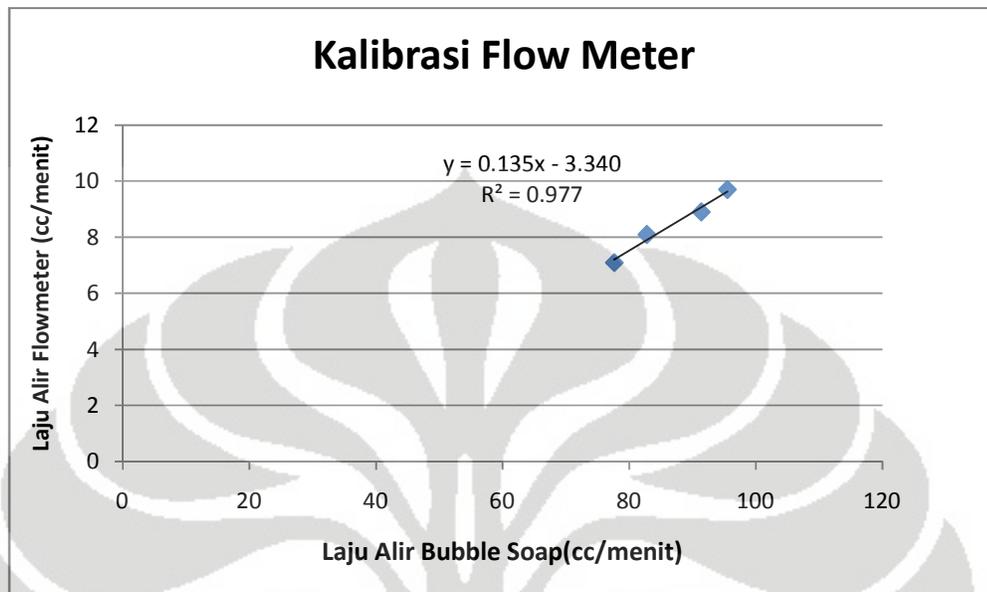
- [24] Lisa. (2005). Pengaruh keasaman katalis berbasis Ni-Cu terhadap Kinerja Reaksi Dekomposisi Metana. Departemen Teknik Kimia-UI.
- [25] R.T.K. Baker dan P.S. Harris. (1978). *Chemistry and Physics of Carbon*, Vol 14. New York : Marcel Dekker.
- [26] H. Dai, et. al.. (1996). *Chem. Phys. Lett.* 260, 471.
- [27] Kunadian , Ilayathambi, et. al. (2009). *Growth Kinetics of MWCNTs synthesized by a continuous-feed CVD method*. *Carbon*, 47, 384 – 395.
- [28] Cybulski, Andrzej. (1998). *Structured Catalysts and Reactors*. New York: Marcel Dekker
- [29] Trubac, R. E., dkk. (2001). *Mikroengineered catalyst system: ABB's advancement in structured catalyst packings*. *Catalyst Today*, 6, 17-24.
- [30] Voecks, Gerald, J. Morgan Parker, Amy Herr, and Juergen Mueller. *Chemical Reactor Based on Catalyzed Wires*. Caltech for NASA's Jet Propulsion Laboratory. www.nasatech.com.
- [31] Heibel, A.K., et al. (2001). *Influence of channel geometry on hydrodynamics and mass transfer in the monolith film flow reactor*. *Catalyst Today*: 69, 153-163.
- [32] Yulianti, Ira. (2008). Perancangan Reaktor Katalis Terstruktur untuk Produksi Karbon Nanotube dan Hidrogen melalui Proses Dekomposisi Katalitik Metana. Departemen Teknik Kimia-UI.
- [33] Zavarukhin, G. Sergei, et al. (2004). The Kinetic Model of formation of nanofibrous Carbon from CH₄-H₂ mixture over a high loaded nickel catalyst with Consideration for the Catalyst Deactivation. *Applied Catalyst A: General* 272, 219-277.
- [34] www.wikipedia.com
- [35] Smith, Roger A.. (2004). *Hydrogen Purity Standard*. *Compressed Gas Association*.
- [36] Mapiour. A, V. Sundaramurthy, Dalai A. K., and Adjaye J.. (2009). *Effect of Hydrogen Purity on Hydroprocessing of Heavy Gas Oil Derived from Oil-Sands Bitumen*. *Energy & Fuels*, 23, 2129–2135.

- [37] Yan Ju, Fengyi Li, Renzhong Wei. (2005). *Methane Decomposition into Carbon Fibers over Coprecipitated Nickel-Based Catalysts*. Journal of Natural Gas Chemistry 14(2005)101–106.
- [38] Martyn V. Twigg and Dennis E. Webster. (2006). *Structured Catalyst and Reactors* (2nd edition). New York : CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [39] Iijima, S. (2002). *Carbon nanotubes: past, present, and future*. Physica B, 323, hlm.1 –5.
- [40] C. N. R. Rao, et al.. (2001). *Nanotubes*. CHEMPHYSCHEM, 2, 78 – 105.
- [41] Chunnian He, et al. (2006). *Carbon nanotubes and onions from methane decomposition using Ni/Al catalysts*. Materials Chemistry and Physics 97, 109–115.
- [42] V.L. Kuznetsov. (2001). *Mechanism of Carbon Filament and Nanotubes Formation on Metal Catalyst*. Russia: Boreskov Institute of Catalysis.
- [43] *Deactivation Correlations of Pd/Rh Three-way Catalysts Designed for Euro IV Emission Limits: Effect of Ageing Atmosphere, Temperature and Time*. (2003). [Oulu University Library](#)
- [44] Geoffrey Q. Miller, and Joerg Stöcker. (1999). *Selection of a Hydrogen Separation Process*. Des Plaines: UOP LLC.

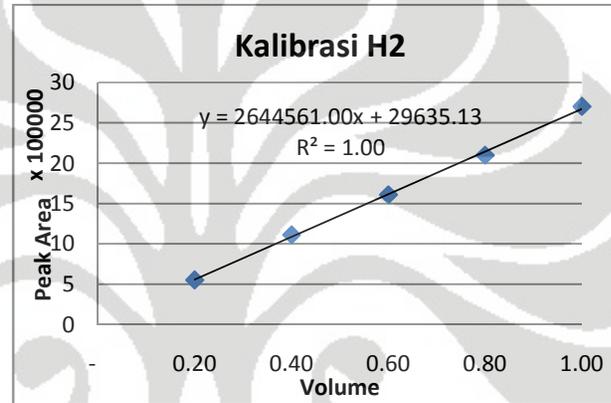
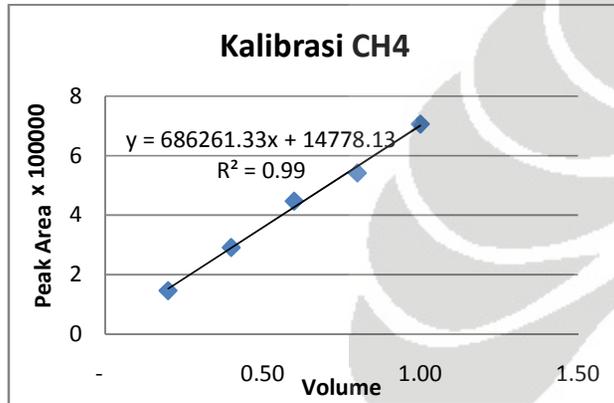
Lampiran 1. Data Kalibrasi Laju Alir

Set Flow Rate	Display Flow (cc/menit)	volum (cc)	waktu (s)	Laju alir (cc/menit)	Rata Laju (cc/menit)	Laju alir (l/h)	Rata laju (l/h)
7	7.1	10	7.97	75.2823	77.671	4.5169	4.66
7	7.1	10	7.91	75.8533		4.5512	
7	7.1	20	15.16	79.1556		4.7493	
7	7.1	20	15.64	76.7263		4.6035	
7	7.1	30	22.32	80.6451		4.8387	
7	7.1	30	22.97	78.3630		4.7017	
8	8.1	10	7.56	79.3650	82.819	4.7619	4.97
8	8.1	10	7.42	80.8625		4.8517	
8	8.1	20	14.63	82.0232		4.9213	
8	8.1	20	14.3	83.9160		5.0349	
8	8.1	30	21.23	84.7856		5.0871	
8	8.1	30	20.94	85.9598		5.1	
9	8.9	10	6.71	89.4187	91.41	5.36	5.485
9	8.9	10	6.78	88.4955		5.31	
9	8.9	20	13.07	91.8133		5.5087	
9	8.9	20	13.13	91.39375		5.4836	
9	8.9	30	19.29	93.3125		5.598	
9	8.9	30	19.14	94.0438		5.642	
10	9.7	10	6.51	92.1658	95.54	5.529	5.73
10	9.7	10	6.36	94.3396		5.660	
10	9.7	20	12.73	94.2655		5.655	
10	9.7	20	12.45	96.3855		5.783	
10	9.7	30	18.44	97.6138		5.856	
10	9.7	30	18.28	98.4682		5.908	

(lanjutan)



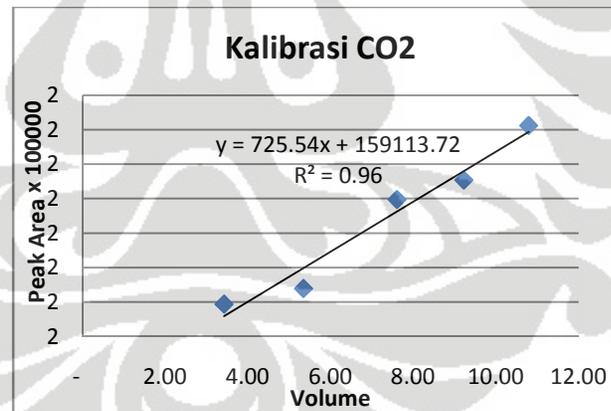
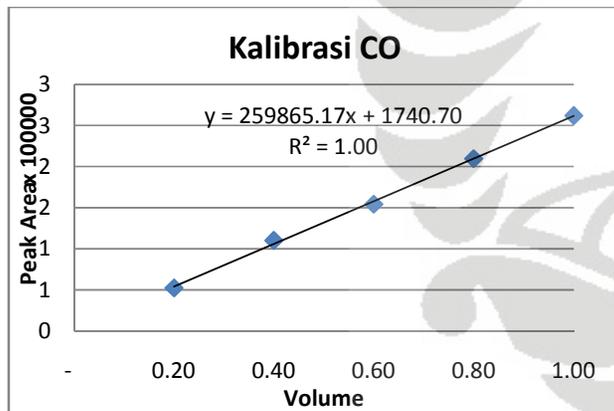
Lampiran 2. Data Kalibrasi Gas Chromatography



Gas	Response Factor	RRF
CH ₄	686261.33	1.00000000
H ₂	2644561.00	3.85357718
CO	259865.17	0.37866795
CO ₂	725.54	0.00105724

Suhu injector = 130°C

Suhu Kolom = 100°C



Kalibrasi Gas Metana

Universitas Indonesia

Volum	Konsentrasi			Waktu Retensi			Luas Peak			Mean		
	C1	C2	C3	τ_1	τ_2	τ_3	PA1	PA2	PA3	Konsentrasi	Waktu Retensi	Luas Peak
0.20	96.7454	96.6462	96.6275	1.595	1.603	1.605	152006	144897	140073	96.6730	1.601	145658.6667
0.40	97.2264	93.1796	96.9626	1.567	1.557	1.562	307282	270300	296320	95.7895	1.562	291300.6667
0.60	96.8614	97.2061	97.1156	1.548	1.538	1.543	451267	445865	444451	97.0610	1.543	447194.3333
0.80	90.1496	95.9566	97.9110	1.352	1.513	1.505	465562	564671	595471	94.6724	1.457	541901.3333
1.00	95.1340	96.0329	96.8421	1.478	1.490	1.483	703234	700318	716307	96.0030	1.484	706619.6667
										96.0398	1.529	426534.9333

Kalibrasi Hidrogen

Volum	Konsentrasi			Waktu Retensi			Luas Peak			Mean		
	C1	C2	C3	τ_1	τ_2	τ_3	PA1	PA2	PA3	Konsentrasi	Waktu Retensi	Luas Peak
0.20	99.7634	99.7281	99.8034	0.372	0.370	0.365	550977	555255	551462	99.7650	0.369	552564.6667
0.40	100.0000	99.9947	99.9983	0.393	0.403	0.400	1116268	1091501	1133337	99.9977	0.399	1113702.0000
0.60	100.0000	100.0000	100.0000	0.415	0.433	0.425	1595651	1627342	1610982	100.0000	0.424	1611325.0000
0.80	99.9888	100.0000	100.0000	0.408	0.417	0.417	2158487	2072560	2070695	99.9963	0.414	2100580.6667
1.00	99.9906	99.9901	99.9877	0.448	0.398	0.437	2887456	2587275	2636328	99.9895	0.428	2703686.3333
										99.9497	0.407	1616371.7333

(lanjutan)

Kalibrasi CO

Volum	Konsentrasi			Waktu Retensi			Luas Peak			Mean		
	C1	C2	C3	τ_1	τ_2	τ_3	PA1	PA2	PA3	Konsentrasi	Waktu Retensi	Luas Peak
0.20	90.0840	90.4767	90.2416	0.872	0.863	0.887	51022	52429	52834	90.2674	0.874	52095.0000
0.40	91.4933	96.1045	91.6717	0.867	0.870	0.847	108848	116282	105116	93.0898	0.861	110082.0000
0.60	90.5198	90.2098	90.6382	0.842	0.862	0.820	153739	154742	154480	90.4559	0.841	154320.3333
0.80	92.7767	92.7375	92.6233	0.845	0.825	0.833	211747	210111	206945	92.7125	0.834	209601.0000
1.00	93.2073	92.8072	92.5694	0.815	0.820	0.830	262784	260019	263799	92.8613	0.822	262200.6667
										91.8774	0.847	157659.8000

Kalibrasi CO₂

Volum	Konsentrasi			Waktu Retensi			Luas Peak			Mean		
	C1	C2	C3	τ_1	τ_2	τ_3	PA1	PA2	PA3	Konsentrasi	Waktu Retensi	Luas Peak
3.42	97.1913	98.0463	98.2004	3.213	3.232	3.218	160815	162202	162823	97.8127	3.221	161946.6667
5.34	97.4001	97.9064	98.1230	3.220	3.217	3.223	161551	162271	163369	97.8098	3.220	162397.0000
7.61	99.1436	99.1801	99.2037	3.163	3.225	3.222		164896	165052	99.1758	3.203	164974.0000
9.22	99.3458	99.3479	99.3836	3.220	3.212	3.193	165389	165313	165908	99.3591	3.208	165536.6667
10.79	99.4798	99.4708	99.5021	2.967	2.960	2.963	167363	166413	167568	99.4842	2.963	167114.6667
										98.7283	3.1632	164,393.8000

Universitas Indonesia

Lampiran 3. Data Hasil Uji Kinerja

3.1 Uji pada W/F = 0,006 , T= 700°C, Rasio CH₄:H₂ = 1:0

t (h)	V. bub.(ml)	Output		Peak Area				Komposisi gas (y, %)				Volume (m3/h)				Out molar flow rate (kmol/h)				Konv ersi CH ₄ (%)	purityH ₂ (%)
		t bub ble (s)	flow (m3/hr)	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂		
0.083 33	20	36.5	0.0019 726	933 98	8553 75	4299 6	614 3	0.0935 934	0.85716 476	0.043 086	0.00 62	0.000 18	0.00169 0846	8.499 E-05	7.49977 E-06	6.87E -05	3.45 E-06			90.66	90.16
0.166 67	20	37.6	0.0019 149	167 502	1197 556	1083 7	467	0.1216 991	0.87008 7957	0.007 874	0.00 03	0.000 23	0.00166 6126	1.508 E-05	9.46662 E-06	6.77E -05	6.12 E-07			88.21	
0.583 33	20	38.4	0.0018 75	241 015	1306 367			0.1557 566	0.84424 3374		0 0	0.000 29	0.00158 2956		1.18634 E-05	6.43E -05			85.23	84.42	
0.75	20	39	0.0018 462	241 884	1268 870			0.1601 081	0.83989 1869		0 0	0.000 3	0.00155 057		1.20073 E-05	6.30E -05			85.05	83.99	
1	20	39.1 4	0.0018 396	252 396	1300 548			0.1625 274	0.83747 2568			0.000 3	0.00154 0573		1.21451 E-05	6.26E -05			84.87	83.75	
1.25	20	39	0.0018 462	257 228	1293 050			0.1659 238	0.83407 6211			0.000 31	0.00153 9833		1.24434 E-05	6.26E -05			84.50	83.41	
1.5	20	39.5	0.0018 228	257 023	1282 269			0.1669 748	0.83302 5183			0.000 3	0.00151 8426		1.23637 E-05	6.17E -05			84.60	83.30	
1.75	20	39.6	0.0018 182	258 266	1273 878			0.1685 651	0.83143 4904			0.000 31	0.00151 17		1.245E -05	6.14E -05			84.50	83.14	
2	20	39.2	0.0018 367	263 274	1275 709			0.1710 701	0.82892 9884			0.000 31	0.00152 2524		1.27639 E-05	6.18E -05			84.10	82.89	
2.25	20	39	0.0018 462	265 606	1274 307			0.1724 812	0.82751 8827			0.000 32	0.00152 7727		1.29352 E-05	6.21E -05			83.89	82.75	
2.5	20	39	0.0018 462	267 384	1271 498			0.1737 521	0.82624 7886			0.000 32	0.00152 5381		1.30305 E-05	6.20E -05			83.77	82.62	
2.75	20	39.3	0.0018 321	267 517	1266 126			0.1744 324	0.82556 7619			0.000 32	0.00151 249		1.29817 E-05	6.14E -05			83.83	82.56	
3.25	20	40.4	0.0017 822	267 357	1266 590			0.1742 935	0.82570 6494			0.000 31	0.00147 1556		1.26181 E-05	5.98E -05			84.29	82.57	

Universitas Indonesia

3.5	20	40.7	0.0017 69	267 357	1266 590			0.1742 935	0.82570 6494			0.000 31	0.00146 0709			1.25251 E-05	5.93E -05	0.00 E+0 0	84.40	82.57
3.75	20	41.5	0.0017 349	266 685	1262 776			0.1743 653	0.82563 4652			0.000 3	0.00143 2426			1.22887 E-05	5.82E -05	0.00 E+0 0	84.70	82.56
4	20	42.1	0.0017 102	266 277	1262 647			0.1741 597	0.82584 0264			0.000 3	0.00141 2363			1.20993 E-05	5.74E -05	0.00 E+0 0	84.93	82.58
4.25	20	42.3	0.0017 021	266 523	1260 045			0.1745 897	0.82541 0332			0.000 3	0.00140 4954			1.20718 E-05	5.71E -05	0.00 E+0 0	84.97	82.54
4.916 67	20	45	0.0016	268 063	1268 016			0.1745 112	0.82548 8793			0.000 28	0.00132 0782			1.13424 E-05	5.37E -05	0.00 E+0 0	85.87	82.55
5.25	20	49.5	0.0014 545	268 289	1270 783			0.1743 187	0.82568 132			0.000 25	0.00120 0991			1.02999 E-05	4.88E -05	0.00 E+0 0	87.17	82.57
5.583 33	20	50.8 5	0.0014 159	270 639	1268 139			0.1758 792	0.82412 0828			0.000 25	0.00116 6897			1.01162 E-05	4.74E -05	0.00 E+0 0	87.40	82.41
6.166 67	20	50.9	0.0014 145	270 827	1266 770			0.1761 365	0.82386 347			0.000 25	0.00116 5386			1.01211 E-05	4.73E -05	0.00 E+0 0	87.40	82.39
6.666 67	20	51.0 2	0.0014 112	271 708	1269 987			0.1762 398	0.82376 0212			0.000 25	0.00116 25			1.01032 E-05	4.72E -05	0.00 E+0 0	87.42	82.38
7.25	20	50.5	0.0014 257	269 131	1268 358			0.1750 458	0.82495 4195			0.000 25	0.00117 6172			1.01381 E-05	4.78E -05	0.00 E+0 0	87.37	82.50
7.583 33	20	51.5	0.0013 981	267 889	1260 412			0.1752 855	0.82471 4503			0.000 25	0.00115 2999			9.95484 E-06	4.68E -05	0.00 E+0 0	87.60	82.47
8	20	51.6	0.0013 953	269 685	1270 691			0.1750 774	0.82492 2616			0.000 24	0.00115 1055			9.92375 E-06	4.68E -05	0.00 E+0 0	87.64	82.49
8.333 33	20	51.3	0.0014 035	270 901	1272 763			0.1754 922	0.82450 7794			0.000 25	0.00115 7204			1.00054 E-05	4.70E -05	0.00 E+0 0	87.54	82.45
9	20	50	0.0014 4	268 786	1270 835			0.1745 793	0.82542 0672			0.000 25	0.00118 8606			1.02122 E-05	4.83E -05	0.00 E+0 0	87.28	82.54

9.5	20	50.1 5	0.0014 357	230 092	1273 364			0.1530 421	0.84695 7942			0.000 22	0.00121 5972			8.92556 E-06	4.94E -05	0.00 E+0 0	88.88	84.70
10	20	50.2 1	0.0014 34	246 702	1292 264			0.1603 037	0.83969 6264			0.000 23	0.00120 4105			9.3379E -06	4.89E -05	0.00 E+0 0	88.37	83.97
10.5	20	50.6 2	0.0014 224	250 660	1299 339			0.1617 162	0.83828 3767			0.000 23	0.00119 2344			9.34388 E-06	4.84E -05	0.00 E+0 0	88.36	83.83
11	20	50.6 5	0.0014 215	248 054	1284 422			0.1618 649	0.83813 5149			0.000 23	0.00119 1426			9.34692 E-06	4.84E -05	0.00 E+0 0	88.36	83.81
11.58 33	20	51.2	0.0014 063	251 178	1303 456			0.1615 673	0.83843 2711			0.000 23	0.00117 9046			9.22952 E-06	4.79E -05	0.00 E+0 0	88.51	83.84
11.83 33	20	51.1	0.0014 09	252 635	1310 873			0.1615 513	0.83841 784			0.000 23	0.00118 1332			9.24667 E-06	4.80E -05	0.00 E+0 0	88.48	83.84
12.25	20	54	0.0013 333	251 412	1304 824			0.1607 09	0.83844 8667			0.000 21	0.00111 7932			8.70447 E-06	4.54E -05	0.00 E+0 0	89.16	83.92
12.5	20	55.5	0.0012 973	251 171	1311 722			0.1614 57	0.83929 0982			0.000 21	0.00108 881			8.50863 E-06	4.42E -05	0.00 E+0 0	89.40	83.87
13.08 33	20	54.9 8	0.0013 096	254 046	1311 073			0.1623 174	0.83768 263			0.000 21	0.00109 7002			8.63487 E-06	4.46E -05	0.00 E+0 0	89.25	83.77
13.33 33	20	55.7	0.0012 926	256 093	1304 890			0.1640 588	0.83594 1199			0.000 21	0.00108 057			8.6147E -06	4.39E -05	0.00 E+0 0	89.27	83.59
13.58 33	20	55.1	0.0013 067	256 011	1297 252			0.1648 214	0.83517 8589			0.000 22	0.00109 134			8.74898 E-06	4.43E -05	0.00 E+0 0	89.10	83.52
13.83 33	20	53.3 4	0.0013 498	256 624	1295 959			0.1652 884	0.83471 1574			0.000 22	0.00112 672			9.06327 E-06	4.58E -05	0.00 E+0 0	88.71	83.47

(lanjutan)

3.2 Uji pada W/F = 0,0032, T= 700°C, Rasio CH₄:H₂ = 1:0

T (h)	V. bub (ml)	Output		Peak Area				Komposisi gas (y, %)		Volume (m ³ /h)				Out molar flow rate (kmol/h)		X CH ₄ (%)	purity H ₂ (%)
		T Bub (s)	flow (m ³ /hr)	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂		
0.08333	20	9.82	0.007332	315773	1248030			0.2019263	0.79807367	0.00148	0.005851457			6.01419E-05	2.38E-04	58.20	79.81
0.16667	20	9.6	0.0075	345493	1196985			0.2239857	0.776014309	0.00168	0.005820107			6.82409E-05	2.36E-04	52.57	77.60
0.33333	20	9.99	0.007207	356999	1144822			0.2377108	0.762289248	0.00171	0.005493977			6.95951E-05	2.23E-04	51.63	76.23
0.5	20	10	0.0072	242510	1170845			0.1715846	0.828415366	0.00124	0.005964591			5.0185E-05	2.42E-04	65.12	82.84
0.58333	20	10.26	0.007018	362999	1141631			0.2412547	0.758745339	0.00169	0.005324529			6.87739E-05	2.16E-04	52.20	75.87
0.83333	20	11.15	0.006457	364989	1114414			0.2467137	0.753286292	0.00159	0.00486427			6.47164E-05	1.98E-04	55.02	75.33
1	20	11.82	0.006091	369826	1084106			0.2543627	0.745637348	0.00155	0.004541953			6.29407E-05	1.85E-04	56.25	74.56
1.25	20	12.12	0.005941	371803	1069579			0.257949	0.742051032	0.00153	0.004408224			6.22482E-05	1.79E-04	56.73	74.21
2.75	20	14.5	0.004966	371148	1049325			0.2612848	0.738715203	0.0013	0.003668103			5.27038E-05	1.49E-04	63.37	73.87
3	20	14.6	0.004932	372253	1030887			0.2653	0.73470003	0.00131	0.003623178			5.31471E-05	1.47E-04	63.06	73.47
3.41667	20	15.31	0.004703	379556	1019833			0.2712298	0.728770199	0.00128	0.003427267			5.18153E-05	1.39E-04	63.98	72.88
3.83333	20	15.66	0.004598	380037	1029210			0.2696738	0.730326195	0.00124	0.003357822			5.03666E-05	1.36E-04	64.99	73.03

Universitas Indonesia

4.25	20	16.6 2	0.004 332	3657 10	9856 71			0.270 6195	0.72938 0537	0.00 117	0.0031 59771			4.76238 E-05	1.28E- 04	66.9 0	72.94
5.58 333	20	18.0 2	0.003 996	3885 69	9658 49			0.286 89	0.71310 9985	0.00 115	0.0028 49274			4.65646 E-05	1.16E- 04	67.6 3	71.31
6	20	18.8	0.003 83	3938 82	9538 43			0.292 257	0.70774 3048	0.00 112	0.0027 10505			4.54677 E-05	1.10E- 04	68.4 0	70.77
6.41 667	20	20.2 6	0.003 554	3978 16	9339 66			0.298 7095	0.70129 0451	0.00 106	0.0024 92246			4.31226 E-05	1.01E- 04	70.0 3	70.13
6.83 333	20	19.8 8	0.003 622	4089 59	9024 65			0.311 8435	0.68815 6538	0.00 113	0.0024 92317			4.58792 E-05	1.01E- 04	68.1 1	68.82
7.08 333	20	19.5 1	0.003 69	4148 27	8812 92			0.320 0532	0.67994 6826	0.00 118	0.0025 09286			4.798E- 05	1.02E- 04	66.6 5	67.99
8.33 333	20	22.0 2	0.003 27	4541 82	7486 32			0.377 5995	0.62240 0471	0.00 123	0.0020 35097			5.01545 E-05	8.27E- 05	65.1 4	62.24
8.58 333	20	22.2 3	0.003 239	4620 68	7342 69			0.386 2357	0.61376 4349	0.00 125	0.0019 87901			5.08169 E-05	8.08E- 05	64.6 8	61.38
8.83 333	20	21.8 4	0.003 297	4606 28	6994 98			0.397 05	0.60295 0024	0.00 131	0.0019 87747			5.31726 E-05	8.07E- 05	63.0 4	60.30
9	20	22.1	0.003 258	4688 43	6853 15			0.406 2208	0.59377 9188	0.00 132	0.0019 34484			5.37608 E-05	7.86E- 05	62.6 3	59.38

3.3 Uji pada $W/F = 0,0006$, $T = 700^\circ\text{C}$, Rasio $\text{CH}_4:\text{H}_2 = 1:0$

t (h)	Vol. Bub. (ml)	Output		Peak Area			Komposisi gas (y, %)			Volume (m ³ /h)			Out molar flow rate (kmol/h)			X CH_4 (%)	Purity H_2 (%)
		t.bub (s)	flow (m ³ /hr)	CH_4	H_2	CO	CH_4	H_2	CO	CH_4	H_2	CO	CH_4	H_2	CO		
0.0 83	30	5.62	0.0192 171	626 283	651 02	137	0.968 0128	0.094 162	0.00 0198	0.01 86	0.0018 0951	3.80717 E-06	0.000755 669	7.35E- 05	1.55 E-07	5.16	8.86
0.1	30	6.07	0.0177	630	206	87	0.968	0.031	0.00	0.01	0.0005	2.3779	0.000699	2.30E	9.66	12.1	3.18

67			924	187	95		2047	795	0134	723	6572	E-06	786	-05	E-08	7	
0.2 67	30	6.17	0.0175 041	627 819	178 29	69	0.972 3859	0.027 614	0.00 0107	0.01 702	0.0004 8336	1.87045 E-06	0.000691 417	1.96E -05	7.60 E-08	13.2 2	2.76
0.4 17	30	6.26	0.0172 524	630 007	154 53	57	0.976 0589	0.023 941	8.83 E-05	0.01 684	0.0004 1304	1.52341 E-06	0.000684 051	1.68E -05	6.19 E-08	14.1 5	2.39
0.5 83	30	6.32	0.0170 886	629 502	144 36	56	0.977 5817	0.022 418	8.7E -05	0.01 671	0.0003 831	1.48598 E-06	0.000678 614	1.56E -05	6.04 E-08	14.8 3	2.24
0.7 5	30	6.5	0.0166 154	627 099	143 44	54	0.977 6379	0.022 362	8.42 E-05	0.01 624	0.0003 7155	1.39865 E-06	0.000659 86	1.51E -05	5.68 E-08	17.1 8	2.24
1.0 83	30	7.18	0.0150 418	626 737	140 22	108	0.978 1166	0.021 883	0.00 0169	0.01 471	0.0003 2917	2.53487 E-06	0.000597 658	1.34E -05	1.03 E-07	24.9 9	2.19
1.5 83	30	7.65	0.0141 176	622 731	143 27	50	0.977 5107	0.022 489	7.85 E-05	0.01 38	0.0003 175	1.10795 E-06	0.000560 592	1.29E -05	4.50 E-08	29.6 4	2.25
2.5	30	8.34	0.0129 496	624 342	135 05	111	0.978 8272	0.021 173	0.00 0174	0.01 268	0.0002 7418	2.25314 E-06	0.000514 905	1.11E -05	9.15 E-08	35.3 8	2.12
2.9 33	30	8.42	0.0128 266	624 686	132 42	104	0.979 2422	0.020 758	0.00 0163	0.01 256	0.0002 6625	2.09075 E-06	0.000510 229	1.08E -05	8.49 E-08	35.9 6	2.08
3.9 17	30	8.52	0.0126 761	622 706	122 96	99	0.980 6363	0.019 364	0.00 0156	0.01 243	0.0002 4546	1.97595 E-06	0.000504 958	9.97E -06	8.03 E-08	36.6 2	1.94
4.2 5	30	8.48	0.0127 358	625 149	121 91	122	0.980 8721	0.019 128	0.00 0191	0.01 249	0.0002 4361	2.43744 E-06	0.000507 462	9.90E -06	9.90 E-08	36.3 1	1.91
4.6 67	30	8.62	0.0125 29	623 357	118 72	107	0.981 1454	0.018 686	0.00 0168	0.01 229	0.0002 3412	2.11007 E-06	0.000499 359	9.51E -06	8.57 E-08	37.3 3	1.87
5.0 83	30	8.91	0.0121 212	626 165	118 85	108	0.981 3729	0.018 627	0.00 0169	0.01 19	0.0002 2578	2.05136 E-06	0.000483 218	9.17E -06	8.33 E-08	39.3 5	1.86
5.7 5	30	9.01	0.0119 867	626 524	116 42	103	0.981 7571	0.018 243	0.00 0161	0.01 177	0.0002 1867	1.93434 E-06	0.000478 042	8.88E -06	7.86 E-08	40.0 0	1.82
6.0 83	30	8.82	0.0122 449	627 198	115 22	186	0.981 9608	0.018 039	0.00 0291	0.01 202	0.0002 2089	3.56477 E-06	0.000488 441	8.97E -06	1.45 E-07	38.7 0	1.80
6.7 5	30	9.1	0.0118 681	627 953	113 14	98	0.982 3016	0.017 698	0.00 0153	0.01 166	0.0002 1005	1.81911 E-06	0.000473 577	8.53E -06	7.39 E-08	40.5 6	1.77
7.4 17	30	9.1	0.0118 681	630 766	111 50	107	0.982 6301	0.017 37	0.00 0167	0.01 166	0.0002 0615	1.97795 E-06	0.000473 735	8.37E -06	8.03 E-08	40.5 4	1.74

7.75	30	9.15	0.0118033	632694	11029	103	0.9828669	0.017133	0.00016	0.0116	0.00020223	1.8883E-06	0.00047126	8.21E-06	7.67E-08	40.85	1.71
8.083	30	9.2	0.0117391	633818	10872	98	0.9831361	0.016864	0.000152	0.01154	0.00019797	1.78421E-06	0.000468827	8.04E-06	7.25E-08	41.16	1.69
8.75	30	9.2	0.0117391	634202	10711	101	0.9833916	0.016608	0.000157	0.01154	0.00019497	1.83818E-06	0.000468949	7.92E-06	7.47E-08	41.14	1.66
9	30	9.21	0.0117264	634213	10699	108	0.9834101	0.01659	0.000167	0.01153	0.00019454	1.96343E-06	0.000468449	7.90E-06	7.98E-08	41.21	1.66

3.4 Uji pada $W/F = 0,006$, $T = 750^{\circ}C$, Rasio $CH_4:H_2 = 1:0$

t (h)	Vol. Bub. (ml)	Output		Peak Area				Komposisi gas (y, %)				Volume (m3/h)				Out molar flow rate (kmol/h)				X CH_4 (%)	Purity H_2 (%)
		t.bub (s)	flow (m3/hr)	CH_4	H_2	CO	$C O_2$	CH_4	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2	CO	$C O_2$	CH_4	H_2	CO	$C O_2$		
0.08333	20	28	0.0025714	43398	855375	42996	6143	0.0457827	0.902378069	0.045359	0.0065	0.00012	0.002320401	0.0001166	4.78233E-06	9.43E-05	4.74E-06		94.04	95.17	
0.25	20	28.32	0.0025424	128697	1661672	3314		0.0717501	0.926402268	0.001848		0.00018	0.00235526	4.697E-06	7.41012E-06	9.57E-05	1.91E-07		90.77	92.81	
0.58333	20	29.82	0.0024145	144356	1568545			0.0842757	0.91572426			0.000202	0.002211004		8.26591E-06	8.98E-05	0.00E+00		89.71	91.57	
0.91667	20	31.2	0.0023077	163658	1528243			0.0967302	0.903269754			0.00022	0.002084469		9.06783E-06	8.47E-05	0.00E+00		88.71	90.33	
1.08333	20	31.42	0.0022915	177574	1493110			0.1062882	0.893711797			0.00024	0.002047971		9.89406E-06	8.32E-05	0.00E+00		87.68	89.37	

1.25	20	31.57	0.0022806	189868	1452095			0.1156348	0.884365238			0.00026	0.002016924			1.0713E-05	8.19E-05	0.00E+00		86.66	88.44
1.91667	20	33.83	0.0021283	239602	1273568			0.1583444	0.841655597			0.00034	0.001791286			1.36898E-05	7.28E-05	0.00E+00		82.95	84.17
2.41667	20	37.02	0.0019449	272928	1200985			0.1851724	0.814827605			0.00036	0.001584754			1.46297E-05	6.44E-05	0.00E+00		81.78	81.48
2.91667	20	37.5	0.00192	300317	1119372			0.2115372	0.788462825			0.00041	0.001513849			1.64987E-05	6.15E-05	0.00E+00		79.45	78.85
3.16667	20	37.8	0.0019048	314484	1080733			0.2254015	0.774598503			0.00043	0.001475426			1.74406E-05	5.99E-05	0.00E+00		78.28	77.46
3.41667	20	37.3	0.0019303	324566	1039494			0.2379411	0.762058854			0.00046	0.001470998			1.86576E-05	5.98E-05	0.00E+00		76.76	76.21
3.83333	20	39.47	0.0018242	348664	966370			0.2651369	0.734863129			0.00048	0.001340515			1.96471E-05	5.45E-05	0.00E+00		75.53	73.49
4.08333	20	39.79	0.0018095	360012	921759			0.2808708	0.719129236			0.00051	0.001301264			2.06456E-05	5.29E-05	0.00E+00		74.29	71.91
4.58333	20	42.35	0.0017001	380618	844825			0.3105962	0.68940375			0.00053	0.001172068			2.14505E-05	4.76E-05	0.00E+00		73.29	68.94
4.83333	20	42.066	0.0017116	381160	813445			0.3190678	0.680932191			0.00055	0.001165481			2.21844E-05	4.73E-05	0.00E+00		72.37	68.09
5.5	20	42.55	0.0016921	408083	704059			0.3669343	0.633065742			0.00062	0.001071228			2.52223E-05	4.35E-05	0.00E+00		68.59	63.31
6.08333	20	43.79	0.0016442	433719	671762			0.3923351	0.607664899			0.00065	0.000999129			2.62046E-05	4.06E-05	0.00E+00		67.37	60.77
6.66667	20	49.85	0.0014443	446860	631979			0.4142045	0.585795471			0.0006	0.000846084			2.43022E-05	3.44E-05	0.00E+00		69.74	58.58
7	20	50.31	0.0014311	456079	592152			0.435094	0.564906018			0.00062	0.000808452			2.52944E-05	3.28E-05	0.00E+00		68.50	56.49

7.33 333	20	50. 71	0.001 4198	468 669	5464 48			0.461 6896	0.5383 10362			0.00 066	0.0007 64314			2.6628 8E-05	3.10 E-05	0.00 E+00		66.84	53.83
7.66 667	20	51. 58	0.001 3959	482 758	4934 42			0.494 5278	0.5054 72239			0.00 069	0.0007 05584			2.8041 7E-05	2.87 E-05	0.00 E+00		65.08	50.55
8	20	51. 95	0.001 3859	498 959	4282 87			0.538 1085	0.4618 91451			0.00 075	0.0006 40158			3.0295 6E-05	2.60 E-05	0.00 E+00		62.27	46.19
8.83 333	20	54. 73	0.001 3155	537 887	2787 63			0.658 6506	0.3413 49415			0.00 087	0.0004 49062			3.5198 6E-05	1.82 E-05	0.00 E+00		56.17	34.13
9	20	54. 133	0.001 3301	548 723	2180 45	20 3		0.715 4417	0.2842 9367	0.00 0265		0.00 095	0.0003 78127	145.2 3466		3.8655 2E-05	1.54 E-05	5.90 E+00		51.86	28.44

3.5 Uji pada $W/F = 0,006$, $T = 800^{\circ}\text{C}$, Rasio $\text{CH}_4:\text{H}_2 = 1:0$

t (h)	Vol. Bub. (ml)	Output		Peak Area				Komposisi gas (y, %)				Volume (m3/h)				Out molar flow rate (kmol/h)				X CH_4 (%)	Purity H_2 (%)
		t.bub (s)	flow (m3/hr)	CH_4	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2	CO	CO_2		
0.01 667	20	25. 14	0.002 864	361 13	1688 969	445 64		0.020 4069	0.9544 10656	0.02 5182	0	5.8E -05	0.0027 33396	7.212 E-05		2.3741 5E-06	1.11 E-04	2.93 E-06		97.04	97.91
0.08 333	20	24. 59	0.002 928	152 264	1456 259	626 9		0.094 2933	0.9018 24507	0.00 3882	0	0.00 028	0.0026 4056	1.137 E-05		1.1215 5E-05	1.07 E-04	4.62 E-07		86.03	90.53
0.25	20	24. 63	0.002 9233	165 145	1491 459			0.099 6889	0.9003 11118	0	0	0.00 029	0.0026 31847	0		1.1838 E-05	1.07 E-04	0.00 E+00		85.26	90.03
0.41 667	20	24. 63	0.002 9233	178 548	1460 802			0.108 9139	0.8910 86101	0	0	0.00 032	0.0026 0488	0		1.2933 5E-05	1.06 E-04	0.00 E+00		83.89	89.11
0.66 667	20	24. 99	0.002 8812	224 645	1330 487			0.144 454	0.8555 46024	0	0	0.00 042	0.0024 64959	0		1.6906 7E-05	1.00 E-04	0.00 E+00		78.95	85.55

0.91 667	20	28. 24	0.002 5496	287 208	1129 617			0.202 7124	0.7972 87597	0	0	0.00 052	0.0020 32745	0		2.0994 8E-05	8.26 E-05	0.00 E+00		73.85	79.73
1.25	20	31. 2	0.002 3077	384 029	8089 36			0.321 9114	0.6780 88628	0		0.00 074	0.0015 6482	0		3.0177 1E-05	6.36 E-05	0.00 E+00		62.42	67.81
1.58 333	20	31. 82	0.002 2627	448 557	5890 13			0.432 3149	0.5676 85072	0		0.00 098	0.0012 84517	0		3.9737 1E-05	5.22 E-05	0.00 E+00		50.51	56.77
1.91 667	20	33. 88	0.002 1251	484 464	4528 99			0.516 8371	0.4831 62873	0		0.00 11	0.0010 26792	0		4.4617 6E-05	4.17 E-05	0.00 E+00		44.44	48.32
2.25	20	32. 84	0.002 1924	500 018	3634 68	276		0.578 884	0.4207 96469	0.00 032		0.00 127	0.0009 22574	159.7 7198		5.1556 6E-05	3.75 E-05	6.49 E+00		35.79	42.09
2.66 667	20	34. 14	0.002 109	519 581	3140 35	295		0.623 0653	0.3765 80954	0.00 0354		0.00 131	0.0007 94195	183.8 0426		5.3378 4E-05	3.23 E-05	7.47 E+00		33.52	37.67
3	20	33. 65	0.002 1397	526 236	2885 33	292		0.645 64	0.3540 01725	0.00 0358		0.00 138	0.0007 57448	188.5 2689		5.6117 8E-05	3.08 E-05	7.66 E+00		30.11	35.41
3.41 667	20	34. 13	0.002 1096	532 440	2645 97	343		0.667 7368	0.3318 33003	0.00 043		0.00 141	0.0007 00029	229.0 3374		5.7222 2E-05	2.84 E-05	9.30 E+00		28.74	33.20
3.83 333	20	35. 4	0.002 0339	542 470	2477 84	354		0.686 1428	0.3134 09427	0.00 0448		0.00 14	0.0006 37443	242.8 9456		5.6690 1E-05	2.59 E-05	9.87 E+00		29.40	31.35
4.25	20	35. 29	0.002 0402	539 676	2278 43	348		0.702 8248	0.2967 21958	0.00 0453		0.00 143	0.0006 05383	244.5 8304		5.8249 3E-05	2.46 E-05	9.94 E+00		27.46	29.69
4.75	20	36. 67	0.001 9635	569 028	2250 51	383		0.716 2432	0.2832 74719	0.00 0482		0.00 141	0.0005 56198	274.3 2114		5.7127 5E-05	2.26 E-05	1.11 E+01		28.86	28.34
5.25	20	37. 62	0.001 9139	564 991	2100 03	383		0.728 6662	0.2708 39862	0.00 0494		0.00 139	0.0005 18354	279.0 7915		5.6650 7E-05	2.11 E-05	1.13 E+01		29.45	27.10
6	20	37. 63	0.001 9134	565 828	1972 87	383		0.741 0995	0.2583 98843	0.00 0502		0.00 142	0.0004 94412	283.8 4112		5.7602 E-05	2.01 E-05	1.15 E+01		28.26	25.85
6.5	20	37. 84	0.001 9027	567 948	1882 42	415		0.750 6532	0.2487 9825	0.00 0549		0.00 143	0.0004 734	311.5 211		5.8020 8E-05	1.92 E-05	1.27 E+01		27.74	24.89
7	20	38.	0.001	574	1819	429		0.759	0.2403	0.00		0.00	0.0004	325.6		5.8335	1.85	1.32		27.35	24.05

		06	8917	795	64			1179	15483	0567		144	54617	616		9E-05	E-05	E+01					
7.5	20	38.41	0.0018745	574795	181964	429		0.7591179	0.240315483	0.000567		0.00142	0.000450474	325.6616		5.78044E-05	1.83E-05	1.32E+01		28.01	24.05		
8	20	38.413	0.0018744	582749	167022	457		0.7767625	0.222628321	0.000609		0.00146	0.000417287	354.98048		5.91433E-05	1.70E-05	1.44E+01		26.35	22.28		
8.5	20	37.83	0.0019033	581842	158814	435		0.7851155	0.214297569	0.000587		0.00149	0.000407862	341.52522		6.07006E-05	1.66E-05	1.39E+01		24.41	21.44		
9	20	36.45	0.0019753	591441	145015	394		0.8026613	0.196803963	0.000535		0.00159	0.000388749	316.24856		6.44066E-05	1.58E-05	1.28E+01		19.79	19.69		

3.6 Uji pada $W/F = 0,006$, $T = 700^{\circ}\text{C}$, Rasio $\text{CH}_4:\text{H}_2 = 4:1$

t (h)	Vol. Bub. (ml)	Output		Peak Area				Komposisi gas (y, %)				Volume (m ³ /h)				Out molar flow rate (kmol/h)				X CH_4 (%)	Purity H_2 (%)
		t.bub (s)	flow (m ³ /hr)	CH_4	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2	CO	CO_2	CH_4	H_2	CO	CO_2		
0.08333	20	35	0.0021	145170	1484484	5161	232	0.0887864	0.907915185	0.003156	0.0001	0.00018018	0.001667711	6.493E-06	7.41949E-06	7.59E-05	2.64E-07			88.09	91.09
0.25	20	37.26	0.0019	198069	1416645			0.1226651	0.877334934			0.00024	0.001695333		9.62883E-06	6.89E-05	0.00E+00			84.54	87.73
0.75	20	38.53	0.0019	208983	1404707			0.1295063	0.870493713			0.00024	0.001626669		9.83077E-06	6.61E-05	0.00E+00			84.22	87.05
1	20	39.5	0.0018	206670	1412426			0.1276453	0.872354697			0.00023	0.001590115		9.45156E-06	6.46E-05	0.00E+00			84.83	87.24
2.33333	20	44.6	0.0016	201268	1434184			0.1230657	0.876934328			0.0002	0.001415679		8.07045E-06	5.75E-05	0.00E+00			87.04	87.69
2.66	20	45.	0.00	215	1384			0.134	0.8653			0.00	0.0013		8.6464	5.56	0.00			86.12	86.53

Universitas Indonesia

667		55	16	410	282			6572	42828			021	67831			3E-06	E-05	E+00				
3	20	43. 23	0.00 17	217 273	1395 440			0.134 7251	0.8652 74851			0.00 022	0.0014 41124			9.1150 5E-06	5.85 E-05	0.00 E+00			85.37	86.53
3.5	20	48. 772	0.00 15	217 349	1397 947			0.134 5568	0.8654 43238			0.00 02	0.0012 77617			8.0692 E-06	5.19 E-05	0.00 E+00			87.05	86.54
4.75	20	48. 88	0.00 15	217 729	1419 674			0.132 9722	0.8670 27848			0.00 02	0.0012 77128			7.9565 6E-06	5.19 E-05	0.00 E+00			87.23	86.70
5.08 333	20	50 14	0.00 14	216 033	1410 253			0.132 8383	0.8671 61742			0.00 019	0.0012 48713			7.7705 E-06	5.07 E-05	0.00 E+00			87.53	86.72
5.41 667	20	48. 95	0.00 15	216 578	1400 181			0.133 9581	0.8660 41878			0.00 02	0.0012 73851			8.0040 9E-06	5.17 E-05	0.00 E+00			87.15	86.60
6.66 667	20	50. 96	0.00 14	256 675	1321 522			0.162 6381	0.8373 61876			0.00 023	0.0011 83086			9.3344 5E-06	4.81 E-05	0.00 E+00			85.01	83.74
7	20	52. 9	0.00 14	230 507	1373 180			0.143 7357	0.8562 64346			0.00 02	0.0011 65426			7.9470 2E-06	4.73 E-05	0.00 E+00			87.24	85.63
7.33 333	20	54. 4	0.00 13	232 612	1361 634			0.145 9072	0.8540 92781			0.00 019	0.0011 30417			7.8446 5E-06	4.59 E-05	0.00 E+00			87.41	85.41
7.66 667	20	54. 07	0.00 13	229 048	1373 375			0.142 9385	0.8570 61463			0.00 019	0.0011 41269			7.7319 4E-06	4.64 E-05	0.00 E+00			87.59	85.71
8.91 667	20	54. 5	0.00 13	243 807	1352 075			0.152 7726	0.8472 27427			0.00 02	0.0011 19273			8.1986 9E-06	4.55 E-05	0.00 E+00			86.84	84.72
9	20	54. 97	0.00 13	230 011	1371 596			0.143 6126	0.8563 87366			0.00 019	0.0011 21701			7.6412 2E-06	4.56 E-05	0.00 E+00			87.73	85.64

3.7 Uji pada W/F = 0,006 , T= 750°C, Rasio CH₄:H₂ = 1:1

t (h)	Vol. Bub. (ml)	Output		Peak Area				Komposisi gas (y, %)				Volume (m ³ /h)				Out molar flow rate (kmol/h)				X CH ₄ (%)	Purity H ₂ (%)
		t.b ub (s)	flow (m ³ /hr)	CH ₄	H ₂	C O	C O ₂	CH ₄	H ₂	C O	C O ₂	CH ₄	H ₂	C O	C O ₂	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂		
0.0833 33333	20	12. 57	0.0057 27924	173 966	1490 885			0.104 4934	0.8955 06565			0.00 06	0.0051 29393			2.4313 6E-05	2.08 E-04	0.00E +00		70.11	89.55
0.1666 66667	20	12. 3	0.0058 53659	188 220	1478 852			0.112 9045	0.8870 95458			0.00 066	0.0051 92754			2.6847 4E-05	2.11 E-04	0.00E +00		67.00	88.71
0.3333 33333	20	12. 58	0.0057 2337	189 612	1493 627			0.112 6471	0.8873 52895			0.00 064	0.0050 78649			2.619E -05	2.06 E-04	0.00E +00		67.81	88.74
0.5	20	12. 88	0.0055 90062	185 732	1431 905			0.114 8169	0.8851 83141			0.00 064	0.0049 48229			2.6072 7E-05	2.01 E-04	0.00E +00		67.95	88.52
0.75	20	12. 55	0.0057 37052	193 503	1489 330			0.114 9865	0.8850 13546			0.00 066	0.0050 77369			2.6797 8E-05	2.06 E-04	0.00E +00		67.06	88.50
1	20	12. 64	0.0056 96203	194 518	1481 375			0.116 0683	0.8839 31731			0.00 066	0.0050 35054			2.6857 3E-05	2.05 E-04	0.00E +00		66.99	88.39
1.5	20	12. 58	0.0057 2337	195 936	1482 694			0.116 7238	0.8832 76243			0.00 067	0.0050 55317			2.7137 8E-05	2.05 E-04	0.00E +00		66.64	88.33
2	20	12. 56	0.0057 32484	192 869	1494 650			0.114 2915	0.8857 08546			0.00 066	0.0050 7731			2.6614 6E-05	2.06 E-04	0.00E +00		67.28	88.57
2.5	20	12. 57	0.0057 27924	195 085	1496 056			0.115 357	0.8846 42972			0.00 066	0.0050 67167			2.6841 4E-05	2.06 E-04	0.00E +00		67.01	88.46
3	20	12. 85	0.0056 03113	182 961	1520 069			0.107 4326	0.8925 67365			0.00 06	0.0050 01156			2.4452 8E-05	2.03 E-04	0.00E +00		69.94	89.26
3.5	20	12. 6	0.0057 14286	199 384	1471 726			0.119 3123	0.8806 87687			0.00 068	0.0050 32501			2.7695 6E-05	2.04 E-04	0.00E +00		65.96	88.07
4	20	12. 64	0.0056 96203	198 057	1474 745			0.118 3984	0.8816 01648			0.00 067	0.0050 21782			2.7396 4E-05	2.04 E-04	0.00E +00		66.32	88.16
4.5	20	13. 8	0.0052 17391	200 135	1488 059			0.118 5498	0.8814 50236			0.00 062	0.0045 98871			2.5125 6E-05	1.87 E-04	0.00E +00		69.12	88.15

Universitas Indonesia

5	20	16.3	0.0044 17178	190 591	1533 047			0.110 5748	0.8894 25158			0.00 049	0.0039 28749			1.9841 E-05	1.60 E-04	0.00E +00		75.61	88.94
5.5833 33333	20	16.06	0.0044 83188	192 197	1532 218			0.111 4563	0.8885 43651			0.00 05	0.0039 83508			2.0298 1E-05	1.62 E-04	0.00E +00		75.05	88.85
6	20	15.84	0.0045 45455	217 717	1494 744			0.127 1369	0.8728 6309			0.00 058	0.0039 6756			2.3475 4E-05	1.61 E-04	0.00E +00		71.14	87.29
6.5	20	17.16	0.0041 95804	212 160	1542 111			0.120 9391	0.8790 60875			0.00 051	0.0036 88367			2.0613 2E-05	1.50 E-04	0.00E +00		74.66	87.91
7	20	16.7	0.0043 11377	219 498	1570 593			0.122 6183	0.8773 81653			0.00 053	0.0037 82723			2.1475 1E-05	1.54 E-04	0.00E +00		73.60	87.74
7.5	20	17	0.0042 35294	215 645	1620 147			0.117 467	0.8825 32988			0.00 05	0.0037 37787			2.0209 8E-05	1.52 E-04	0.00E +00		75.16	88.25
8	20	17.16	0.0041 95804	222 736	1634 304			0.119 9414	0.8800 58588			0.00 05	0.0036 92554			2.0443 1E-05	1.50 E-04	0.00E +00		74.87	88.01
8.25	20	17.06	0.0042 20399	228 595	1647 812			0.121 8259	0.8781 74085			0.00 051	0.0037 06245			2.0886 E-05	1.51 E-04	0.00E +00		74.33	87.82
8.5	20	17.15	0.0041 98251	219 567	1697 015			0.114 5618	0.8854 38244			0.00 048	0.0037 17292			1.9537 6E-05	1.51 E-04	0.00E +00		75.98	88.54
8.75	20	17.12	0.0042 05607	222 895	1712 751			0.115 1528	0.8848 47229			0.00 048	0.0037 2132			1.9672 8E-05	1.51 E-04	0.00E +00		75.82	88.48
9	20	17.14	0.0042 007	236 532	1706 349			0.121 7429	0.8782 57083			0.00 051	0.0036 89295			2.0774 4E-05	1.50 E-04	0.00E +00		74.46	87.83

Lampiran 4. Kestimbangan Termodinamika

Reaksi: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^2$$

$$T_0 = 298.15 \text{ K}$$

$$R = 1.987 \text{ cal/mol.K}$$

Spesies	vi	A	B	C	D	Ho	Go
CH4	-1	5.34	0.0115	0	0	-17798.80	-12059.329
C	1	2.673	0.002617	0	-116900	0	0
H2	2	6.62	0.00081	0	0	0	0
Total		10.573	-0.007263	0	-116900	17798.7965	12059.33
		ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	ΔH_0	ΔG_0

$$\Delta H^\circ = \Delta H_0^\circ + R \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^\circ}{R} dT$$

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^\circ}{R} dT = (\Delta A)T_0(\tau - 1) + \frac{\Delta B}{2} T_0^2(\tau^2 - 1) + \frac{\Delta C}{3} T_0^3(\tau^3 - 1) + \frac{\Delta D}{T_0} \left(\frac{\tau - 1}{\tau} \right)$$

$$\tau = T / T_0$$

$$\frac{\Delta G^\circ}{RT} = \frac{\Delta G_0^\circ - \Delta H_0^\circ}{RT_0} + \frac{\Delta H_0^\circ}{RT} + \frac{1}{T} \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^\circ}{R} dT - \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^\circ}{R} \frac{dT}{T}$$

$$\int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^\circ}{R} \frac{dT}{T} = \Delta A \ln \tau + \left[\Delta B T_0 + \left(\Delta C T_0^2 + \frac{\Delta D}{\tau^2 T_0^2} \right) \left(\frac{\tau + 1}{2} \right) \right] (\tau - 1)$$

$$\ln K = -\Delta G^\circ / RT$$

Keterangan:

ΔH° = Entalpi perubahan standar pada reaksi, J

C_p° = Kapasitas panas pada tekanan konstan saat keadaan standar, $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

τ = Rasio temperatur (T/T_0)

ΔG° = Energi Gibbs standar pada reaksi, J mol^{-1}

R = Konstanta gas ; $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

K = Konstanta kesetimbangan reaksi

T_0 = Temperatur referensi, K

A, B, C, D = parameter pada persamaan kapasitas panas

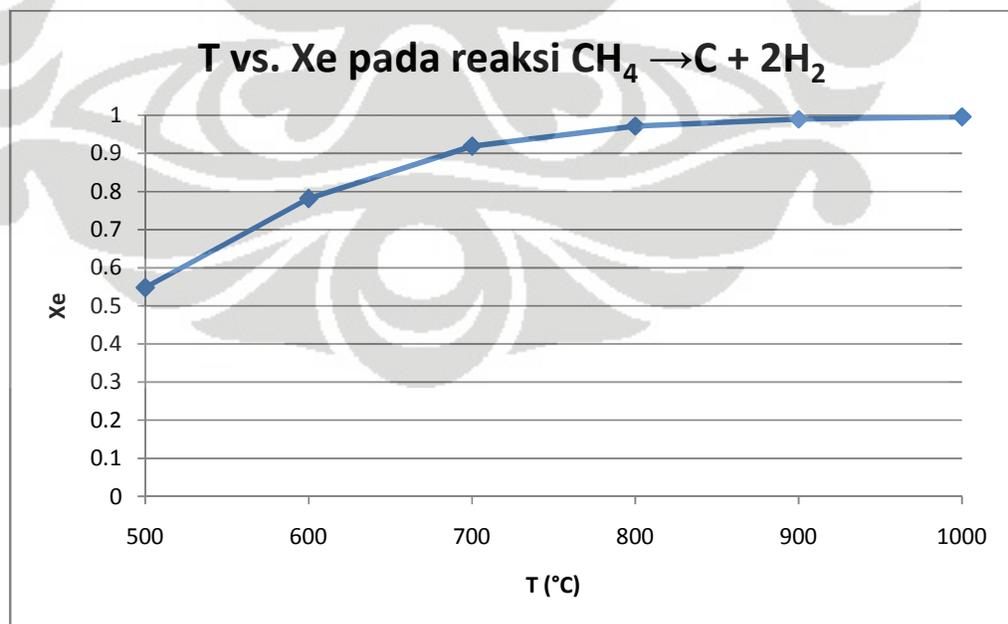
Universitas Indonesia

(lanjutan)

T (°C)	T (K)	τ	int 1	ΔH	int 2	$\Delta G/RT$	K	Xe	K (Xe)
500	773.15	2.593	2933.337	23627.34	6.065	- 0.373307	1.452530	0.547646	0.000138
600	873.15	2.928	3375.467	24505.85	6.603	- 2.166995	8.732010	0.781422	1.26E-05
700	973.15	3.263	3748.525	25247.12	7.008	- 3.640290	38.102921	0.918620	0.000146
800	1073.15	3.599	4051.518	25849.16	7.305	- 4.871558	130.524202	0.971868	0.000606
900	1173.15	3.934	4283.789	26310.69	7.513	- 5.914298	370.294422	0.989533	-0.00023
1000	1273.15	4.270	4444.888	26630.79	7.645	- 6.806488	903.691481	0.995631	-0.0002

Dari gb equilibrium constants over the range 400-5000K (Michael Modell and Robert C. Reid, Thermodynamics and Its Applications)

log Kp	Kp	Xe	K (Xe)
-0.343	0.453942	0.406811	-4.7E-05
0.411	2.576321	0.623599	-0.00074
0.892	7.798301	0.767817	-3.4E-05
1.219	16.5577	0.851076	-6.9E-05
1.519	33.03695	0.890745	7.161937
1.819	65.91739	0.941664	8.662934



Universitas Indonesia

Lampiran 5. Hasil Eksperimen

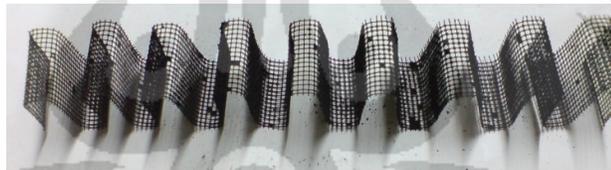
3.4 Uji pada $W/F = 0,006$, $T= 700^{\circ}\text{C}$, Rasio $\text{CH}_4:\text{H}_2 = 1:0$



3.5 Uji pada $W/F = 0,0032$, $T= 700^{\circ}\text{C}$, Rasio $\text{CH}_4:\text{H}_2 = 1:0$



3.6 Uji pada $W/F = 0,0006$, $T= 700^{\circ}\text{C}$, Rasio $\text{CH}_4:\text{H}_2 = 1:0$



3.4 Uji pada $W/F = 0,006$, $T= 750^{\circ}\text{C}$, Rasio $\text{CH}_4:\text{H}_2 = 1:0$



(lanjutan)

3.5 Uji pada $W/F = 0,006$, $T= 800^{\circ}\text{C}$, Rasio $\text{CH}_4:\text{H}_2 = 1:0$



3.6 Uji pada $W/F = 0,006$, $T= 700^{\circ}\text{C}$, Rasio $\text{CH}_4:\text{H}_2 = 4:1$



3.7 Uji pada $W/F = 0,006$, $T= 750^{\circ}\text{C}$, Rasio $\text{CH}_4:\text{H}_2 = 1:1$

