

**PENGARUH PERLAKUAN ULTRASONIK PADA  
PREPARASI KATALIS Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DENGAN  
METODE KOPRESIPITASI TERHADAP  
KUALITAS KARBON NANOTUBE PADA  
REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA**

**SKRIPSI**

Oleh

**FELANY WIJAYA**

**04 04 06 026 8**



**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GENAP 2007/2008**

**PENGARUH PERLAKUAN ULTRASONIK PADA  
PREPARASI KATALIS Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DENGAN  
METODE KOPRESIPITASI TERHADAP  
KUALITAS KARBON NANOTUBE PADA  
REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA**

**SKRIPSI**

Oleh

**FELANY WIJAYA**

**04 04 06 026 8**



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN  
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GENAP 2007/2008**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

**PENGARUH PERLAKUAN ULTRASONIK PADA PREPARASI  
KATALIS Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DENGAN METODE KOPRESIPITASI  
TERHADAP KUALITAS KARBON NANOTUBE PADA  
REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 27 Juni 2008

Felany Wijaya

04 04 06 026 8

# PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

**PENGARUH PERLAKUAN ULTRASONIK PADA PREPARASI  
KATALIS Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DENGAN METODE KOPRESIPITASI  
TERHADAP KUALITAS KARBON NANOTUBE PADA  
REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 9 Juli 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 10 Juli 2008

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2

**Prof.Dr.Ir.Widodo W. P., DEA**

NIP 131 627 864

**Dr.rer.nat.Ir.Yuswan M., MT.**

NIP 132 137 886

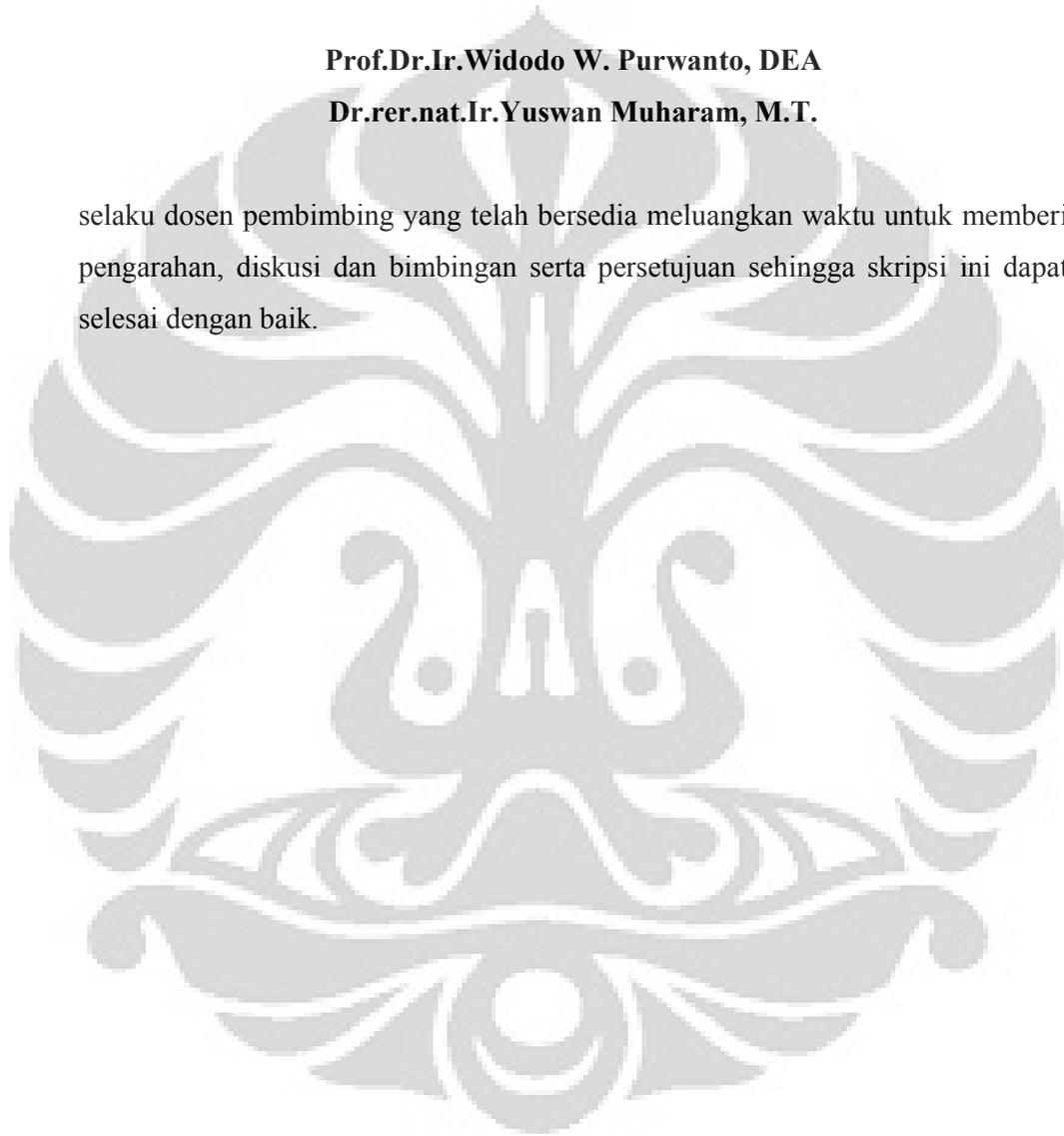
## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

**Prof.Dr.Ir.Widodo W. Purwanto, DEA**

**Dr.rer.nat.Ir.Yuswan Muharam, M.T.**

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.



Felany Wijaya  
NPM 04 04 06 026 8  
Departemen Teknik Kimia

Dosen Pembimbing  
I. Prof. Dr. Ir. Widodo W.P., DEA  
II. Dr.rer.nat.Ir.Yuswan M., MT.

**PENGARUH PERLAKUAN ULTRASONIK PADA PREPARASI  
KATALIS Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DENGAN METODE KOPRESIPITASI  
TERHADAP KUALITAS KARBON NANOTUBE PADA  
REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA**

**ABSTRAK**

Nanokarbon merupakan salah satu produk nanoteknologi yang paling berkembang saat ini. Nanokarbon yang paling banyak dikaji adalah karbon nanotube karena sifat dan strukturnya yang unik, sehingga mempunyai banyak aplikasi, seperti sebagai penyimpan hidrogen, *nanoscale transistor*, *flat panel display*, superkapasitor, *nanoprobes* dan sensor, dan sebagai katalis.

Terdapat batasan struktur nanotubes yang digunakan untuk setiap aplikasi. Karbon nanotubes yang berkualitas baik sebagai penyimpan hidrogen adalah karbon nanotubes yang *single-walled*, berdiameter kecil, panjang, dan seragam. Kualitas karbon nanotubes selain dipengaruhi oleh temperatur reaksi dekomposisi katalitik metana, juga dipengaruhi oleh ukuran partikel katalis. Salah satu hal yang dapat mempengaruhi ukuran partikel katalis adalah metode preparasi katalis.

Pada penelitian ini, pengaruh dari perlakuan ultrasonik pada katalis Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> terhadap diameter inti aktif Ni dan kualitas karbon nanotube dievaluasi pada reaksi dekomposisi katalitik metana pada temperatur 650°C. Katalis dipreparasi dengan menggunakan metode kopresipitasi dengan variasi perlakuan ultrasonik pada tahap sebelum dan sesudah tahap agglomerasi selama 0, 30, 60, dan 90 menit. Ukuran diameter NiO dikarakterisasi dengan menggunakan XRD dan morfologi produk nanokarbon dengan menggunakan TEM.

Semakin lama perlakuan ultrasonik selama preparasi katalis memperbesar ukuran diameter NiO, tanpa perlakuan ultrasonik diperoleh diameter berdiameter paling kecil yaitu 14,50 nm. Dan katalis dengan loading tertinggi yaitu SB-30U menghasilkan konversi metana rata-rata dan *yield* hidrogen rata-rata yaitu 76,70% dan 35,95% pada uji aktivitas selama 520 menit. Katalis SB-30 U memiliki waktu hidup selama 18 jam 20 menit, dan memiliki konversi metana dan *yield* hidrogen rata-rata sebesar 85,27% dan 20,19%. Dari hasil TEM diketahui bahwa nanokarbon yang dihasilkan sebagian besar merupakan karbon nanofiber dan sebagian kecil karbon nanotube dengan diameter antara 20-230 nm.

**Kata kunci: Karbon nanotube, ultrasonik, reaksi dekomposisi katalitik metana, ukuran partikel katalis.**

Felany Wijaya  
NPM 04 04 06 026 8  
Chemical Engineering Department

Counsellor  
I. Prof. Dr. Ir. Widodo W.P., DEA  
II. Dr.rer.nat.Ir.Yuswan M., MT.

**EFFECT OF ULTRASONIC IRRADIATION TO THE  
COPRECIPITATED Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> CATALYST TO  
THE CARBON NANOTUBE QUALITY BY  
CATALYTIC DECOMPOSITION OF METHANE**

**ABSTRACT**

Nowadays, nanocarbon is one of the most developed nanotechnology product. Carbon nanotubes is the most conducted nanocarbon because of its unique properties and structures, therefore it is applied as a hydrogen storage, nanoscale transistor, flat panel display, supercapasitor, nanoprobes and sensor, and as a catalyst.

However there is a structure limitation of carbon nanotubes for every application. Carbon nanotubes that is fit for hydrogen storage, has single-walled, small diameter, long, and uniform. Quality of carbon nanotubes is not only influenced by the catalytic decomposition of methane reaction temperatur, but also by catalyst particle size which is influenced by catalyst preparation method.

In this research, the effect of ultrasonic irradiation on Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst to the particle size of Ni and also to the quality of carbon nanotubes is evaluated in the catalytic decomposition of methane reaction at 650°C. Catalyst is prepared by coprecipitation method with different period of ultrasonic irradiation before and after agglomeration step. The particle size of NiO is characterized by XRD and nanocarbon morphology by TEM.

The longer ultrasonic irradiation period in the catalyst preparation, the bigger size of Ni particle size. Without ultrasonic irradiation, NiO particle size is smaller, which is 14,50 nm. SB-30U catalyst which has highest loading of Ni has average conversion of methane and average hydrogen yield 76,70% and 35,95%. Besides that, SB-30U catalyst's lifetime is 18 hours and 20 minutes, and it has average conversion of methane and hydrogen yield 85,27% and 20,19%. From TEM, most of the nanocarbon is recognized as carbon nanofiber and the rest is carbon nanotube with diameter range 20-230 nm.

**Keywords: Carbon nanotube, ultrasonic, catalytic decomposition of methane, particle size of catalyst.**

# DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vi
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN .....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 RUMUSAN MASALAH.....	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	3
1.4 BATASAN MASALAH.....	3
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 TINJAUAN UMUM DEKOMPOSISI KATALITIK METANA .....	5
2.2 PRODUK DEKOMPOSISI KATALITIK METANA.....	6
2.2.1 Hidrogen .....	6
2.2.2 Nanokarbon.....	7
2.3 KARBON NANOTUBE (CNT).....	9

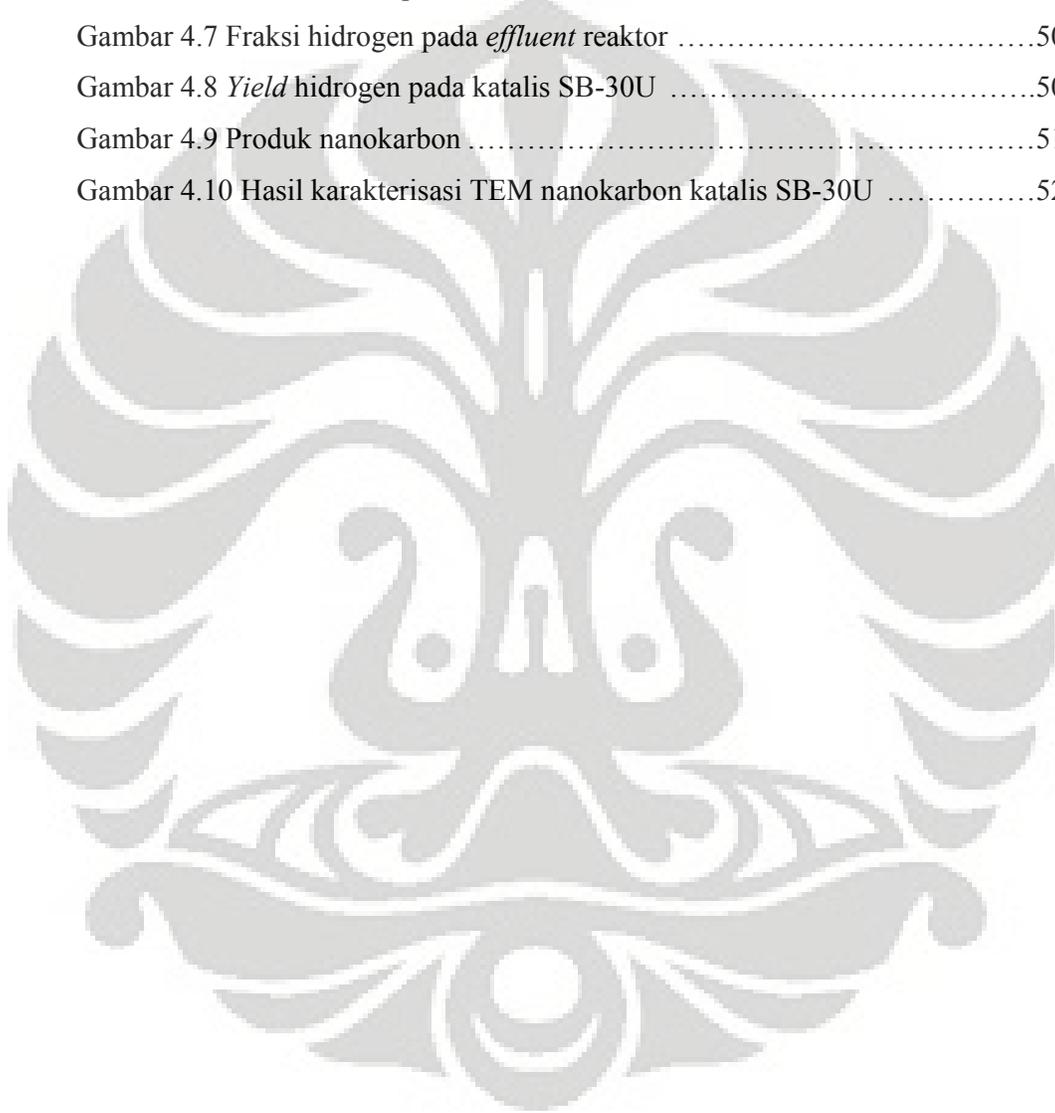
2.3.1 Jenis-jenis Karbon Nanotube .....	9
2.3.2 Karakteristik Karbon Nanotubes.....	12
2.3.3 Aplikasi Karbon Nanotubes .....	13
2.3.4 Sintesis Karbon Nanotubes .....	15
2.4 MEKANISME PERTUMBUHAN KARBON NANOTUBE PADA REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA .....	17
2.5 KATALIS PADA REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA....	20
2.5.1 Inti aktif.....	20
2.5.2 Penyangga ( <i>support</i> ) .....	21
2.5.3 Promotor .....	21
2.6 METODE PREPARASI KATALIS PADA REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA .....	24
2.6.1 Metode Presipitasi.....	25
2.6.2 Metode Perlakuan Ultrasonik.....	27
BAB III METODE PENELITIAN .....	31
3.1 ALUR PENELITIAN .....	31
3.2 PREPARASI KATALIS.....	32
3.2.1 Alat dan Bahan.....	32
3.2.2 Prosedur Preparasi .....	32
3.3 KARAKTERISASI KATALIS.....	35
3.4 KALIBRASI ALAT.....	36
3.5 UJI AKTIVITAS KATALIS .....	36
3.6 KARAKTERISASI PRODUK NANOKARBON.....	38
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 HASIL KARAKTERISASI KATALIS .....	39
4.1.1 Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF).....	39

4.1.2 Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....	40
4.2 UJI AKTIVITAS KATALIS .....	43
4.2.1 Uji Aktivitas Katalis dengan Iradiasi Ultrasonik Sebelum Tahap Agglomerasi .....	44
4.2.2 Uji Aktivitas Katalis dengan Iradiasi Ultrasonik Setelah Tahap Agglomerasi .....	46
4.3 UJI STABILITAS KATALIS .....	48
4.4 MORFOLOGI NANOKARBON .....	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	53
5.1 KESIMPULAN .....	53
5.2 SARAN .....	54
DAFTAR ACUAN .....	55
LAMPIRAN .....	59

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Diagram struktur nanokarbon .....	8
Gambar 2.2 Skema 2D dari lembaran grafit.....	10
Gambar 2.3 Struktur SWNT yang mungkin terbentuk dari berbagai vektor kiral .....	11
Gambar 2.4 <i>Armchair</i> , <i>zigzag</i> , dan <i>chiral</i> SWNT dan penutupnya sesuai dengan <i>fullerene</i> yang bersesuaian .....	11
Gambar 2.5 MWNT.....	12
Gambar 2.6 Struktur ikatan heksagonal pada lembaran grafit.....	13
Gambar 2.7 Skema transistor CNT.....	15
Gambar 2.8 Mekanisme reaksi permukaan dekomposisi katalitik metana.....	17
Gambar 2.9 Mekanisme pembentukan nukleus pada pertumbuhan (a) karbon nanofilamen; (b) MWNT; dan (c) SWNT .....	19
Gambar 2.10 Skema pertumbuhan CNT.....	19
Gambar 2.11 Katalis dan penyusunnya .....	20
Gambar 2.12 Susunan <i>textural promoter</i> HRO pada struktur matriks NiO.....	22
Gambar 2.13 Hubungan antara kelarutan terhadap konsentrasi dan temperatur dalam proses pengendapan .....	26
Gambar 2.14 Interaksi energi dan bahan .....	28
Gambar 2.15 Kavitasi Akustik pada cairan yang mengandung padatan.....	28
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	31
Gambar 3.2 Skema reaktor .....	37
Gambar 3.3 Reaktor unggul tetap yang terpasang <i>online</i> dengan kromatografi gas .....	37
Gambar 4.1 Katalis Ni/Cu/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	39
Gambar 4.2 Hasil Karakterisasi XRD untuk Katalis Ni/Cu/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dengan variasi perlakuan ultrasonik .....	41

Gambar 4.3 Pengaruh iradiasi ultrasonik terhadap ukuran kristal .....	43
Gambar 4.4 Perbandingan konversi CH <sub>4</sub> pada katalis dengan iradiasi ultrasonik sebelum tahap agglomerasi .....	45
Gambar 4.5 Perbandingan konversi CH <sub>4</sub> pada katalis dengan iradiasi ultrasonik setelah tahap agglomerasi .....	47
Gambar 4.6 Konversi CH <sub>4</sub> pada katalis SB-30U .....	49
Gambar 4.7 Fraksi hidrogen pada <i>effluent</i> reaktor .....	50
Gambar 4.8 <i>Yield</i> hidrogen pada katalis SB-30U .....	50
Gambar 4.9 Produk nanokarbon .....	51
Gambar 4.10 Hasil karakterisasi TEM nanokarbon katalis SB-30U .....	52



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Perbandingan Metode Sintesis CNT .....	16
Tabel 2.2 <i>Textural promoter</i> dan titik leburnya .....	23
Tabel 2.3 Reaksi Dekomposisi Metana dengan katalis Ni/Cu/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	24
Tabel 2.4 Iradiasi Ultrasonik pada Katalis untuk Aplikasi Tertentu.....	30
Tabel 3.1 Peralatan dalam preparasi katalis.....	32
Tabel 4.1 Perbandingan Komposisi Desain dan Komposisi Aktual Katalis Ni/Cu/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dari Hasil Karakterisasi XRF.....	40
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Diameter Partikel dari Data Karakterisasi XRD ....	42
Tabel 4.3 Hasil uji aktivitas katalis dengan iradiasi ultrasonik sebelum tahap agglomerasi .....	44
Tabel 4.4 Hasil uji aktivitas katalis dengan iradiasi ultrasonik setelah tahap agglomerasi .....	46
Tabel 4.5 Hasil uji stabilitas katalis SB-30U* .....	48

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
LAMPIRAN A KALIBRASI KROMATOGRAFI GAS.....	60
LAMPIRAN B KALIBRASI FLOWMETER .....	63
LAMPIRAN C PERHITUNGAN KOMPOSISI GAS.....	65
LAMPIRAN D DATA KARAKTERISASI XRF .....	67
LAMPIRAN E PERHITUNGAN DIAMETER PARTIKEL DAN HASIL KARAKTERISASI XRD .....	74
LAMPIRAN F VERIFIKASI LAJU ALIR MASUKAN METANA.....	90
LAMPIRAN G DATA UJI AKTIVITAS DAN STABILITAS KATALIS.....	92

## DAFTAR SINGKATAN



CNT	= Karbon Nanotube
SWNT	= <i>Single-walled Nanotube</i>
MWNT	= <i>Multi-walled Nanotube</i>
HRO	= <i>Hard to Reduced Oxide</i>
MDR	= <i>Methane Decompositon Reaction</i>
CNF	= Karbon Nanofiber
CVD	= <i>Chemical Vapour Deposition</i>
GC	= <i>Gas Chromatography</i>
XRF	= <i>X-Ray Fluoresence</i>
XRD	= <i>X-Ray Diffraction</i>
TEM	= <i>Transmission Electron Microscopy</i>

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Nanoteknologi digunakan untuk memproduksi suatu material ataupun alat yang berukuran nano. Selama beberapa tahun terakhir ini, nanoteknologi secara global telah berkembang pesat. Riset mengenai nanoteknologi telah berkembang lima kali lipat dari 1997 hingga 2002 [1]. Selain itu, pertumbuhan industri nanoteknologi diprediksi akan berkembang dari \$225 juta menjadi \$700 milyar dari tahun 2005 hingga tahun 2007 [2].

Salah satu produk nanoteknologi adalah nanokarbon. Nanokarbon merupakan material padat yang terdiri atas ikatan rantai karbon yang berbentuk bulat maupun pipa, yang berukuran kecil dalam skala nanometer. Dari semua bentuk nanokarbon yang dihasilkan, karbon nanotube adalah nanokarbon yang paling banyak dikaji dan dikembangkan karena strukturnya dan sifat fisiknya yang unik, serta mempunyai nilai tambah yang tinggi karena dapat digunakan sebagai penyimpan hidrogen, *nanoscale transistor*, *flat-panel display*, superkapasitor, *nanoprobes* dan sensor [3], dan katalis [4].

Salah satu metode dalam memproduksi karbon nanotubes adalah reaksi dekomposisi katalitik metana. Reaksi dekomposisi katalitik metana ( $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$   $\Delta H_{298\text{K}} = +75 \text{ kJ mol}^{-1}$  [5]) bersifat endotermik sehingga membutuhkan temperatur yang tinggi agar terjadi reaksi dekomposisi [6-7]. Oleh karena itu, digunakan katalis untuk menurunkan energi aktivasi, sehingga konversi maksimum dapat dicapai pada suhu yang lebih rendah.

Produksi karbon nanotube dengan menggunakan reaksi dekomposisi katalitik metana tidak memerlukan pemurnian produk, namun untuk mendapatkan kualitas bentuk yang diinginkan (nanotube berdiameter kecil dan seragam) dibutuhkan temperatur operasi yang cukup tinggi ( $>700^\circ\text{C}$ ) [8-9]. Padahal, pada temperatur tinggi katalis mudah terdeaktivasi, akibat deposit karbon yang menutupi permukaan katalis, sehingga menyebabkan *lifetime* katalis tidak

berlangsung lama. Oleh karena itu digunakan katalis berinti aktif nikel yang memiliki titik leleh yang rendah dan juga ditambah Cu sebagai *structural promoter* yang dapat menurunkan titik leleh suatu katalis [10] disamping dapat meningkatkan aktivitas katalis. Titik leleh yang rendah diperlukan karena syarat untuk terbentuknya karbon nanotube adalah katalis berada dalam keadaan *liquid* [9,11].

Karbon nanotube yang berkualitas baik sebagai penyimpan hidrogen adalah karbon nanotube yang *single-walled* (diameternya kecil), panjang, dan seragam [5]. Selain dipengaruhi oleh temperatur operasi, kualitas karbon nanotube dipengaruhi juga oleh diameter katalis. Penelitian menunjukkan bahwa ukuran nanokarbon yang dihasilkan sedikit lebih kecil daripada ukuran partikel inti aktif katalis [12]. Dan juga, pertumbuhan *Single-Walled Carbon Nanotube* (SWNT) terjadi pada katalis yang ukuran partikelnya lebih kecil [13].

Ukuran nanopartikel nikel sebagai inti aktif dapat dicegah untuk sintering saat kalsinasi dengan menambahkan *textural promoter* berupa *Hard Reduce Oxide* (HRO), yaitu alumina. Tanpa penambahan *textural promoter* ukuran partikel nikel menjadi lima kali dari ukuran semula setelah dikalsinasi hingga suhu 800°C. Sedangkan dengan *textural promoter*, ukuran rata-rata partikel nikel tidak berubah setelah dikalsinasi pada suhu yang sama [14]. Selain itu alumina, dimana dengan komposisi tertentu dan kenaikan temperatur, akan menghasilkan nanokarbon dalam bentuk nanotube seperti yang dikehendaki [6].

Ukuran diameter inti aktif katalis juga dapat dikontrol oleh metode preparasinya, seperti metode presipitasi, kopresipitasi, impregnasi, dan sol gel, maupun dengan metode kombinasi seperti, kopresipitasi-sol gel [6], dan kopresipitasi-impregnasi [14]. Penelitian sebelumnya dengan metode preparasi kopresipitasi dan variasi suhu kalsinasi, menghasilkan inti aktif katalis Ni berukuran 4-16 nm [7]. Selain itu juga ditemukan bahwa perlakuan ultrasonik pada katalis 5%NiO-CeO<sub>2</sub>/MgO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang dipreparasi secara sol gel-impregnasi mempunyai diameter 2,63 nm dan tanpa perlakuan ultrasonik adalah 3,15 nm [15]. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan ultrasonik selama preparasi katalis akan memberikan diameter katalis yang lebih kecil, karena energi ultrasonik yang diberikan menyebabkan proses tumbukan antar partikel sangat

cepat sehingga memungkinkan pergerakan atom-atom memecah ukuran partikel ukuran besar menjadi semakin kecil.

## 1.2 RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan di atas, maka rumusan masalahnya adalah bagaimana pengaruh perlakuan ultrasonik terhadap ukuran inti aktif katalis dalam rangka meningkatkan kualitas karbon nanotubes yang dihasilkan pada reaksi dekomposisi katalitik metana.

## 1.3 TUJUAN PENELITIAN

Adapun, penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan informasi pengaruh perlakuan ultrasonik terhadap ukuran inti aktif katalis dalam rangka meningkatkan kualitas karbon nanotubes yang dihasilkan pada reaksi dekomposisi katalitik metana.

## 1.4 BATASAN MASALAH

Batasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Katalis yang digunakan adalah Ni sebagai inti aktif dengan penambahan Cu sebagai *structural promoter (second metal)* dan  $Al_2O_3$  sebagai *textural promoter* dengan komposisi yang sama.
2. Katalis dipreparasi dengan metode kopresipitasi dan perlakuan ultrasonik diberikan pada sebelum dan setelah tahap agglomerasi.
3. Kondisi reaksi untuk setiap uji aktivitas dan stabilitas katalis sama.

## 1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

### BAB I Pendahuluan

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

### BAB II Tinjauan Pustaka

Berisi tinjauan literatur mengenai reaksi dekomposisi metana, produk reaksi dekomposisi metana yang antara lain: gas hidrogen dan karbon nanotube, mekanisme pertumbuhan karbon nanotube pada reaksi dekomposisi metana, katalis yang digunakan beserta metode preparasinya.

### BAB III Metode Penelitian

Berisi penjelasan mengenai prosedur penelitian secara umum, termasuk di dalamnya preparasi katalis, uji aktivitas dan stabilitas katalis, karakterisasi terhadap katalis dan produk nanokarbon.

### BAB IV Hasil dan Pembahasan

Berisi uraian dan analisa terhadap data karakterisasi katalis, data uji aktivitas katalis, data uji stabilitas katalis, dan juga data karakterisasi produk nanokarbon.

### BAB V Kesimpulan

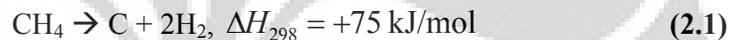
Berisi kesimpulan atas penelitian yang telah dilakukan.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 TINJAUAN UMUM DEKOMPOSISI KATALITIK 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 [5]. Salah satu contohnya adalah dekomposisi metana atau yang dikenal dengan *Methane Decomposition Reaction* (MDR) yang memutuskan ikatan H-C dari metana menjadi komponen yang lebih sederhana yaitu hidrogen dan karbon. Reaksinya [5]:



Analisis termodinamika reaksi dekomposisi metana menyatakan bahwa nilai untuk energi bebas Gibbs ( $\Delta G_r^\circ$ ) dan energi penguraian metana ( $\Delta H_r^\circ$ ) pada suhu 198 K, masing-masing sebesar 50.8 kJ/mol dan 75 kJ/mol [6]. Nilai  $\Delta G_r^\circ$  yang positif menunjukkan bahwa reaksi tidak akan bisa berjalan dengan spontan. Walaupun reaksi dapat berjalan, konversi yang dihasilkan tidak akan maksimal. Dan nilai  $\Delta H_r^\circ$  yang positif menandakan reaksi bersifat endotermis. Sehingga konversi akan meningkat seiring dengan meningkatnya suhu reaksi sehingga reaksi ini harus dilakukan pada temperatur sangat tinggi.

Temperatur reaksi memiliki peranan yang vital dalam tinjauan ekonomi suatu proses industri. Proses yang dilakukan pada temperatur yang lebih rendah jelas lebih menguntungkan daripada proses bertemperatur tinggi, karena lebih hemat dari segi energi. Oleh karena itu, untuk menurunkan temperatur reaksi perlu ditambahkan katalis yang dapat menurunkan energi aktivasi.

Pada proses ini dihasilkan dua jenis produk yang memiliki nilai tinggi yaitu *gas hidrogen free* CO-CO<sub>2</sub> dan material karbon dengan jenis yang berbeda. Perkembangan MDR pertama kalinya bertujuan untuk mendapatkan gas H<sub>2</sub> yang murni dan memiliki konsentrasi yang lebih besar. Selain itu, pada sektor energi

bahan bakar alternatif, hidrogen diarahkan untuk sel bahan bakar (*fuel cells*) yang akan menggantikan pembangkit tenaga listrik. Kemudian, setelah ditemukannya bentuk material karbon selain grafit dan intan yang diduga dapat terbentuk dari reaksi ini, maka perkembangan penelitian dekomposisi metana pun semakin pesat.

Sehingga sampai saat ini perkembangan penelitian dekomposisi metana secara umum, yaitu:

1. Dekomposisi metana secara termal (*thermal cracking*) yang menghasilkan hidrogen dan karbon hitam.
2. Dekomposisi katalitik metana dengan menggunakan katalis berdasar logam transisi (Fe, Co, dan Ni) yang menghasilkan jenis material karbon yang memiliki ukuran partikel nanometer yang biasa disebut dengan nanokarbon.

## **2.2 PRODUK DEKOMPOSISI KATALITIK METANA**

### **2.2.1 Hidrogen**

Hidrogen adalah bahan baku bebas polutan atau disebut juga sebagai *clean fuel*, karena pembakaran hidrogen hanya menghasilkan air saja. Selain itu energi yang dihasilkan oleh pembakaran hidrogen cukup tinggi, yaitu sebesar 286 kJ/mol atau 33.886 cal/g. Nilai ini lebih besar daripada energi pembakaran yang dihasilkan oleh bensin, yaitu berkisar 11.100-11.470 cal/g.

Selain diharapkan dapat menjadi bahan bakar alternatif, hidrogen telah banyak digunakan dalam sektor industri, seperti industri petroleum atau kimia. Misalnya dalam produksi amonia yang menggunakan hidrogen sebagai bahan baku utama. Dalam bidang energi, hidrogen digunakan sebagai bahan bakar *fuel cell* [16].

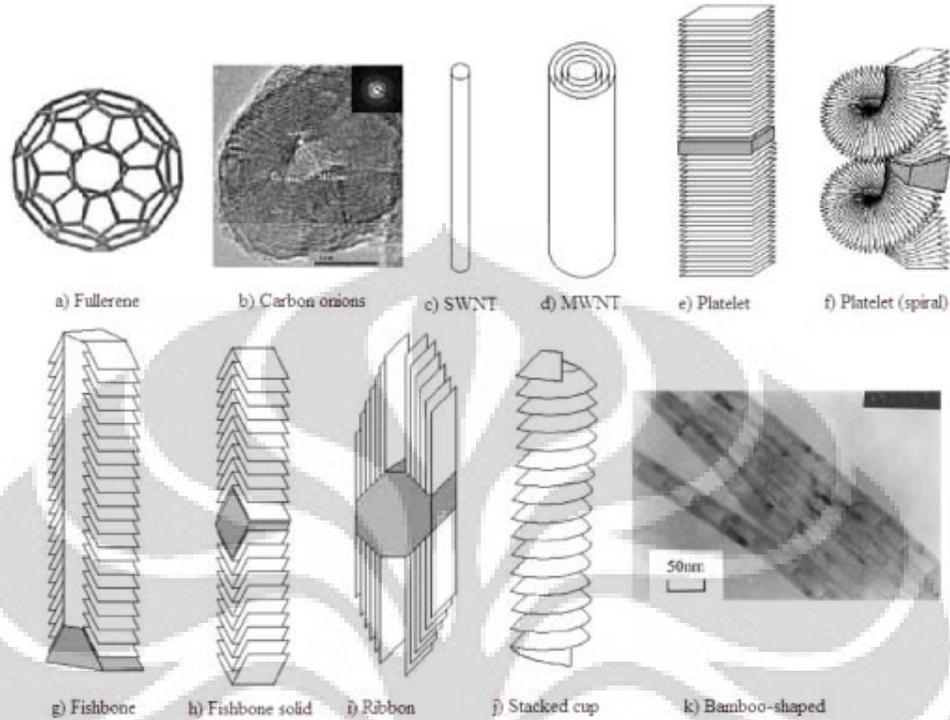
Walaupun hidrogen banyak terdapat di alam dalam bentuk persenyawaan dengan zat lain, misalnya air dan hidrokarbon, hidrogen dalam bentuk gas hanya berada dalam konsentrasi kecil di atmosfer bumi. Hal ini disebabkan karena berat molekulnya yang kecil, sehingga lebih mudah terlepas dari atmosfer bumi

dibandingkan dengan gas lain yang lebih berat. Kebutuhan gas hidrogen yang cukup tinggi dapat dipenuhi dari proses konversi dari air, gas alam, dan minyak bumi.

### 2.2.2 Nanokarbon

Nanokarbon didefinisikan sebagai material karbon yang diproduksi dengan ukuran dan struktur berskala nanometer. Material karbon yang paling dikenal adalah intan dan grafit. Intan memiliki karbon dengan empat ikatan  $sp^3$  membentuk susunan tiga dimensi yang simetris dan tersusun rapat. Sedangkan grafit memiliki karbon dengan tiga ikatan  $sp^2$  membentuk susunan dua dimensi berupa lembaran tersusun dari ikatan heksagonal atom-atom karbon  $sp^2$  [17]. Selain kedua jenis bentuk alotropik karbon di atas, ditemui juga bentuk alotropik karbon berukuran nanometer, yaitu:

1. *Fullerene* atau *buckminsterfullerene* atau *bucky ball*, yaitu lembaran grafit yang membentuk bola (Gambar 2.1(a)). *Fullerene* terdiri dari karbon-karbon  $sp^2$  dan  $sp^3$ . Contohnya adalah  $C_{60}$ , yaitu *fullerene* yang terdiri dari 12 cincin pentana dan 20 cincin heksana [17].
2. *Carbon onions* terdiri dari lapisan grafit yang konsentrik seperti bola (*quasi-spherical*) dan seperti pada Gambar 2.1(b) [18].
3. Karbon nanofilamen adalah nanokarbon berbentuk filamen. Secara umum, karbon nanofilamen terdiri dari karbon nanofiber (CNF) dan karbon nanotubes (CNT). Bentuk-bentuk nanofilamen yang diterima secara umum adalah:
  - a. Karbon nanotubes (CNT) berbentuk pipa, merupakan lapisan grafit yang berbentuk silinder (pipa). CNT dapat berupa *single-walled carbon nanotubes* (SWNT) yang hanya terdiri satu lapis lembaran grafit seperti pada Gambar 2.1(c), maupun *multi-walled carbon nanotubes* (MWNT) yang terdiri dari berlapis-lapis lembaran grafit yang konsentrik seperti pada Gambar 2.1(d). CNT akan dibahas lebih lanjut dalam sub-bab 2.3.



**Gambar 2.1 Diagram struktur nanokarbon [9,17-19]**

- b. *Platelet carbon nanofiber*, berupa lapisan grafit kecil yang tegak lurus dengan arah aksial fiber seperti pada Gambar 2.1(e). Nanofiber ini harus memiliki hidrogen atau atom lainnya dalam jumlah tak terbatas untuk stabilisasi piringan (*plate*). *Platelet carbon nanofiber* dapat pula berbentuk spiral (Gambar 2.1(f)). Biasanya, partikel padatan berada pada bagian tengah fiber [19].
- c. *Fishbone carbon nanofibers*, dimana lapisan grafit memiliki kemiringan dari sumbu aksialnya, dan dapat berinti kosong (*hollow core*) maupun berinti padatan (*solid core*) seperti pada Gambar 2.1(g) dan (h) [19]. Seperti platelet, juga dibutuhkan hidrogen untuk menstabilkan bagian ujungnya.

- d. *Ribbon carbon nanofibers* berupa lapisan grafit yang lurus dan tidak tergulung yang posisinya sejajar dengan sumbu aksial fiber (Gambar 2.1(i)) [19].
- e. *Stacked cup carbon nanofibers* berupa lapisan spiral grafit yang kontiniu sepanjang sumbu aksial fiber (Gambar 2.1(j)) [19].
- f. *Bamboo-shaped carbon filament*, berbentuk seperti bambu, dimana banyak terdapat ruang kosong dan *joint-joint* [9] seperti yang terlihat pada Gambar 2.1(k).

## 2.3 KARBON NANOTUBE (CNT)

Karbon nanotube pertama kali ditemukan oleh Sumio Iijima pada tahun 1991. Karbon nanotube merupakan lembaran grafit yang digulung membentuk tabung. Lembaran grafit ini tersusun dari ikatan heksagonal atom-atom karbon  $sp^2$ .

### 2.3.1 Jenis-jenis Karbon Nanotube

Berdasarkan jumlah lapisan grafitnya, CNT terbagi menjadi dua jenis, yaitu:

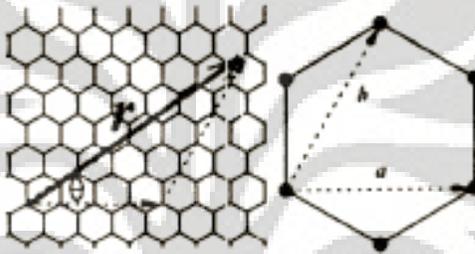
#### a. *Single-Walled Nanotubes* (SWNT)

SWNT terdiri dari dua bagian terpisah dengan sifat fisik dan kimia yang berbeda. Yang pertama adalah bagian dinding tabung dan kedua adalah bagian penutup tabung. Struktur bagian penutup tabung serupa dengan *fullerene*, dimana atom karbon membentuk ikatan heksagonal dan pentagonal pada bagian penutup tabung (*end caps*). Kombinasi dari bentuk pentagon dan heksagon ini menghasilkan bentuk penutup tabung setengah bola yang stabil. Menurut teori Euler, setiap penutup harus memiliki 6 pentagon yang terisolasi satu sama lain agar diperoleh energi permukaan yang minimal dan struktur yang stabil [20]. Struktur *fullerene* terkecil yang stabil yang dapat dibuat adalah C<sub>60</sub>, lalu C<sub>70</sub> dan berikutnya. Diameter CNT bergantung pada *semi-fullerene* pada bagian penutupnya itu [21].

Bagian lain pada CNT adalah dinding tabung yang berupa silinder yang terbentuk dari lembaran grafit dengan ukuran tertentu yang digulung pada arah tertentu pula. Gambar 2.2 di bawah ini menunjukkan lembaran grafit yang digulung searah vektor  $\mathbf{r}$ . Vektor  $\mathbf{r}$  atau disebut juga dengan vektor kiral, dapat dinyatakan sebagai kombinasi linear dari vektor basis  $\mathbf{a}$  dan  $\mathbf{b}$  pada heksagonal atau dinyatakan dengan persamaan [20]:

$$\mathbf{r} = n\mathbf{a} + m\mathbf{b} \quad (2.2)$$

Dimana  $n$  dan  $m$  adalah konstanta.



**Gambar 2.2 Skema 2D dari lembaran grafit. Vektor kiral sebagai kombinasi linear dari vektor basis  $\mathbf{a}$  dan  $\mathbf{b}$  [20].**

Berbagai tipe CNT ditentukan oleh nilai  $n$  dan  $m$  dan juga bagian penutupnya, dan juga sudut kiral,  $\theta$  [20, 22] yang dapat dilihat pada (Gambar 2.3). Berikut adalah ketiga tipe CNT yang paling umum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4, yaitu:

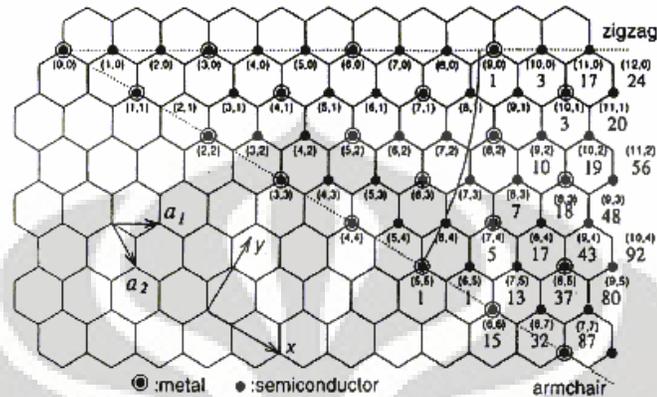
- *Armchair*, dimana  $m = n$  atau  $\theta = 30$
- *Zigzag*, dimana  $m = 0$  atau  $\theta = 0$
- *Chiral*, dimana  $m \neq 0$  dan  $m \neq n$  atau  $0 < \theta < 30$

Diameter dan sudut kiral  $\theta$  CNT dapat ditentukan dengan persamaan [22]:

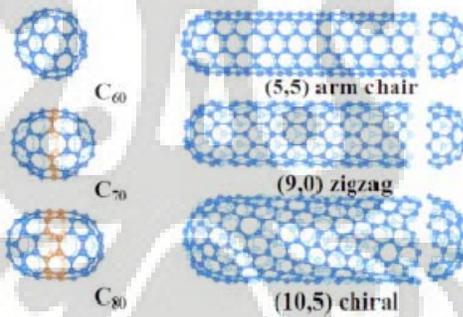
$$d = 0.783\sqrt{n^2 + nm + m^2} A \quad (2.3)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[ \frac{\sqrt{3}m}{2(n^2 + nm + m^2)} \right] \quad (2.4)$$

Vektor kiral ini mempengaruhi karakteristik CNT seperti kekuatan mekanik, konduktivitas elektrik, dan sifat optiknya.



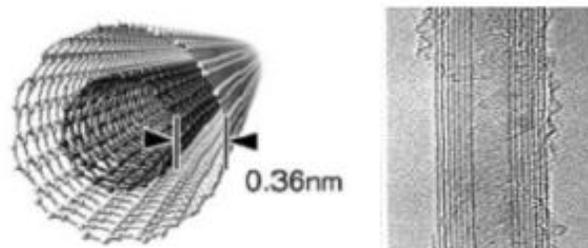
**Gambar 2.3 Struktur SWNT yang mungkin terbentuk dari berbagai vektor kiral [3]**



**Gambar 2.4 Armchair, zigzag, dan chiral SWNT dan penutupnya sesuai dengan fullerene yang bersesuaian [20]**

**b. Multi-walled nanotubes (MWNT)**

MWNT merupakan SWNT yang tersusun secara aksial konsentrik. Panjang dan struktur MWNT berbeda daripada SWNT, dan juga karakteristiknya berbeda. Jarak antara satu SWNT dengan yang lainnya adalah sekitar 0.36 nm (Gambar 2.5). Lapisan grafit pada MWNT bervariasi jumlahnya dari dua hingga beberapa puluh lapisan, sehingga memungkinkan diameternya mencapai 100 nm [23].



**Gambar 2.5 MWNT [24]**

### 2.3.2 Karakteristik Karbon Nanotubes

Karakteristik CNT yang terpenting adalah sebagai berikut [3]:

#### a. Reaktivitas Kimia

Reaktivitas kimia karbon nanotubes dipengaruhi oleh bentuk setengah bola pada ujung CNT (*end caps* CNT). Semakin kecil diameter nanotubes, maka reaktivitasnya akan meningkat. Hal ini akan mempengaruhi kelarutan karbon nanotubes pada suatu larutan, yang dapat diatur oleh diameternya.

#### b. Konduktivitas Elektrik

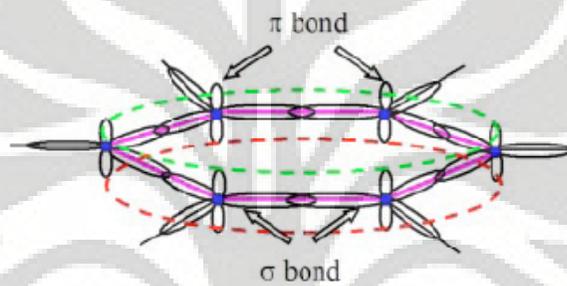
Konduktivitas elektrik dipengaruhi oleh vektor kiral CNT tersebut. CNT dengan diameter yang kecil dapat berupa semi-konduktor maupun logam. Perbedaan ini disebabkan oleh struktur molekul yaitu pita struktur yang berbeda dan celah pita yang berbeda pula. Perbedaan konduktivitas ini diturunkan dari karakteristik lembaran grafit. Suatu (n,m) nanotubes dikatakan bersifat logam jika  $n = m$  atau  $(n - m) = 3i$ , dimana  $i$  adalah integer dan  $n$  dan  $m$  adalah vektor kiralnya. Tahanan konduksi ditentukan oleh aspek mekanika kuantum dan tidak dipengaruhi atau mempengaruhi panjang nanotubes.

#### c. Sifat optik

Aktivitas optik dari suatu karbon nanotubes akan menghilang seiring bertambah besarnya diameter nanotubes tersebut. Sifat ini cukup penting jika karbon nanotubes digunakan untuk peralatan optik.

#### d. Kekuatan mekanik

CNT memiliki nilai modulus Young yang sangat besar pada arah aksialnya. Nilai modulus Young untuk SWNT dan MWNT, yaitu sekitar 1 Tpa dan 1,8 Tpa [20-21]. Akibatnya, CNT sangat elastik dan sangat kuat, bahkan kekuatan tensil lapisan terluar MWNT adalah sekitar 100 kali aluminium. Kekuatan CNT berasal dari ikatan antar-atom karbon yang memiliki hibridisasi  $sp^2$ , dimana ikatan sigma yang dimilikinya adalah ikatan kovalen yang kuat (dapat dilihat pada Gambar 2.6).



**Gambar 2.6 Struktur ikatan heksagonal pada lembaran grafit [20]**

#### 2.3.3 Aplikasi Karbon Nanotubes

CNT banyak diaplikasikan karena sifat-sifatnya yang unik, antara lain sebagai:

##### a. Penyimpan Energi

Bahan-bahan yang mengandung karbon biasanya digunakan sebagai elektroda pada *fuel cell*, baterai, dan aplikasi elektrokimia yang lainnya. Efisiensi yang tinggi ditemukan dengan menggunakan CNT, dimana CNT memiliki ukuran yang kecil, topologi permukaan yang halus dan hampir sempurna [3]. Sebagai penyimpan energi, CNT diaplikasikan sebagai penyimpan hidrogen dan superkapasitor.

- Penyimpan hidrogen

CNT dapat menyimpan cairan atau gas pada bagian dalamnya melalui efek kapiler, karena bentuknya yang berupa silinder kosong dan ukuran diameter yang berskala nanometer. Hidrogen dapat diabsorpsi dengan dua

cara, yaitu dengan *chemisorptions*, dimana molekul  $H_2$  berdisosiasi dan hidrogen disimpan dalam bentuk atom, dan dengan *physisorption*, dimana hidrogen disimpan dalam bentuk molekul. CNT yang berkualitas baik sebagai penyimpan hidrogen adalah karbon nanotubes yang *single-walls* (diameternya kecil), panjang, dan seragam [5].

- Superkapasitor

Superkapasitor berpotensi untuk digunakan pada peralatan elektronik, karena kapasitansinya yang tinggi. Kemampuan kapasitor dalam menyimpan muatan listrik atau kapasitansi tergantung geometri kapasitor, yaitu jarak pisah antar elektroda, luas elektroda, dan permitivitas bahan penyekat. Pada elektroda nanotubes, kapasitansi yang sangat besar timbul karena jarak pisah antarelektroda berskala nanometer, dan luas permukaan nanotubes yang besar. Oleh karena itu, CNT dapat digunakan sebagai superkapasitor.

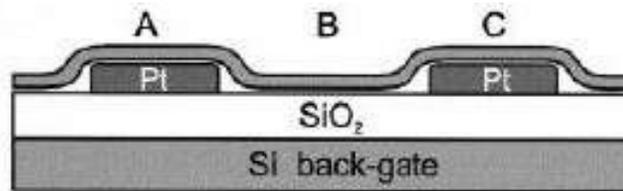
#### **b. Peralatan Elektronik**

- *Field emitting devices*

Pada medan listrik tinggi, elektron dapat terekstraksi dari suatu padatan dan arusnya tergantung pada kekuatan medan listrik pada permukaan teremisi dan pada jumlah energi yang dibutuhkan untuk mengeksitasi elektron ke keadaan vakum. *Emitter* yang ideal adalah yang mempunyai diameter berukuran nanometer, berstruktur utuh, konduktivitas listrik tinggi, dan stabilitas kimia yang baik. Dan CNT memiliki semua karakteristik ini. Penggunaan CNT dalam *field emitting device* adalah untuk *flat panel display*, tabung gas *discharge* pada jaringan telekomunikasi, *electron guns* untuk mikroskop elektron.

- Transistor

Transistor dapat dibuat dari satu buah SWNT. Hanya dengan menghubungkan dengan elektroda-elektroda yang beda potensialnya tinggi, CNT dapat berubah fungsinya dari sebagai konduktor menjadi insulator. Skema transistor dari CNT dapat dilihat pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7 Skema transistor CNT [3]**

**c. Nanoprobes and Sensor**

CNT dapat pula digunakan sebagai *scanning probe instruments*, seperti pada STM dan AFM karena karakteristiknya yang fleksibel. Penggunaan CNT akan meningkatkan resolusi instrumen dibandingkan dengan penggunaan Si atau ujung logam. Namun, vibrasi CNT cukup mengganggu resolusi instrumen. Vibrasi ini akan semakin besar, apabila CNT semakin panjang. Oleh karena itu, untuk mengatasinya dibutuhkan CNT yang pendek.

**2.3.4 Sintesis Karbon Nanotubes**

Pada umumnya, CNT disintesis dengan menggunakan tiga metode, yaitu *arc discharge*, *laser ablation*, dan *Chemical Vapour Deposition (CVD)*. Namun juga ada metode lainnya yang menjadi alternatif dalam memproduksi CNT, yaitu dekomposisi katalitik metana. Saat ini masih diteliti metode sintesis yang lebih ekonomis untuk memproduksi CNT.

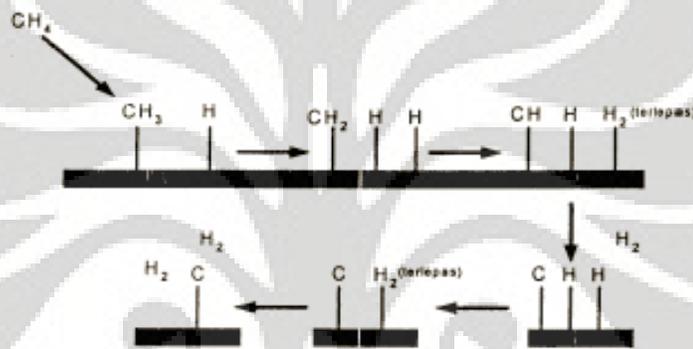
Tabel 2.1 menunjukkan perbandingan antara metode *Arc discharge*, *Laser ablation*, dan CVD, serta Dekomposisi Katalitik Metana.

**Tabel 2.1 Perbandingan Metode Sintesis CNT**

Metode	Arc Discharge	Chemical Vapour Deposition (CVD)	Laser Ablation	Dekomposisi Katalitik Metana
Oleh	Ebbesen dan Ajayan, NEC, Jepang, 1992	Endo, Shinsu University, Nagano, Jepang	Smalley, Rice University, 1995	
Caranya	Menghubungkan dua elektroda grafit pada sumber listrik, dipisahkan sejauh beberapa millimeter. Pada arus 100 A, karbon akan menguap dan membentuk plasma.	Meletakkan substrat pada oven, dipanaskan hingga 600°C, dan ditambahkan gas berkarbon secara perlahan-lahan. Saat gas terdekomposisi, atom karbon terbebas, dan akan membentuk CNT.	Grafit diuapkan oleh sinar laser untuk membentuk gas karbon yang akan membentuk CNT.	Gas metana dialirkan dan direaksikan dengan katalis yang telah dipersiapkan dalam reaktor pada temperatur tinggi dan akan terbentuk nanokarbon pada permukaan katalis.
Yield	30-90%	20-100%	Diatas 70%	Bervariasi
SWNT	Tabung pendek dengan diameter 0.6-1.4 nm	Tabung panjang dengan diameter 0.6-4 nm	Kumpulan SWNT, dengan panjang 5-20 µm dan diameter 1-2 nm.	Bervariasi. Namun dihasilkan SWNT jika menggunakan katalis berukuran kecil.
MWNT	Tabung pendek dengan diameter dalam 1-3 nm dan diameter luar hingga 10 nm	Tabung panjang dengan diameter 10-240 nm.	Produksi MWNT sangat mahal, namun masih mungkin untuk dilakukan.	Bervariasi. Diameter tergantung pada ukuran katalis.
Pro	Mudah untuk memproduksi SWNT dan MWNT. SWNT memiliki sedikit <i>defect</i> dan MWNT diproduksi tanpa katalis dan tidak terlalu mahal. Dapat disintesis pada keadaan terbuka.	Mudah untuk di <i>scale-up</i> hingga tahap industry. SWNT panjang, diameternya dapat dikontrol, juga cukup murni.	Sebagian besar menghasilkan SWNT dengan sedikit <i>defect</i> . Diameternya dapat dikontrol dan cukup murni.	Paling ekonomis. Bahan baku yang digunakan tidak terlalu mahal. Proses pemurniannya sederhana dan diameternya dapat dikontrol oleh ukuran katalis.
Kontra	CNT pendek dan memerlukan purifikasi.	Menghasilkan sebagian besar MWNT dengan banyak <i>defect</i> .	Teknik yang mahal, karena memerlukan laser dan energi yang besar.	Katalis yang digunakan akan mengalami deaktivasi.

## 2.4 MEKANISME PERTUMBUHAN KARBON NANOTUBE PADA REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA

Pada reaksi dekomposisi metana, sebuah molekul metana direngkah (*cracking*) menjadi sebuah molekul karbon dan dua buah molekul hidrogen. Gambar 2.8 menunjukkan mekanisme reaksi permukaan dekomposisi katalitik metana. Atom hidrogen terputus satu persatu membentuk ion karbonium. Dan pada akhirnya didapatkan sebuah molekul atom karbon dan dua molekul hidrogen pada akhir reaksi.



Gambar 2.8 Mekanisme reaksi permukaan dekomposisi katalitik metana [6]

Salah satu teori mekanisme pertumbuhan nanokarbon, menyebutkan bahwa mekanisme pertumbuhan nanokarbon dipengaruhi oleh laju pembentukan lapisan karbon terhadap laju pergerakan metal. Dalam teori itu, Safronov dan Kovalski 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 mereka berpendapat bahwa 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 [9].

Teori mekanisme pertumbuhan oleh Chen [9] menyatakan bahwa laju pembentukan karbon dan laju pergerakan katalis dipengaruhi oleh keadaan katalis pada saat reaksi terjadi dan juga oleh 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.

Berdasarkan kedua teori di atas, agar terbentuk karbon nanotube diperlukan laju pembentukan lapisan karbon dan laju pergerakan logam sama. Agar laju, pergerakan logam sama dengan laju pembentukan lapisan karbon, diperlukan keadaan partikel logam yang meleleh (*liquid*).

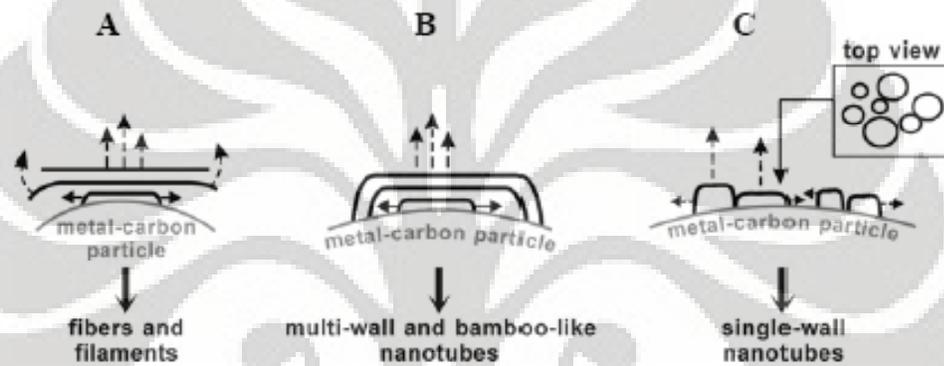
Menurut Kuznetsov [11], faktor yang menentukan jenis karbon yang dihasilkan suatu proses dekomposisi metana adalah proses nukleasi karbon pada logam. Proses nukleasi ini merupakan proses presipitasi beberapa karbon pada permukaan partikel logam yang jenuh karbon (*carbon-saturated metal particles*). Partikel logam yang jenuh karbon ini dicapai pada saat logam berada dalam fasa *liquid* yaitu pada temperatur sedikit di bawah temperatur eutektik. 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 2.9(a)). Bentuk nanokarbon yang dihasilkan ini dinamakan nanofilamen.

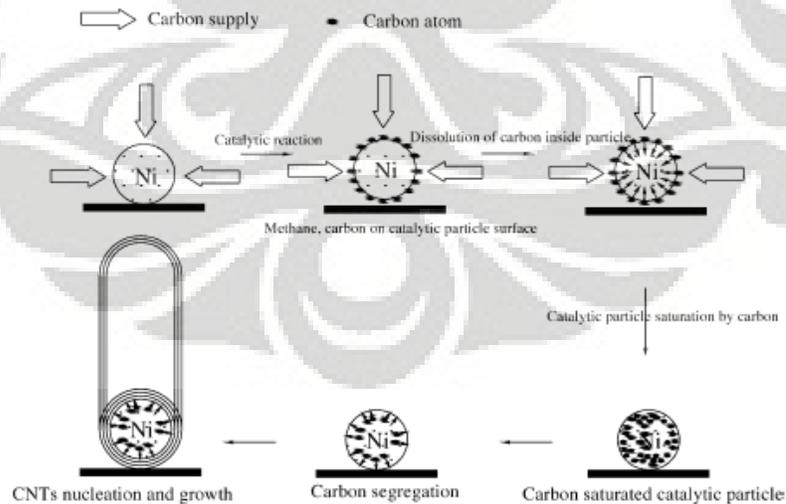
Proses pembentukan *Multi-Walled Nanotube* (MWNT) hampir sama dengan pembentukan nanofilamen. Hanya saja MWNT terbentuk pada permukaan partikel logam yang lebih jenuh karbon. Selain itu, ujung dari nukleus berikutnya

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 didapatkan dinding nanotube yang berlapis-lapis (Gambar 2.9(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 2,9(c)).



**Gambar 2.9 Mekanisme pembentukan nukleus pada pertumbuhan (a) karbon nanofilamen; (b) MWNT; dan (c) SWNT [11]**



**Gambar 2.10 Skema pertumbuhan CNT [18]**

He [18] menggambarkan mekanisme pertumbuhan karbon nanotubes seperti pada Gambar 2.10.. Setelah terjadi reaksi katalitik, terjadi penjumlahan 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.

## 2.5 KATALIS PADA REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA

Penggunaan katalis dalam reaksi dekomposisi metana memungkinkan tercapainya konversi yang maksimum pada temperatur yang lebih rendah, karena reaksi dekomposisi metana bersifat endotermis. Hal ini berpengaruh terhadap banyaknya *yield* produk yang dihasilkan. Selain berpengaruh terhadap kuantitas, katalis juga berperan dalam hal kualitas nanokarbon. Katalis yang efisien untuk reaksi ini adalah yang paling tahan terhadap adanya akumulasi karbon dalam jumlah besar sesuai dengan konversi metana yang bersangkutan.

Katalis secara garis besar, terbuat dari inti aktif, penyangga, dan promoter (Gambar 2.11). Berikut akan dijelaskan tentang bagian-bagian dari katalis yang akan digunakan pada reaksi dekomposisi metana pada penelitian ini:



**Gambar 2.11 Katalis dan penyusunnya [25]**

### 2.5.1 Inti aktif

Inti aktif suatu katalis merupakan unsur utama penentu aktivitas katalis dalam reaksi. Pada penelitian reaksi dekomposisi katalitik metana, sebagai inti aktif digunakan logam-logam transisi dari golongan VIII, seperti Ni, Co, dan Fe. Hal ini dikarenakan ketiga logam tersebut memiliki harga yang tidak terlalu tinggi dibandingkan logam golongan VIII lainnya (Pd, Rh, Ru, Pt, Ir, dan Os). Selain itu,

dalam dekomposisi hidrokarbon, partikel logam Fe, Co, dan Ni menghasilkan karbon filamen yang diameternya hampir sama dengan diameter partikel logam itu sendiri [12].

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa CNT baru terbentuk pada keadaan meleleh. Karena titik leleh Ni ( $1455^{\circ}\text{C}$ ) yang lebih rendah daripada Fe ( $1537^{\circ}\text{C}$ ) dan Co ( $1495^{\circ}\text{C}$ ), maka penggunaan Ni membuat pembentukan karbon nanotubes dapat dilakukan pada temperatur yang lebih rendah daripada katalis Fe dan Co. Selain itu, di antara ketiga logam tersebut, Ni memiliki tingkat keaktifan paling tinggi dan menghasilkan *yield* karbon yang relatif lebih tinggi daripada Co dan Fe [26].

### 2.5.2 Penyangga (*support*)

Selain inti aktif, katalis juga terdiri dari *support* atau penyangga. Jenis penyangga yang sering digunakan dalam dekomposisi katalitik metana seperti  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ , dan  $\text{ZrO}_2$  [26].

Penggunaan penyangga hanya mengijinkan *loading* inti aktif yang sedikit, sehingga jumlah inti aktif pada katalis berpenyangga lebih sedikit dibandingkan katalis tidak berpenyangga. Padahal, banyaknya inti aktif secara langsung mempengaruhi *yield* karbon. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa katalis yang tidak berpenyangga menghasilkan lebih banyak *yield* daripada katalis berpenyangga. Namun di sisi lain, katalis berpenyangga memberikan kualitas nanokarbon yang lebih baik daripada katalis tidak berpenyangga karena partikel sangat terdispersi [8].

### 2.5.3 Promotor

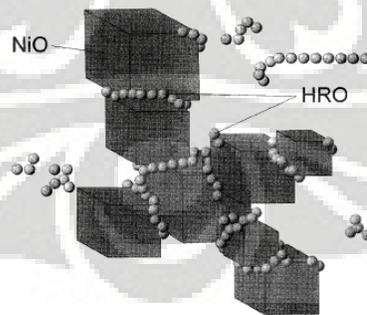
Permasalahan yang masih timbul dalam dekomposisi katalitik metana, salah satunya adalah umur katalis yang pendek atau dengan kata lain katalis cepat terdeaktivasi. Untuk menyelesaikan masalah ini maka diperlukan suatu usaha atau pendekatan untuk meningkatkan stabilitas dari katalis yang digunakan, salah satunya adalah dengan penambahan promotor. Penambahan promotor pada saat

preparasi dalam jumlah yang relatif sedikit meningkatkan aktivitas, selektivitas, ataupun stabilitas katalis [27]. Secara umum, promotor dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu *textural promoter* dan *structural promoter*.

*Textural promoter* lebih bersifat sebagai penstabil (*stabilizer*), yang merupakan bahan *inert* yang mencegah terjadinya *sintering* pada partikel katalis yang berbentuk mikrokristal. *Sintering* ini dapat menyebabkan penurunan luas area inti aktif katalis. Material-material sebagai *textural promoter* memisahkan partikel-partikel inti aktif katalis dengan cara berada di antara partikel yang satu dengan yang lain (Gambar 2.12), sehingga tidak terjadi kontak antara partikel-partikel tersebut yang dapat menyebabkan partikel-partikel tersebut bergabung menjadi satu.

Penggunaan *textural promoter* pada katalis berbasis Ni sangat signifikan. Apabila digunakan *textural promoter*, ukuran rata-rata partikel NiO tidak berubah selama kalsinasi hingga 800°C. Sebaliknya, apabila tidak digunakan *textural promoter*, ukuran partikel meningkat menjadi lima kali setelah kalsinasi pada suhu yang sama [14].

Agar efektif, ukuran *textural promoter* harus lebih kecil daripada inti aktif [14,27]. 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 [27].



**Gambar 2.12 Susunan *textural promoter* H<sub>2</sub>O pada struktur matriks NiO [14]**

Keseluruhan sifat yang harus dimiliki oleh material *textural promoter* tersebut terdapat pada senyawa oksida logam, seperti Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, CrO<sub>2</sub>,

CeO<sub>2</sub>, MgO<sub>2</sub>, dan TiO<sub>2</sub>. Senyawa-senyawa oksida logam di atas disebut sebagai *Hard-to-Reduced Oxide* (HRO) [14,26]. Titik lebur senyawa oksida logam yang telah disebutkan di atas dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** *Textural promoter* dan titik leburnya

Oksida Logam	Titik Lebur (°C)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2027
SiO <sub>2</sub>	1700
ZrO <sub>2</sub>	2687
CrO <sub>2</sub>	2435
CeO <sub>2</sub>	2600
MgO <sub>2</sub>	2802
TiO <sub>2</sub>	1855

Apabila *textural promoter* mempengaruhi sifat fisik dari katalis, *structural promoter* mempengaruhi sifat kimia dari katalis. Hal ini terjadi karena *structural promoter* mengubah komposisi kimia dari katalis tersebut.

Pada reaksi dekomposisi katalitik metana, *structural promoter* yang digunakan adalah logam transisi seperti Cu dan Mo. Dibanding logam Mo, pemakaian logam Cu lebih banyak digunakan dalam penelitian reaksi dekomposisi katalitik metana [10,28]. Hal ini disebabkan sifat logam Cu yang memiliki afinitas yang tinggi terhadap struktur grafit yang dapat menghambat terbentuknya lapisan grafit pada permukaan inti aktif [28] sehingga deaktivasi katalis yang disebabkan pembungkusan katalis akibat akumulasi karbon yang terlalu cepat dapat dihindari. Selain itu, logam Cu memiliki titik leleh yang lebih rendah (1084°C [9]) daripada logam Mo (2623°C). Alloy Ni-Cu diketahui memiliki titik leleh sebesar 2370-2460°F atau 1298-1348°C [42]. Hal ini memungkinkan terbentuknya katalis berfasa *liquid*, yang merupakan syarat terbentuknya karbon nanotube, pada temperatur reaksi yang lebih rendah.

Dussault [29] melakukan penelitian dengan memvariasikan komposisi katalis Ni-Cu-Mg-Al dan metode preparasi katalis untuk mensintesis nanofilamen dan CNT. Dan dari penelitian tersebut diperoleh bahwa ukuran partikel katalis dan pada akhirnya diameter nanofilamen lebih kecil, jika terdapat sedikit Cu. Dengan komposisi Cu yang tinggi ternyata tidak dihasilkan produk karbon sama sekali.

Aktifitas katalis tinggi saat kandungan Cu rendah (<0.2). Jadi terdapat batasan kandungan Cu dalam katalis.

Tabel 2.3 di bawah ini, menunjukkan bahwa komposisi terbaik untuk katalis Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> adalah 2:1:1 baik dari jumlah karbon yang didapat maupun dari kualitas karbon yang dihasilkan.

**Tabel 2.3 Reaksi Dekomposisi Metana dengan katalis Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Komposisi (rasio mol)	Temperatur (°C)	Konversi CH <sub>4</sub> (%)	Yield Karbon	Jenis Karbon*	Ref.
15:3:2	740	65	39	T	[10]
	700	60	280	T, F	[10]
	600	22	380	F	[10]
	500	10	167	F	[10]
	737	68	n.a.	n.a.	[30]
	600	20	585	F	[30]
	700	n.a.	230	T	[9]
	730	n.a.	16.7	T	[9]
	770	n.a.	11	F	[9]
2:1:1	800	n.a.	6.2	T	[9]
	740	55	152	T	[10]
	750	70	191	T	[30]
3:2:2	830	n.a.	6.1	carbon particles	[9]
	740	48	42	T	[10]
1:1:1	740	50	41	F	[10]

\*T = Karbon nanotube, F = Karbon nanofilamen

## 2.6 METODE PREPARASI KATALIS PADA REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA

Teknik preparasi katalis berpengaruh pada sifat partikel katalis yang dihasilkan, seperti luas permukaan kontak, diameter partikel katalis, dan lain sebagainya. Teknik preparasi yang paling sering digunakan preparasi katalis pada dekomposisi katalitik metana adalah impregnasi, presipitasi atau kopresipitasi, dan sol-gel. Pada penelitian ini akan digunakan metode kopresipitasi, karena metode ini memungkinkan *loading* logam dalam jumlah yang lebih besar daripada metode impregnasi.

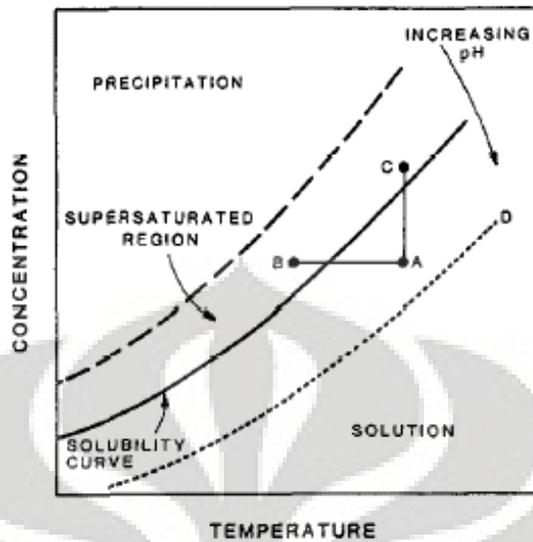
### 2.6.1 Metode Presipitasi [31]

Metode ini bertujuan untuk mengendapkan suatu padatan pada suatu larutan, baik sebagai endapan maupun sebagai gel. Endapan maupun gel yang terbentuk ini merupakan prekursor yang akan menentukan struktur dan sifat katalis.

Pada metode ini digunakan *precipitating agent* yang dapat ditambahkan dalam bentuk larutan atau gas, di mana penambahan dalam bentuk larutan dilakukan dengan metode titrasi, sedangkan penambahan dalam bentuk gas dilakukan dengan metode injeksi. Presipitan yang sering digunakan adalah hidroksida dan karbonat karena kelarutannya rendah, mudah terdekomposisi, dan juga tingkat racunnya rendah.

Presipitasi suatu padatan, dapat dibagi menjadi tiga tahap, yaitu penjenuhan (*supersaturation*), pembentukan inti (*nucleation*), dan pertumbuhan (*growth*).

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.13, kurva kelarutan merupakan fungsi suhu dan pH. Titik kejenuhan bisa dicapai dengan menambah konsentrasi dari larutan (memindahkan titik A ke C) atau dengan menurunkan temperatur dari sistem (dari titik A ke B). Selain itu bisa pula dengan menaikkan pH dari larutan, sehingga kurva kelarutan bergeser dan titik A berada pada daerah lewat jenuh. Partikel yang sudah berada di daerah lewat jenuh berkembang dalam dua tahap, nukleasi dan pertumbuhan. Proses perkembangan sangat tergantung dari konsentrasi, temperatur, pH, dan kematangan dari larutan tersebut.



**Gambar 2.13 Hubungan antara kelarutan terhadap konsentrasi dan temperatur dalam proses pengendapan [39]**

Tahap awal metode ini diawali dengan pencampuran dua atau lebih larutan atau suspensi dari material yang menyebabkan pengendapan, kemudian diikuti beberapa tahap lainnya, yaitu filtrasi, pencucian, pengeringan, dan kalsinasi.

Jika terdapat dua atau lebih komponen logam dalam suatu bejana, komponen-komponen tersebut mungkin akan mengendap pada laju yang berbeda sehingga mempengaruhi struktur akhir padatan. Pada metode kopresipitasi, komponen-komponen logam tersebut diharapkan mengendap pada saat yang bersamaan, sehingga dispersi partikel dalam ukuran mikro lebih merata.

Secara umum, ada beberapa keuntungan dari metode presipitasi, yaitu:

1. Menghasilkan campuran yang lebih merata pada skala molekular terhadap variasi unsur katalis.
2. Distribusi inti aktif katalis merata.
3. Ukuran dan bentuk katalis tidak dibatasi untuk menjadi bentuk yang diinginkan penyangga.

Penelitian yang dilakukan oleh Saputra [7] menghasilkan katalis Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang cukup kecil, yaitu 4-16 nm. Dengan suhu kalsinasi yang semakin kecil, diameter katalis semakin kecil. Diameter katalis terkecil yang dihasilkan adalah 4 nm saat katalis dikalsinasikan pada suhu 400°C.

## 2.6.2 Metode Perlakuan Ultrasonik

Dalam reaksi kimia, panas dan cahaya memberikan masukan energi bagi reaksi. Begitu pula dengan energi suara, juga dapat memberikan efek bagi reaksi kimia. Suara merambat melalui gelombang mekanik. Frekuensi gelombang yang masih dapat didengar oleh telinga kita adalah antara 1 Hz hingga 16 kHz. Gelombang suara yang frekuensinya di atas 16 kHz, disebut dengan ultrasonik.

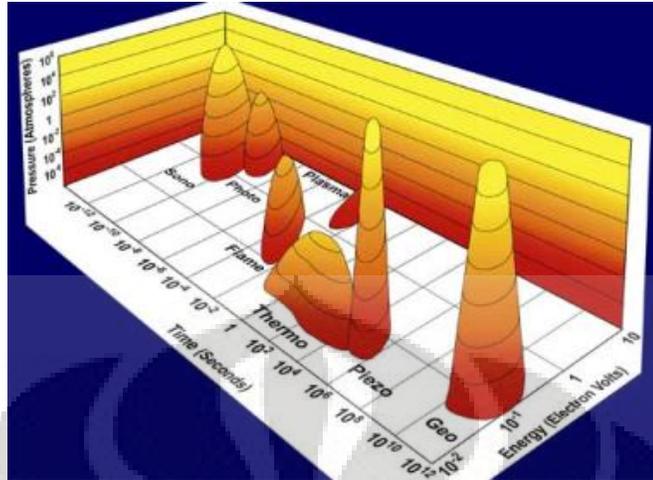
Suara memiliki energi yang dapat diaplikasikan pada sistem kimia. Energi pada gelombang dapat dirumuskan sebagai berikut [32]:

$$E = 2\pi^2 f^2 A^2 \mu vt \quad (2.5)$$

Dimana:  $E$  = Energi gelombang  
 $f$  = Frekuensi gelombang  
 $A$  = Amplitude gelombang  
 $\mu$  = Massa per satuan panjang dan medium yang dilewati  
 $v$  = Cepat rambat gelombang  
 $t$  = Waktu yang diperlukan untuk merambat

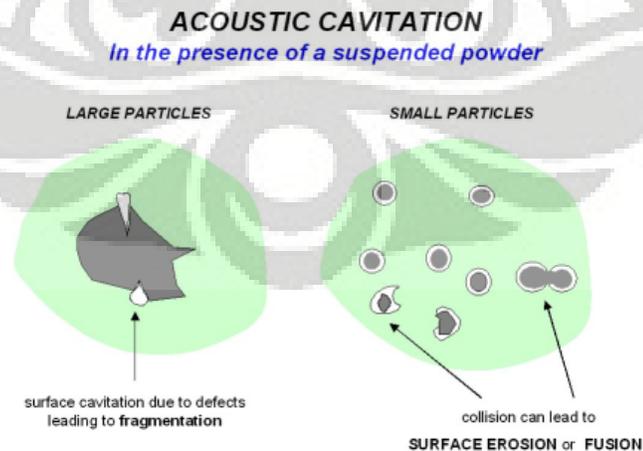
Ultrasonik memberikan energinya kepada katalis yang di-iradiasi sehingga mampu mengubah dimensi katalis. Peningkatan luas permukaan katalis pada katalis yang mengalami perlakuan ultrasonik terjadi karena tumbukan antarpartikel yang sangat cepat sehingga memungkinkan pergerakan atom-atom di dalam sistem padatan yang menyebabkan terbentuknya rongga-rongga baru sehingga luas permukaan dan dimensi katalis berubah. Selain itu, tumbukan antarpartikel ini juga menyebabkan terjadinya agglomerasi partikel [32].

Iradiasi ultrasonik (sonokimia) berbeda dari sumber energi yang lainnya seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.14. Ultrasonik mempunyai keunikan dan keunggulan tersendiri, yaitu memiliki energi yang cukup tinggi yang dapat diberikan kepada zat lain dalam waktu yang singkat.



**Gambar 2.14 Interaksi energi dan bahan [34]**

Efek ultrasonik tidak ditimbulkan langsung oleh gelombang suara, namun oleh karena konsekuensi dari kavitasi akustik. Kavitasi akustik adalah pembentukan, pengembangan, dan pemecahan gelembung di dalam *liquid* yang disebabkan oleh gelombang suara. Kavitasi akustik dapat memecah partikel padatan menjadi lebih kecil. Hal ini terjadi akibat ketidaksempurnaan permukaan partikel yang berperan sebagai inti bagi pembentukan gelembung kavitasi pada permukaan yang selanjutnya saat pecah menjadi gelombang kejut yang dapat memecah partikel menjadi lebih kecil, seperti yang terlihat pada Gambar 2.15 di bawah ini.



**Gambar 2.15 Kavitasi Akustik pada cairan yang mengandung padatan [37]**

Penelitian menunjukkan bahwa iradiasi ultrasonik mengubah morfologi bubuk Ni dan Cu, dimana ternyata permukaan partikel menjadi lebih halus. Iradiasi ultrasonik pada partikel Ni atau Cu yang berukuran 5  $\mu\text{m}$ , menjadikan partikel lebih kecil walaupun tidak terlalu signifikan, bahkan setelah beberapa jam di-iradiasi. Hanya saja, iradiasi ultrasonik meningkatkan kecenderungan partikel Ni dan Cu untuk berkumpul (*agglomeration*), walaupun setiap partikel masih dapat dibedakan. Lamanya iradiasi ultrasonik pada partikel Ni akan menghasilkan Ni dengan luas permukaan maksimum saat diiradiasi selama 120 menit, yaitu 1  $\text{m}^2/\text{g}$  [33].

Susanty [15] pada penelitiannya menunjukkan bahwa dengan adanya iradiasi ultrasonik dengan frekuensi 20 kHz selama 60 menit, didapatkan diameter partikel NiO-CeO<sub>2</sub>/MgO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebesar 2,62 nm, lebih kecil daripada katalis yang tidak di-iradiasi ultrasonik yaitu sebesar 3,15 nm. Dan juga dengan iradiasi ultrasonik diperoleh katalis dengan komposisi yang lebih homogen. Selain itu juga katalis yang diberikan perlakuan ultrasonik lebih selektif terhadap produk H<sub>2</sub> dan CO saat diuji keaktifannya dalam reaksi oksidasi parsial metana menghasilkan gas sintesis (H<sub>2</sub> dan CO).

Dari kedua penelitian di atas, perlakuan ultrasonik saat preparasi katalis memberikan ukuran katalis yang lebih kecil. Walaupun pengurangan ukuran partikel katalis ini tidak terlalu signifikan, yaitu hanya beberapa nanometer saja. Namun, pengurangan ini tetap berpengaruh pada produk CNT yang dihasilkan dari reaksi dekomposisi katalitik metana, karena seperti yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya, untuk menghasilkan SWNT perlu katalis yang berukuran sangat kecil.

Tabel 2.4 dibawah ini menunjukkan perlakuan iradiasi ultrasonik pada katalis untuk beberapa penggunaan, seperti reaksi oksidasi parsial metana dan hidrogenasi CO<sub>2</sub> menjadi metanol. Dari data yang diperoleh dapat dilihat bahwa dengan iradiasi ultrasonik dapat memperkecil diameter partikel dan meningkatkan luas permukaan. Semakin lama iradiasi ultrasonik, luas permukaan katalis meningkat hingga satu titik tertentu, namun kemudian menurun kembali. Hal ini menunjukkan adanya batasan waktu iradiasi ultrasonik pada katalis, jika ingin

diperoleh katalis yang berukuran kecil dan mempunyai luas permukaan yang besar.

**Tabel 2.4 Iradiasi Ultrasonik pada Katalis untuk Aplikasi Tertentu**

Katalis	Reaksi	f (kHz)	Waktu (menit)	Dia. partikel (nm)	Luas Perm. (m <sup>2</sup> /g)	X (%)	Ref.
5% NiO-CeO <sub>2</sub> /MgO/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oksidasi parsial metana	-	-	3.15	181.6	83.17	[15]
		20	60	2.62	177.1	86.92	
CuO/ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hidrogenasi CO <sub>2</sub> menjadi methanol	40	0	-	23.13	11.47	[35]
			30	-	46.4	44.18	
			60	-	50.1	45.09	
			90	-	34.7	40.73	
CuO/ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hidrogenasi CO <sub>2</sub> menjadi methanol	40	0	-	98.06	-	[36]
			30	-	103.3	-	
			60	-	126.6	-	
			90	-	105.5	-	

# BAB III

## METODE PENELITIAN

### 3.1 ALUR PENELITIAN

Penelitian akan dilakukan di laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Gas dan Petrokimia FTUI, Depok. Penelitian diawali dengan tahap kalibrasi alat dan preparasi katalis yang kemudian dilanjutkan dengan karakterisasi serta uji aktivitas dan stabilitas katalis serta produk nanokarbon yang dihasilkan.

Adapun diagram alir untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

Preparasi katalis Ni-Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (komposisi 61:31:8) dengan metode kopresipitasi dengan variasi waktu iradiasi ultrasonik pada saat sebelum dan sesudah tahap agglomerasi

Karakterisasi Katalis:  
XRF dan XRD

Uji kinerja katalis menggunakan mikro reaktor kuarsa dilengkapi dengan GC *online* untuk mendeteksi produk gas.

Karakterisasi dan analisis produk nanokarbon dengan TEM

**Gambar 3.1 Diagram alir penelitian**

## 3.2 PREPARASI KATALIS

### 3.2.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang akan digunakan pada penelitian ini pada dasarnya sama dengan penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh Saputra [7], adapun peralatan tersebut adalah sebagai berikut:

**Tabel 3.1 Peralatan dalam preparasi katalis**

No	Nama alat	Jumlah	No	Nama alat	Jumlah
1	<i>Beaker glass</i> 500 mL	1	9	Timbangan	1
2	<i>Beaker glass</i> 1000mL	1	10	Termometer	1
3	Gelas ukur 100 mL	1	11	<i>Stopwatch</i>	1
4	Gelas ukur 250ml	1	12	<i>Magnetic stirrer</i>	1
5	Pipet ukur (25 ml)	1	13	<i>Buchner funnel</i>	1
6	Spatula	1	14	Kaca arloji	3
7	Botol Aquades	1	15	<i>pH meter digital</i>	1
8	<i>Hotplate plus stirrer</i>	1	16	Cawan keramik	3

Dan bahan yang digunakan adalah sebagai berikut:

- *Nickel nitrate hexahydrate* (Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O) 99%, Merck
- *Aluminium nitrate nonahydrate* (Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O) 98.5%, Merck
- *Copper nitrate trihydrate* (Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O) 99.5%, Merck
- Larutan amonia 25%
- *Deionized water*

### 3.2.2 Prosedur Preparasi

Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah katalis Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan perbandingan komposisi berat 61:31:8 (Ni:Cu:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Katalis tersebut akan dipreparasi dengan metode kopresipitasi dan akan diberikan perlakuan ultrasonik selama preparasinya, yaitu saat sebelum atau setelah tahap agglomerasi.

Iradiasi ultrasonik ini dilakukan oleh *generator ultrasonic cleaner*, Cole-Parmer, dengan frekuensi 40 kHz.

Prosedur preparasi katalis tanpa aplikasi iradiasi ultrasonik adalah sebagai berikut:

1. Melarutkan 24,78 gram  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  sebagai prekursor inti aktif, 9,5 gram  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  sebagai prekursor *structural promoter*, dan 9,19 gram  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  sebagai prekursor *textural promoter* dalam 100 mL *deionized water* dengan menggunakan *beaker glass* 300 mL. Proses pelarutan dibantu dengan menggunakan *magnetic stirrer* pada *hotplate* yang bersuhu  $50^\circ\text{C}$ .
2. Meneteskan larutan  $\text{NH}_4\text{OH}$  25% ke dalam larutan sambil diaduk hingga dicapai  $\text{pH} = 7,5$ .  $\text{pH}$  diukur dengan menggunakan *pHmeter digital*.
3. Mendinginkan larutan pada temperatur dan tekanan ruang selama semalam. Pada proses ini akan terbentuk endapan.
4. Menyaring endapan dengan menggunakan *Buchner funnel*, kemudian mencucinya dengan menggunakan *deionized water*.
5. Mengeringkan *wetcake* dengan menggunakan atmosferik *furnace* pada temperatur  $120^\circ\text{C}$  selama 5 jam.
6. Mengkalsinasi katalis pada temperatur  $600^\circ\text{C}$  selama 1 jam dengan menggunakan atmosferik *furnace*.
7. Menghaluskan katalis hingga ukuran partikelnya mencapai 100 mesh.

Prosedur preparasi katalis dengan aplikasi iradiasi ultrasonik sebelum tahap agglomerasi adalah sebagai berikut:

1. Melarutkan 24,78 gram  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  sebagai prekursor inti aktif, 9,5 gram  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  sebagai prekursor *structural promoter*, dan 9,19 gram  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  sebagai prekursor *textural promoter* dalam 100 mL *deionized water* dengan menggunakan *beaker glass* 300 mL. Proses pelarutan dibantu dengan menggunakan *magnetic stirrer* pada *hotplate* yang bersuhu  $50^\circ\text{C}$ .

2. Meneteskan larutan  $\text{NH}_4\text{OH}$  25% ke dalam larutan sambil diaduk hingga dicapai  $\text{pH} = 7,5$ .  $\text{pH}$  diukur dengan menggunakan *pHmeter digital*.
3. Mengaplikasikan ultrasonik pada larutan selama 30; 60; dan 90 menit.
4. Mendinginkan larutan pada temperatur dan tekanan ruang selama semalam. Pada proses ini akan terbentuk endapan.
5. Menyaring endapan dengan menggunakan *Buchner funnel*, kemudian mencucinya dengan menggunakan *deionized water*.
6. Mengeringkan *wetcake* dengan menggunakan atmosferik *furnace* pada temperatur  $120^\circ\text{C}$  selama 5 jam.
7. Mengkalsinasi katalis pada temperatur  $600^\circ\text{C}$  selama 1 jam dengan menggunakan atmosferik *furnace*.
8. Menghaluskan katalis hingga ukuran partikelnya mencapai 100 mesh.

Prosedur preparasi katalis dengan aplikasi iradiasi ultrasonik setelah tahap agglomerasi adalah sebagai berikut:

1. Melarutkan 24,78 gram  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  sebagai prekursor inti aktif, 9,5 gram  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  sebagai prekursor *structural promoter*, dan 9,19 gram  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  sebagai prekursor *textural promoter* dalam 100 mL *deionized water* dengan menggunakan *beaker glass* 300 mL. Proses pelarutan dibantu dengan menggunakan *magnetic stirrer* pada *hotplate* yang bersuhu  $50^\circ\text{C}$ .
2. Meneteskan larutan  $\text{NH}_4\text{OH}$  25% ke dalam larutan sambil diaduk hingga dicapai  $\text{pH} = 7,5$ .  $\text{pH}$  diukur dengan menggunakan *pHmeter digital*.
3. Mendinginkan larutan pada temperatur dan tekanan ruang selama semalam. Pada proses ini akan terbentuk endapan.
4. Mengaplikasikan ultrasonik pada endapan selama 30; 60; dan 90 menit.
5. Menyaring endapan dengan menggunakan *Buchner funnel*, kemudian mencucinya dengan menggunakan *deionized water*.
6. Mengeringkan *wetcake* dengan menggunakan atmosferik *furnace* pada temperatur  $120^\circ\text{C}$  selama 5 jam.
7. Mengkalsinasi katalis pada temperatur  $600^\circ\text{C}$  selama 1 jam dengan menggunakan atmosferik *furnace*.

8. Menghaluskan katalis hingga ukuran partikelnya mencapai 100 mesh.

### 3.3 KARAKTERISASI KATALIS

Katalis yang telah dipreparasi, dikarakterisasi komposisi dan strukturnya. Karakterisasi dilakukan dengan menggunakan metode analisa sebagai berikut:

#### a. X-Ray Fluorescence (XRF)

Karakterisasi katalis dengan XRF dilakukan sebelum katalis direduksi. Tujuannya adalah untuk mengetahui komposisi unsur dari katalis yang telah dibuat. Pengujian karakterisasi XRF menggunakan mesin JEOL Element Analyzer JSX-3211 yang terdapat di *Research Center of Material Science* FMIPA UI, Salemba.

#### b. X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi katalis dengan XRD dilakukan untuk mengetahui struktur kristal katalis dan ukuran partikel setiap fasa kristal tersebut. Analisa XRD dilakukan dengan menggunakan *diffractometer* Phillips PW 3819 yang terdapat di *Centre for Material Processing and Failure Analysis* dan Departemen Metalurgi FTUI dan Laboratorium Uji Material BATAN, Serpong. Struktur kristal katalis dapat diketahui dengan mencocokkan pola *peak* hasil analisa XRD dengan pola *peak* berbagai macam zat yang terdapat dalam PC PDFWIN. Sedangkan ukuran kristal pada setiap fasa dihitung dengan menggunakan persamaan *Scherer*, yaitu:

$$L = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.1)$$

dimana:  $L$  = ukuran kristal

$\lambda$  = panjang gelombang radiasi sinar X (Co K $\alpha$  = 0.178896 nm)

$K$  = 0.89

$\beta$  = lebar setengah tinggi *peak* tertinggi (rad)

### 3.4 KALIBRASI ALAT

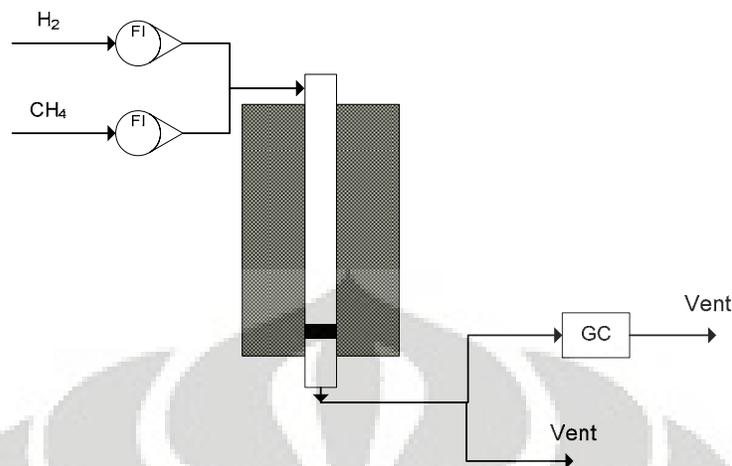
Sebelum dilakukan uji aktivitas katalis, dilakukan kalibrasi kromatografi gas dan kalibrasi *flowmeter*. Kalibrasi kromatografi gas dilakukan untuk menentukan retention time dari gas umpan dan gas produk dan juga kuantitas gas yang dihasilkan. Kalibrasi kromatografi gas ini dilakukan dengan menginjeksikan 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.

### 3.5 UJI AKTIVITAS KATALIS

Uji aktivitas katalis dilakukan pada reaktor unggun tetap (*atmospheric fixed bed reactor*) pada suhu 650°C. Reaktor yang digunakan pada penelitian ini adalah tabung reaktor kuarsa berdiameter 16 mm pada *furnace*. Pada bagian atas tabung terdapat pipa yang akan menjadi tempat masuknya metana, maupun hidrogen. Sedangkan umpan yang tidak bereaksi maupun produk gas akan dialirkan melalui pipa yang berada pada bagian bawah tabung. Gambar 3.2 menunjukkan skema reaktor yang digunakan dalam penelitian ini dan Gambar 3.3 menunjukkan reaktor yang digunakan selama uji aktivitas.

Pengambilan data (*sampling*) dilakukan setiap 10 menit pada 120 menit pertama, kemudian setiap 20 menit sehingga tidak semua aliran produk dan sisa gas umpan dialirkan ke GC-TCD Shimadzu. Oleh karena itu, pada aliran keluaran terdapat *bypass* yang mengalirkan gas-gas buangan langsung ke *vent*. Gas argon digunakan sebagai *carrier gas* pada GC dengan laju alir sebesar 20 mL/menit dengan menggunakan kolom karbon aktif yang dioperasikan pada temperature 100°C untuk kolomnya dan 130°C di injektornya.



**Gambar 3.2 Skema reaktor**



**Gambar 3.3 Reaktor unggun tetap yang terpasang *online* dengan kromatografi gas**

Pada reaksi ini digunakan katalis sebanyak 0,2 gram. Setelah suhu reaksi tercapai, katalis direduksi dengan mengalirkan gas hidrogen dengan laju alir 60 mL/menit selama satu jam. Kemudian, gas metana dialirkan ke dalam reaktor dengan laju alir 27 mL/menit. Pada 120 menit pertama, setiap 10 menit gas keluaran reaktor diukur laju alirnya dengan metode *bubble soap* dan dianalisa komposisinya dengan menginjeksikan gas keluaran ke GC yang terpasang online dengan reaktor. Uji aktivitas katalis diakhiri setelah lamanya reaksi mencapai 520 menit.

Parameter yang ingin dievaluasi dari uji aktivitas adalah besarnya konversi reaksi dan *yield* karbon. Konversi didefinisikan sebagai rasio jumlah mol metana yang bereaksi dengan jumlah mol gas metana yang masuk ke reaktor. Secara matematis, persamaan konversi adalah:

$$X_{CH_4} = \frac{\sum (CH_{4in} - CH_{4out})}{\sum CH_{4in}} \times 100\% \quad (3.2)$$

Persen *yield* hidrogen menunjukkan rasio jumlah mol gas hidrogen yang dihasilkan (aktual) terhadap jumlah mol gas hidrogen yang diprediksi akan dihasilkan (teoritis). Jumlah mol gas hidrogen yang akan dihasilkan secara teoritis didasarkan pada jumlah mol reaktan pembatas, yaitu gas metana, yang dikonsumsi. Persamaan *yield* hidrogen adalah:

$$Y_{H_2} = \frac{\sum (H_2)_{produk}}{2 \times \sum (CH_{4in})} \times 100\% \quad (3.3)$$

Sedangkan *yield* karbon didefinisikan sebagai berat berat karbon yang dihasilkan per gram katalis. Secara matematika:

$$Y_C = \frac{\text{massa karbon}}{\text{massa katalis}} \text{ gr C/gr cat.} \quad (3.4)$$

Laju alir metana diverifikasi dengan cara mengukur laju alir metana saat reaktor kosong (hanya berisi glass wool dan katalis) dan saat di reaktor terdapat produk nanokarbon dengan tinggi tertentu. Dari data yang didapatkan akan diplot dalam kurva ketinggian unggun versus penurunan laju alir dan diperoleh persamaan penurunan laju alir masukan metana terhadap ketinggian unggun.

### 3.6 KARAKTERISASI PRODUK NANOKARBON

Karakterisasi nanokarbon dilakukan untuk melihat morfologi dari nanokarbon yang dihasilkan dari masing-masing katalis dengan menggunakan *Transmission Electron Microscopy* (TEM) di Laboratorium Uji Bahan, Pusat Tenaga Bahan Badan Nuklir-Badan Tenaga Nuklir Nasional (LUB PTBN-BATAN), kawasan PUSPIPEK, Serpong, Tangerang, Banten.

## BAB IV

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 HASIL KARAKTERISASI KATALIS

Katalis yang dihasilkan berwarna hitam kecokelatan seperti yang terlihat pada Gambar 4.1. Semua katalis yang telah dipreparasi dikarakterisasi untuk mengetahui karakter dan komposisinya. Adapun karakterisasi yang dilakukan terhadap katalis yang telah dipreparasi meliputi komposisi katalis dengan menggunakan XRF dan karakterisasi diameter partikel NiO dengan XRD.



**Gambar 4.1 Katalis Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

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

Karakterisasi XRF bertujuan untuk mengetahui komposisi aktual dari katalis yang telah dipreparasi. Diharapkan komposisi aktual katalis sesuai dengan komposisi yang didesain pada saat preparasi katalis. Tabel 4.1 menampilkan perbandingan komposisi desain dan komposisi aktual dari katalis.

**Tabel 4.1 Perbandingan Komposisi Desain dan Komposisi Aktual Katalis Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dari Hasil Karakterisasi XRF**

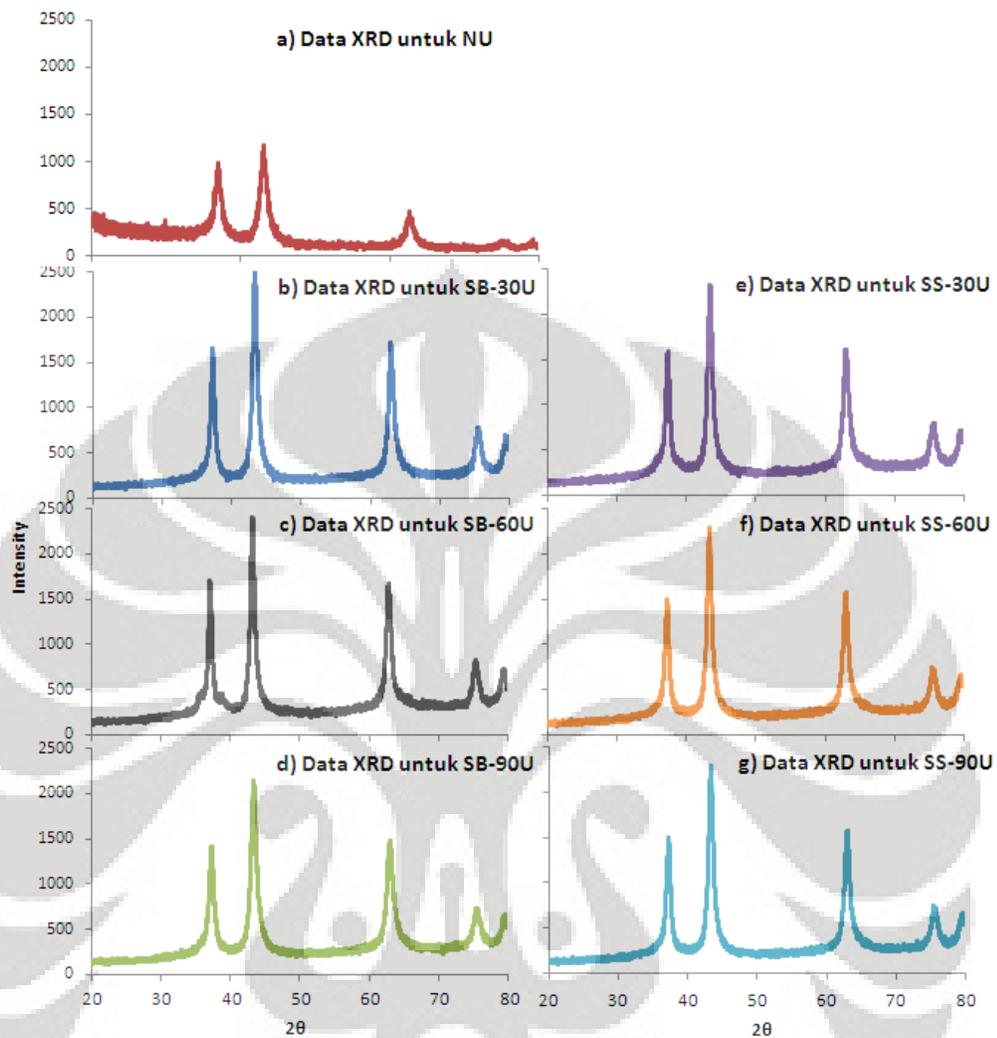
Katalis		Komposisi desain katalis	Komposisi aktual katalis
NU	Tanpa perlakuan ultrasonik	61 : 31 : 8	67,9 : 22,7 : 9.4
SB-30U	30 menit perlakuan ultrasonik sebelum agglomerasi	61 : 31 : 8	70.0 : 20.4 : 9.6
SB-60U	60 menit perlakuan ultrasonik sebelum agglomerasi	61 : 31 : 8	63.3 : 27.5 : 9.2
SB-90U	90 menit perlakuan ultrasonik sebelum agglomerasi	61 : 31 : 8	66.9 : 23.7 : 9.4
SS-30U	30 menit perlakuan ultrasonik setelah aglomerasi	61 : 31 : 8	63.4 : 26.6 : 9.5
SS-60U	60 menit perlakuan ultrasonik setelah aglomerasi	61 : 31 : 8	63.7 : 26.7 : 9.6
SS-90U	90 menit perlakuan ultrasonik setelah aglomerasi	61 : 31 : 8	69.6 : 21.2 : 9.2

Hasil karakterisasi XRF menunjukkan bahwa katalis memiliki komposisi aktual yang berbeda-beda walaupun jumlah prekursor dan prosedur preparasinya sama. Akibatnya dihasilkan katalis dengan persen *loading* yang berbeda-beda seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.1. Hal ini dimungkinkan karena jumlah larutan ammonia yang ditambahkan selama proses preparasi berbeda untuk mencapai pH yang sama, yaitu 7,5. Perbedaan ini disebabkan oleh faktor eksternal yang tidak dapat diminimalisasi oleh peneliti.

#### 4.1.2 Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi XRD bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi perlakuan ultrasonik terhadap ukuran partikel katalis. Hasil karakterisasi XRD terhadap katalis Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, tanpa perlakuan ultrasonik dan dengan perlakuan ultrasonik sebelum dan sesudah proses agglomerasi dapat dilihat pada Gambar 4.2.

Dengan menggunakan PC PDFWin, terdeteksi keberadaan kristal NiO. Tidak ditemukan adanya Ni karena karakterisasi XRD ini dilakukan tanpa proses reduksi katalis terlebih dahulu sehingga senyawa yang terdeteksi adalah NiO. NiO (111) berada pada sekitar 37°, NiO (200) pada 43°, NiO (220) pada 62°, NiO (311) pada 75°, dan NiO (222) pada 79°. Dari hasil karakterisasi tidak terdeteksi adanya kristal NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, yang merupakan bentuk tidak aktif dari Ni.



**Gambar 4.2 Hasil Karakterisasi XRD untuk Katalis Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan variasi perlakuan ultrasonik**

Ukuran partikel NiO dihitung menggunakan persamaan Scherrer pada tiga *peak* dengan intensitas tertinggi, yaitu NiO (111), NiO (200), dan NiO (220). Hasil perhitungan diameter partikel ditunjukkan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Diameter Partikel dari Data Karakterisasi XRD**

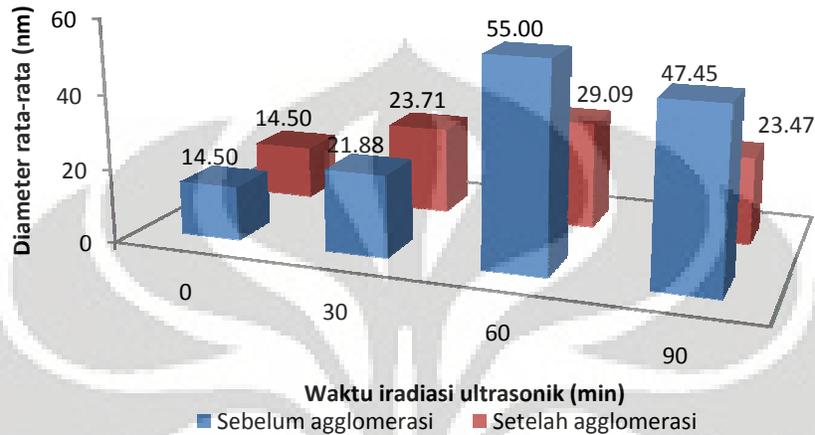
Katalis		Diameter Partikel NiO (nm)
NU	Tanpa perlakuan ultrasonik	14,50
SB-30U	30 menit perlakuan ultrasonik sebelum agglomerasi	21,88
SB-60U	60 menit perlakuan ultrasonik sebelum agglomerasi	61,84
SB-90U	90 menit perlakuan ultrasonik sebelum agglomerasi	47,45
SS-30U	30 menit perlakuan ultrasonik setelah agglomerasi	23,71
SS-60U	60 menit perlakuan ultrasonik setelah agglomerasi	29,09
SS-90U	90 menit perlakuan ultrasonik setelah agglomerasi	23,47

Dari Tabel 4.2 di atas terlihat adanya kenaikan diameter NiO dengan adanya perlakuan ultrasonik. Hal ini bertentangan dengan teori bahwa perlakuan ultrasonik dapat memperkecil ukuran katalis, seperti yang dijelaskan pada subbab 2.6.2, dimana iradiasi ultrasonik menghasilkan gelembung kavitas yang saat pecah menghasilkan gelombang kejut yang dapat memecah partikel menjadi lebih kecil.

Dari Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa saat di-iradiasi ultrasonik semakin lama waktu iradiasi ultrasonik maka ukuran diameter rata-rata NiO menjadi semakin besar. Saat di-iradiasi selama 60 menit, diameter rata-rata NiO lebih besar daripada yang di-iradiasi selama 30 menit. Kenaikan ukuran partikel ini kemungkinan disebabkan karena pada awal iradiasi ultrasonik, kavitas yang terbentuk mendorong laju pembentukan inti. Dengan waktu iradiasi ultrasonik yang semakin lama, kristal mengalami pertumbuhan. Akibatnya ukuran kristalnya semakin besar. Hal ini serupa dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Qian dalam preparasi nanokristal ZnO [38], dimana semakin lama iradiasi ultrasonik diberikan maka ukuran partikel akan semakin membesar.

Namun, saat iradiasi ultrasonik diaplikasikan selama 90 menit, didapatkan ukuran diameter rata-rata NiO lebih kecil daripada yang diberi iradiasi ultrasonik selama 60 menit. Seharusnya ukuran diameter rata-rata NiO menjadi lebih besar, bukannya lebih kecil. Turunnya diameter ini tidak dapat dijadikan *trend* atau

kecenderungan karena keterbatasan data, sehingga diperlukan data tambahan untuk memastikannya.



**Gambar 4.3 Pengaruh iradiasi ultrasonik terhadap ukuran kristal**

Dari Gambar 4.3 terlihat bahwa perlakuan ultrasonik pada setelah tahap agglomerasi menghasilkan ukuran partikel katalis yang hampir sama, yaitu 23,71 nm untuk perlakuan ultrasonik selama 30 menit, 29,09 nm selama 60 menit, dan 23,47 nm selama 90 menit. Adanya perlakuan ultrasonik tidaklah mengubah dimensi partikel secara signifikan karena telah terbentuk kristal yang lebih stabil, dimana energi permukaannya kecil. Hal ini berbeda dengan keadaan sebelum tahap agglomerasi dimana partikel masih berbentuk sol yang memiliki energi permukaan yang besar sehingga memiliki kecenderungan yang lebih besar untuk menggerombol [39].

## 4.2 UJI AKTIVITAS KATALIS

Semua jenis katalis yang telah dipreparasi diuji keaktifannya dalam reaksi dekomposisi katalitik metana menghasilkan nanokarbon dan gas H<sub>2</sub>. Selain itu, pengujian dilakukan menggunakan reaktor unggun tetap (*fixed bed reactor*) yang terbuat dari kuarsa dengan kondisi yang sama, yaitu:

Tekanan operasi : Atmosferik  
 Temperatur operasi : 650°C  
 Waktu tinggal : 0,0074 g kat.detik/ml  
 Waktu uji : 520 menit

#### 4.2.1 Uji Aktivitas Katalis dengan Iradiasi Ultrasonik Sebelum Tahap Agglomerasi

Perbandingan hasil uji aktivitas katalis yang diberi iradiasi ultrasonik sebelum tahap agglomerasi dan katalis tanpa iradiasi ultrasonik dapat dilihat pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3 Hasil uji aktivitas katalis dengan iradiasi ultrasonik sebelum tahap agglomerasi\***

Katalis	Dia. Partikel (nm)	Loading Ni (% wt.)	X <sub>CH<sub>4</sub></sub> (%)	Y <sub>H<sub>2</sub></sub> (%)	Y <sub>C</sub> (gr.C/gr.cat)	ΔP <sup>+</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	H. ungunn <sup>+</sup> (cm)
NU	14,50	67,9	74,82	35,68	6,25	0,2	4
SB-30U	21,88	70	76,70	35,95	4,14	0,5	2,1
SB-60U	61,84	63,3	66,14	32,79	5,48	0,4	3,2
SB-90U	47,45	66,9	68,07	34,51	8,27	0,05	5,6

\*) Data hasil uji aktivitas katalis pada tabel di atas merupakan rata-rata hasil uji aktivitas selama 520 menit

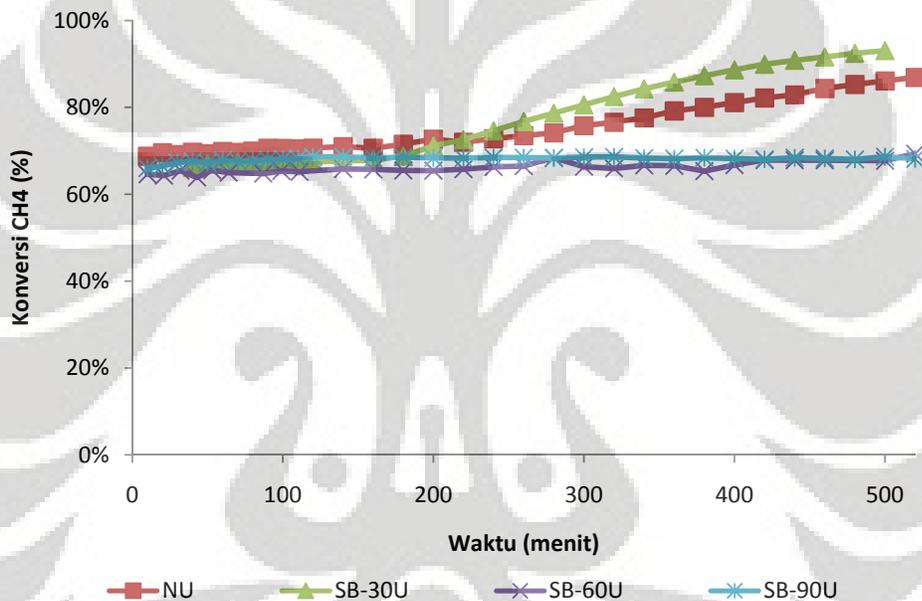
†) Data *pressure drop* dan ketinggian ungunn pada akhir uji aktivitas.

Dari data di Tabel 4.3 dan Gambar 4.4, dapat dilihat bahwa katalis SB-30U menghasilkan konversi metana rata-rata yang paling tinggi. Berikutnya diikuti oleh katalis NU, SB-90U, dan SB-60U. Tingginya konversi metana ini bukanlah akibat ukuran diameter partikel yang dihasilkan namun karena tingginya *loading* Ni. Katalis SB-30U memiliki *loading* Ni yang paling tinggi yaitu 70%. Jadi semakin tinggi *loading* Ni maka semakin tinggi konversi rata-rata metana yang dihasilkan oleh katalis tersebut.

*Loading* Ni menunjukkan banyaknya inti aktif yang terdapat pada katalis. Banyaknya inti aktif berpengaruh terhadap banyaknya metana yang teradsorb

pada katalis. Semakin banyak inti aktif maka semakin banyak metana yang teradsorb dan bereaksi menghasilkan karbon dan hidrogen [40].

Dari Tabel 4.3, dapat dilihat bahwa katalis SB-30U menghasilkan persen *yield* hidrogen yang paling tinggi, yaitu sebesar 35,95%. Kemudian diikuti oleh katalis NU, SB-90U, dan SB-60U, sebesar 35,68%; 34,51%; dan 31,79%. *Yield* hidrogen bergantung pada konversi metana. Apabila konversi metana semakin tinggi, maka semakin banyak metana yang bereaksi, sehingga hidrogen yang dihasilkan pun semakin banyak pula.



**Gambar 4.4 Perbandingan konversi CH<sub>4</sub> pada katalis dengan iradiasi ultrasonik sebelum tahap agglomerasi**

*Yield* karbon menunjukkan rasio massa produk karbon yang dihasilkan terhadap massa katalis yang digunakan. Sedangkan *yield* karbon tertinggi dimiliki oleh katalis SB-90U, yaitu sebesar 8,27 gr C/gr cat. Lalu diikuti oleh katalis NU, SB-60U, dan SB-30U dengan *yield* karbon sebesar 6,25; 5,48; dan 4,14 gr C/gr cat.

Seharusnya *loading* Ni yang tinggi akan menghasilkan karbon yang lebih banyak yaitu *yield* karbon yang tinggi pula [40]. Jadi, seharusnya katalis SB-30U yang memiliki *loading* Ni paling tinggi, yaitu 70% menghasilkan *yield* karbon

paling tinggi. Namun ternyata dari data diperoleh bahwa katalis SB-30U memiliki *yield* karbon yang paling rendah. Hal ini dapat dijelaskan berkaitan dengan *pressure drop* pada reaktor saat uji aktivitas katalis SB-30U, yaitu sebesar 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>. *Pressure drop* yang tinggi pada reaktor, terjadi akibat deposisi karbon pada katalis. Dan mengakibatkan laju alir metana yang masuk reaktor semakin kecil pada saat uji aktivitas katalis ini. Dengan semakin sedikitnya gas metana yang bereaksi maka semakin kecil laju pembentukan karbon.

#### 4.2.2 Uji Aktivitas Katalis dengan Iradiasi Ultrasonik Setelah Tahap Agglomerasi

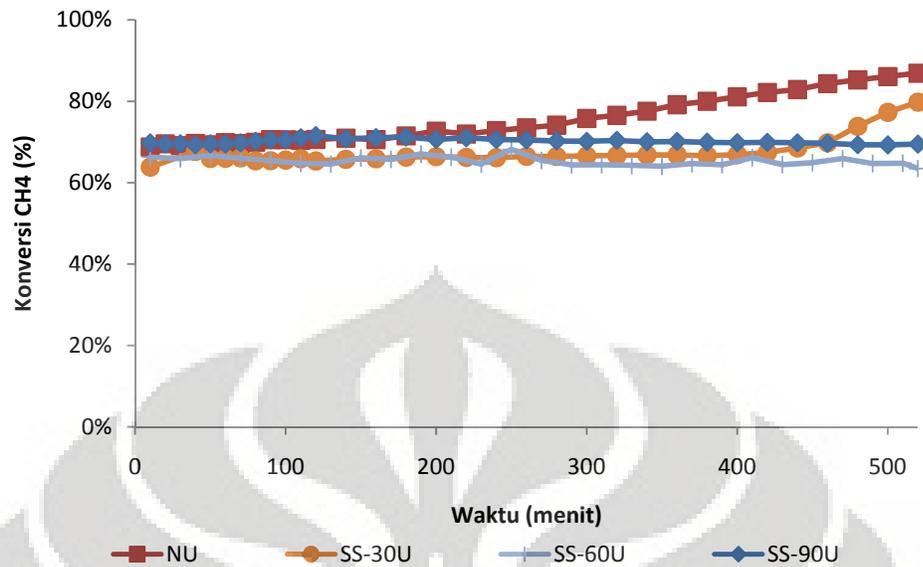
Perbandingan hasil uji aktivitas katalis yang diberi iradiasi ultrasonik setelah tahap agglomerasi dan katalis tanpa iradiasi ultrasonik dapat dilihat pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4 Hasil uji aktivitas katalis dengan iradiasi ultrasonik setelah tahap agglomerasi\***

Katalis	Dia. Partikel (nm)	Loading Ni (% wt.)	X <sub>CH<sub>4</sub></sub> (%)	Y <sub>H<sub>2</sub></sub> (%)	Y <sub>C</sub> (gr.C/gr.cat)	ΔP <sup>+</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	H. ungunn <sup>+</sup> (cm)
NU	14,50	67,9	74,82	35,68	6,25	0,2	4
SS-30U	23,71	63,4	67,47	32,82	5,72	0,3	2,1
SS-60U	29,09	63,7	65,32	32,12	5,68	0,3	3,2
SS-90U	23,47	69,6	70,16	35,45	8,59	0	5,6

\*) Data hasil uji aktivitas katalis pada tabel di atas merupakan rata-rata hasil uji aktivitas selama 520 menit

†) Data *pressure drop* dan ketinggian ungunn pada akhir uji aktivitas.



**Gambar 4.5 Perbandingan konversi CH<sub>4</sub> pada katalis dengan iradiasi ultrasonik setelah tahap agglomerasi**

Dari data di Tabel 4.4 dan Gambar 4.5, dapat dilihat bahwa katalis NU menghasilkan konversi metana rata-rata yang paling tinggi, yaitu 74,82%. Berikutnya diikuti oleh katalis SS-90U, SS-30U dan SS-60U sebesar 70,16%; 67,47% dan 65,32 %. Katalis SS-90U memiliki *loading* Ni yang paling tinggi, sehingga seharusnya memiliki konversi metana yang paling tinggi. Namun perbedaan konversi katalis SS-90U dan katalis NU tidak terlalu besar sehingga penyimpangan data ini masih dalam tahap wajar. Sedangkan, katalis SS-60U memiliki *loading* Ni yang hampir sama dengan katalis SS-30U, sehingga konversi metana yang dimiliki keduanya pun tidak jauh berbeda.

Dari Tabel 4.4, dapat dilihat bahwa *yield* hidrogen tertinggi dihasilkan oleh katalis NU, diikuti oleh SS-90U, SS-30U, dan SS-60U sebesar 35,68%; 35,45%, 32,82%, dan 32,12%. *Yield* hidrogen dipengaruhi oleh konversi metana. Apabila konversi metana semakin tinggi, maka semakin banyak metana yang bereaksi, sehingga hidrogen yang dihasilkan pun semakin banyak pula.

*Yield* karbon tertinggi dimiliki oleh katalis SS-90U, yaitu sebesar 8,59 gr C/gr cat. Lalu diikuti oleh katalis NU, SS-30U, dan SS-60U dengan *yield* karbon sebesar 6,25; 5,72; 5,682 gr C/gr cat. *Yield* karbon ini dipengaruhi oleh *loading*

Ni. Namun karena *loading* Ni katalis SS-30U dan SS-60U hampir sama, yaitu 63,4% dan 63,7%, maka *yield* karbonnya juga hampir sama.

#### 4.3 UJI STABILITAS KATALIS

Uji stabilitas katalis bertujuan untuk mengetahui waktu hidup katalis. Katalis yang akan diuji stabilitasnya adalah katalis SB-30U. Katalis ini dipilih karena menghasilkan konversi dan persen *yield* hidrogen yang paling tinggi pada uji aktivitas katalis selama 520 menit.

Pengujian dilakukan menggunakan reaktor unggun tetap (*fixed bed reactor*) yang terbuat dari kuarsa dengan kondisi yang sama dengan uji aktivitas, yaitu:

Tekanan operasi : Atmosferik  
 Temperatur operasi : 650°C  
 Waktu tinggal : 0,0074 g kat.detik/ml

Uji stabilitas akan dihentikan saat konversi metana tidak naik secara signifikan lagi atau laju alir keluaran reaktor sangat kecil, yaitu di bawah 4 mL/menit.

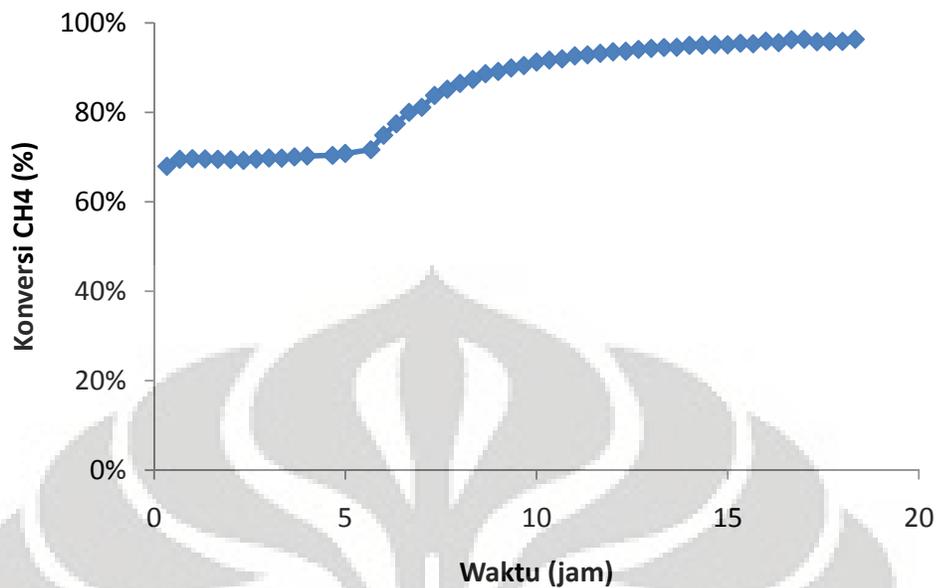
Katalis SB-30U memiliki waktu hidup selama 1100 menit atau 18 jam 20 menit. Uji stabilitas dihentikan karena laju alir keluaran reaktor yang sudah terlalu kecil, yaitu 3,81 mL/menit. Hasil uji stabilitas katalis SB-30U dapat dilihat pada Tabel 4.5.

**Tabel 4.5 Hasil uji stabilitas katalis SB-30U\***

Katalis	X <sub>CH<sub>4</sub></sub> (%)	Y <sub>H<sub>2</sub></sub> (%)	Y <sub>C</sub> (gr.C/gr.cat)	ΔP <sup>+</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	H. unggun <sup>+</sup> (cm)
SS-30U	85,27	20,19	10,09	0,7	7

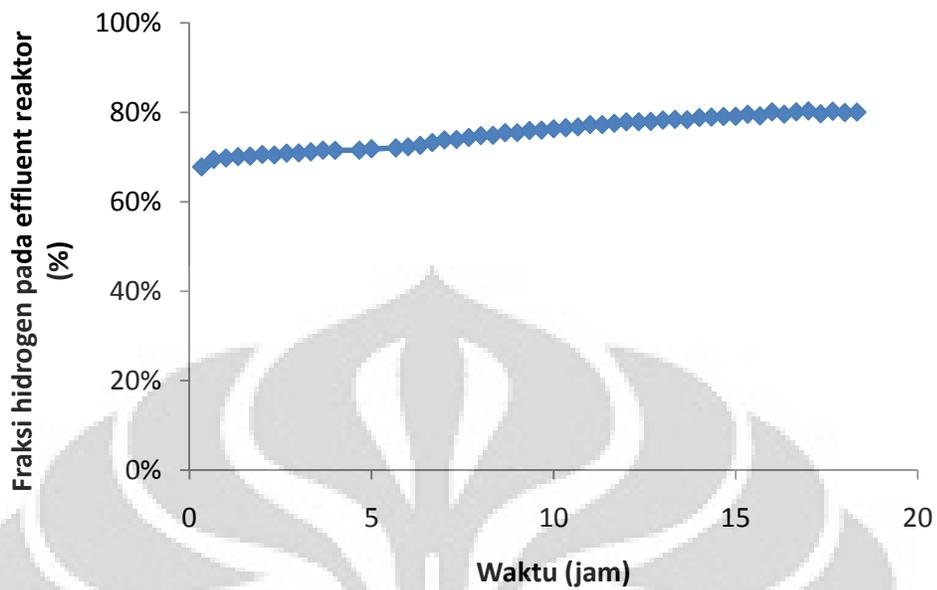
\*) Data hasil uji aktivitas katalis pada tabel di atas merupakan rata-rata hasil uji stabilitas

†) Data *pressure drop* dan ketinggian unggun pada akhir uji aktivitas.

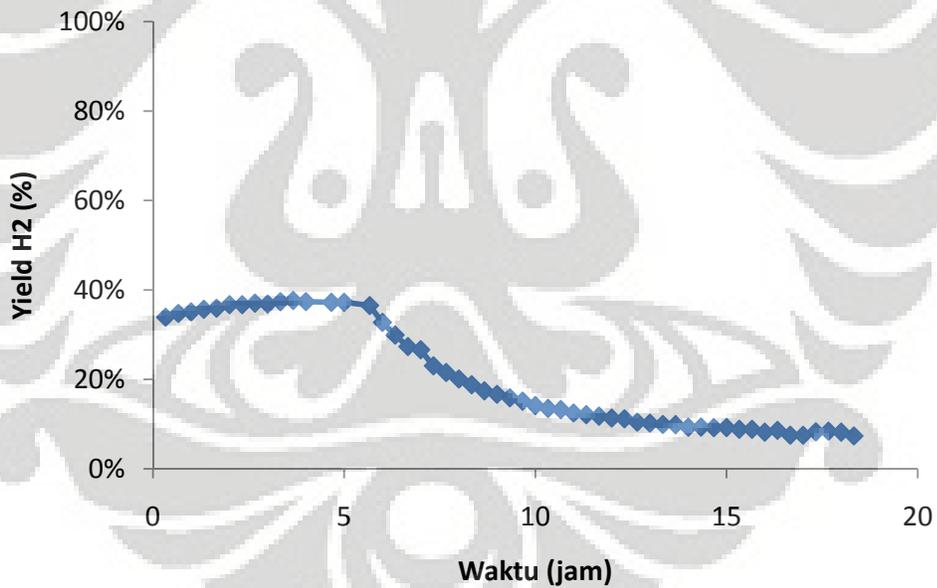


**Gambar 4.6 Konversi CH<sub>4</sub> pada katalis SB-30U**

Gambar 4.6 menunjukkan kurva konversi metana katalis SB-30U. Dapat dilihat bahwa kurva konsentrasi metana terus naik bahkan setelah diuji selama 18 jam dan belum menunjukkan tanda-tanda akan turun. Selain itu, dapat pula dilihat dari Gambar 4.7 bahwa fraksi hidrogen yang dihasilkan juga semakin banyak. Kenaikan ini menunjukkan bahwa katalis masih cukup aktif karena masih dapat menghasilkan hidrogen. Namun aliran keluaran reaktor telah sangat kecil karena *pressure drop* yang tinggi yaitu sebesar 0,7 kgf/cm<sup>2</sup>. *Pressure drop* yang tinggi disebabkan oleh deaktivasi katalis akibat deposisi karbon yang terbentuk hasil reaksi. Sehingga laju alir masukan metana pun semakin kecil. Namun metana yang masuk masih dapat direaksikan menjadi hidrogen dan karbon oleh katalis. Hal ini yang menyebabkan kurva konversi metana masih cenderung stabil.



**Gambar 4.7** Fraksi hidrogen pada *effluent* reaktor



**Gambar 4.8** *Yield* hidrogen pada katalis SB-30U

Persen *yield* hidrogen menunjukkan rasio jumlah mol gas hidrogen yang dihasilkan (aktual) terhadap jumlah mol gas hidrogen yang diprediksi akan dihasilkan (teoritis). Persen *yield* hidrogen rata-rata yang dihasilkan selama 1100

menit adalah sebesar 20,19%. Gambar 4.8 menunjukkan kurva persen *yield* hidrogen. Kurva tersebut terus menurun menunjukkan bahwa jumlah mol gas hidrogen yang dihasilkan (aktual) semakin sedikit dibandingkan jumlah mol hidrogen yang diprediksi akan dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin sedikit hidrogen yang dihasilkan dibandingkan dengan karbon.

#### 4.4 MORFOLOGI NANOKARBON

Produk nanokarbon hasil reaksi dekomposisi katalitik metana dapat dilihat pada Gambar 4.9. Uji karakterisasi produk nanokarbon menggunakan TEM.

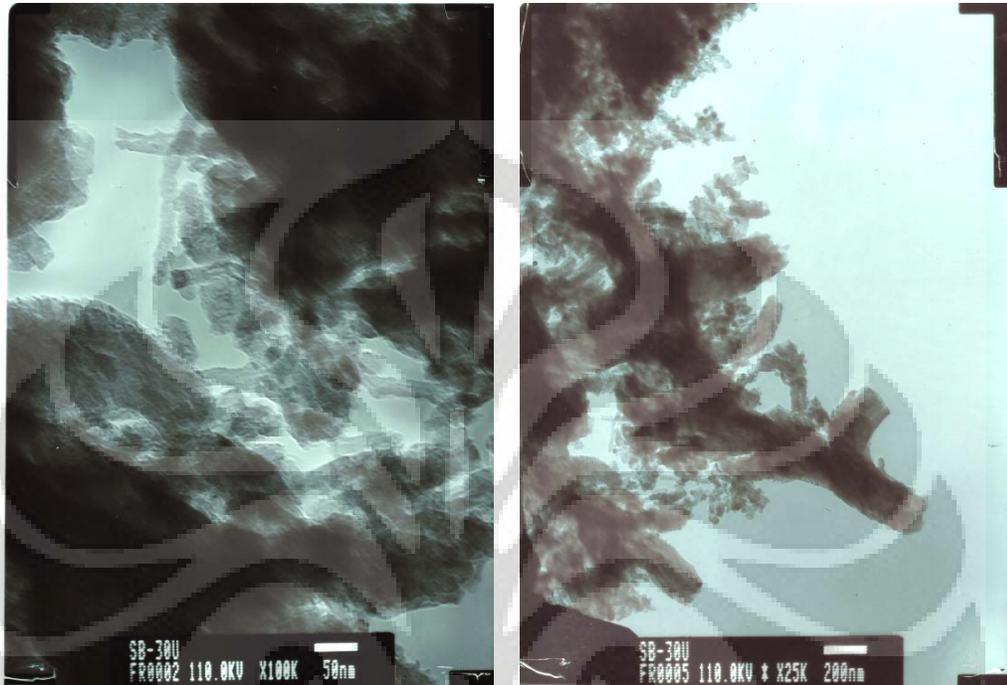


**Gambar 4.9 Produk nanokarbon**

Hasil uji karakterisasi TEM dapat dilihat pada Gambar 4.10. Dapat dilihat bahwa nanokarbon yang dihasilkan berupa karbon nanofiber (CNF) dan karbon nanotube (CNT). Dari gambar dapat dilihat bahwa nanokarbon yang dihasilkan memiliki diameter yang bervariasi dari 20-230 nm. CNT yang dihasilkan memiliki diameter yang cukup kecil yaitu 20-35 nm. Namun, rasio CNT dibandingkan CNF kecil, sehingga lebih banyak dihasilkan CNF yang diameternya lebih besar.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Astika [41] dihasilkan nanokarbon yang lebih baik, berupa berupa CNT dengan diameter 22-30 nm.

Digunakan katalis yang sama dan temperatur reaksi yang sama pula, namun tanpa perlakuan ultrasonik.



**Gambar 4.10 Hasil karakterisasi TEM nanokarbon katalis SB-30U**

# BAB V

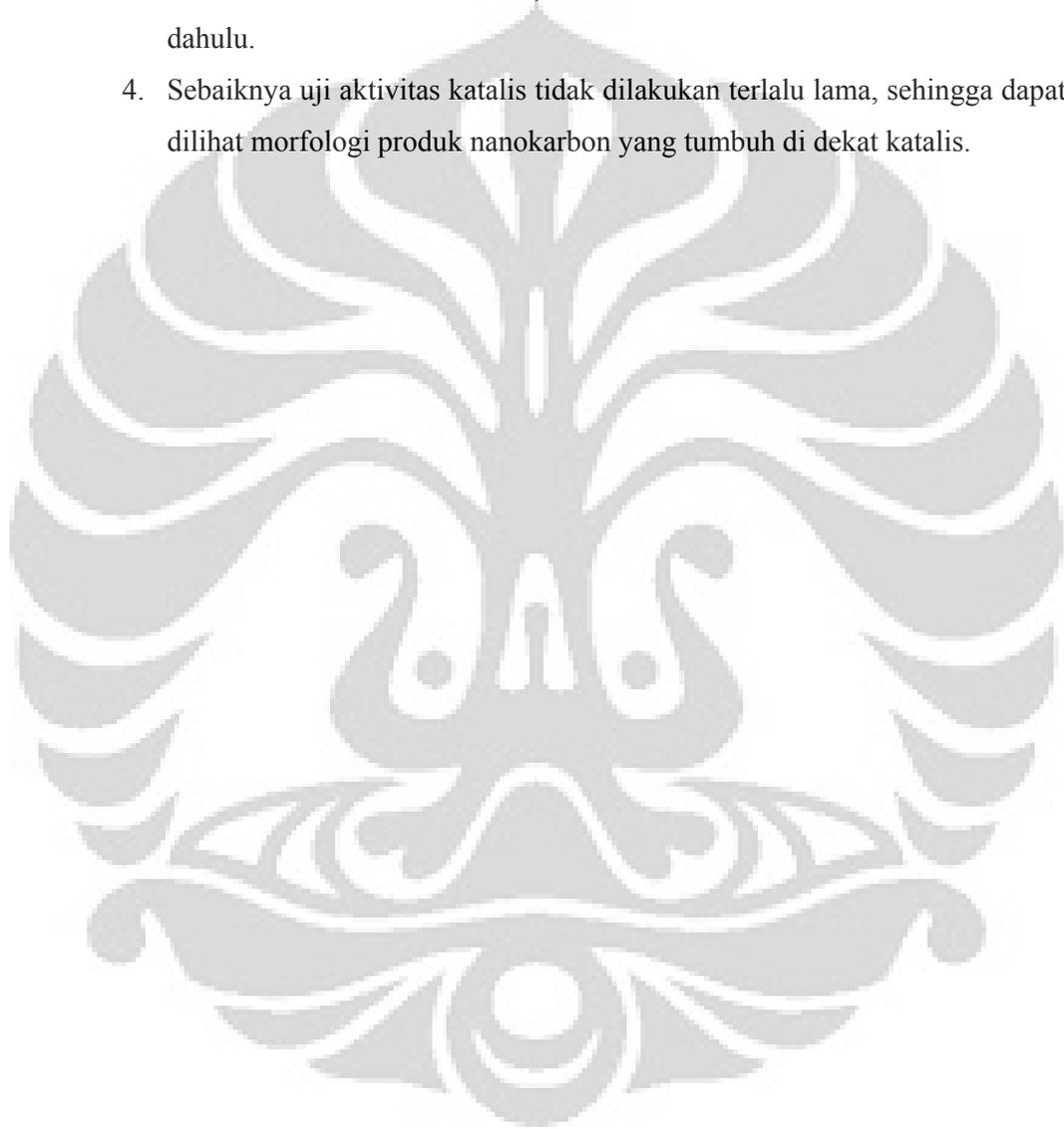
## KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 KESIMPULAN

1. Semakin lama waktu iradiasi ultrasonik selama preparasi katalis menyebabkan semakin besar ukuran diameter inti aktif. Tanpa iradiasi ultrasonik didapatkan ukuran diameter katalis 14,50 nm. Dengan iradiasi ultrasonik selama 30, 60, dan 90 menit, menghasilkan katalis berdiameter 21,88; 61,84; dan 47,45 nm.
2. Iradiasi ultrasonik sebelum tahap agglomerasi menghasilkan diameter katalis yang lebih besar daripada setelah tahap agglomerasi. Dengan iradiasi ultrasonik selama 30, 60, dan 90 menit setelah agglomerasi menghasilkan katalis berdiameter 23,71; 29,09; dan 23,47 nm. Dan sebelum agglomerasi, berdiameter 21,88; 61,84; dan 47,45 nm.
3. Semakin tinggi loading Ni pada katalis, maka semakin tinggi konversi metana dan *yield* hidrogen. Katalis SB-30U memiliki loading Ni tertinggi yaitu 70%, memiliki konversi metana dan *yield* hidrogen tertinggi pula yaitu 76,70% dan 35,95%.
4. *Yield* karbon dipengaruhi oleh *pressure drop* yang terjadi selama reaksi. *Yield* karbon tertinggi dihasilkan oleh katalis SS-90U yaitu 8,59 gr C/gr dengan *pressure drop* sebesar 0 kgf/m<sup>2</sup> untuk reaksi selama 520 menit.
5. Katalis SB-30U memiliki waktu hidup 18 jam 20 menit dan memiliki konversi metana, *yield* hidrogen rata-rata, dan *yield* karbon sebesar 85,27%; 20,19%; dan 10,09 gr C/gr kat.
6. Nanokarbon yang dihasilkan sebagian besar berupa karbon nanofiber dibandingkan karbon nanotube dengan diameter antara 20-230 nm.

## 5.2 SARAN

1. Variasi lama iradiasi ultrasonik lebih banyak.
2. Sebaiknya katalis dibuat satu *batch* saja, untuk kemudian divariasikan iradiasi ultrasoniknya.
3. Sebelum dikarakterisasi XRD, lebih baik katalis telah direduksi terlebih dahulu.
4. Sebaiknya uji aktivitas katalis tidak dilakukan terlalu lama, sehingga dapat dilihat morfologi produk nanokarbon yang tumbuh di dekat katalis.



## DAFTAR ACUAN

- [1] Nanotechnology and Government Strategies Worldwide. [Online]. 2003 [diakses pada 22 Maret 2007]. Tersedia di:  
<http://www.researchandmarkets.com/reports/37902>
- [2] Nanotechnology – The Coming Revolution. [Online]. 2005 [diakses pada 22 Maret 2007]. Tersedia di:  
<http://www.researchandmarkets.com/reports/10810>
- [3] Daenan M, de Fouw RD, Hamers B, Janssen PGA, Schouteden K, Veld MAJ. *Wondrous World of Carbon Nanotubes*. Eindhoven University of Technology; 2003.
- [4] Zhang D, Shi L, Fang J, Dai K, Li X. *Preparation and desalination performance of multiwall carbon nanotubes*. *Materials Chemistry and Physics* 2006; 97:415-419.
- [5] Grujicic M, Cao G, Gersten B. *An atomic-scale analysis of catalytically-assisted chemical vapor deposition of carbon nanotubes*. *Materials Science and Engineering* 2002;B94:247-259.
- [6] Song L. *Pengaruh keasaman katalis berbasis Ni-Cu terhadap kinerja reaksi dekomposisi katalitik metana menjadi hydrogen dan nanokarbon*. Skripsi. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia FTUI; 2005.
- [7] Saputra E. *Studi pengaruh partikel nikel terhadap kinerja katalis Ni-Cu/Al pada reaksi dekomposisi katalitik metana*. Skripsi. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia FTUI; 2005.
- [8] Li Y, Zhang XB, Tao XY, Xu JM, Huang WZ, Luo JH, Luo ZQ, Li T, Liu F, Bao Y, Geise HJ. *Mass production of high-quality multi-walled carbon nanotube bundles on a Ni/Mo/MgO catalyst*. *Carbon* 2005;43:295-301.
- [9] Chen J, Li Y, Ma Y, Qin Y, Chang L. *Formation of bamboo-shaped carbon filaments and dependence of their morphology on catalyst composition and reaction conditions*. *Carbon* 2001;39:1467-1475.
- [10] Chen J, Li Y, Li Z, Zhang X. *Production of Cox-free hydrogen and nanocarbon by direct decomposition of undiluted methane on Ni-Cu-alumina catalysts*. *Applied Catalysis A* 2004;269:179-186.
- [11] Kuznetsov VL. *Mechanism of carbon filaments and nanotubes formation on metal catalysts*. Bereskov Institute of Catalysis, Lavrentieva 5, Novosibirsk, 630090 Rusia.
- [12] Takenaka S, Serizawa M, Otsuka K. *Formation of filamentous carbons over supported Fe catalysts through methane decomposition*. *Journal of Catalysis* 2004;222:520-531.

- [13] Li YL, Kinloch IA, Shaffer MSP, Geng J, Johnson B, Windle AH. *Synthesis of single-walled carbon nanotubes by a fluidized-bed method*. Chemical Physics Letters 2004;384:98-102.
- [14] Ermakova MA, Ermakov DY, Kushinov GG, Plyasova LM. *New nickel catalyst for the formation of the filamentous carbon in the reaction of methane decomposition*. Journal of Catalysis 1999;187:77-84.
- [15] Susanty R. *Sintesis dan uji kinerja katalis Ni/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan teknik preparasi sol-del dan impregnasi untuk reaksi oksidasi parsial metana: variasi promotor CeO<sub>2</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan MgO serta perlakuan ultrasonik*. Tesis. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia FTUI; 2003.
- [16] Takenaka S, Ogihara H, Yamanaka I, Otsuka K. *Decomposition of methane over supported-Ni catalysts: effects of the supports on the catalytic lifetime*. Applied Catalysis A: General 2001;217:101-110.
- [17] Rao CNR, Satishkumar BC, Govindaraj A, Nath M. *Nanotubes*. Chemphyschem 2001;2:78-105.
- [18] He C, Zhao N, Shi C, Xiwen D, Li J. *Carbon nanotubes and onions from methane decomposition using Ni/Al catalysts*. Materials Chemistry and Physics 2006;97:109-115.
- [19] Gullon IM, Vera J, Conesa JA, Gonzalez JL, Monino C. *Differences between carbon nanofibers produced using Fe and Ni catalysts in a floating catalyst reactor*. Carbon 2006;xxx:xxx-xxx (Article in Press).
- [20] Qian D, Wagner GJ, Liu WK. *Mechanics of carbon nanotubes*. Applied Mechanics Rev 2002;55:495-533.
- [21] Komarov FF, Mironov AM. *Carbon nanotubes: present and future*. Physics and Chemistry of Solid State 2004;5:411-429.
- [22] Ruoff RS, Qian D, Liu WK. *Mechanical properties of carbon nanotubes: theoretical predictions and experimental measurements*. CR Physique 2003;4:933-1008.
- [23] Serp P. *Carbon nanotubes and nanofibers in catalysts*. Applied Catalysis A: General 2003;253:337-358.
- [24] Iijima S. *Carbon nanotubes: past, present, and future*. Physica B 2002;323:1-5.
- [25] Preparation Catalyst Support and Supported Catalyst. [Online]. [diakses pada 15 April 2007]. Tersedia di: [http://edu.chem.tue.nl/sheets/SET-slides\\_lecture9.pdf](http://edu.chem.tue.nl/sheets/SET-slides_lecture9.pdf)
- [26] Ermakova MA, Ermakov DY, Chuvilin AL, Kushinov GG. *Decomposition of methane over iron catalysts at the range of moderate temperatures: the influence of structure of the catalytic systems and the reaction conditions on the yield of carbon and morphology of carbon filaments*. Journal of Catalysis 2001;201:183-197.

- [27] Kim DH, Woo SI, Yang OB. *Effect of pH in a sol-gel synthesis on the physiochemical properties of Pd-alumina three-way catalyst*. Applied Catalysis B: Environmental 2000;26:285-289.
- [28] Reshетенko TV, Avdeeva LB, Ismagilov ZR, Chuvilin AL, Ushakov VA. *Carbon capacious Ni/Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for high-temperature methane decomposition*. Applied Catalysis A: General 2003;247:51-63.
- [29] Dussault L, Dupin JC, Latorre N, Ubieto T, Noé L, Monthieux M, Romeo E, Royo C, Monzón A, Guimon C. *New Ni–Cu–Mg–Al-based catalysts preparation procedures for the synthesis of carbon nanofibers and nanotubes*. Journal of Physics and Chemistry of Solids 2006;67:1162-1167.
- [30] Li Y, Chen J, Qin Y, Chang L. *Simultaneous production of hydrogen and nanocarbon from decomposition of methane on a nickel-based catalyst*. Energy and Fuels 2000;14:1188-1194.
- [31] Satterfield, Charles N. *Heterogenous Catalysis in Industrial Practical*. Ed. 2. Singapore: McGraw Hill, 1991.
- [32] Chang, Raymond. *Chemistry*. Ed. 5. Singapore: McGraw Hill, 1994.
- [33] Suslick KS, Casadonte DJ, Doktycz SJ. *The effect of ultrasound on nickel and copper powder*. Solid State Ionics 1988;32/33:444-452.
- [34] Suslick KS. *The Chemistry of Ultrasound*. [Online]. [Diakses pada 18 April 2007]. Tersedia di: <http://www.scs.uiuc.edu/suslick/britannica.html>
- [35] Rahman MS. *Pengaruh iradiasi ultrasonik pada preparasi katalis CuO/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> untuk reaksi hidrogenasi CO<sub>2</sub> menjadi metanol*. Skripsi. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia; 2001.
- [36] Kairupan ME. *Karakterisasi BET dan TPD pada katalis CuO/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang dipreparasi dengan perlakuan iradiasi ultrasonik untuk reaksi hidrogenasi CO<sub>2</sub> menjadi metanol*. Skripsi. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia; 2001.
- [37] Mason T. *An Introduction to Sonochemistry*. [Online]. [Diakses pada 18 Juni 2008]. Tersedia di: <http://www.sonochemistry.info/Research.htm>
- [38] Qian D, Jiang JZ, dan Hansen PL. *Preparation of ZnO nanocrystals via ultrasonic irradiation*. Chemcomm.
- [39] Richardson JT. *Principle of catalyst development (Fundamental and applied catalysis)*. New York: Plenum Press, 1989.
- [40] Ermakova MA, Ermakov DY, Kushinov GG. *Effective catalyst for direct cracking of methane to produce hydrogen and filamentous carbon, part 1. Nickel catalysts*. Applied Catalysis A: General 2000;201:61-70.
- [41] Siregar AO. *Pengaruh textural promoter (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MgO) pada katalis berbasis Ni-Cu terhadap kualitas dan kuantitas nanokarbon melalui reaksi dekomposisi katalitik metana*. Skripsi. Departemen Teknik Kimia FTUI; 2007.

[42] Monel 400 Chemical Resistance. [Online]. [diakses pada 9 Juli 2008].  
Tersedia di: <http://www.megamex.com/monel-400-nickel-alloy.htm>





## LAMPIRAN A

### KALIBRASI KROMATOGRAFI GAS

Perhitungan *Relative Response Factor* dilakukan dengan cara menginjeksikan semua gas yang akan dikalibrasi, baik reaktan maupun produknya. Injeksi dilakukan dengan menggunakan *syringe* dan *Gas Chromatography* dioperasikan pada kondisi yang sama dengan kondisi pada saat digunakan untuk uji akitivitas katalis. Injeksi pada kolom karbon aktif ini juga bertujuan untuk mengetahui *retention time* dari masing-masing zat.

Gas yang akan diinjeksikan pada kolom karbon aktif adalah CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>. *Response area* hasil analisis kolom karbon aktif digunakan untuk menghitung *relative response factor*, dengan cara memplot data *response area* dengan volume gas yang disuntikkan. Dan faktor korelasi yang dihasilkan haruslah mendekati nilai 1.

*Response Factor* untuk masing-masing zat dapat dihitung dengan:

$$RF_i = \frac{A_i}{n_i} \quad (\text{A.1})$$

Untuk 1 mL gas pada temperatur dan tekanan yang diketahui:

$$n_i = \frac{1}{22400} \times \frac{P_i}{P} \times \frac{T}{T_i} \quad (\text{A.2})$$

Dimana P dan T adalah pada kondisi standar.

Jika injeksi pada volume yang berbeda dilakukan pada kondisi tekanan dan temperatur yang sama, maka *slope* atau kemiringan kurva volume versus *peak area* adalah *response factor* untuk masing-masing zat.

Perhitungan *response factor* didasarkan atas RRF gas CH<sub>4</sub>, sehingga RRF masing-masing zat adalah:

$$RRF_i = \frac{RF_i}{RF_{CH_4}} \quad (\text{A.3})$$

Dari hasil kalibrasi didapat RRF untuk masing-masing zat, yaitu:

<b>Gas</b>	<b><i>Response Factor</i></b>	<b>RRF</b>
CH <sub>4</sub>	1271557.33	1.000
H <sub>2</sub>	4370820.17	3.437
CO	588599.00	0.463
CO <sub>2</sub>	371839.50	0.292

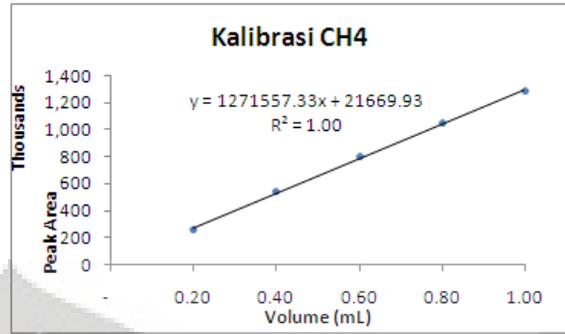


Temperatur INJ 130°C  
 Temperatur kolom 100°C

**Kalibrasi CH4**

Volume	Peak Area			Mean
0.20	265368	264848	260195	263470.3
0.40	534333	536149	538960	536480.7
0.60	797373	796990	800042	798135
0.80	1047845	1042262	1039899	1043335
1.00	1282324	1286156	1276321	1281600

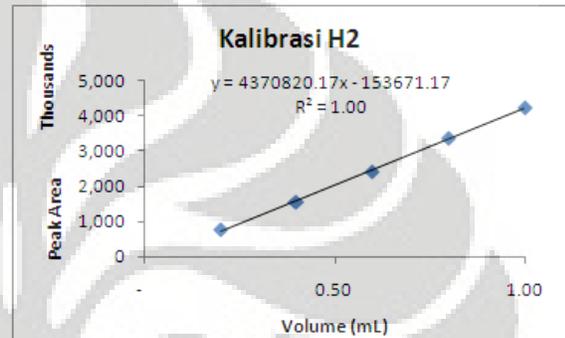
Retention time: 2.22 min



**Kalibrasi H2**

Volume	Peak Area			Mean
0.20	774750	761681	765331	767254
0.40	1561620	1534048	1567656	1554441
0.60	2359910	2411457	2490295	2420554
0.80	3213158	3413540	3492665	3373121
1.00	4222717	4209588	4253898	4228734

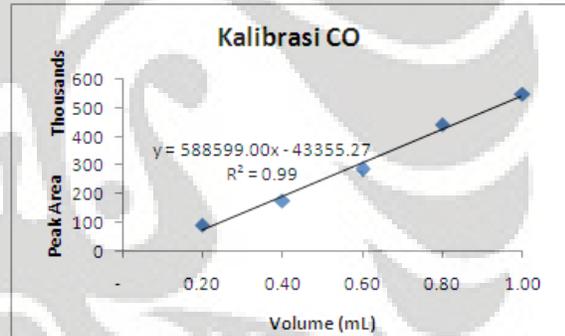
Retention time: 0.6 min



**Kalibrasi CO**

Volume	Peak Area			Mean
0.20	92924	92973	92383	92760
0.40	182122	177043	174683	177949.3
0.60	280575	293559	284970	286368
0.80	421938	471568	436152	443219.3
1.00	540575	530859	574738	548724

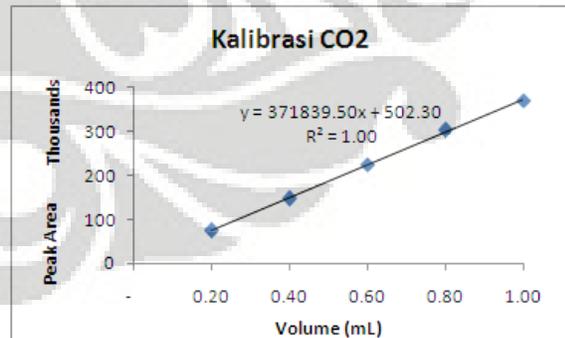
Retention time: 1.3 min



**Kalibrasi CO2**

Volume	Peak Area			Mean
0.20	72172	73230	78792	74731.33
0.40	148091	143448	149076	146871.7
0.60	226019	223441	226370	225276.7
0.80	301784	301110	303968	302287.3
1.00	375889	363072	367628	368863

Retention time: 4.4 min



## LAMPIRAN B

### KALIBRASI *FLOWMETER*

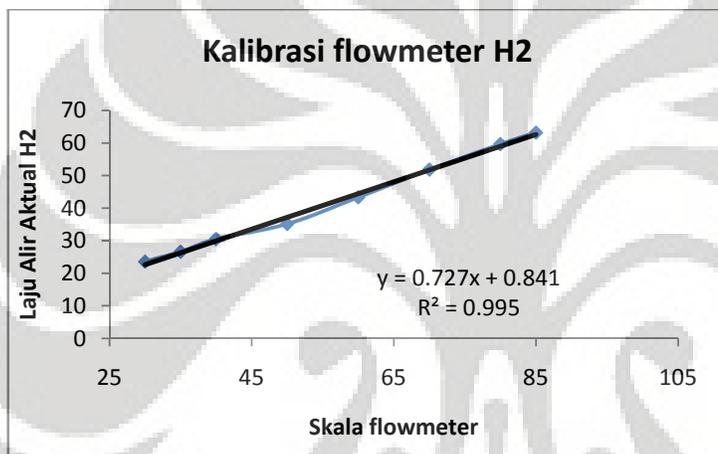
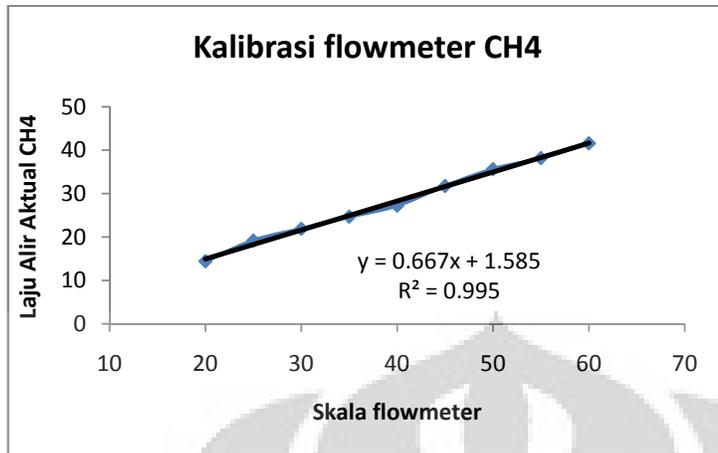
Volume aktual *bubble soap* untuk skala 0-5 adalah 4,335 mL.

#### Gas CH<sub>4</sub>

Skala <i>flowmeter</i>	T <sub>Bubble</sub> for 5 mL			<i>Mean</i>	Laju Alir Aktual
	1	2	3		
20	18.09	18.09	17.96	18.047	14.4132
25	13.61	13.5	13.56	13.557	19.1869
30	11.82	11.83	11.96	11.87	21.9132
35	10.53	10.49	10.62	10.547	24.6627
40	9.5	9.59	9.56	9.55	27.2366
45	8.17	8.17	8.21	8.1833	31.7853
50	7.25	7.29	7.35	7.2967	35.6478
55	6.88	6.82	6.74	6.8133	38.1766
60	6.25	6.24	6.27	6.2533	41.5954

#### Gas H<sub>2</sub>

Skala <i>flowmeter</i>	T <sub>Bubble</sub> for 5 mL			<i>Mean</i>	Laju Alir Aktual
	1	2	3		
30	10.78	11.05	11.23	11.02	23.6034
35	9.71	9.77	9.81	9.7633	26.6415
40	8.53	8.51	8.53	8.5233	30.5174
50	7.36	7.49	7.35	7.4	35.15
60	5.99	5.98	6.03	6	43.3516
70	5.04	5.01	5	5.0167	51.8491
80	4.42	4.34	4.32	4.36	59.6582
85	4.17	4.06	4.11	4.1133	63.2358



## LAMPIRAN C

### PERHITUNGAN KOMPOSISI GAS

Komposisi keluaran reaktor dianalisa menggunakan GC dengan kolom karbon aktif. Dengan basis 1 menit, komposisi gas keluar dihitung berdasarkan persamaan:

$$y_i = \frac{\frac{A}{(RF_i / RRF_{CH_4})}}{\sum \frac{A}{(RF_i / RRF_{CH_4})}} \quad (C.1)$$

Dimana:  $A$  = *peak area*

$RF_i$  = *response factor gas i*

$RRF_{CH_4}$  = *relative response factor terhadap CH<sub>4</sub>*

Sehingga komposisi volume gas keluar masing-masing komponen adalah:

$$V_i = y_i F_{out} \quad (C.2)$$

Dimana  $F_{out}$  adalah laju produk keluar reaktor yang diukur dengan *bubble soap*.

Komposisi mol gas keluar masing-masing adalah:

$$n_i = \frac{V_i}{22400} \times \frac{P_i}{P} \times \frac{T}{T_i} \quad (C.3)$$

Dimana: P dan T pada kondisi standar

$V_i$  = volume gas i

$P_i$  = tekanan gas i (1 atm)

$T_i$  = temperatur gas i (30°C)

Konversi CH<sub>4</sub> dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$X_{CH_4} = \frac{\sum (CH_{4in} - CH_{4out})}{\sum CH_{4in}} \times 100\% \quad (C.4)$$

Selektivitas H<sub>2</sub> dihitung dengan persamaan:

$$S_{H_2} = \frac{\sum (H_2)_{produk}}{2 \times \sum (CH_{4in} - CH_{4out})} \times 100\% \quad (C.5)$$

Sedangkan *yield* H<sub>2</sub> dihitung dengan persamaan:

$$Y_{H_2} = \frac{\sum (H_2)_{produk}}{2 \times \sum (CH_{4in})} \times 100\% \quad (C.6)$$

Neraca atom dihitung sebagai berikut:

Atom H:

$$\text{Masuk} = 4 \times \sum (CH_4)_{in} \quad (C.7)$$

$$\text{Keluar} = 4 \times \sum (CH_4)_{out} + 2 \times \sum (H_2)_{out} \quad (C.8)$$

Atom C:

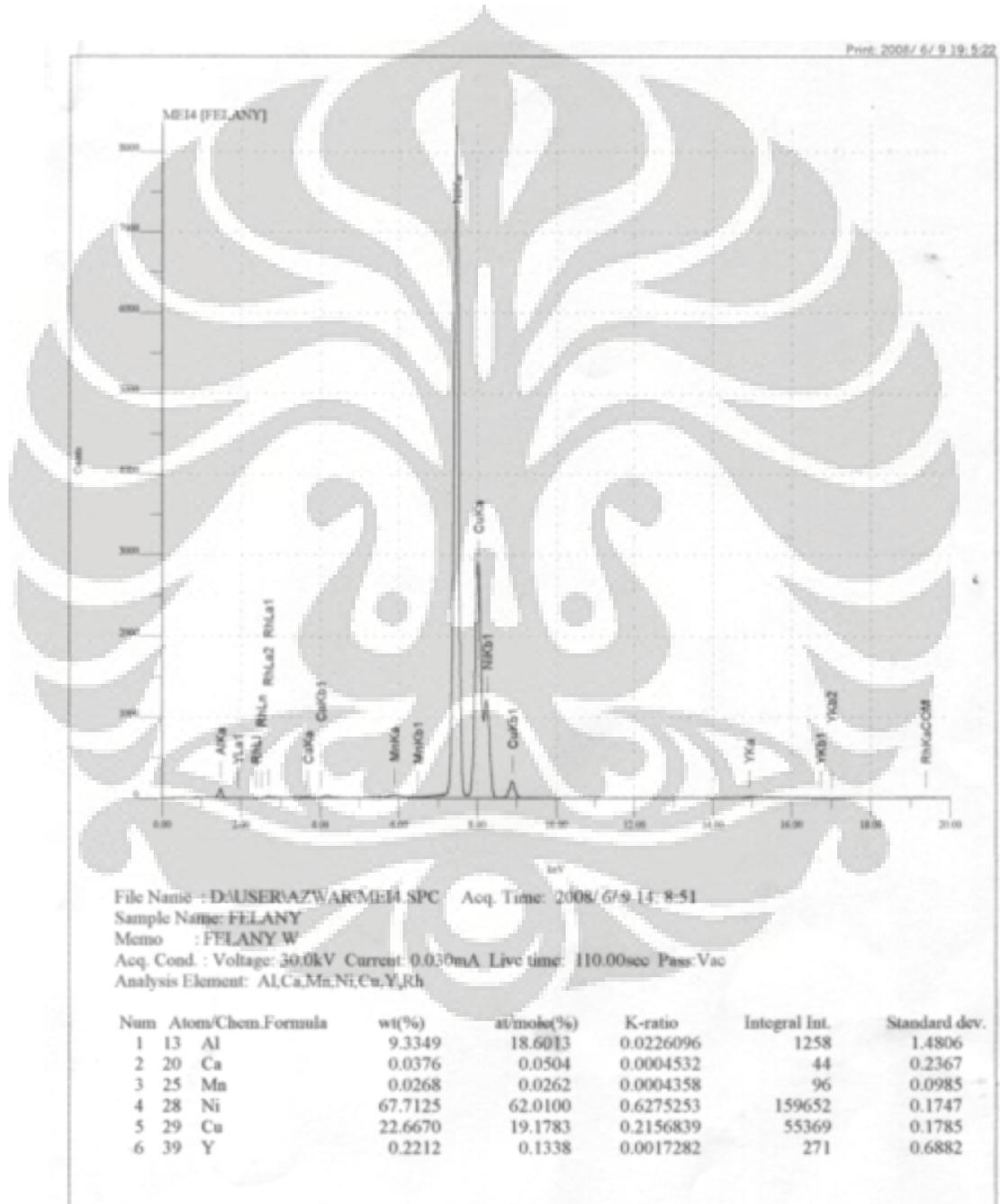
$$\text{Masuk} = \sum (CH_4)_{in} \quad (C.9)$$

$$\text{Keluar} = \sum (CH_4)_{out} + \sum (C + CO)_{out} \quad (C.10)$$

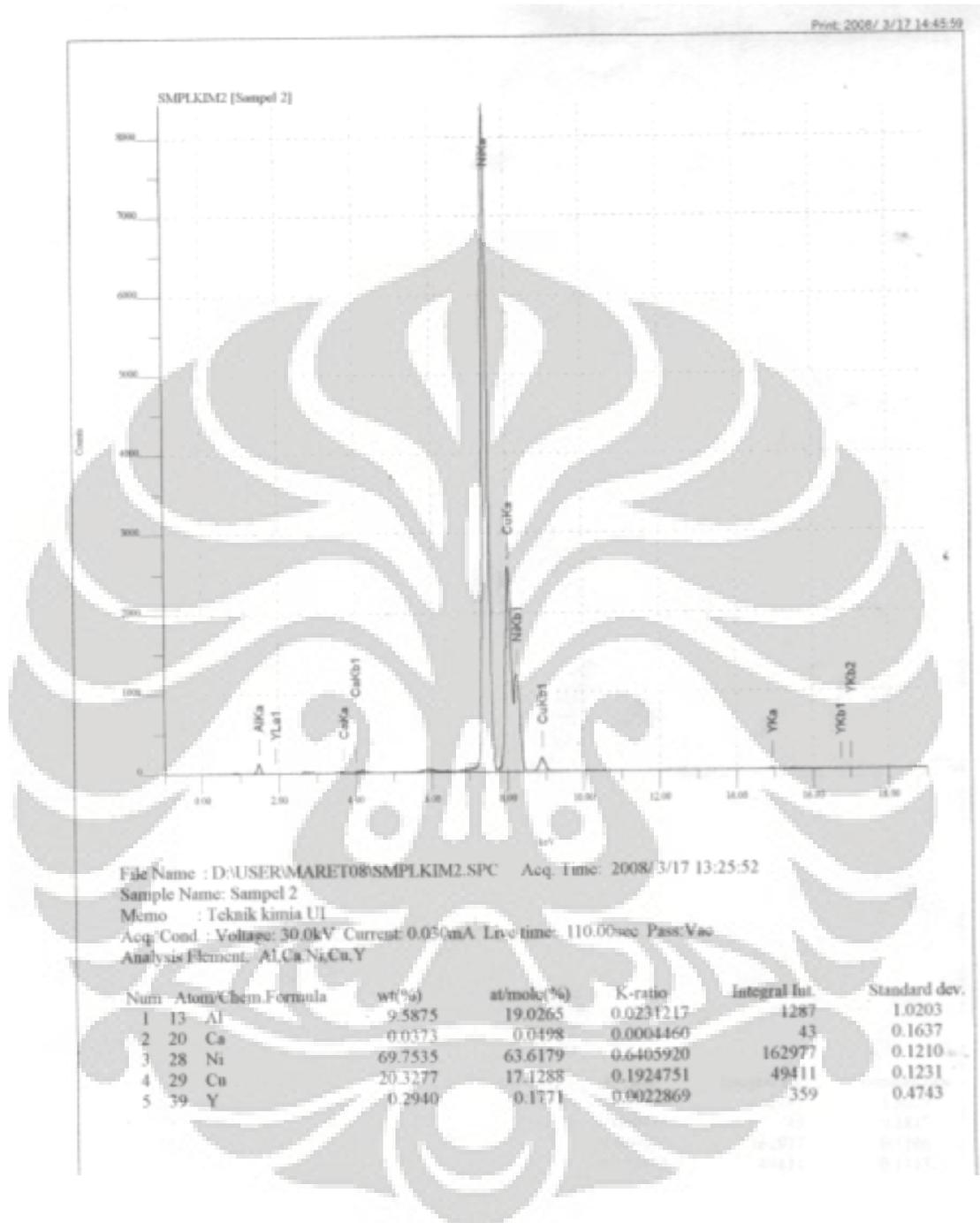
# LAMPIRAN D

## DATA KARAKTERISASI XRF

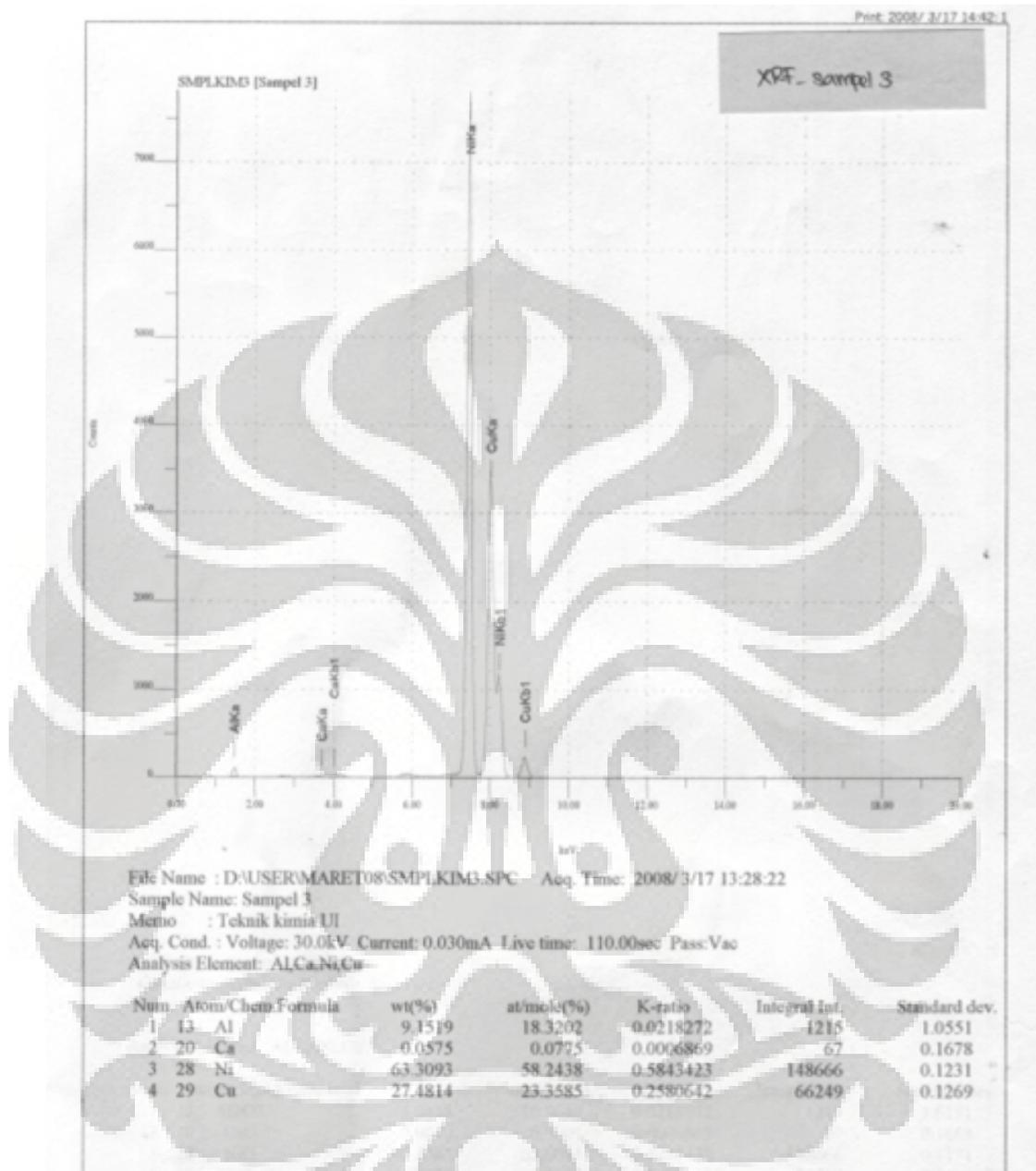
### D.1 DATA XRF KATALIS NU



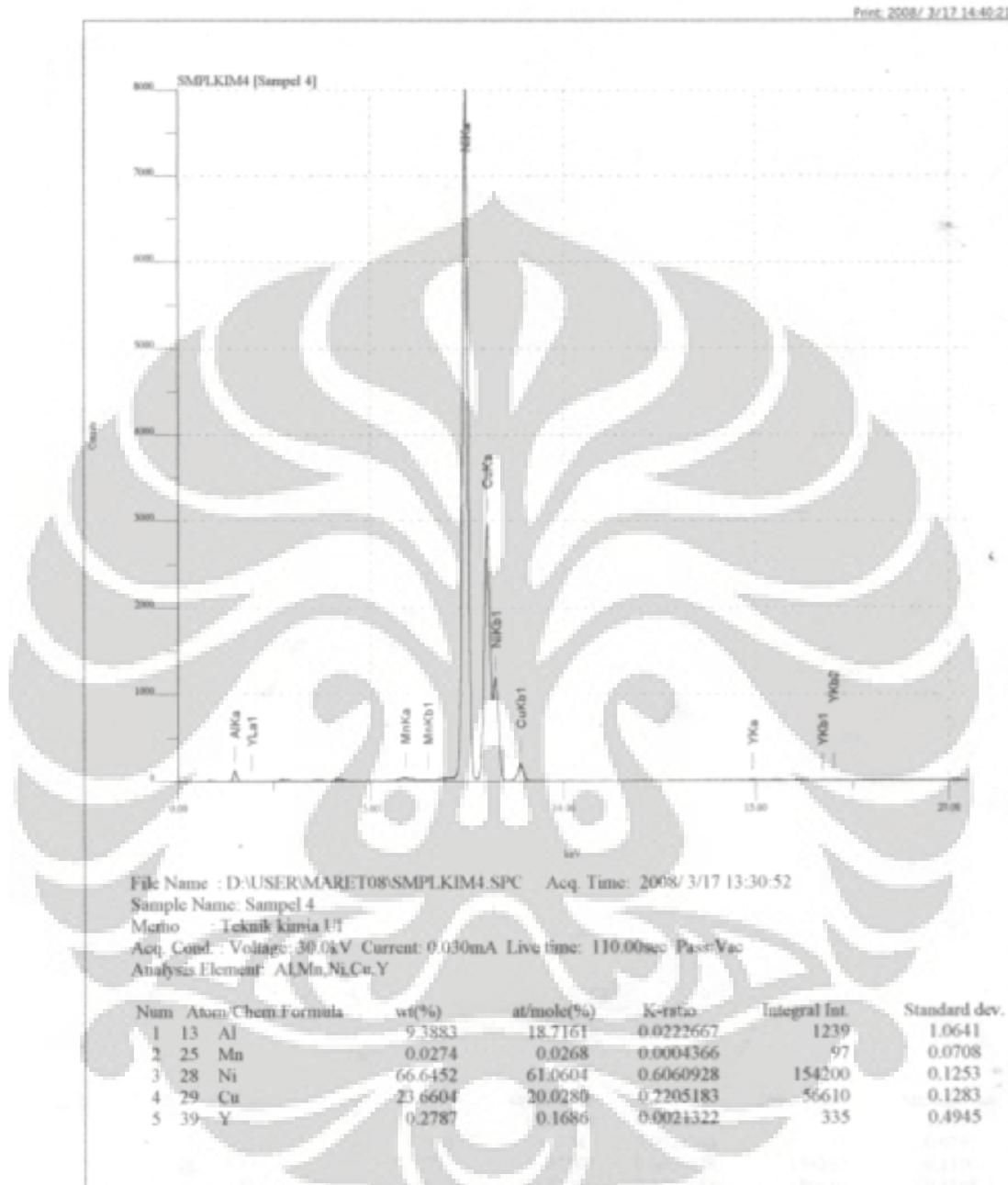
## D.2 DATA XRF KATALIS SB-30U



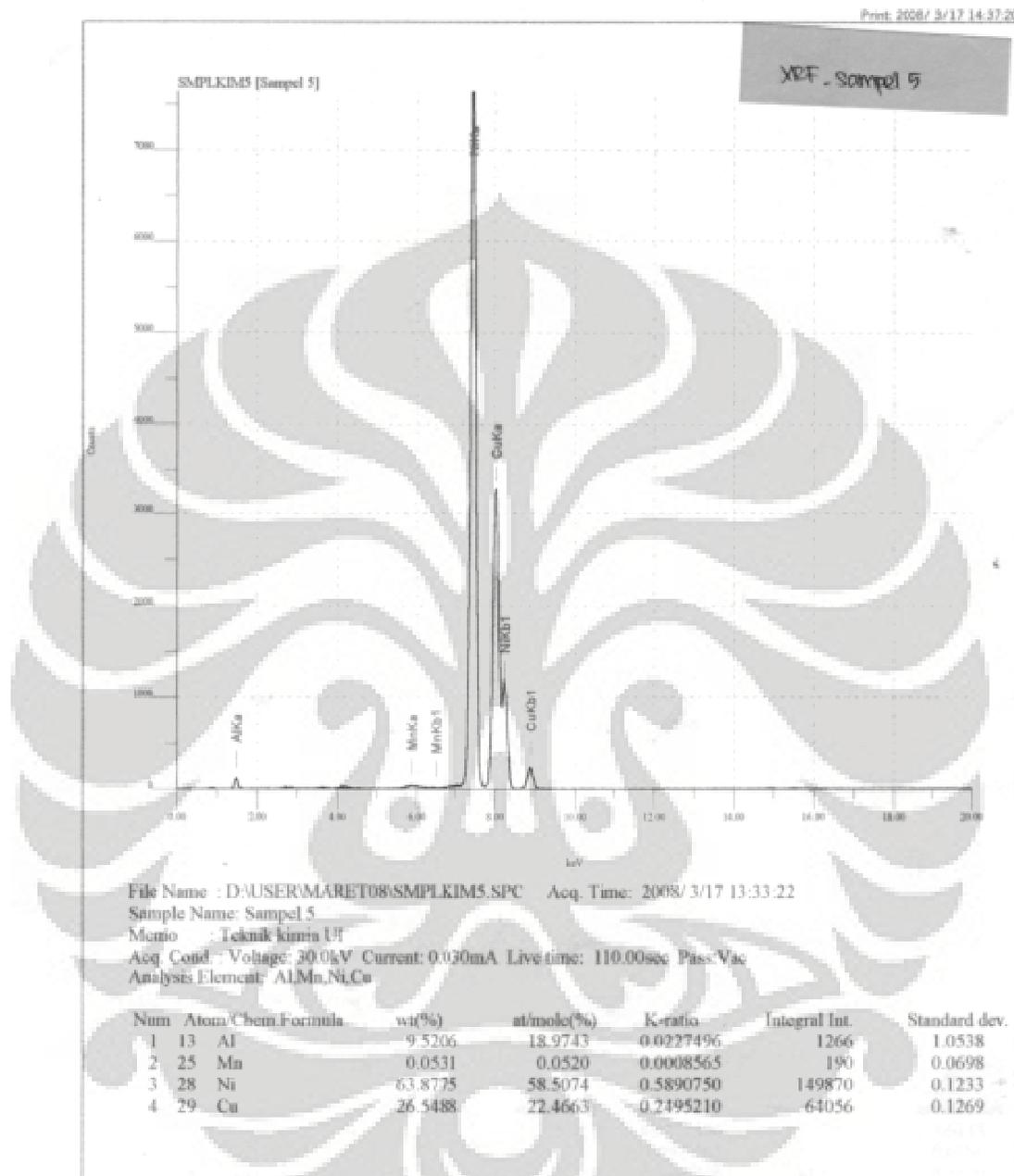
### D.3 DATA XRF KATALIS SB-60U



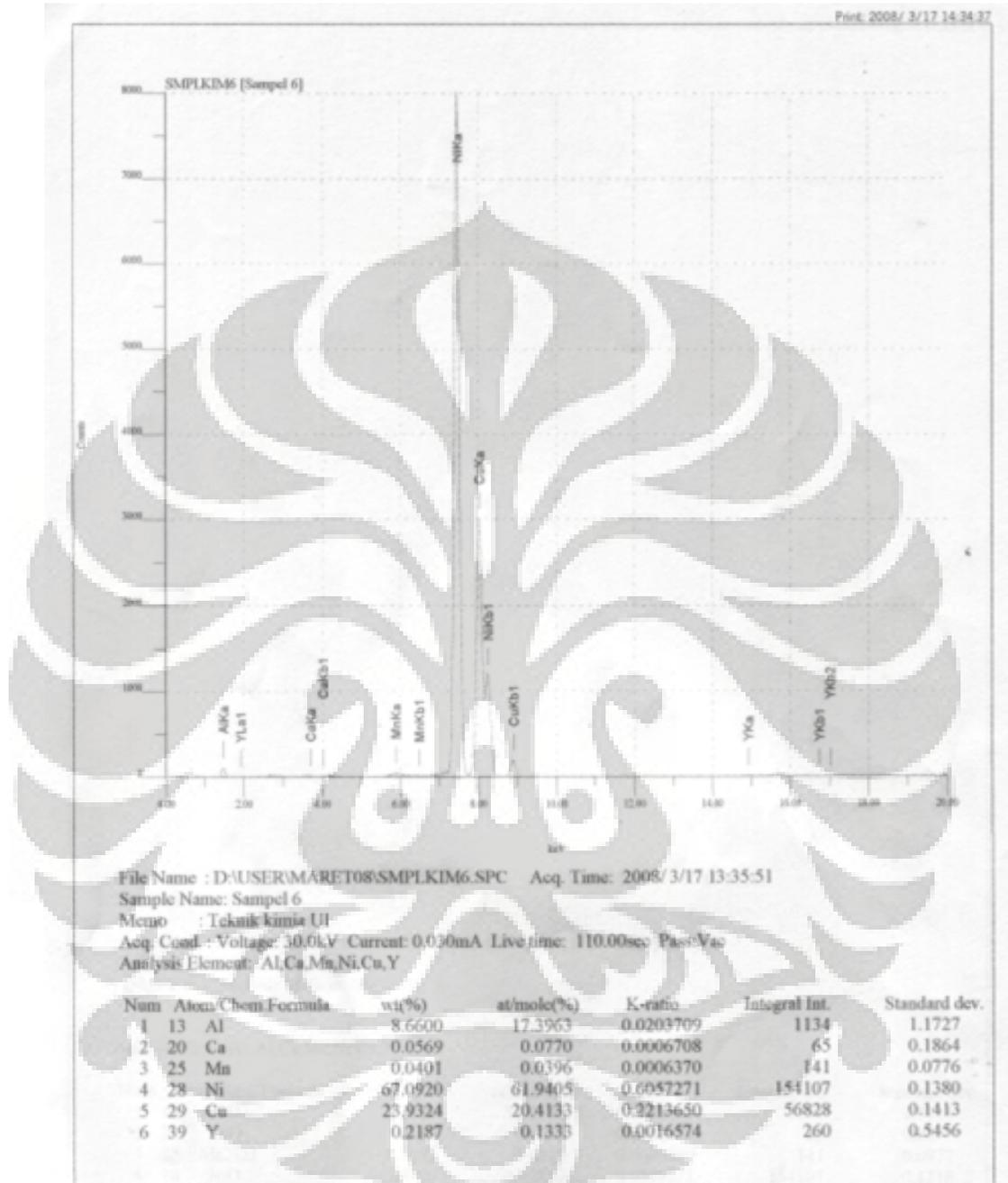
## D.4 DATA XRF KATALIS SB-90U



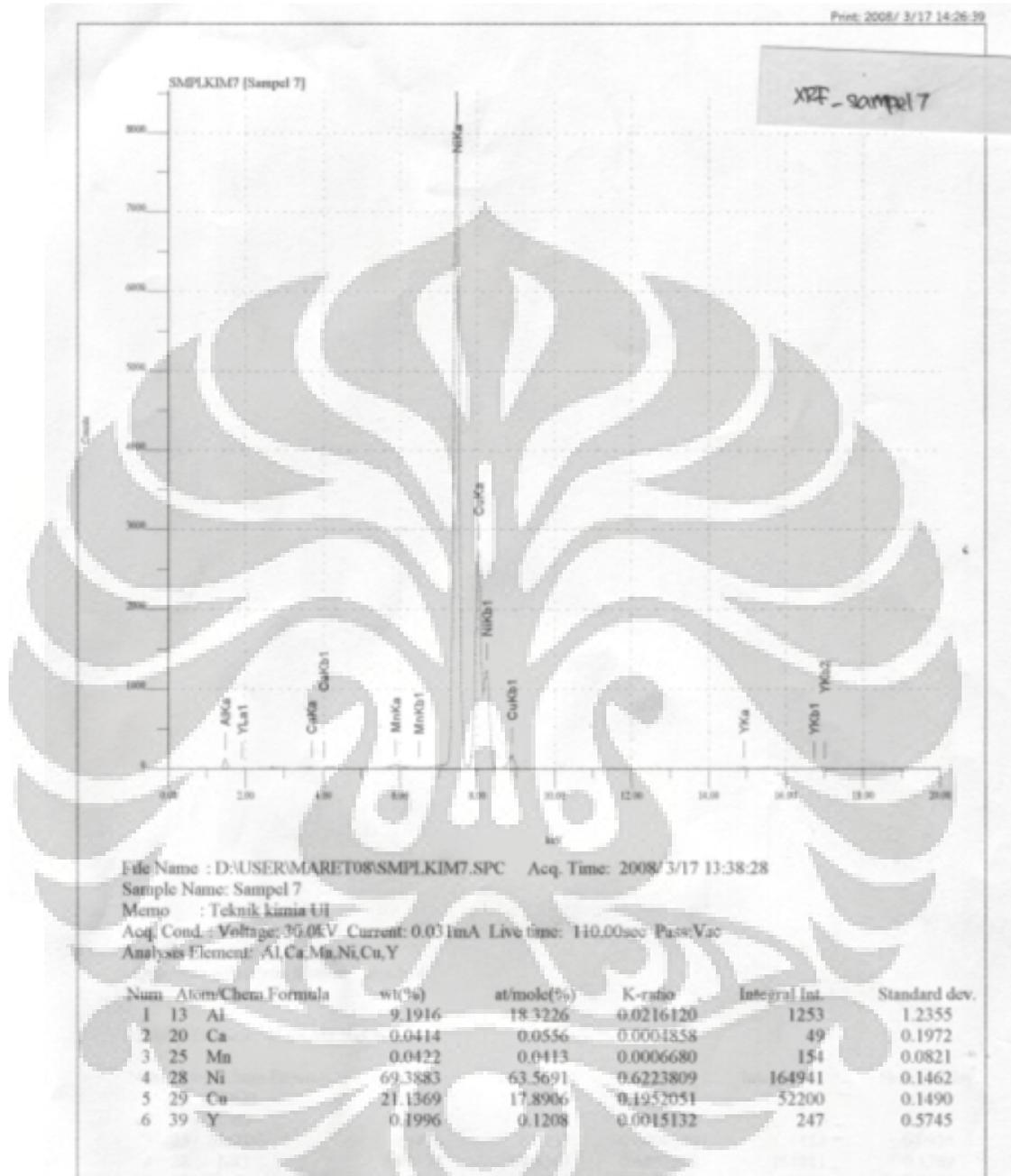
## D.5 DATA XRF KATALIS SS-30U



## D.6 DATA XRF KATALIS SS-60U



## D.7 DATA XRF KATALIS SS-90U



## LAMPIRAN E

### PERHITUNGAN DIAMETER PARTIKEL DAN HASIL KARAKTERISASI XRD

Diameter partikel NiO dihitung dari hasil karakterisasi XRD dengan persamaan berikut:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (\text{E.1})$$

Dengan:

$\lambda$  = panjang gelombang dari berkas sinar X yang tergantung dari tabung anoda dari generator penghasil sinar X yang dipakai (Cu  $K\alpha = 0,154056$  nm)

n = bilangan bulat yang menyatakan fasa dimana fraksi menghasilkan terang (n=1)

d = lebar celah

$\theta$  = sudut difraksi

Ukuran Kristal dihitung dengan menggunakan persamaan Scherer, yaitu:

$$L = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (\text{E.2})$$

Dengan:

L = ukuran kristal

$\lambda$  = panjang gelombang radiasi sinar X (Co  $K\alpha = 0.178896$  nm)

K = 0.89

$\beta$  = lebar setengah tinggi *peak* tertinggi (rad)

**NU**                      Diameter rata-rata                      14.4969

Sudut ( $2\theta$ )	d-value ( $\text{\AA}$ )	$\beta$	$\beta$ (rad)	D (nm)
36.8221	2.43895	0.48	0.008378	17.24917876
42.9676	2.10327	0.672	0.011729	12.56306861
62.5601	1.48357	0.672	0.011729	13.6785145

**SB-30U**                      Diameter rata-rata                      21.8775

Sudut ( $2\theta$ )	d-value ( $\text{\AA}$ )	$\beta$	$\beta$ (rad)	D (nm)
37.270	2.4106	0.280	0.004887	29.6087701
43.300	2.0878	0.560	0.009774	15.09297721
62.920	1.4759	0.440	0.007679	20.93086328

**SB-60U**                      Diameter rata-rata                      61.8370

Sudut ( $2\theta$ )	d-value ( $\text{\AA}$ )	$\beta$	$\beta$ (rad)	D (nm)
37.250	2.4119	0.120	0.002094	69.08306537
43.295	2.0881	0.120	0.002094	70.43267384
62.705	1.4805	0.200	0.003491	45.99517987

**SB-90U**                      Diameter rata-rata                      47.4537

Sudut ( $2\theta$ )	d-value ( $\text{\AA}$ )	$\beta$	$\beta$ (rad)	D (nm)
37.300	2.4087	0.320	0.005585	25.90996214
43.350	2.0856	0.120	0.002094	70.44610139
62.745	1.4796	0.200	0.003491	46.00496672

**SS-30U**                      Diameter rata-rata                      23.7124

Sudut ( $2\theta$ )	d-value ( $\text{\AA}$ )	$\beta$	$\beta$ (rad)	D (nm)
37.355	2.4053	0.440	0.007679	18.84666402
43.400	2.0833	0.360	0.006283	23.48610893
63.080	1.4725	0.320	0.005585	28.80457257

**SS-60U**                      Diameter rata-rata                      29.0878

Sudut ( $2\theta$ )	d-value ( $\text{\AA}$ )	$\beta$	$\beta$ (rad)	D (nm)
37.355	2.4066	0.160	0.002793	51.82832607
43.385	2.0840	0.520	0.009076	16.25876707
62.820	1.4780	0.480	0.008378	19.17639309

**SS-90U**                      Diameter rata-rata                      23.4658

Sudut ( $2\theta$ )	d-value ( $\text{\AA}$ )	$\beta$	$\beta$ (rad)	D (nm)
37.340	2.4062	0.360	0.006283	23.03379254
43.305	2.0876	0.320	0.005585	26.41316761
63.095	1.4722	0.440	0.007679	20.95046342

## E.1 DATA XRD KATALIS NU



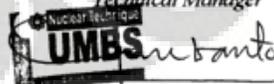
**LABORATORIUM UJI MATERIAL BATAN SERPONG**  
PUSAT TEKNOLOGI BAHAN INDUSTRI NUKLIR  
BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL  
Kawasan Puspiptek, Serpong, Gedung 42  
Telp. 021 7560922, Fax .021 7560926, e-mail:ptbin@batan.go.id

### SERTIFIKAT HASIL UJI *Certificate of Test Result*

No. Sertifikat : 25/05/SHU/VI/2008  
*Certificate No.*  
Nama Pelanggan : Sdr. Felani  
*Name of Customer*  
Alamat : Teknik Kimia – Universitas Indonesia  
*Adresses*  
Jenis pengujian : Analisis Kualitatif  
*Type of test* : *Qualitatif Analysis*  
Tanggal Penerimaan : 17-Juni-2008  
*Date Received* : *June 17, 2008*  
Jumlah sampel : 1 (satu) sampel  
*Number of Sample* : *1 (one) sample*  
Metoda : LUM-IK-05-01 Pengujian Fasa dan Struktur Bahan dengan XRD  
*Method* : *LUM-IK-05-01 Fasa and Structure Materials Test by X-Ray Diffractometer*

Sertifikat ini terdiri atas 2 halaman  
*This certificate comprises of 2 pages*

Diterbitkan tanggal 19-06-2008  
*Date of issue 06.19.2008*

Manajer Teknis  
*Technical Manager*  
  
( Dr. Setyo Purwanto )

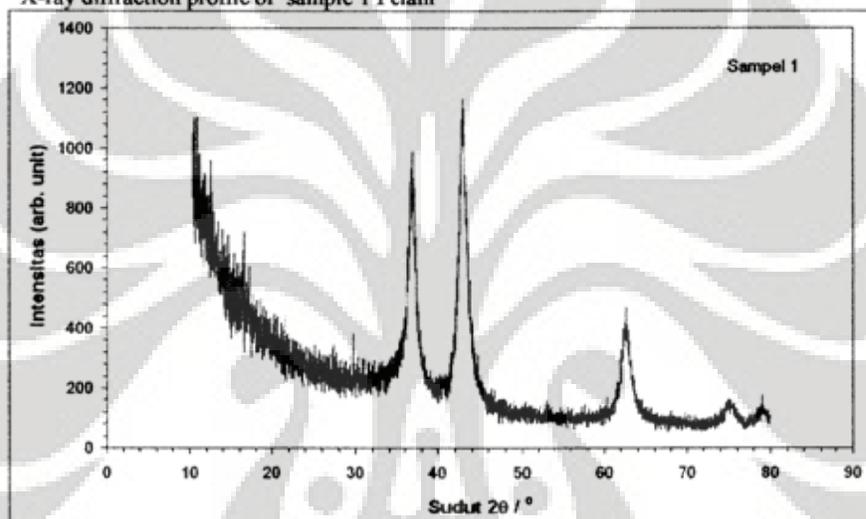
Hasil pengujian ini hanya berlaku untuk contoh yang diuji dan dilarang keras untuk mengandakan sertikat ini kecuali seluruhnya tanpa persetujuan tertulis dari LUMBS.  
*This test result related to the sample(s) submitted only and the certificate can not be reproduced in any way, except in full context and with the prior approval in writing from LUMBS.*

No. Sertifikat : 25/05/SHUMI/2008  
Certificate Number  
Tanggal terbit : 19 Juni 2008  
Date of issue 06.19.2008

Hal 2 dari 2  
Page 2 of 2

## HASIL ANALISIS/UJI TEST/ANALYSIS RESULT

Profil Difraksi sinar-x sampel 1 Felani  
X-ray diffraction profile of sample 1 Felani



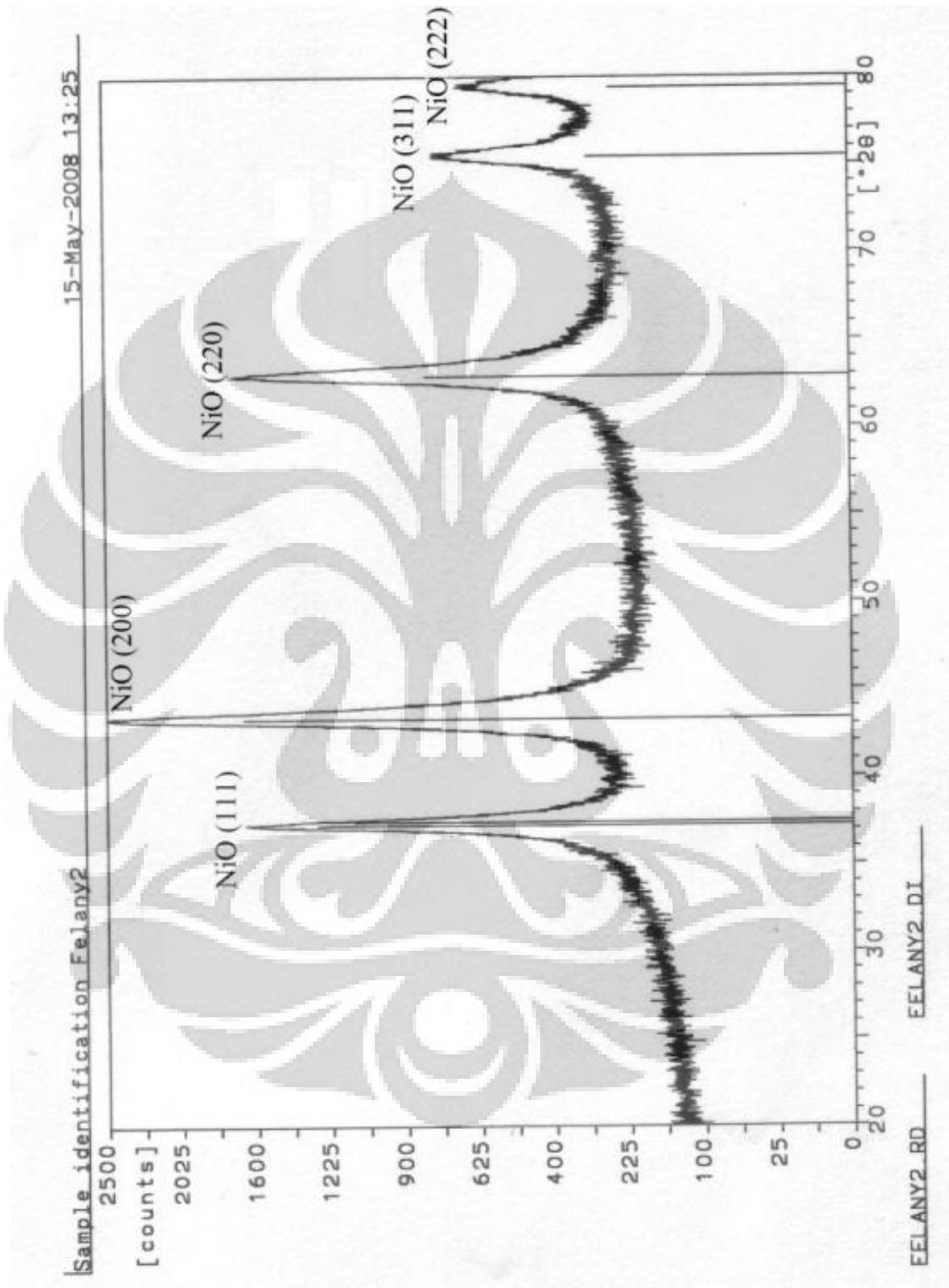
Peaks Search of sample 1 Felani

No.	Pos. [°2 $\theta$ .]	FWHM [°2 $\theta$ .]	Area [cts*°2 $\theta$ .]	Backgr.[cts]	d-spacing [Å]	Height [cts]	Rel. Int. [%]
1	36.8221	0.48	101.39	36	2.43895	158.42	63.15
2	42.9676	0.672	224.77	35	2.10327	250.86	100
3	62.5601	0.672	113.69	31	1.48357	126.88	50.58
4	74.8476	0.576	21.47	34	1.26755	27.96	11.14
5	79.0145	0.288	7.39	47	1.21083	19.24	7.67

Hasil pengujian ini hanya berlaku untuk contoh yang diuji dan dilarang keras untuk mengandakan sertikat ini kecuali seluruhnya tanpa persetujuan tertulis dari LUMBS.

*This test result related to the sample(s) submitted only and the certificate can not be reproduced in any way, except in full context and with the prior approval in writing from LUMBS.*

## E.2 DATA XRD KATALIS SB-30U

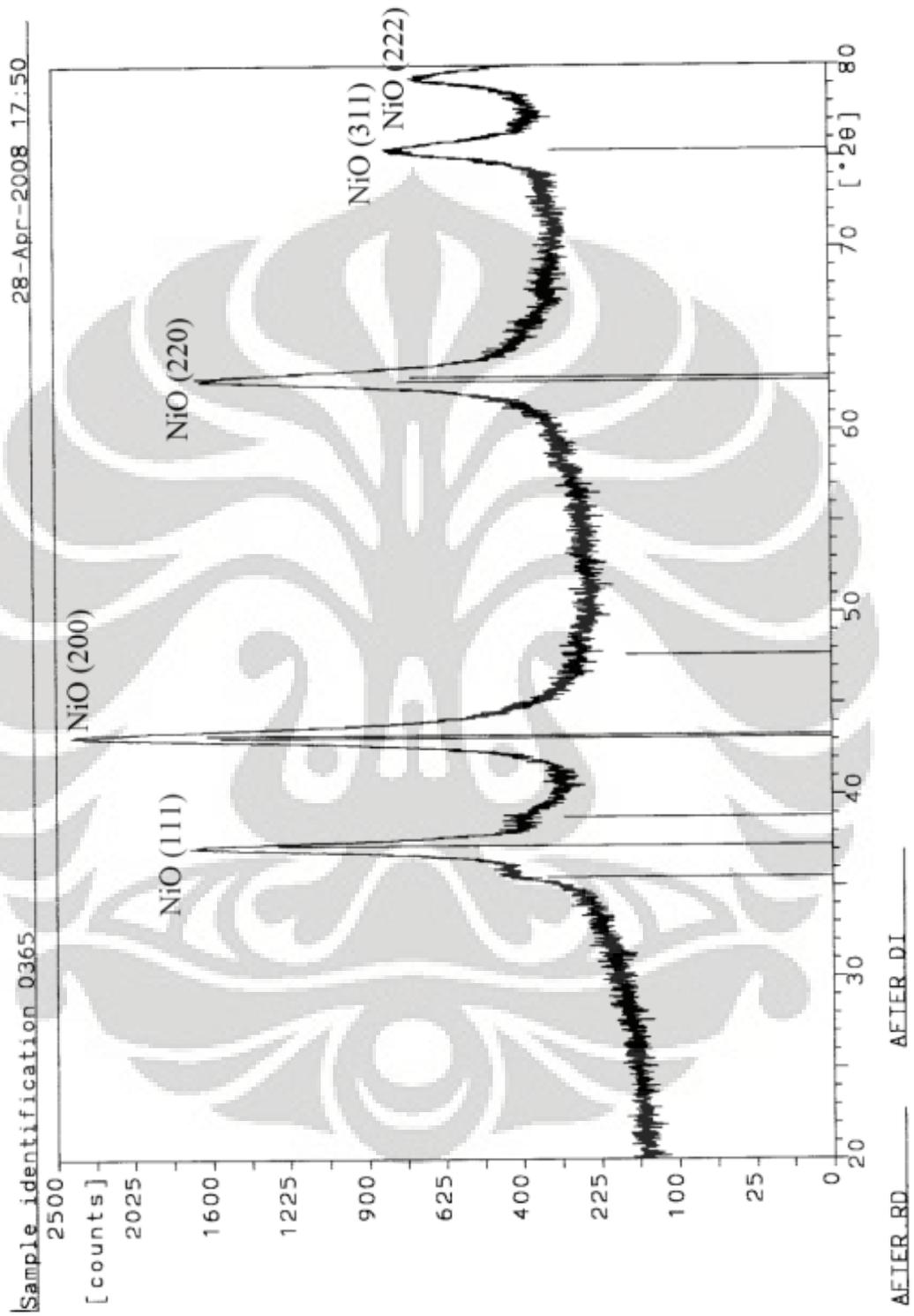


Sample identification: Felany2  
Data measured at: 9-May-2008 13:27:00

Diffraction type: PW1710 BASED  
Tube anode: Cu  
Generator tension [kV]: 40  
Generator current [mA]: 30  
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056  
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439  
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500  
Divergence slit: AUTOMATIC  
Irradiated length [mm]: 12  
Receiving slit: 0.2  
Monochromator used: YES  
Start angle [°2θ]: 20.010  
End angle [°2θ]: 79.990  
Step size [°2θ]: 0.020  
Maximum intensity: 1413.760  
Time per step [s]: 1.000  
Type of scan: CONTINUOUS  
Intensities converted to: FIXED  
Minimum peak tip width: 0.00  
Maximum peak tip width: 1.00  
Peak base width: 2.00  
Minimum significance: 0.75  
Number of peaks: 6

Angle [°2θ]	d-value a1 [Å]	d-value a2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
37.270	2.4106	2.4166	0.280	1037	250	73.3	7.55
37.450	2.3994	2.4054	0.120	870	246	61.6	1.18
43.300	2.0878	2.0930	0.560	1414	250	100.0	47.85
62.920	1.4759	1.4796	0.440	630	185	44.6	16.95
75.455	1.2588	1.2619	0.800	172	135	12.1	19.01
79.405	1.2058	1.2088	0.360	130	125	9.2	3.26

### E.3 DATA XRD KATALIS SB-60U



: AFTER.DI

28-Apr-2008 17:38

Philips Analytical X-Ray B.V.

Department of Metallurgy UI

Sample identification: 0365

Data measured at: 28-Apr-2008 16:47:00

Diffractometer type: PW1710 BASED

Tube anode: Cu

Generator tension [kV]: 40

Generator current [mA]: 30

Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056

Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439

Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500

Divergence slit: AUTOMATIC

Irradiated length [mm]: 12

Receiving slit: 0.2

Monochromator used: YES

Start angle [ $^{\circ}2\theta$ ]: 20.000

End angle [ $^{\circ}2\theta$ ]: 80.000

Step size [ $^{\circ}2\theta$ ]: 0.020

Maximum intensity: 1383.840

Time per step [s]: 1.000

Type of scan: CONTINUOUS

Intensities converted to: FIXED

Minimum peak tip width: 0.00

Maximum peak tip width: 1.00

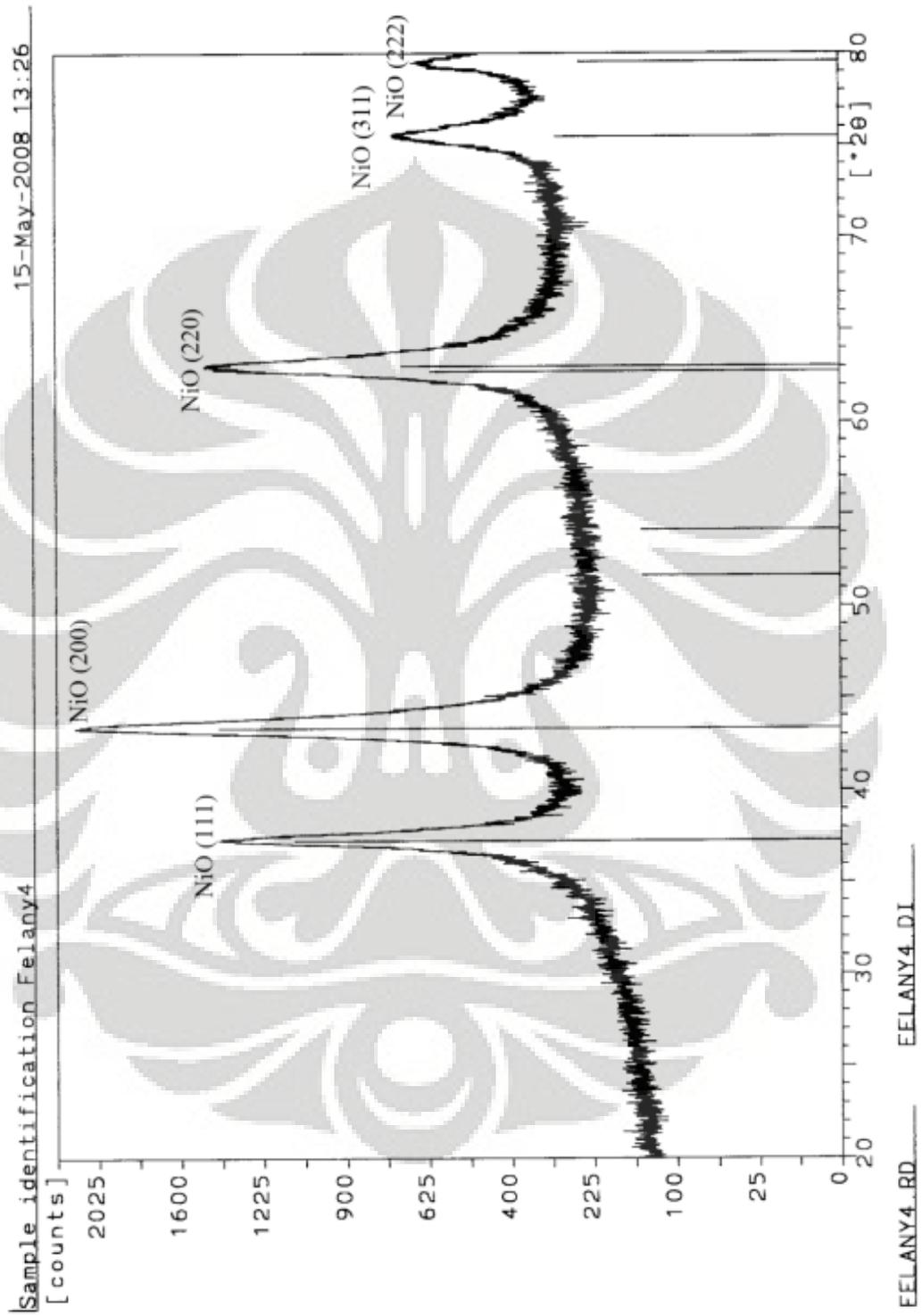
Peak base width: 2.00

Minimum significance: 0.75

Number of peaks: 9

Angle [ $^{\circ}2\theta$ ]	d-value a1 [Å]	d-value a2 [Å]	Peak width [ $^{\circ}2\theta$ ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
35.520	2.5253	2.5315	0.320	128	210	9.2	1.17
37.250	2.4119	2.4178	0.120	1063	213	76.8	1.39
38.835	2.3170	2.3227	0.800	83	216	6.0	1.64
43.130	2.0957	2.1009	0.100	1310	240	94.7	0.86
43.295	2.0881	2.0933	0.120	1384	237	100.0	1.34
47.680	1.9058	1.9105	0.200	10	166	0.7	0.76
62.705	1.4805	1.4841	0.200	586	190	42.3	2.29
62.930	1.4757	1.4794	0.120	538	193	38.9	1.09
75.350	1.2603	1.2634	0.720	174	149	12.6	14.35

#### E.4 DATA XRD KATALIS SB-90U



Sample identification: Felany4

Data measured at: 9-May-2008 14:33:00

Diffractometer type: PW1710 BASED

Tube anode: Cu

Generator tension [kV]: 40

Generator current [mA]: 30

Wavelength Alpha [Å]: 1.54056

Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439

Intensity ratio (alpha2/alpha): 0.500

Divergence slit: AUTOMATIC

Irradiated length [mm]: 12

Receiving slit: 0.2

Monochromator used: YES

Start angle [ $^{\circ}2\theta$ ]: 20.010End angle [ $^{\circ}2\theta$ ]: 79.990Step size [ $^{\circ}2\theta$ ]: 0.020

Maximum intensity: 1142.440

Time per step [s]: 1.000

Type of scan: CONTINUOUS

Intensities converted to: FIXED

Minimum peak tip width: 0.00

Maximum peak tip width: 1.00

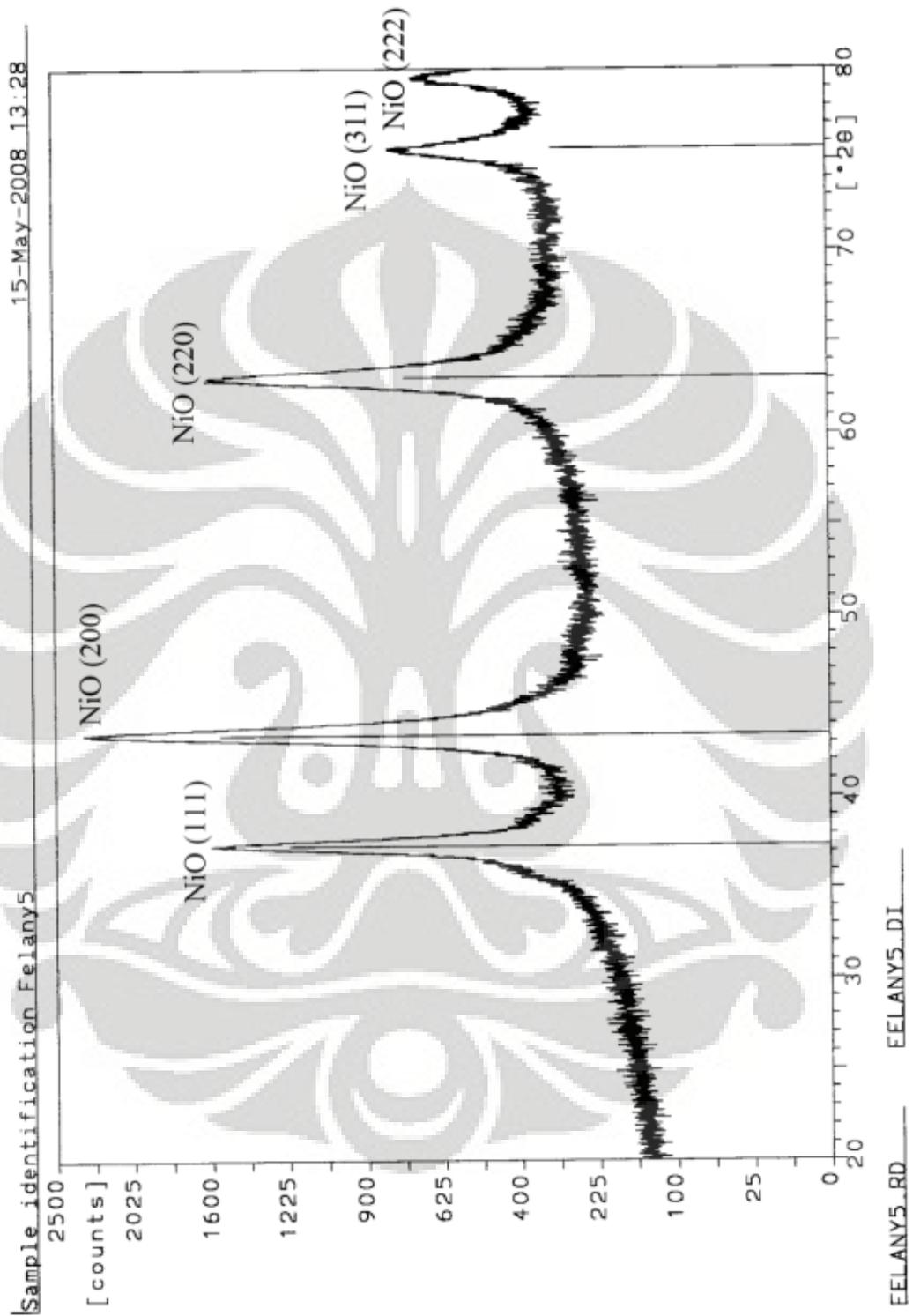
Peak base width: 2.00

Minimum significance: 0.75

Number of peaks: 8

Angle [ $^{\circ}2\theta$ ]	d-value a1 [Å]	d-value a2 [Å]	Peak width [ $^{\circ}2\theta$ ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
37.300	2.4087	2.4147	0.320	818	276	71.6	7.87
43.350	2.0856	2.0907	0.120	1142	276	100.0	1.32
51.650	1.7682	1.7726	0.200	8	135	0.7	0.76
54.140	1.6926	1.6968	0.480	11	135	1.0	0.79
62.745	1.4796	1.4833	0.200	420	196	36.8	1.33
63.010	1.4740	1.4777	0.200	506	199	44.3	1.23
75.480	1.2585	1.2616	0.720	146	149	12.8	11.88
79.565	1.2038	1.2068	0.320	106	142	9.3	1.97

### E.5 DATA XRD KATALIS SS-30U



Sample identification: Felany5  
Data measured at: 9-May-2008 16:04:00

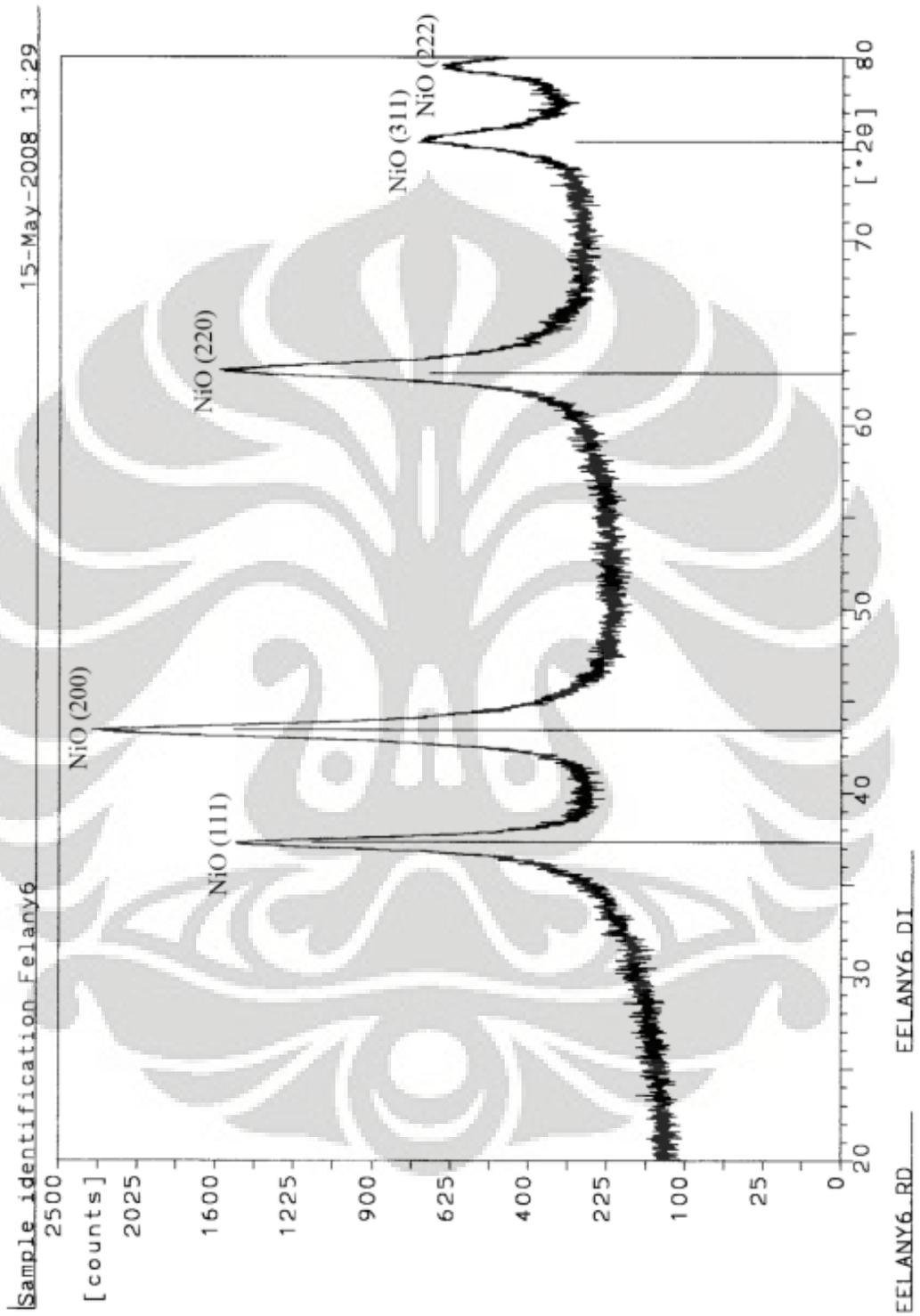
Diffractometer type: PW1710 BASED  
Tube anode: Cu  
Generator tension [kV]: 40  
Generator current [mA]: 30  
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056  
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439  
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500  
Divergence slit: AUTOMATIC  
Irradiated length [mm]: 12  
Receiving slit: 0.2  
Monochromator used: YES

Start angle [ $^{\circ}2\theta$ ]: 20.010  
End angle [ $^{\circ}2\theta$ ]: 79.990  
Step size [ $^{\circ}2\theta$ ]: 0.020  
Maximum intensity: 1267.360  
Time per step [s]: 1.000  
Type of scan: CONTINUOUS  
Intensities converted to: FIXED

Minimum peak tip width: 0.00  
Maximum peak tip width: 1.00  
Peak base width: 2.00  
Minimum significance: 0.75  
Number of peaks: 4

Angle [ $^{\circ}2\theta$ ]	d-value a1 [Å]	d-value a2 [Å]	Peak width [ $^{\circ}2\theta$ ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
37.355	2.4053	2.4113	0.440	912	306	72.0	20.40
43.400	2.0833	2.0884	0.360	1267	279	100.0	14.22
63.080	1.4725	1.4762	0.320	538	210	42.5	5.65
75.655	1.2560	1.2591	0.400	156	159	12.3	3.98

## E.6 DATA XRD KATALIS SS-60U



: FELANY6.DI

9-May-2008 18:04

-----  
Philips Analytical X-Ray B.V.

Department of Metallurgy UI

Sample identification: Felany6  
Data measured at: 9-May-2008 17:13:00

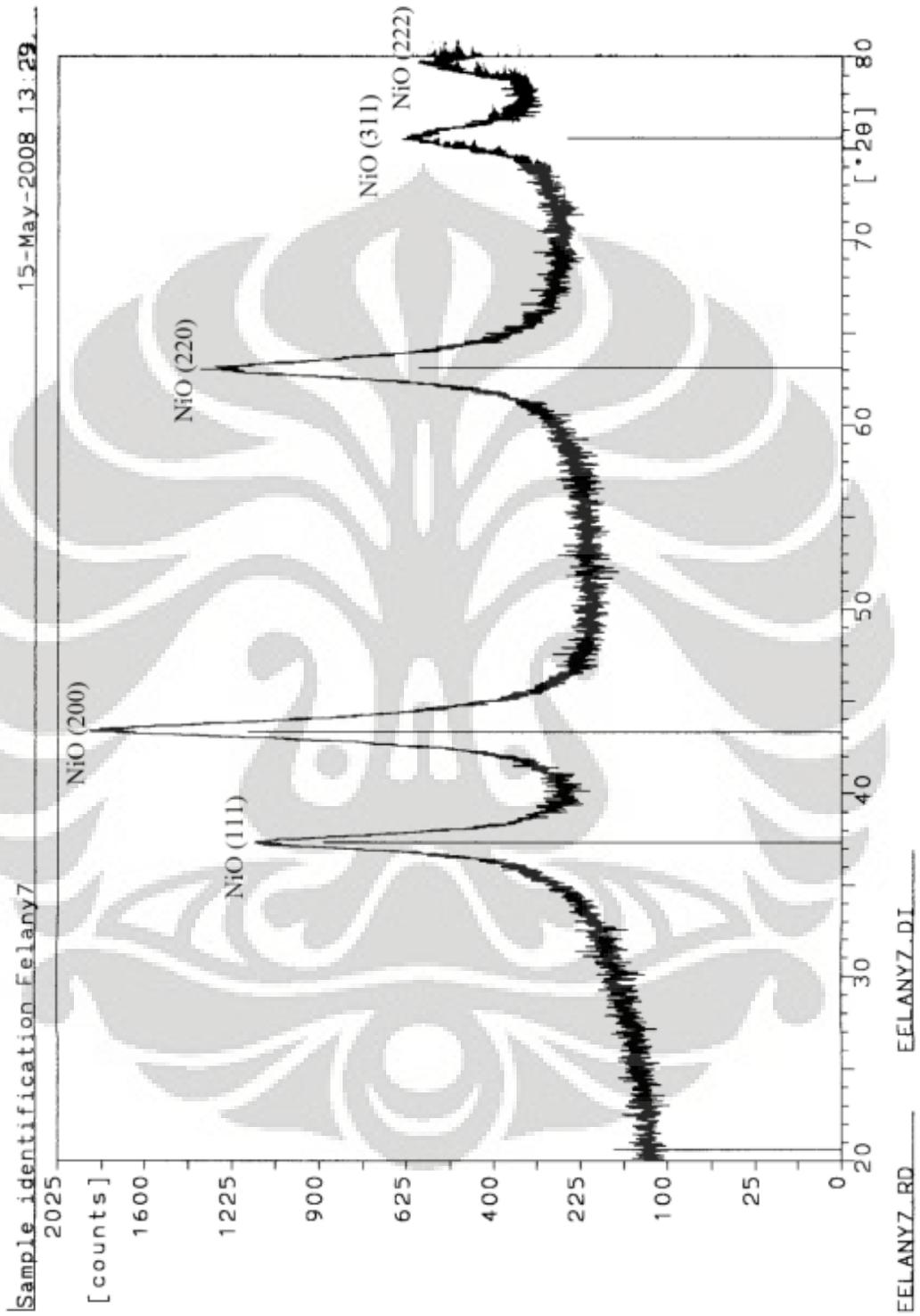
Diffractometer type: PW1710 BASED  
Tube anode: Cu  
Generator tension [kV]: 40  
Generator current [mA]: 30  
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056  
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439  
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500  
Divergence slit: AUTOMATIC  
Irradiated length [mm]: 12  
Receiving slit: 0.2  
Monochromator used: YES

Start angle [°2θ]: 20.000  
End angle [°2θ]: 80.000  
Step size [°2θ]: 0.020  
Maximum intensity: 1260.250  
Time per step [s]: 1.000  
Type of scan: CONTINUOUS  
Intensities converted to: FIXED

Minimum peak tip width: 0.00  
Maximum peak tip width: 1.00  
Peak base width: 2.00  
Minimum significance: 0.75  
Number of peaks: 4

Angle [°2θ]	d-value a1 [Å]	d-value a2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
37.335	2.4066	2.4125	0.160	888	256	70.5	2.53
43.385	2.0840	2.0891	0.520	1260	250	100.0	35.02
62.820	1.4780	1.4817	0.480	511	188	40.5	18.14
75.395	1.2597	1.2628	0.120	156	137	12.4	0.89

## E.7 DATA XRD KATALIS SS-90U



: FELANY7.DI

9-May-2008 18:59

-----  
Philips Analytical X-Ray B.V.

Department of Metallurgy UI

Sample identification: Felany7  
Data measured at: 9-May-2008 18:09:00

Diffractometer type: PW1710 BASED  
Tube anode: Cu  
Generator tension [kV]: 40  
Generator current [mA]: 30  
Wavelength Alpha1 [Å]: 1.54056  
Wavelength Alpha2 [Å]: 1.54439  
Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500  
Divergence slit: AUTOMATIC  
Irradiated length [mm]: 12  
Receiving slit: 0.2  
Monochromator used: YES

Start angle [°2θ]: 20.000  
End angle [°2θ]: 80.000  
Step size [°2θ]: 0.020  
Maximum intensity: 894.0100  
Time per step [s]: 1.000  
Type of scan: CONTINUOUS  
Intensities converted to: FIXED

Minimum peak tip width: 0.00  
Maximum peak tip width: 1.00  
Peak base width: 2.00  
Minimum significance: 0.75  
Number of peaks: 5

Angle [°2θ]	d-value a1 [Å]	d-value a2 [Å]	Peak width [°2θ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
20.640	4.2997	4.3104	0.640	2	169	0.3	0.90
37.340	2.4062	2.4122	0.360	630	256	70.5	7.06
43.305	2.0876	2.0928	0.320	894	269	100.0	6.25
63.095	1.4722	1.4759	0.440	396	196	44.3	8.16
75.560	1.2573	1.2605	0.640	110	139	12.3	5.55

## LAMPIRAN F

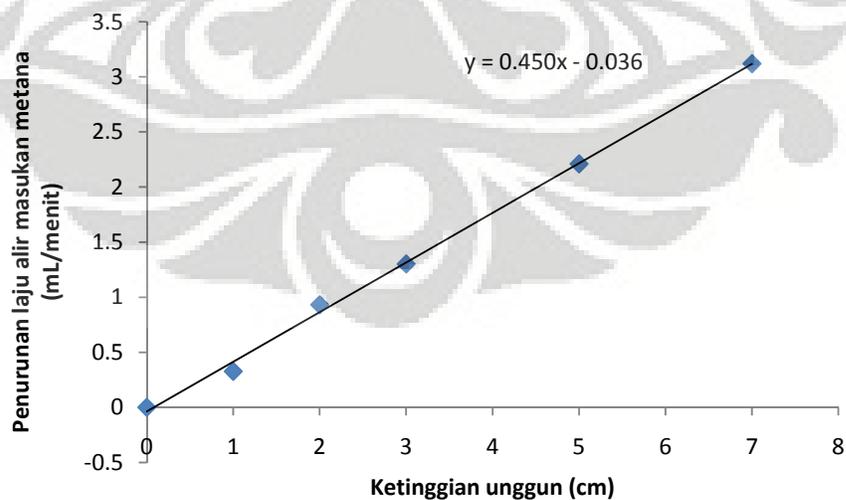
### VERIFIKASI LAJU ALIR MASUKAN METANA

Laju alir metana diverifikasi dengan cara mengukur laju alir metana saat reaktor kosong (hanya berisi *glass wool* dan katalis) dan saat di reaktor terdapat produk nanokarbon dengan tinggi tertentu. Dari data yang didapatkan akan diplot dalam kurva ketinggian unggun versus penurunan laju alir dan diperoleh persamaan penurunan laju alir masukan metana terhadap ketinggian unggun.

Berikut ini adalah data yang diperoleh:

Tinggi unggun (cm)	Q CH <sub>4</sub> input	ΔQ CH <sub>4</sub>
0	27.3655708	0
1	27.0384356	0.33
2	26.4339177	0.93
3	26.0631012	1.30
5	25.1555708	2.21
7	24.2455708	3.12

Kemudian diplot antara data ketinggian unggun dan penurunan laju alir masukan metana dan diperoleh persamaan garis  $y = 0,450x - 0,036$ .



Persamaan garis ini kemudian digunakan dalam verifikasi laju alir masukan metana dalam setiap uji aktivitas katalis, berdasarkan data ketinggian unggun yang diketahui setelah uji aktivitas katalis selesai. Persamaan verifikasi laju alir adalah:

$$[Q_{CH_4}]_{input}' = [Q_{CH_4}]_{input} - \frac{(0,450x - 0.036)}{L} * t \quad (F.1)$$

Dimana:

$[Q_{CH_4}]_{input}'$  = laju alir masukan metana yang terverifikasi (mL/menit)

$[Q_{CH_4}]_{input}$  = laju alir masukan metana yang belum terverifikasi (mL/menit)

$L$  = lama uji aktivitas katalis (menit)

$t$  = periode pengambilan data (menit)

Data laju alir masukan metana yang telah terverifikasi ini kemudian digunakan untuk perhitungan konversi metana, selektivitas hidrogen, dan persen *yield* hidrogen.



**LAMPIRAN G**

**DATA UJI AKTIVITAS DAN STABILITAS KATALIS**

**Pengolahan Data Uji Aktivitas Katalis Ni-Cu/Al2O3 dalam Produksi Nanokarbon**

**Katalis:** NU

Rasio CH4:N2 1 0 T<sub>bubble</sub> 9.55 T<sub>column</sub> 100 C  
 Q total 27.2366 mL/min 0.00110 mol/min T<sub>reaktor</sub> 923 K  
 Q CH4 27.2366 mL/min 0.00110 mol/min T<sub>sampling</sub> 301 K  
 Q N2 0 mL/min W/f<sub>(reaktan)</sub> 0.0073  
 Katalis 0.2 gr P<sub>reaktor</sub> 1 atm

Gas	RF =slope	RRF
CH4	1.27E+06	1.000
H2	4.37E+06	3.437
CO	5.89E+05	0.463
CO2	3.72E+05	0.292

Kalibrasi bubblesoap 4.335163 mL untuk skala 0 - 5

waktu (menit)	Flowin (mL/min)	Flowin (mol/min)	Bubble out	Flowout (mL/min)	Flowout (mol/min)	PEAK AREA				KOMPOSISI GAS (%) (yi)				VOLUME (mL/min)				MOL (mol/min)				X CH4 (%)	S H2 (%)	Y H2 (%)	Neraca Atom H		
						CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2				In	Out	% loss
10	27.2026	0.0011	9.77	26.62	0.00108	965,367	2,057,421	1,487	31	31.92%	68.03%	0.05%	0.00%	8.4982	18.1117	0.0131	0.000273	0.0003	0.0007	5.3E-07	1.1E-08	68.76%	48.42%	33.29%	2.65E+21	1.71E+21	35.47%
20	27.1686	0.0011	9.82	26.50	0.00107	953,450	2,100,037	1,177		31.21%	68.75%	0.04%	0.00%	8.2704	18.2161	0.0102	0	0.0003	0.0007	4.13E-07	0	69.56%	48.20%	33.52%	2.65E+21	1.69E+21	36.03%
30	27.1346	0.0011	9.71	26.79	0.00108	950,534	2,086,749	928		31.29%	68.68%	0.03%	0.00%	8.3808	18.3988	0.0082	0	0.0003	0.0007	3.31E-07	0	69.11%	49.05%	33.90%	2.65E+21	1.71E+21	35.21%
40	27.1006	0.0011	9.81	26.51	0.00107	946,493	2,104,535	839		31.01%	68.96%	0.03%	0.00%	8.2204	18.2781	0.0073	0	0.0003	0.0007	2.95E-07	0	69.67%	48.41%	33.72%	2.64E+21	1.69E+21	35.94%
50	27.0666	0.0011	9.76	26.65	0.00108	947,414	2,094,422	642		31.14%	68.84%	0.02%	0.00%	8.2989	18.3461	0.0056	0	0.0003	0.0007	2.28E-07	0	69.34%	48.88%	33.89%	2.64E+21	1.7E+21	35.45%
60	27.0326	0.0011	9.76	26.64	0.00108	938,322	2,128,743	50		30.59%	69.41%	0.00%	0.00%	8.1504	18.4906	0.0004	0	0.0003	0.0007	1.76E-08	0	69.85%	48.96%	34.20%	2.64E+21	1.7E+21	35.65%
70	26.9986	0.0011	9.78	26.59	0.00108	942,667	2,114,813			30.83%	69.17%	0.00%	0.00%	8.1972	18.3898	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	69.64%	48.91%	34.06%	2.63E+21	1.7E+21	35.58%
80	26.9646	0.0011	9.62	27.03	0.00109	927,185	2,166,480			29.97%	70.03%	0.00%	0.00%	8.1007	18.9283	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	69.96%	50.17%	35.10%	2.63E+21	1.71E+21	34.86%
90	26.9306	0.0011	9.81	26.51	0.00107	922,570	2,166,751	47		29.86%	70.14%	0.00%	0.00%	7.9153	18.5900	0.0000	0.000403	0.0003	0.0008	0	1.63E-08	70.61%	48.88%	34.51%	2.63E+21	1.68E+21	36.09%
100	26.8966	0.0011	9.82	26.48	0.00107	924,422	2,169,493			29.88%	70.12%	0.00%	0.00%	7.9115	18.5673	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.59%	48.90%	34.52%	2.62E+21	1.68E+21	36.07%
110	26.8626	0.0011	9.77	26.62	0.00108	923,135	2,170,865			29.84%	70.16%	0.00%	0.00%	7.9434	18.6799	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.43%	49.37%	34.77%	2.62E+21	1.69E+21	35.66%
120	26.8286	0.0011	9.78	26.60	0.00108	918,592	2,184,764			29.60%	70.40%	0.00%	0.00%	7.8724	18.7237	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.66%	49.39%	34.89%	2.62E+21	1.68E+21	35.76%
140	26.7606	0.0011	9.73	26.74	0.00108	907,775	2,216,080			29.06%	70.94%	0.00%	0.00%	7.7711	18.9709	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.96%	49.95%	35.45%	2.61E+21	1.68E+21	35.52%
160	26.6926	0.0011	9.70	26.81	0.00109	913,079	2,206,235			29.27%	70.73%	0.00%	0.00%	7.8467	18.9596	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.60%	50.30%	35.51%	2.60E+21	1.69E+21	35.09%
180	26.6246	0.0011	9.94	26.18	0.00106	906,288	2,221,762	25		28.97%	71.03%	0.00%	0.00%	7.5841	18.5924	0.0000	0.000209	0.0003	0.0008	0	8.47E-09	71.51%	48.82%	34.92%	2.60E+21	1.65E+21	36.60%
200	26.5566	0.0011	10.41	24.99	0.00101	906,941	2,218,202			29.02%	70.98%	0.00%	0.00%	7.2536	17.7409	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	72.69%	45.95%	33.40%	2.59E+21	1.57E+21	39.28%
220	26.4886	0.0011	10.10	25.76	0.00104	903,121	2,231,348	20		28.81%	71.19%	0.00%	0.00%	7.4226	18.3391	0.0000	0.000164	0.0003	0.0007	0	6.66E-09	71.98%	48.09%	34.62%	2.58E+21	1.62E+21	37.36%
240	26.4206	0.0011	10.34	25.16	0.00102	899,127	2,247,593			28.57%	71.43%	0.00%	0.00%	7.1879	17.9678	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	72.79%	46.71%	34.00%	2.58E+21	1.58E+21	38.79%
260	26.3526	0.0011	10.53	24.69	0.00100	893,676	2,266,416			28.28%	71.72%	0.00%	0.00%	6.9835	17.7105	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	73.50%	45.72%	33.60%	2.57E+21	1.54E+21	39.90%
280	26.2846	0.0011	10.93	23.81	0.00096	898,430	2,247,100	23		28.56%	71.44%	0.00%	0.00%	6.7992	17.0057	0.0000	0.000174	0.0003	0.0007	0	7.05E-09	74.13%	43.64%	32.35%	2.56E+21	1.49E+21	41.78%
300	26.2166	0.0011	11.32	22.97	0.00093	880,658	2,306,048			27.64%	72.36%	0.00%	0.00%	6.3482	16.6230	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	75.79%	41.83%	31.70%	2.56E+21	1.43E+21	44.08%
320	26.1486	0.0011	11.74	22.15	0.00090	881,228	2,305,297			27.65%	72.35%	0.00%	0.00%	6.1254	16.0241	0.0000	0	0.0002	0.0006	0	0	76.57%	40.01%	30.64%	2.55E+21	1.38E+21	45.93%
340	26.0806	0.0011	12.26	21.22	0.00086	879,344	2,311,720			27.56%	72.44%	0.00%	0.00%	5.8480	15.3739	0.0000	0	0.0002	0.0006	0	0	77.58%	37.99%	29.47%	2.54E+21	1.32E+21	48.10%
360	26.0126	0.0011	12.96	20.07	0.00081	868,231	2,347,010			27.00%	73.00%	0.00%	0.00%	5.4171	14.6479	0.0000	0	0.0002	0.0006	0	0	79.18%	35.56%	28.16%	2.54E+21	1.24E+21	51.02%
380	25.9446	0.0011	13.51	19.25	0.00078	866,614	2,351,988			26.93%	73.07%	0.00%	0.00%	5.1839	14.0692	0.0000	0	0.0002	0.0006	0	0	80.02%	33.88%	27.11%	2.53E+21	1.19E+21	52.91%
400	25.8766	0.0010	14.21	18.30	0.00074	871,335	2,390,651			26.71%	73.29%	0.00%	0.00%	4.8884	13.4120	0.0000	0	0.0002	0.0005	0	0	81.11%	31.95%	25.92%	2.52E+21	1.13E+21	55.19%
420	25.8086	0.0010	14.96	17.39	0.00070	765,476	2,128,236			26.45%	73.55%	0.00%	0.00%	4.5994	12.7876	0.0000	0	0.0002	0.0005	0	0	82.18%	30.15%	24.77%	2.52E+21	1.07E+21	57.40%
440	25.7406	0.0010	15.52	16.76	0.00068	877,555	2,460,716			26.29%	73.71%	0.00%	0.00%	4.4048	12.3513	0.0000	0	0.0002	0.0005	0	0	82.89%	28.94%	23.99%	2.51E+21	1.03E+21	59.90%
460	25.6726	0.0010	16.82	15.47	0.00063	832,403	2,371,408			25.98%	74.02%	0.00%	0.00%	4.0187	11.4487	0.0000	0	0.0002	0.0005	0	0	84.35%	26.44%	22.30%	2.50E+21	9.5E+20	62.05%
480	25.6046	0.0010	17.62	14.76	0.00060	732,776	2,138,667			25.52%	74.48%	0.00%	0.00%	3.7679	10.9970	0.0000	0	0.0002	0.0004	0	0	85.28%	25.18%	21.47%	2.50E+21	9.03E+20	63.81%
500	25.5366	0.0010	18.60	13.98	0.00057	866,863	2,546,184			25.40%	74.60%	0.00%	0.00%	3.5512	10.4307	0.0000	0	0.0001	0.0004	0	0	86.09%	23.72%	20.42%	2.49E+21	8.55E+20	65.67%
520	25.4686	0.0010	20.03	12.99	0.00053	870,332	2,519,360			25.68%	74.32%	0.00%	0.00%	3.33427	9.65174	0.00000	0	0.0001	0.0004	0	0	86.91%	21.80%	18.95%	2.48E+21	7.96E+20	67.96%

Berat produk + katalis 1.4509 gr  
 Berat produk 1.2509 gr 0.1041462 mol  
 Yield karbon 6.2545 gr C/gr cat.

Neraca atom C			% loss
In	Out		
0.56	0.245034		56.00%

Tinggi unggun 4 cm  
 ΔQ CH4 1.768 mL/menit

**Pengolahan Data Uji Aktivitas Katalis Ni-Cu/Al2O3 dalam Produksi Nanokarbon**

**Katalis:** SB-30U

Rasio CH4:N2	1	0	T <sub>bubble</sub>	9.595	T <sub>column</sub>	100 C	Gas	RF =slope	RRF
Q total	27.1089	mL/min	0.00110	mol/min	T <sub>reaktor</sub>	923 K	CH4	1.27E+06	1.000
Q CH4	27.1089	mL/min	0.00110	mol/min	T <sub>sampling</sub>	301 K	H2	4.37E+06	3.437
Q N2	0	mL/min			W/f <sub>(reaktan)</sub>	0.0074	CO	5.89E+05	0.463
Katalis	0.2	gr			P <sub>reaktor</sub>	1 atm	CO2	3.72E+05	0.292

Kalibrasi bubblesoap 4.335163 mL untuk skala 0 - 5

waktu (menit)	Flowin (mL/min)	Flowin (mol/min)	Bubble out	Flowout (mL/min)	Flowout (mol/min)	PEAK AREA				KOMPOSISI GAS (%) (yi)				VOLUME (mL/min)				MOL (mol/min)				X CH4 (%)	S H2 (%)	Y H2 (%)	Neraca Atom H		
						CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2				In	Out	% loss
40	27.0388	0.0011	9.68	26.88	0.00109	1,035,983	2,012,046			33.99%	66.01%	0.00%	0.00%	9.1362	17.7439	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	66.21%	49.56%	32.81%	2.64E+21	1.76E+21	33.40%
50	27.0213	0.0011	9.68	26.87	0.00109	1,026,897	2,062,407	697	50	33.23%	66.74%	0.02%	0.00%	8.9298	17.9345	0.0061	0.000435	0.0004	0.0007	2.45E-07	1.76E-08	66.95%	49.57%	33.19%	2.63E+21	1.74E+21	33.77%
60	27.0038	0.0011	9.79	26.56	0.00108	1,032,385	2,031,667	680		33.69%	66.29%	0.02%	0.00%	8.9470	17.6070	0.0059	0	0.0004	0.0007	2.39E-07	0	66.87%	48.75%	32.60%	2.63E+21	1.73E+21	34.27%
70	26.9862	0.0011	9.83	26.46	0.00107	1,061,388	2,109,720	558		33.46%	66.52%	0.02%	0.00%	8.8550	17.6011	0.0047	0	0.0004	0.0007	1.88E-07	0	67.19%	48.54%	32.61%	2.63E+21	1.72E+21	34.58%
80	26.9687	0.0011	9.83	26.46	0.00107	1,037,381	2,039,997	15		33.71%	66.29%	0.00%	0.00%	8.9199	17.5408	0.0000	0.000129	0.0004	0.0007	0	5.22E-09	66.93%	48.59%	32.52%	2.63E+21	1.72E+21	34.40%
90	26.9512	0.0011	9.87	26.35	0.00107	1,034,579	2,037,477			33.68%	66.32%	0.00%	0.00%	8.8751	17.4785	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	67.07%	48.35%	32.43%	2.63E+21	1.72E+21	34.64%
100	26.9337	0.0011	9.88	26.33	0.00107	1,036,192	2,037,039			33.72%	66.28%	0.00%	0.00%	8.8766	17.4503	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	67.04%	48.32%	32.40%	2.63E+21	1.72E+21	34.65%
110	26.9162	0.0011	9.92	26.21	0.00106	1,024,401	2,005,764			33.81%	66.19%	0.00%	0.00%	8.8614	17.3505	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	67.08%	48.05%	32.23%	2.62E+21	1.71E+21	34.85%
120	26.8986	0.0011	9.97	26.10	0.00106	1,034,196	2,044,250			33.59%	66.41%	0.00%	0.00%	8.7690	17.3333	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	67.40%	47.80%	32.22%	2.62E+21	1.7E+21	35.18%
140	26.8636	0.0011	10.10	25.74	0.00104	1,037,531	2,036,571	11		33.75%	66.25%	0.00%	0.00%	8.6891	17.0558	0.0000	9.21E-05	0.0004	0.0007	0	3.73E-09	67.65%	46.92%	31.75%	2.62E+21	1.68E+21	35.91%
160	26.8285	0.0011	10.21	25.48	0.00103	1,041,703	2,033,320			33.88%	66.12%	0.00%	0.00%	8.6331	16.8512	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	67.82%	46.31%	31.41%	2.62E+21	1.66E+21	36.42%
180	26.7935	0.0011	10.52	24.73	0.00100	1,040,603	2,033,881			33.85%	66.15%	0.00%	0.00%	8.3686	16.3566	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	68.77%	44.39%	30.52%	2.61E+21	1.61E+21	38.24%
200	26.7585	0.0011	11.18	23.27	0.00094	1,022,724	2,058,905	11		33.19%	66.81%	0.00%	0.00%	7.7236	15.5489	0.0000	8.31E-05	0.0003	0.0006	0	3.36E-09	71.14%	40.84%	29.05%	2.61E+21	1.51E+21	42.08%
220	26.7234	0.0011	11.58	22.47	0.00091	1,017,537	2,103,541			32.60%	67.40%	0.00%	0.00%	7.3252	15.1433	0.0000	0	0.0003	0.0006	0	0	72.59%	39.03%	28.33%	2.61E+21	1.45E+21	44.26%
240	26.6884	0.0011	12.45	20.89	0.00085	1,014,233	2,112,528			32.44%	67.56%	0.00%	0.00%	6.7769	14.1155	0.0000	0	0.0003	0.0006	0	0	74.61%	35.45%	26.44%	2.60E+21	1.35E+21	48.16%
260	26.6533	0.0011	13.48	19.30	0.00078	983,919	2,080,045			32.11%	67.89%	0.00%	0.00%	6.1980	13.1028	0.0000	0	0.0003	0.0005	0	0	76.75%	32.03%	24.58%	2.60E+21	1.24E+21	52.17%
280	26.6183	0.0011	14.68	17.72	0.00072	1,007,603	2,133,965			32.07%	67.93%	0.00%	0.00%	5.6829	12.0357	0.0000	0	0.0002	0.0005	0	0	78.65%	28.74%	22.61%	2.60E+21	1.14E+21	56.04%
300	26.5833	0.0011	15.94	16.32	0.00066	936,750	2,024,845			31.63%	68.37%	0.00%	0.00%	5.1614	11.1567	0.0000	0	0.0002	0.0005	0	0	80.58%	26.04%	20.98%	2.59E+21	1.05E+21	59.60%
320	26.5482	0.0011	17.45	14.90	0.00060	895,460	1,972,267			31.23%	68.77%	0.00%	0.00%	4.6536	10.2496	0.0000	0	0.0002	0.0004	0	0	82.47%	23.41%	19.30%	2.59E+21	9.53E+20	63.17%
340	26.5132	0.0011	19.07	13.64	0.00055	799,472	1,813,946	30		30.59%	69.41%	0.00%	0.00%	4.1732	9.4687	0.0000	0.000157	0.0002	0.0004	0	6.34E-09	84.26%	21.19%	17.86%	2.58E+21	8.68E+20	66.40%
360	26.4781	0.0011	20.82	12.49	0.00051	634,308	1,476,066			30.06%	69.94%	0.00%	0.00%	3.7551	8.7382	0.0000	0	0.0002	0.0004	0	0	85.82%	19.23%	16.50%	2.58E+21	7.92E+20	69.32%
380	26.4431	0.0011	22.99	11.31	0.00046	733,232	1,731,328			29.75%	70.25%	0.00%	0.00%	3.3660	7.9480	0.0000	0	0.0001	0.0003	0	0	87.27%	17.22%	15.03%	2.58E+21	7.16E+20	72.24%
400	26.4080	0.0011	25.24	10.31	0.00042	621,381	1,514,757			29.09%	70.91%	0.00%	0.00%	2.9981	7.3087	0.0000	0	0.0001	0.0003	0	0	88.65%	15.61%	13.84%	2.57E+21	6.49E+20	74.81%
420	26.3730	0.0011	28.24	9.21	0.00037	597,952	1,473,703			28.86%	71.14%	0.00%	0.00%	2.6585	6.5522	0.0000	0	0.0001	0.0003	0	0	89.92%	13.81%	12.42%	2.57E+21	5.79E+20	77.50%
440	26.3380	0.0011	30.49	8.53	0.00035	497,151	1,259,624			28.30%	71.70%	0.00%	0.00%	2.4142	6.1168	0.0000	0	0.0001	0.0002	0	0	90.83%	12.78%	11.61%	2.57E+21	5.34E+20	79.22%
460	26.3029	0.0011	33.24	7.83	0.00032	584,919	1,488,121	24		28.22%	71.78%	0.00%	0.00%	2.2081	5.6178	0.0000	9.06E-05	0.0001	0.0002	0	3.67E-09	91.61%	11.66%	10.68%	2.56E+21	4.89E+20	80.93%
480	26.2679	0.0011	36.15	7.19	0.00029	423,273	1,110,813	21		27.59%	72.41%	0.00%	0.00%	1.9851	5.2095	0.0000	9.85E-05	0.0001	0.0002	0	3.99E-09	92.44%	10.73%	9.92%	2.56E+21	4.47E+20	82.53%
500	26.2328	0.0011	39.32	6.62	0.00027	367,003	969,313	42		27.46%	72.53%	0.00%	0.00%	1.8170	4.7989	0.0000	0.000208	0.0001	0.0002	0	8.42E-09	93.07%	9.83%	9.15%	2.56E+21	4.11E+20	83.93%

Berat produk + katalis 1.0271 gr  
 Berat produk 0.8271 gr 0.06886188 mol  
 Yield karbon 4.1355 gr C/gr cat.

Neraca atom C		
In	Out	% loss
0.56	0.195222	65.25%

Tinggi unggun 2.1 cm  
 ΔQ CH4 0.9111 mL/menit

**Pengolahan Data Uji Aktivitas Katalis Ni-Cu/Al2O3 dalam Produksi Nanokarbon**

**Katalis:** SB-60U

Rasio CH4:N2            1            0            T<sub>bubble</sub>            9.57 T<sub>column</sub>            100 C  
 Q total                    27.1797 mL/min    0.00110 mol/min            T<sub>reaktor</sub>            923 K  
 Q CH4                    27.1797 mL/min    0.00110 mol/min            T<sub>sampling</sub>            301 K  
 Q N2                      0 mL/min  
 Katalis                    0.2 gr                    W/f<sub>(reaktan)</sub>            0.0074            P<sub>reaktor</sub>            1 atm

Gas	RF =slope	RRF
CH4	1.27E+06	1.000
H2	4.37E+06	3.437
CO	5.89E+05	0.463
CO2	3.72E+05	0.292

Kalibrasi bubblesoap            4.335163 mL            untuk skala 0 - 5

waktu (menit)	Flowin (mL/min)	Flowin (mol/min)	Bubble out	Flowout (mL/min)	Flowout (mol/min)	PEAK AREA				KOMPOSISI GAS (%) (yi)				VOLUME (mL/min)				MOL (mol/min)				X CH4 (%)	S H2 (%)	Y H2 (%)	Neraca Atom H		
						CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2				In	Out	% loss
10	27.1526	0.0011	9.71	26.79	0.00108	1,011,275	1,795,184	12,131	14	35.88%	63.69%	0.43%	0.00%	9.6111	17.0613	0.1153	0.000133	0.0004	0.0007	4.67E-06	5.39E-09	64.60%	48.63%	31.42%	2.65E+21	1.77E+21	33.19%
21	27.1229	0.0011	9.65	26.95	0.00109	1,035,581	1,835,185	11,592	901	35.92%	63.65%	0.40%	0.03%	9.6779	17.1505	0.1083	0.000842	0.0004	0.0007	4.39E-06	3.41E-07	64.32%	49.16%	31.62%	2.64E+21	1.78E+21	32.70%
32	27.0931	0.0011	9.70	26.81	0.00109	1,907,764	3,532,926	20,895		34.93%	64.69%	0.38%	0.00%	9.3636	17.3401	0.1026	0	0.0004	0.0007	4.15E-06	0	65.44%	48.90%	32.00%	2.64E+21	1.76E+21	33.44%
43	27.0633	0.0011	9.68	26.86	0.00109	1,070,369	1,848,038	12,047	11088	36.39%	62.83%	0.41%	0.38%	9.7744	16.8759	0.1100	0.101253	0.0004	0.0007	4.45E-06	4.1E-06	63.88%	48.81%	31.18%	2.64E+21	1.78E+21	32.70%
53	27.0363	0.0011	9.70	26.81	0.00109	1,004,411	1,866,280	11,192	11192	34.72%	64.51%	0.39%	0.39%	9.3065	17.2923	0.1037	0.103701	0.0004	0.0007	4.2E-06	4.2E-06	65.58%	48.77%	31.98%	2.64E+21	1.75E+21	33.60%
64	27.0065	0.0011	9.57	27.17	0.00110	1,007,271	1,874,870	11,402		34.81%	64.79%	0.39%	0.00%	9.4582	17.6049	0.1071	0	0.0004	0.0007	4.33E-06	0	64.98%	50.16%	32.59%	2.63E+21	1.78E+21	32.38%
87	26.9443	0.0011	9.61	27.08	0.00110	1,010,252	1,860,713	11,061	10	35.05%	64.56%	0.38%	0.00%	9.4910	17.4809	0.1039	9.39E-05	0.0004	0.0007	4.21E-06	3.8E-09	64.78%	50.08%	32.44%	2.63E+21	1.78E+21	32.34%
99	26.9118	0.0011	9.68	26.88	0.00109	1,003,533	1,879,465	11,035		34.68%	64.94%	0.38%	0.00%	9.3209	17.4567	0.1025	0	0.0004	0.0007	4.15E-06	0	65.36%	49.62%	32.43%	2.62E+21	1.76E+21	32.93%
111	26.8793	0.0011	9.68	26.88	0.00109	1,012,352	1,883,849	11,242	28	34.82%	64.79%	0.39%	0.00%	9.3610	17.4195	0.1040	0.000259	0.0004	0.0007	4.21E-06	1.05E-08	65.17%	49.72%	32.40%	2.62E+21	1.76E+21	32.77%
140	26.8008	0.0011	9.78	26.61	0.00108	1,007,637	1,911,417	10,819		34.39%	65.24%	0.37%	0.00%	9.1516	17.3599	0.0983	0	0.0004	0.0007	3.98E-06	0	65.85%	49.18%	32.39%	2.61E+21	1.74E+21	33.47%
160	26.7467	0.0011	9.74	26.72	0.00108	1,005,825	1,915,782	10,806		34.80%	65.33%	0.37%	0.00%	9.1647	17.4559	0.0985	0	0.0004	0.0007	3.99E-06	0	65.74%	49.64%	32.63%	2.61E+21	1.74E+21	33.10%
180	26.6926	0.0011	9.65	26.96	0.00109	1,003,029	1,921,575	10,898		34.17%	65.46%	0.37%	0.00%	9.2132	17.6504	0.1001	0	0.0004	0.0007	4.05E-06	0	65.48%	50.49%	33.06%	2.60E+21	1.76E+21	32.42%
200	26.6385	0.0011	9.70	26.82	0.00109	1,008,310	1,918,665	9,518		34.34%	65.34%	0.32%	0.00%	9.2077	17.5208	0.0869	0	0.0004	0.0007	3.52E-06	0	65.43%	50.26%	32.89%	2.60E+21	1.75E+21	32.55%
220	26.5843	0.0011	9.93	26.19	0.00106	1,028,125	1,928,125	3,760		34.73%	65.14%	0.13%	0.00%	9.0983	17.0628	0.0333	0	0.0004	0.0007	1.35E-06	0	65.78%	48.79%	32.09%	2.59E+21	1.72E+21	33.68%
240	26.5302	0.0011	10.03	25.94	0.00105	1,027,685	1,952,877	1,270	39	34.46%	65.49%	0.04%	0.00%	8.9407	16.9897	0.0110	0.000339	0.0004	0.0007	4.47E-07	1.37E-08	66.30%	48.29%	32.02%	2.59E+21	1.7E+21	34.28%
260	26.4761	0.0011	10.11	25.72	0.00104	1,028,705	1,953,672	1,242		34.48%	65.48%	0.04%	0.00%	8.8677	16.8411	0.0107	0	0.0004	0.0007	4.33E-07	0	66.51%	47.82%	31.80%	2.58E+21	1.69E+21	34.70%
280	26.4220	0.0011	10.74	24.21	0.00098	1,030,690	1,956,116	976		34.50%	65.47%	0.03%	0.00%	8.3521	15.8512	0.0079	0	0.0003	0.0006	3.2E-07	0	68.39%	43.86%	30.00%	2.58E+21	1.59E+21	38.39%
300	26.3679	0.0011	10.06	25.86	0.00105	1,028,256	1,966,930	738		34.32%	65.65%	0.02%	0.00%	8.8742	16.9753	0.0064	0	0.0004	0.0007	2.58E-07	0	66.34%	48.52%	32.19%	2.57E+21	1.69E+21	34.16%
320	26.3137	0.0011	9.91	26.24	0.00106	1,026,421	1,977,569	497		34.16%	65.82%	0.02%	0.00%	8.9638	17.2702	0.0043	0	0.0004	0.0007	1.76E-07	0	65.93%	49.77%	32.82%	2.57E+21	1.72E+21	33.12%
340	26.2596	0.0011	10.08	25.80	0.00104	1,017,785	1,982,797	497		33.91%	66.07%	0.02%	0.00%	8.7513	17.0489	0.0043	0	0.0004	0.0007	1.73E-07	0	66.67%	48.69%	32.46%	2.56E+21	1.68E+21	34.21%
360	26.2055	0.0011	10.01	25.99	0.00105	1,017,676	1,999,593	384		33.72%	66.26%	0.01%	0.00%	8.7661	17.2242	0.0033	0	0.0004	0.0007	1.34E-07	0	66.55%	49.38%	32.86%	2.55E+21	1.69E+21	33.68%
380	26.1514	0.0011	9.62	27.05	0.00110	1,014,142	2,011,884		12	33.51%	66.49%	0.00%	0.00%	9.0648	17.9829	0.0000	0.000107	0.0004	0.0007	0	4.34E-09	65.34%	52.62%	34.38%	2.55E+21	1.76E+21	30.95%
400	26.0972	0.0011	10.04	25.92	0.00105	1,012,659	2,010,942			33.49%	66.51%	0.00%	0.00%	8.6797	17.2362	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	66.74%	49.48%	33.02%	2.54E+21	1.69E+21	33.72%
420	26.0431	0.0011	10.05	25.89	0.00105	1,012,008	2,121,069		43	32.30%	67.70%	0.00%	0.00%	8.3640	17.5301	0.0000	0.000355	0.0003	0.0007	0	1.44E-08	67.88%	49.58%	33.66%	2.54E+21	1.67E+21	34.23%
440	25.9890	0.0011	10.01	25.98	0.00105	1,101,513	2,322,963			32.17%	67.83%	0.00%	0.00%	8.3583	17.6267	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	67.84%	49.99%	33.91%	2.53E+21	1.67E+21	33.93%
460	25.9349	0.0011	10.16	25.61	0.00104	1,180,450	2,444,694			32.56%	67.44%	0.00%	0.00%	8.3393	17.2705	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	67.85%	49.08%	33.30%	2.53E+21	1.65E+21	34.55%
500	25.8266	0.0010	10.13	25.68	0.00104	1,124,675	2,339,324			32.47%	67.53%	0.00%	0.00%	8.3367	17.3404	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	67.72%	49.57%	33.57%	2.52E+21	1.66E+21	34.15%
520	25.7725	0.0010	10.66	24.39	0.00099	1,023,000	2,132,955			32.41%	67.59%	0.00%	0.00%	7.9069	16.4860	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	69.32%	46.14%	31.98%	2.51E+21	1.57E+21	37.34%

Berat produk + katalis            1.2969 gr  
 Berat produk                        1.0969 gr                        0.09132462 mol  
 Yield karbon                        5.4845 gr C/gr cat.

Neraca atom C		% loss
In	Out	
0.56	0.281859	49.55%

Tinggi unggun                        3.2 cm  
 ΔQ CH4                                1.4072 mL/menit

**Pengolahan Data Uji Aktivitas Katalis Ni-Cu/Al2O3 dalam Produksi Nanokarbon**

Katalis: SB-90U

Rasio CH4:N2 1 0 T<sub>bubble</sub> 9.39333333 T<sub>column</sub> 100 C  
 Q total 27.6909 mL/min 0.00112 mol/min T<sub>reaktor</sub> 923 K  
 Q CH4 27.6909 mL/min 0.00112 mol/min T<sub>sampling</sub> 301 K  
 Q N2 0 mL/min W/f<sub>(reaktan)</sub> 0.0072  
 Katalis 0.2 gr P<sub>reaktor</sub> 1 atm

Gas	RF =slope	RRF
CH4	1.27E+06	1.000
H2	4.37E+06	3.437
CO	5.89E+05	0.463
CO2	3.72E+05	0.292

Kalibrasi bubblesoap 4.335163 mL untuk skala 0 - 5

waktu (ment)	Flowin (mL/min)	Flowin (mol/min)	Bubble out	Flowout (mL/min)	Flowout (mol/min)	PEAK AREA				KOMPOSISI GAS (%) (y)				VOLUME (mL/min)				MOL (mol/min)				X CH4 (%)	S H2 (%)	Y H2 (%)	Neraca Atom H			
						CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2				In	Out	% loss	
10	27.6430	0.0011	9.39	27.69	0.00112	1,015,112	1,977,287		498	33.92%	66.07%	0.00%	0.02%	9.3920	18.2943	0.0000	0.004608	0.0004	0.0007	0	0	1.87E-07	66.02%	50.12%	33.09%	2.70E+21	1.81E+21	32.93%
20	27.5951	0.0011	9.41	27.64	0.00112	999,667	1,992,858			33.41%	66.59%	0.00%	0.00%	9.2339	18.4080	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	0	66.54%	50.13%	33.35%	2.69E+21	1.8E+21	33.18%
30	27.5473	0.0011	9.44	27.54	0.00112	992,793	2,040,237			32.73%	67.27%	0.00%	0.00%	9.0160	18.5283	0.0000	0	0.0004	0.0008	0	0	0	67.27%	49.99%	33.63%	2.69E+21	1.78E+21	33.64%
40	27.4994	0.0011	9.45	27.52	0.00111	984,256	2,054,374			32.39%	67.61%	0.00%	0.00%	8.9157	18.6091	0.0000	0	0.0004	0.0008	0	0	0	67.58%	50.07%	33.84%	2.68E+21	1.78E+21	33.74%
50	27.4515	0.0011	9.43	27.57	0.00112	987,402	2,038,304			32.63%	67.37%	0.00%	0.00%	8.9983	18.5752	0.0000	0	0.0004	0.0008	0	0	0	67.22%	50.33%	33.83%	2.68E+21	1.78E+21	33.39%
60	27.4036	0.0011	9.47	27.47	0.00111	979,460	2,070,769			32.11%	67.89%	0.00%	0.00%	8.8198	18.6469	0.0000	0	0.0004	0.0008	0	0	0	67.82%	50.17%	34.02%	2.67E+21	1.77E+21	33.79%
70	27.3558	0.0011	9.47	27.48	0.00111	980,673	2,061,209			32.24%	67.76%	0.00%	0.00%	8.8581	18.6183	0.0000	0	0.0004	0.0008	0	0	0	67.62%	50.33%	34.03%	2.67E+21	1.77E+21	33.59%
80	27.3079	0.0011	9.44	27.54	0.00112	975,029	2,073,018			31.99%	68.01%	0.00%	0.00%	8.8110	18.7332	0.0000	0	0.0004	0.0008	0	0	0	67.73%	50.64%	34.30%	2.66E+21	1.77E+21	33.43%
90	27.2600	0.0011	9.45	27.52	0.00111	972,612	2,093,963			31.72%	68.28%	0.00%	0.00%	8.7269	18.7883	0.0000	0	0.0004	0.0008	0	0	0	67.99%	50.69%	34.46%	2.66E+21	1.77E+21	33.53%
100	27.2121	0.0011	9.48	27.43	0.00111	971,320	2,103,343			31.59%	68.41%	0.00%	0.00%	8.6648	18.7633	0.0000	0	0.0004	0.0008	0	0	0	68.16%	50.58%	34.48%	2.65E+21	1.76E+21	33.68%
110	27.1642	0.0011	9.52	27.33	0.00111	968,817	2,104,473			31.52%	68.48%	0.00%	0.00%	8.6161	18.7159	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.28%	50.45%	34.45%	2.65E+21	1.75E+21	33.83%
120	27.1164	0.0011	9.52	27.33	0.00111	958,209	2,123,510			31.09%	68.91%	0.00%	0.00%	8.4984	18.8336	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.66%	50.58%	34.73%	2.64E+21	1.75E+21	33.93%
140	27.0206	0.0011	9.53	27.30	0.00111	953,385	2,119,795			31.02%	68.98%	0.00%	0.00%	8.4702	18.8391	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.65%	50.76%	34.85%	2.63E+21	1.74E+21	33.80%
160	26.9249	0.0011	9.49	27.41	0.00111	955,321	2,115,781		15	31.11%	68.89%	0.00%	0.00%	8.5260	18.8827	0.0000	0.000134	0.0003	0.0008	0	0	5.42E-09	68.33%	51.31%	35.07%	2.62E+21	1.75E+21	33.27%
180	26.8291	0.0011	9.51	27.34	0.00111	950,590	2,126,777			30.89%	69.11%	0.00%	0.00%	8.4457	18.8959	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.52%	51.39%	35.22%	2.62E+21	1.74E+21	33.30%
200	26.7334	0.0011	9.52	27.32	0.00111	952,128	2,126,849			30.92%	69.08%	0.00%	0.00%	8.4491	18.8734	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.40%	51.61%	35.30%	2.61E+21	1.74E+21	33.10%
220	26.6376	0.0011	9.55	27.25	0.00110	953,916	2,125,209		20	30.98%	69.02%	0.00%	0.00%	8.4408	18.8051	0.0000	0.000177	0.0003	0.0008	0	0	7.17E-09	68.31%	51.67%	35.30%	2.60E+21	1.74E+21	33.01%
240	26.5418	0.0011	9.57	27.17	0.00110	949,533	2,132,709			30.81%	69.19%	0.00%	0.00%	8.3702	18.8000	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.46%	51.73%	35.42%	2.59E+21	1.73E+21	33.05%
260	26.4461	0.0011	9.54	27.27	0.00110	945,914	2,147,088			30.58%	69.42%	0.00%	0.00%	8.3413	18.9334	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.46%	52.29%	35.80%	2.58E+21	1.74E+21	32.66%
280	26.3503	0.0011	9.51	27.36	0.00111	944,648	2,154,435			30.48%	69.52%	0.00%	0.00%	8.3400	19.0208	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.35%	52.81%	36.09%	2.57E+21	1.74E+21	32.26%
300	26.2546	0.0011	9.51	27.34	0.00111	935,076	2,160,528			30.21%	69.79%	0.00%	0.00%	8.2590	19.0826	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.54%	53.02%	36.34%	2.56E+21	1.74E+21	32.20%
320	26.1588	0.0011	9.52	27.31	0.00111	935,668	2,175,230			30.08%	69.92%	0.00%	0.00%	8.2149	19.0980	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.60%	53.22%	36.50%	2.55E+21	1.73E+21	32.09%
340	26.0631	0.0011	9.51	27.35	0.00111	936,964	2,168,311			30.17%	69.83%	0.00%	0.00%	8.2528	19.0984	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.34%	53.62%	36.64%	2.54E+21	1.74E+21	31.70%
360	25.9673	0.0011	9.49	27.41	0.00111	936,468	2,174,059			30.11%	69.89%	0.00%	0.00%	8.2518	19.1570	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.22%	54.07%	36.89%	2.53E+21	1.74E+21	31.34%
380	25.8716	0.0010	9.51	27.35	0.00111	933,315	2,190,307			29.88%	70.12%	0.00%	0.00%	8.1723	19.1789	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.41%	54.18%	37.07%	2.52E+21	1.73E+21	31.35%
400	25.7758	0.0010	9.49	27.40	0.00111	932,474	2,186,682			29.90%	70.10%	0.00%	0.00%	8.1910	19.2082	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.22%	54.62%	37.26%	2.51E+21	1.73E+21	30.96%
420	25.6801	0.0010	9.46	27.50	0.00111	929,702	2,184,414			29.85%	70.15%	0.00%	0.00%	8.2087	19.2870	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.03%	55.20%	37.55%	2.50E+21	1.74E+21	30.48%
440	25.5843	0.0010	9.51	27.34	0.00111	928,215	2,213,012			29.55%	70.45%	0.00%	0.00%	8.0793	19.2623	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.42%	55.02%	37.64%	2.49E+21	1.73E+21	30.78%
460	25.4886	0.0010	9.50	27.38	0.00111	927,708	2,211,817			29.55%	70.45%	0.00%	0.00%	8.0906	19.2894	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.26%	55.44%	37.84%	2.48E+21	1.73E+21	30.42%
480	25.3928	0.0010	9.48	27.45	0.00111	929,865	2,214,815			29.57%	70.43%	0.00%	0.00%	8.1175	19.3347	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.03%	55.96%	38.07%	2.48E+21	1.73E+21	29.96%
500	25.2970	0.0010	9.56	27.21	0.00110	920,324	2,236,948			29.15%	70.85%	0.00%	0.00%	7.9310	19.2771	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.65%	55.50%	38.10%	2.47E+21	1.71E+21	30.55%
520	25.2013	0.0010	9.38	27.74	0.00112	911,294	2,236,945			28.95%	71.05%	0.00%	0.00%	8.02969	19.71041	0.00000	0	0.0003	0.0008	0	0	0	68.14%	57.39%	39.11%	2.46E+21	1.74E+21	29.03%

Berat produk + katalis 1.8532 gr  
 Berat produk 1.6532 gr 0.1376405 mol  
 Yield karbon 8.266 gr C/gr cat.

Neraca atom C		% loss
In	Out	
0.56	0.316421	43.47%

Tinggi unggun 5.6 cm  
 ΔQ CH4 2.4896 mL/ment

**Pengolahan Data Uji Aktivitas Katalis Ni-Cu/Al2O3 dalam Produksi Nanokarbon**

**Katalis:** SS-60U

Rasio CH4:N2	1	0	T <sub>bubble</sub>	9.28	T <sub>column</sub>	100	C	Gas	RF =slope	RRF
Q <sub>total</sub>	28.0291	mL/min	0.00113	mol/min	T <sub>reaktor</sub>	923	K	CH4	1.27E+06	1.000
Q <sub>CH4</sub>	28.0291	mL/min	0.00113	mol/min	T <sub>sampling</sub>	301	K	H2	4.37E+06	3.437
Q <sub>N2</sub>	0	mL/min			W/f <sub>(reaktan)</sub>	0.0071		CO	5.89E+05	0.463
Katalis	0.2	gr			P <sub>reaktor</sub>	1	atm	CO2	3.72E+05	0.292

Kalibrasi bubblesoap 4,335163 mL untuk skala 0 - 5

waktu (menit)	Flowin (mL/min)	Flowin (mol/min)	Bubble out	Flowout (mL/min)	Flowout (mol/min)	PEAK AREA				KOMPOSISI GAS (%) (yi)				VOLUME (mL/min)				MOL (mol/min)				X CH4 (%)	S H2 (%)	Y H2 (%)	Neraca Atom H			
						CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2				In	Out	% loss	
10	28.0003	0.0011	9.39	27.70	0.00112	918,082	1,773,541			23	34.11%	65.89%	0.00%	0.00%	9.4483	18.2522	0.0000	0.000237	0.0004	0.0007	0	9.58E-09	66.26%	49.19%	32.59%	2.73E+21	1.81E+21	33.66%
30	27.9427	0.0011	9.64	26.98	0.00109	999,464	1,831,619			17	35.30%	64.70%	0.00%	0.00%	9.5256	17.4566	0.0000	0.000162	0.0004	0.0007	0	6.56E-09	65.91%	47.39%	31.24%	2.72E+21	1.78E+21	34.67%
50	27.8851	0.0011	9.61	27.08	0.00110	922,899	1,769,250				34.28%	65.72%	0.00%	0.00%	9.2819	17.7940	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	66.71%	47.83%	31.91%	2.72E+21	1.77E+21	34.81%
70	27.8275	0.0011	9.54	27.26	0.00110	942,880	1,772,463				34.72%	65.28%	0.00%	0.00%	9.4643	17.7914	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	65.99%	48.44%	31.97%	2.71E+21	1.79E+21	34.02%
90	27.7699	0.0011	9.68	26.87	0.00109	912,334	1,640,176				35.74%	64.26%	0.00%	0.00%	9.6043	17.2665	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	65.41%	47.53%	31.09%	2.71E+21	1.78E+21	34.33%
110	27.7123	0.0011	9.60	27.09	0.00110	942,784	1,672,499				36.05%	63.95%	0.00%	0.00%	9.7674	17.3274	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	64.75%	48.28%	31.26%	2.70E+21	1.8E+21	33.49%
130	27.6547	0.0011	9.83	26.46	0.00107	919,695	1,565,468			24	37.01%	62.99%	0.00%	0.00%	9.7924	16.6682	0.0000	0.000256	0.0004	0.0007	0	1.03E-08	64.59%	46.66%	30.14%	2.70E+21	1.77E+21	34.45%
150	27.5971	0.0011	9.86	26.38	0.00107	847,885	1,542,481				35.47%	64.53%	0.00%	0.00%	9.3573	17.0230	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	66.09%	46.66%	30.84%	2.69E+21	1.74E+21	35.25%
170	27.5395	0.0011	9.87	26.34	0.00107	841,375	1,507,468				35.82%	64.18%	0.00%	0.00%	9.4369	16.9078	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	65.73%	46.70%	30.70%	2.68E+21	1.74E+21	35.04%
190	27.4819	0.0011	9.91	26.25	0.00106	774,037	1,469,641				34.50%	65.50%	0.00%	0.00%	9.0549	17.1923	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	67.05%	46.65%	31.28%	2.68E+21	1.72E+21	35.77%
210	27.4243	0.0011	9.94	26.18	0.00106	790,945	1,449,287			43	35.31%	64.69%	0.00%	0.00%	9.2419	16.9344	0.0000	0.000502	0.0004	0.0007	0	2.03E-08	66.30%	46.57%	30.87%	2.67E+21	1.73E+21	35.43%
230	27.3668	0.0011	9.93	26.19	0.00106	874,791	1,489,899			64	36.99%	63.00%	0.00%	0.00%	9.6901	16.5036	0.0000	0.000709	0.0004	0.0007	0	2.87E-08	64.59%	46.68%	30.15%	2.67E+21	1.75E+21	34.44%
250	27.3092	0.0011	9.91	26.24	0.00106	745,570	1,503,911			15	33.14%	66.86%	0.00%	0.00%	8.6964	17.5418	0.0000	0.000175	0.0004	0.0007	0	7.08E-09	68.16%	47.12%	32.12%	2.66E+21	1.7E+21	36.04%
270	27.2516	0.0011	9.99	26.04	0.00105	871,795	1,540,546				36.14%	63.86%	0.00%	0.00%	9.4095	16.6275	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	65.47%	46.60%	30.51%	2.66E+21	1.73E+21	34.96%
290	27.1940	0.0011	9.90	26.26	0.00106	922,325	1,579,235			29	36.87%	63.13%	0.00%	0.00%	9.6837	16.5808	0.0000	0.000304	0.0004	0.0007	0	1.23E-08	64.39%	47.35%	30.49%	2.65E+21	1.75E+21	33.90%
310	27.1364	0.0011	9.94	26.18	0.00106	924,075	1,579,690				36.91%	63.09%	0.00%	0.00%	9.6612	16.5156	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	64.40%	47.25%	30.43%	2.65E+21	1.75E+21	33.97%
330	27.0788	0.0011	9.99	26.04	0.00105	936,572	1,582,740			77	37.17%	62.82%	0.00%	0.00%	9.6791	16.3571	0.0000	0.000796	0.0004	0.0007	0	3.22E-08	64.26%	47.00%	30.20%	2.64E+21	1.74E+21	34.05%
350	27.0212	0.0011	9.95	26.15	0.00106	941,458	1,592,344				37.16%	62.84%	0.00%	0.00%	9.7164	16.4340	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	64.04%	47.48%	30.41%	2.63E+21	1.75E+21	33.63%
370	26.9636	0.0011	9.96	26.12	0.00106	913,263	1,592,822			45	36.44%	63.56%	0.00%	0.00%	9.5200	16.6038	0.0000	0.000469	0.0004	0.0007	0	1.9E-08	64.69%	47.59%	30.79%	2.63E+21	1.74E+21	33.90%
390	26.9060	0.0011	9.95	26.15	0.00106	816,979	1,414,881			23	36.60%	63.39%	0.00%	0.00%	9.5723	16.5778	0.0000	0.000269	0.0004	0.0007	0	1.09E-08	64.42%	47.82%	30.81%	2.62E+21	1.74E+21	33.62%
410	26.8484	0.0011	9.91	26.26	0.00106	821,516	1,552,331			13	34.61%	65.39%	0.00%	0.00%	9.0864	17.1695	0.0000	0.000144	0.0004	0.0007	0	5.82E-09	66.16%	48.33%	31.97%	2.62E+21	1.72E+21	34.18%
430	26.7908	0.0011	9.96	26.11	0.00106	869,864	1,514,154			63	36.49%	63.51%	0.00%	0.00%	9.5254	16.5806	0.0000	0.00069	0.0004	0.0007	0	2.79E-08	64.45%	48.02%	30.94%	2.61E+21	1.74E+21	33.50%
450	26.7332	0.0011	9.92	26.23	0.00106	810,293	1,456,145			30	35.75%	64.25%	0.00%	0.00%	9.3774	16.8518	0.0000	0.000347	0.0004	0.0007	0	1.41E-08	64.92%	48.55%	31.52%	2.61E+21	1.74E+21	33.40%
470	26.6756	0.0011	9.94	26.16	0.00106	799,293	1,502,167			24	34.73%	65.27%	0.00%	0.00%	9.0850	17.0740	0.0000	0.000273	0.0004	0.0007	0	1.1E-08	65.94%	48.53%	32.00%	2.60E+21	1.72E+21	33.94%
490	26.6181	0.0011	9.95	26.15	0.00106	883,031	1,576,373			27	35.90%	64.10%	0.00%	0.00%	9.3890	16.7611	0.0000	0.000287	0.0004	0.0007	0	1.16E-08	64.73%	48.64%	31.48%	2.60E+21	1.73E+21	33.24%
510	26.5605	0.0011	9.86	26.38	0.00107	828,430	1,509,174			11	35.44%	64.56%	0.00%	0.00%	9.3489	17.0312	0.0000	0.000124	0.0004	0.0007	0	5.03E-09	64.80%	49.48%	32.06%	2.59E+21	1.74E+21	32.74%
520	26.5317	0.0011	9.94	26.17	0.00106	918,100	1,562,348				37.01%	62.99%	0.00%	0.00%	9.6857	16.4823	0.0000	0	0.0004	0.0007	0	0	63.49%	48.92%	31.06%	2.59E+21	1.75E+21	32.43%

Berat produk + katalis 1.3364 gr  
 Berat produk 1.1364 gr 0.09461327 mol  
 Yield karbon 5.682 gr C/gr cat.

Neraca atom C			% loss
In	Out		
0.57	0.293534		48.84%

Tinggi unggun 3.4 cm  
 ΔQ CH4 1.4974 mL/menit

Berat produk + katalis 1.3437 gr  
 Berat produk 1.1437 gr 0.09522105 mol  
 Yield karbon 5.7185 gr C/gr cat.

Neraca atom C			% loss
In	Out		
0.56	0.27792		50.43%

Tinggi unggun 3.2 cm  
 ΔQ CH4 1.4072 mL/menit

**Pengolahan Data Uji Aktivitas Katalis Ni-Cu/Al2O3 dalam Produksi Nanokarbon**

**Katalis:** SS-90U

Rasio CH4:N2	1	0	T <sub>bubble</sub>	9.5 T <sub>column</sub>	100 C
Q <sub>total</sub>	27.3800	mL/min	0.00111	mol/min	T <sub>reaktor</sub> 923 K
Q <sub>CH4</sub>	27.3800	mL/min	0.00111	mol/min	T <sub>sampling</sub> 301 K
Q <sub>N2</sub>	0	mL/min			W/f <sub>(reaktan)</sub> 0.0073
Katalis	0.2	gr			P <sub>reaktor</sub> 1 atm

Gas	RF =slope	RRF
CH4	1.27E+06	1.000
H2	4.37E+06	3.437
CO	5.89E+05	0.463
CO2	3.72E+05	0.292

Kalibrasi bubblesoap 4.335163 mL untuk skala 0 - 5

waktu (menit)	Flowin (mL/min)	Flowin (mol/min)	Bubble out	Flowout (mL/min)	Flowout (mol/min)	PEAK AREA				KOMPOSISI GAS (%) (yi)				VOLUME (mL/min)				MOL (mol/min)				X CH4 (%)	S H2 (%)	Y H2 (%)	Neraca Atom H		
						CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2				In	Out	% loss
10	27.3286	0.0011	9.65	26.95	0.00109	946,851	2,147,323			30.60%	69.40%	0.00%	0.00%	8.2483	18.7060	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	69.82%	49.02%	34.22%	2.66E+21	1.72E+21	35.59%
20	27.2773	0.0011	9.70	26.82	0.00109	953,307	2,124,539			30.97%	69.03%	0.00%	0.00%	8.3056	18.5098	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	69.55%	48.78%	33.93%	2.66E+21	1.71E+21	35.62%
30	27.2259	0.0011	9.74	26.71	0.00108	954,585	2,126,216			30.98%	69.02%	0.00%	0.00%	8.2775	18.4370	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	69.60%	48.65%	33.86%	2.65E+21	1.71E+21	35.74%
40	27.1746	0.0011	9.70	26.82	0.00109	956,555	2,119,019			31.10%	68.90%	0.00%	0.00%	8.3429	18.4817	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	69.30%	49.07%	34.01%	2.65E+21	1.71E+21	35.29%
50	27.1232	0.0011	9.76	26.66	0.00108	953,220	2,123,789		12	30.98%	69.02%	0.00%	0.00%	8.2588	18.4008	0.0000	0.000104	0.0003	0.0007	0	4.21E-09	69.55%	48.77%	33.92%	2.64E+21	1.7E+21	35.63%
60	27.0719	0.0011	9.77	26.62	0.00108	953,777	2,117,293			31.06%	68.94%	0.00%	0.00%	8.2684	18.3550	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	69.46%	48.81%	33.90%	2.64E+21	1.7E+21	35.56%
70	27.0206	0.0011	9.77	26.62	0.00108	946,357	2,139,854			30.66%	69.34%	0.00%	0.00%	8.1638	18.4595	0.0000	0	0.0003	0.0007	0	0	69.79%	48.95%	34.16%	2.63E+21	1.7E+21	35.63%
80	26.9692	0.0011	9.77	26.61	0.00108	938,812	2,168,804			30.21%	69.79%	0.00%	0.00%	8.0402	18.5741	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.19%	49.06%	34.44%	2.63E+21	1.69E+21	35.75%
90	26.9179	0.0011	9.74	26.71	0.00108	930,105	2,198,146			29.73%	70.27%	0.00%	0.00%	7.9401	18.7652	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.50%	49.44%	34.86%	2.62E+21	1.69E+21	35.65%
100	26.8665	0.0011	9.59	27.13	0.00110	921,684	2,236,256		24	29.19%	70.81%	0.00%	0.00%	7.9189	19.2134	0.0000	0.000206	0.0003	0.0008	0	8.35E-09	70.53%	50.70%	35.76%	2.62E+21	1.71E+21	34.77%
110	26.8152	0.0011	9.59	27.12	0.00110	910,993	2,273,579			28.61%	71.39%	0.00%	0.00%	7.7589	19.3641	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	71.07%	50.81%	36.11%	2.61E+21	1.7E+21	34.96%
120	26.7638	0.0011	9.71	26.79	0.00108	907,259	2,285,692			28.41%	71.59%	0.00%	0.00%	7.6116	19.1762	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	71.56%	50.06%	35.82%	2.61E+21	1.68E+21	35.74%
140	26.6611	0.0011	9.59	27.11	0.00110	913,701	2,265,887			28.74%	71.26%	0.00%	0.00%	7.7915	19.3221	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.78%	51.20%	36.24%	2.60E+21	1.7E+21	34.54%
160	26.5584	0.0011	9.67	26.91	0.00109	903,974	2,263,401			28.54%	71.46%	0.00%	0.00%	7.6796	19.2283	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	71.08%	50.93%	36.20%	2.59E+21	1.69E+21	34.88%
180	26.4557	0.0011	9.69	26.83	0.00109	899,124	2,270,645			28.37%	71.63%	0.00%	0.00%	7.6116	19.2223	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	71.23%	51.00%	36.33%	2.58E+21	1.68E+21	34.90%
200	26.3531	0.0011	9.58	27.14	0.00110	902,647	2,263,611			28.51%	71.49%	0.00%	0.00%	7.7377	19.4042	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.64%	52.12%	36.82%	2.57E+21	1.7E+21	33.82%
220	26.2504	0.0011	9.78	26.60	0.00108	903,690	2,256,520			28.60%	71.40%	0.00%	0.00%	7.6054	18.9907	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	71.03%	50.93%	36.17%	2.56E+21	1.67E+21	34.86%
240	26.1477	0.0011	9.61	27.08	0.00110	899,733	2,271,335			28.37%	71.63%	0.00%	0.00%	7.6823	19.3936	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.62%	52.51%	37.08%	2.55E+21	1.69E+21	33.53%
260	26.0450	0.0011	9.68	26.86	0.00109	903,440	2,257,168			28.58%	71.42%	0.00%	0.00%	7.6782	19.1834	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.52%	52.22%	36.83%	2.54E+21	1.68E+21	33.69%
280	25.9423	0.0011	9.63	27.02	0.00109	903,556	2,258,089			28.58%	71.42%	0.00%	0.00%	7.7219	19.2978	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.23%	52.96%	37.19%	2.53E+21	1.69E+21	33.04%
300	25.8396	0.0010	9.64	26.98	0.00109	902,165	2,256,915			28.56%	71.44%	0.00%	0.00%	7.7056	19.2768	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.18%	53.15%	37.30%	2.52E+21	1.69E+21	32.88%
320	25.7369	0.0010	9.71	26.78	0.00108	897,230	2,254,294			28.47%	71.53%	0.00%	0.00%	7.6238	19.1548	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.38%	52.88%	37.21%	2.51E+21	1.68E+21	33.17%
340	25.6342	0.0010	9.69	26.85	0.00109	901,721	2,252,183			28.59%	71.41%	0.00%	0.00%	7.6773	19.1751	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.05%	53.39%	37.40%	2.50E+21	1.68E+21	32.65%
360	25.5315	0.0010	9.69	26.85	0.00109	900,753	2,270,425			28.40%	71.60%	0.00%	0.00%	7.6272	19.2251	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	70.13%	53.69%	37.65%	2.49E+21	1.68E+21	32.48%
380	25.4288	0.0010	9.65	26.95	0.00109	900,535	2,274,632			28.36%	71.64%	0.00%	0.00%	7.6421	19.3030	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	69.95%	54.26%	37.95%	2.48E+21	1.69E+21	31.99%
400	25.3261	0.0010	9.64	26.99	0.00109	900,354	2,280,347			28.31%	71.69%	0.00%	0.00%	7.6405	19.3512	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	69.83%	54.71%	38.20%	2.47E+21	1.69E+21	31.63%
420	25.2234	0.0010	9.63	27.00	0.00109	900,226	2,303,431			28.10%	71.90%	0.00%	0.00%	7.5873	19.4137	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	69.92%	55.04%	38.48%	2.46E+21	1.69E+21	31.44%
440	25.1207	0.0010	9.68	26.86	0.00109	902,114	2,293,745			28.23%	71.77%	0.00%	0.00%	7.5824	19.2792	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	69.82%	54.96%	38.37%	2.45E+21	1.68E+21	31.44%
460	25.0181	0.0010	9.71	26.79	0.00108	902,378	2,282,452		31	28.33%	71.67%	0.00%	0.00%	7.5899	19.1977	0.0000	0.000261	0.0003	0.0008	0	1.06E-08	69.66%	55.08%	38.37%	2.44E+21	1.68E+21	31.29%
480	24.9154	0.0010	9.66	26.92	0.00109	901,997	2,276,219			28.38%	71.62%	0.00%	0.00%	7.6393	19.2779	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	69.34%	55.79%	38.69%	2.43E+21	1.68E+21	30.65%
500	24.8127	0.0010	9.63	27.01	0.00109	897,400	2,293,921			28.21%	71.79%	0.00%	0.00%	7.6192	19.3912	0.0000	0	0.0003	0.0008	0	0	69.29%	56.39%	39.08%	2.42E+21	1.69E+21	30.22%
520	24.7100	0.0010	9.67	26.91	0.00109	893,377	2,294,269			28.03%	71.97%	0.00%	0.00%	7.54127	19.3666	0.00000	0	0.0003	0.0008	0	0	69.48%	56.40%	39.19%	2.41E+21	1.68E+21	30.29%

Berat produk + katalis 1.9181 gr  
 Berat produk 1.7181 gr 0.14304388 mol  
 Yield karbon 8.5905 gr C/gr cat.

Neraca atom C		
In	Out	% loss
0.55	0.307602	44.23%

Tinggi unggun 6 cm  
 ΔQ CH4 2.67 mL/menit

**Pengolahan Data Uji Stabilitas Katalis Ni-Cu/Al2O3 dalam Produksi Nanokarbon Katalis: SB-30U**

T<sub>Reduksi</sub> 650 C      t<sub>bubble</sub> 4.48 s      QH2 58.06021205 mL/min  
 R 82.057 atm.mL/gmol.K  
 Rasio CH4:N2 1 0      T<sub>bubble</sub> 9.526667 T<sub>column</sub> 100 C  
 Q total 27.3033328 mL/min 0.00110544 mol/min      T<sub>reaktor</sub> 923 K  
 Q CH4 27.3033328 mL/min 0.00110544 mol/min      T<sub>sampling</sub> 301 K  
 Q N2 0 mL/min  
 Katalis 0.2 gr      W/f<sub>(reaktan)</sub> 0.007325      P<sub>reaktor</sub> 1 atm

Gas	RF =slope	RRF
CH4	1.27E+06	1.000
H2	4.37E+06	3.437
CO	5.89E+05	0.463
CO2	3.72E+05	0.292

Kalibrasi bubblesoap 4.335163 mL untuk skala 0 - 5

waktu (menit)	Flowin (mL/min)	Flowin (mol/min)	Bubble out	Flowout (mL/min)	Flowout (mol/min)	PEAK AREA				KOMPOSISI GAS (%) (yi)				VOLUME (mL/min)				MOL (mol/min)				X CH4 (%)	S H2 (%)	Y H2 (%)	Neraca Atom H		
						CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2	CH4	H2	CO	CO2				In	Out	% loss
20	27.1832943	0.00110	9.61	27.08	0.00110	976,249	2,057,538			32.18%	67.82%	0.00%	0.00%	8.7128	18.3631	0.0000	0.0000	0.000353	0.000743	0	0	67.95%	49.71%	33.91%	2.7E+21	1.74E+21	34.17%
40	27.0632558	0.00110	9.62	27.05	0.00110	954,206	2,174,265			30.50%	69.50%	0.00%	0.00%	8.2498	18.7980	0.0000	0.0000	0.000334	0.000761	0	0	69.52%	49.96%	34.73%	2.6E+21	1.72E+21	34.79%
60	26.9432174	0.00109	9.60	27.09	0.00110	964,285	2,230,053		20	30.19%	69.81%	0.00%	0.00%	8.1791	18.9155	0.0000	0.0002	0.000331	0.000766	0	6.87E-09	69.64%	50.40%	35.10%	2.6E+21	1.72E+21	34.54%
80	26.8231789	0.00109	9.53	27.29	0.00111	950,277	2,229,126			29.89%	70.11%	0.00%	0.00%	8.1577	19.1361	0.0000	0.0000	0.000333	0.000775	0	0	69.59%	51.26%	35.67%	2.6E+21	1.73E+21	33.92%
100	26.7031404	0.00108	9.52	27.32	0.00111	942,928	2,223,061			29.78%	70.22%	0.00%	0.00%	8.1375	19.1850	0.0000	0.0000	0.000329	0.000777	0	0	69.53%	51.67%	35.92%	2.6E+21	1.73E+21	33.60%
120	26.583102	0.00108	9.41	27.64	0.00112	936,504	2,249,356			29.40%	70.60%	0.00%	0.00%	8.1255	19.5163	0.0000	0.0000	0.000329	0.00079	0	0	69.43%	52.87%	36.71%	2.6E+21	1.74E+21	32.73%
140	26.4630635	0.00107	9.44	27.55	0.00112	949,928	2,270,788			29.49%	70.51%	0.00%	0.00%	8.1269	19.4271	0.0000	0.0000	0.000329	0.000787	0	0	69.29%	52.97%	36.71%	2.6E+21	1.74E+21	32.58%
160	26.3430251	0.00107	9.44	27.54	0.00112	936,516	2,279,118			29.12%	70.88%	0.00%	0.00%	8.0219	19.5223	0.0000	0.0000	0.000325	0.00079	0	0	69.55%	53.28%	37.05%	2.6E+21	1.73E+21	32.49%
180	26.2229866	0.00106	9.55	27.24	0.00110	938,067	2,290,196			29.06%	70.94%	0.00%	0.00%	7.9144	19.3222	0.0000	0.0000	0.00032	0.000782	0	0	69.82%	52.77%	36.84%	2.6E+21	1.71E+21	32.98%
200	26.1029481	0.00106	9.49	27.41	0.00111	923,525	2,281,150			28.82%	71.18%	0.00%	0.00%	7.8987	19.5101	0.0000	0.0000	0.00032	0.00079	0	0	69.74%	53.59%	37.37%	2.5E+21	1.72E+21	32.37%
220	25.9829097	0.00105	9.51	27.35	0.00111	916,761	2,307,126			28.44%	71.56%	0.00%	0.00%	7.7777	19.5735	0.0000	0.0000	0.000315	0.000792	0	0	70.07%	53.76%	37.67%	2.5E+21	1.71E+21	32.40%
240	25.8628712	0.00105	9.62	27.04	0.00109	916,257	2,302,333		17	28.47%	71.53%	0.00%	0.00%	7.6972	19.3411	0.0000	0.0001	0.000312	0.000793	0	5.78E-09	70.24%	53.24%	37.39%	2.5E+21	1.69E+21	32.85%
280	25.6227943	0.00104	9.75	26.67	0.00108	926,470	2,330,704		15	28.44%	71.56%	0.00%	0.00%	7.5856	19.0830	0.0000	0.0001	0.000307	0.000773	0	4.97E-09	70.39%	52.90%	37.24%	2.5E+21	1.67E+21	33.16%
300	25.5027558	0.00103	9.84	26.44	0.00107	908,607	2,320,204			28.14%	71.86%	0.00%	0.00%	7.4412	19.0017	0.0000	0.0000	0.000301	0.000769	0	0	70.82%	52.60%	37.25%	2.5E+21	1.65E+21	33.57%
340	25.2626789	0.00102	10.16	25.61	0.00104	904,867	2,332,840			27.95%	72.05%	0.00%	0.00%	7.1574	18.4524	0.0000	0.0000	0.00029	0.000747	0	0	71.67%	50.96%	36.52%	2.5E+21	1.6E+21	35.15%
360	25.1426404	0.00102	11.42	22.78	0.00092	910,597	2,377,095			27.70%	72.30%	0.00%	0.00%	6.3103	16.4730	0.0000	0.0000	0.000255	0.000667	0	0	74.90%	43.74%	32.76%	2.5E+21	1.42E+21	42.14%
380	25.022602	0.00101	12.62	20.61	0.00083	903,371	2,397,739			27.37%	72.63%	0.00%	0.00%	5.6388	14.9666	0.0000	0.0000	0.000228	0.000606	0	0	77.47%	38.61%	29.91%	2.4E+21	1.28E+21	47.56%
400	24.9025635	0.00101	13.99	18.59	0.00075	895,477	2,454,478			26.73%	73.27%	0.00%	0.00%	4.9700	13.6226	0.0000	0.0000	0.000201	0.000552	0	0	80.04%	34.17%	27.35%	2.4E+21	1.15E+21	52.69%
420	24.7825251	0.00100	14.55	17.88	0.00072	875,157	2,472,398			26.14%	73.86%	0.00%	0.00%	4.6736	13.2034	0.0000	0.0000	0.000189	0.000535	0	0	81.14%	32.83%	26.64%	2.4E+21	1.1E+21	54.50%
440	24.6624866	0.00100	16.94	15.35	0.00062	871,946	2,474,421			26.06%	73.94%	0.00%	0.00%	4.0009	11.3539	0.0000	0.0000	0.000162	0.00046	0	0	83.78%	27.48%	23.02%	2.4E+21	9.44E+20	60.76%
460	24.5424481	0.00099	18.30	14.22	0.00058	864,249	2,511,459			25.60%	74.40%	0.00%	0.00%	3.6396	10.5766	0.0000	0.0000	0.000147	0.000428	0	0	85.17%	25.30%	21.55%	2.4E+21	8.7E+20	63.62%
480	24.4224097	0.00099	19.86	13.10	0.00053	847,711	2,517,665			25.19%	74.81%	0.00%	0.00%	3.2996	9.7997	0.0000	0.0000	0.000134	0.000397	0	0	86.49%	23.20%	20.06%	2.4E+21	7.99E+20	66.43%
500	24.3023712	0.00098	21.31	12.21	0.00049	859,950	2,563,538			25.12%	74.88%	0.00%	0.00%	3.0660	9.1400	0.0000	0.0000	0.000124	0.00037	0	0	87.38%	21.52%	18.80%	2.4E+21	7.44E+20	68.58%
520	24.1823328	0.00098	23.29	11.17	0.00045	804,900	2,476,329		14	24.53%	75.47%	0.00%	0.00%	2.7396	8.4286	0.0000	0.0000	0.000111	0.000341	0	1.93E-09	88.67%	19.65%	17.43%	2.4E+21	6.78E+20	71.24%
540	24.0622943	0.00097	24.47	10.63	0.00043	814,566	2,509,371			24.51%	75.49%	0.00%	0.00%	2.6055	8.0264	0.0000	0.0000	0.000105	0.000325	0	0	89.17%	18.70%	16.68%	2.3E+21	6.45E+20	72.49%
560	23.9422558	0.00097	25.96	10.02	0.00041	736,208	2,322,553			24.07%	75.93%	0.00%	0.00%	2.4121	7.6095	0.0000	0.0000	9.77E-05	0.000308	0	0	89.93%	17.67%	15.89%	2.3E+21	6.06E+20	74.03%
580	23.8222174	0.00096	27.45	9.48	0.00038	715,290	2,270,102			23.96%	76.04%	0.00%	0.00%	2.2704	7.2054	0.0000	0.0000	9.19E-05	0.000252	0	0	90.47%	16.72%	15.12%	2.3E+21	5.73E+20	75.35%
600	23.7021789	0.00096	29.60	8.79	0.00036	661,360	2,135,980			23.64%	76.36%	0.00%	0.00%	2.0776	6.7099	0.0000	0.0000	8.41E-05	0.000292	0	0	91.23%	15.51%	14.15%	2.3E+21	5.3E+20	77.08%
620	23.5821404	0.00095	31.24	8.33	0.00034	618,106	2,020,265			23.43%	76.57%	0.00%	0.00%	1.9506	6.3756	0.0000	0.0000	7.9E-05	0.000258	0	0	91.73%	14.74%	13.52%	2.3E+21	5.01E+20	78.21%
640	23.462102	0.00095	32.13	8.10	0.00033	611,191	2,018,598			23.24%	76.76%	0.00%	0.00%	1.8815	6.2141	0.0000	0.0000	7.62E-05	0.000252	0	0	91.98%	14.40%	13.24%	2.3E+21	4.86E+20	78.74%
660	23.3420635	0.00095	34.47	7.55	0.00031	547,937	1,862,677			22.73%	77.27%	0.00%	0.00%	1.7152	5.8308	0.0000	0.0000	6.94E-05	0.000236	0	0	92.65%	13.48%	12.49%	2.3E+21	4.51E+20	80.16%
680	23.2220251	0.00094	35.79	7.27	0.00029	520,890	1,772,642			22.71%	77.29%	0.00%	0.00%	1.6506	5.6171	0.0000	0.0000	6.68E-05	0.000227	0	0	92.89%	13.02%	12.09%	2.3E+21	4.35E+20	80.80%
700	23.1019866	0.00094	37.15	7.00	0.00028	493239	1709002			22.40%	77.60%	0.00%	0.00%	1.5682	5.4334	0.0000	0.0000	6.35E-05	0.00022	0	0	93.21%	12.62%	11.76%	2.3E+21	4.18E+20	81.45%
720	22.9819481	0.00093	38.82	6.70	0.00027	426474	1502875			22.10%	77.90%	0.00%	0.00%	1.4811	5.2193	0.0000	0.0000	6E-05	0.000211	0	0	93.56%	12.14%	11.36%	2.2E+21	3.99E+20	82.20%
740	22.8619097	0.00093	39.71	6.55	0.00027	453520	1599494			22.09%	77.91%	0.00%	0.00%	1.4470	5.1033	0.0000	0.0000	5.86E-05	0.000207	0	0	93.67%	11.92%	11.16%	2.2E+21	3.9E+20	82.51%
760	22.7418712	0.00092	42.67	6.10	0.00025	460737	1632108			22.01%	77.99%	0.00%	0.00%	1.3420	4.7539	0.0000	0.0000	5.43E-05	0.000192	0	0	94.10%	11.11%	10.45%	2.2E+21	3.63E+20	83.65%
780	22.6218328	0.00092	44.04	5.91	0.00024	407677	1468980			21.72%	78.28%	0.00%	0.00%	1.2830	4.6232	0.0000	0.0000	5.19E-05	0.000187	0	0	94.33%	10.83%	10.22%	2.2E+21	3.5E+20	84.11%

800	22.5017943	0.00091	45.58	5.71	0.00023	403838	1471094			21.54%	78.46%	0.00%	0.00%	1.2291	4.4775	0.0000	0.0000	4.98E-05	0.000181	0	0	94.54%	10.52%	9.95%	2.2E+21	3.38E+20	84.59%
820	22.3817558	0.00091	46.14	5.64	0.00023	479736	1738364			21.63%	78.37%	0.00%	0.00%	1.2193	4.4181	0.0000	0.0000	4.94E-05	0.000179	0	0	94.55%	10.44%	9.87%	2.2E+21	3.34E+20	84.68%
840	22.2617174	0.00090	49.54	5.25	0.00021	400182	1489319			21.18%	78.82%	0.00%	0.00%	1.1120	4.1385	0.0000	0.0000	4.5E-05	0.000168	0	0	95.00%	9.78%	9.30%	2.2E+21	3.1E+20	85.71%
860	22.1416789	0.00090	49.7	5.23	0.00021	406012	1523074			21.05%	78.95%	0.00%	0.00%	1.1015	4.1321	0.0000	0.0000	4.46E-05	0.000167	0	0	95.03%	9.82%	9.33%	2.2E+21	3.09E+20	85.69%
880	22.0216404	0.00089	50.84	5.12	0.00021	382341	1447766			20.89%	79.11%	0.00%	0.00%	1.0689	4.0474	0.0000	0.0000	4.33E-05	0.000164	0	0	95.15%	9.66%	9.19%	2.1E+21	3.02E+20	85.96%
900	21.901602	0.00089	50.9	5.11	0.00021	389563	1476951			20.87%	79.13%	0.00%	0.00%	1.0666	4.0437	0.0000	0.0000	4.32E-05	0.000164	0	0	95.13%	9.70%	9.23%	2.1E+21	3.01E+20	85.90%
920	21.7815635	0.00088	53.85	4.83	0.00020	369660	1440952			20.42%	79.58%	0.00%	0.00%	0.9862	3.8441	0.0000	0.0000	3.99E-05	0.000156	0	0	95.47%	9.24%	8.82%	2.1E+21	2.84E+20	86.65%
940	21.6615251	0.00088	53.85	4.83	0.00020	308953	1177852			20.78%	79.22%	0.00%	0.00%	1.0037	3.8266	0.0000	0.0000	4.06E-05	0.000155	0	0	95.37%	9.26%	8.83%	2.1E+21	2.84E+20	86.53%
960	21.5414866	0.00087	59.14	4.40	0.00018	235329	949075			19.87%	80.13%	0.00%	0.00%	0.8739	3.5243	0.0000	0.0000	3.54E-05	0.000143	0	0	95.94%	8.53%	8.18%	2.1E+21	2.57E+20	87.76%
980	21.4214481	0.00087	56.12	4.63	0.00019	349682	1364671			20.40%	79.60%	0.00%	0.00%	0.9454	3.6895	0.0000	0.0000	3.83E-05	0.000149	0	0	95.59%	9.01%	8.61%	2.1E+21	2.72E+20	86.98%
1000	21.3014097	0.00086	64.94	4.01	0.00016	363845	1466908			19.87%	80.13%	0.00%	0.00%	0.7960	3.2094	0.0000	0.0000	3.22E-05	0.00013	0	0	96.26%	7.83%	7.53%	2.1E+21	2.34E+20	88.73%
1020	21.1813712	0.00086	65.7	3.96	0.00016	317561	1295733			19.68%	80.32%	0.00%	0.00%	0.7793	3.1798	0.0000	0.0000	3.16E-05	0.000129	0	0	96.32%	7.79%	7.51%	2.1E+21	2.31E+20	88.81%
1040	21.0613328	0.00085	59.67	4.36	0.00018	309497	1214712			20.31%	79.69%	0.00%	0.00%	0.8851	3.4740	0.0000	0.0000	3.58E-05	0.000141	0	0	95.80%	8.61%	8.25%	2.1E+21	2.56E+20	87.55%
1060	20.9412943	0.00085	59.16	4.40	0.00018	304318	1236438			19.75%	80.25%	0.00%	0.00%	0.8684	3.5283	0.0000	0.0000	3.52E-05	0.000143	0	0	95.85%	8.79%	8.42%	2.0E+21	2.57E+20	87.43%
1080	20.8212558	0.00084	60.98	4.27	0.00017	273938	1092553			20.05%	79.95%	0.00%	0.00%	0.8551	3.4104	0.0000	0.0000	3.46E-05	0.000138	0	0	95.89%	8.54%	8.19%	2.0E+21	2.5E+20	87.70%
1100	20.7012174	0.00084	68.24	3.81	0.00015	304323	1222609			19.93%	80.07%	0.00%	0.00%	0.7597	3.0520	0.0000	0.0000	3.08E-05	0.000124	0	0	96.33%	7.65%	7.37%	2.0E+21	2.23E+20	88.96%

Berat produk + katalis 2.2173 gr  
 Berat produk 2.0173 gr 0.16795438 mol  
 Yield karbon 10.0865 gr C/gr cat.

Neraca atom C		% loss
In	Out	
0.50	24.61%	51.05%

Tinggi unggun 7 cm  
 $\Delta Q_{CH4}$  3.121 mL/menit

