



UNIVERSITAS INDONESIA

ANALISIS TEKNO-EKONOMI PRODUKSI *CARBON NANO TUBE* (CNT) MELALUI REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA

SKRIPSI

**YULHAFIDZ
0706270144**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JANUARI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

ANALISIS TEKNO-EKONOMI PRODUKSI *CARBON NANO TUBE* (CNT) MELALUI REAKSI DEKOMPOSISI KATALITIK METANA

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**YULHAFIDZ
0706270144**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JANUARI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Yulhafidz

NPM : 0706270144

Tanda Tangan :

Tanggal : 6 Januari 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Yulhafidz
NPM : 0706270144
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Analisis Tekno-Ekonomi Produksi *Carbon Nanotube* (CNT) Melalui Reaksi Dekomposisi Katalitik Metana

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Praswasti PDK Wulan, MT ()

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

Penguji : Kamarza Mulia, Ph.D ()

Penguji : Ir. Dijan Supramono, M.Sc ()

Penguji : Dr. Ir. Sukirno, M.Eng ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Januari 2011

KATA PENGANTAR

Rasa syukur yang dalam kami sampaikan ke hadapan Tuhan Yang Maha Pemurah, karena berkat kemurahanNya makalah skripsi ini dapat diselesaikan sesuai yang diharapkan. Skripsi dengan judul “Analisis Tekno Ekonomi Produksi *Carbon Nano Tube* (CNT) Melalui Reaksi Dekomposisi Katalitik Metana” ini disusun sebagai salah satu prasyarat dalam menyelesaikan studi program sarjana pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam proses pendalaman materi skripsi ini, tentunya penulis banyak mendapatkan bimbingan, arahan, koreksi dan saran, untuk itu rasa terima kasih yang dalam-dalamnya penulis sampaikan kepada :

1. Ibu Ir. Praswasti PDK Wulan, M.T. selaku pembimbing I skripsi atas segala ide, kritik, serta sarannya kepada penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W.Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, dan sekaligus pembimbing II skripsi atas segala ide, kritik, serta sarannya kepada penulis.
3. Dr. Heri Hermansyah, S.T., M.Eng. selaku Pembimbing Akademik penulis.
4. Kedua orang tua dan keluarga penulis atas do'a, dukungan, dan kepercayaan yang telah diberikan.
5. Karim, atas kebersamaan serta canda dan tawanya dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Seluruh dosen Teknik Kimia atas ilmu yang diberikan.
7. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Kimia 2007 atas semua kerjasamanya.
8. Serta berbagai pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu untuk segala kontribusinya.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik untuk memperbaiki penulisan di masa yang akan datang.

Depok, 6 Januari 2011

Penulis

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

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

Nama : Yulhafidz
NPM : 0706270144
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Analisis Tekno Ekonomi Produksi *Carbon Nano Tube* (CNT) Melalui Reaksi Dekomposisi Katalitik Metana

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal : 6 Januari 2011

Yang menyatakan

(Yulhafidz)

ABSTRAK

Nama : Yulhafidz
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Analisis Tekno Ekonomi Produksi *Carbon Nano Tube* (CNT)
Melalui Reaksi Dekomposisi Katalitik Metana

Pengaplikasian *Carbon Nano Tube* (CNT) di berbagai bidang mulai dari elektronik hingga kesehatan terus meningkat setiap tahunnya. Dengan potensi pasar CNT yang menjanjikan, perlu dilakukan analisis tekno ekonomi untuk melihat kelayakan proses produksi CNT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa reaksi dekomposisi katalitik metana menggunakan reaktor katalitik terstruktur dapat memproduksi CNT komersial dengan biaya yang murah. Reaktor katalitik terstruktur memberikan konversi metana yang optimum dengan kondisi operasi pada suhu 700 °C, tekanan atmosferik dan perbandingan berat katalis dengan laju alir umpan sebesar 0,006 gr menit/ mL. Perhitungan parameter keekonomian mengindikasikan bahwa investasi bersifat ekonomis karena didapat IRR sebesar 23,73% dan NPV Rp4.138.422.889,27

Kata kunci : CNT, reaksi dekomposisi katalitik metana, reaktor katalitik terstruktur, investasi, parameter keekonomian

ABSTRACT

Name : Yulhafidz
Study Program : Chemical Engineering
Judul : Techno Economic Analysis of Carbon Nano Tube Production
Through Catalytic Decomposition Reaction of Methane

Application of Carbon Nano Tube (CNT) is increasing in many fields, from electronics till health sector. With CNT promising market potential, techno-economic analysis is needed to see the feasibility of CNT production processes. The results showed that catalytic decomposition reaction of methane using a structured catalytic reactor to produce commercial CNT has low cost. Structured catalytic reactor provides optimum methane conversion with operating condition at a temperature of 700 ° C, atmospheric pressure and weight ratio of catalyst to feed flow rate of 0.006 g min / mL. The calculation of economic parameters indicate that the investment are profitable because it acquired the investment IRR of 23.73% and NPV Rp4.138.422.889, 27

Keywords : CNT, catalytic decomposition reaction of methane, structured catalytic reactor, economic parameters

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penulisan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 <i>Carbon Nanotube</i> (CNT)	5
2.1.1 Sifat Fisik CNT	7
2.1.2 Aplikasi CNT	8
2.2 Teknologi Produksi CNT	10
2.3 Proses Produksi CNT	16
2.4 Seleksi Teknologi	17
2.4.1 Reaktor.....	17
2.4.2 Katalis	21
2.4.3 H ₂ S Removal	23
2.4.4 H ₂ O Removal	25
2.4.5 Pemurnian CNT	26
2.5 Unit Operasi Proses.....	34
2.5.1 Reaktor.....	34
2.5.2 H ₂ S Removal.....	34
2.5.2 H ₂ O Removal	35
2.6 Pasar CNT	36
2.7 Estimasi Biaya.....	39
2.7.1 Total Capital Investment (TCI)	39
2.7.2 Biaya Operasional.....	41
2.8 Teori Ekonomi.....	42
2.8.1 NPV (<i>Net Present Value</i>)	42
2.8.2 IRR (<i>Internal Rate of Return</i>).....	43
2.8.3 PBP (<i>Payback Period</i>).....	44
BAB 3 METODOLOGI.....	45
3.1 Metode Analisis.....	45
3.1.1 Analisis Permintaan dan Penawaran.....	46

3.1.2 Menentukan Kapasitas dan Lokasi Pabrik.....	46
3.1.3 <i>Flowsheeting</i>	47
3.1.4 <i>Sizing</i> Peralatan.....	51
3.1.5 Estimasi Biaya	52
3.1.6 Analisis Keekonomian.....	52
3.1.7 Analisis Sensitivitas.....	52
3.2 Teknik Pengumpulan Data	53
3.3 Asumsi dan Justifikasi.....	53
3.3.1 Reaktor.....	53
3.3.2 <i>H₂S Removal</i>	54
3.3.3 <i>H₂O Removal</i>	55
3.3.4 Pemurnian CNT	55
3.3.5 Keekonomian.....	56
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	57
4.1 Analisis Penawaran dan Permintaan	57
4.2 Penentuan Lokasi Pabrik.....	58
4.3 <i>Flowsheeting</i>	60
4.3.1 <i>Block Flow Diagram (BFD)</i>	60
4.3.2 <i>Process Flow Diagram (PFD)</i>	61
4.3.3 Deskripsi Proses	62
4.3.4 Neraca Massa.....	63
4.3.5 Neraca Energi	66
4.3.6 Daftar Peralatan	67
4.4 Estimasi Biaya.....	70
4.4.1 Perhitungan <i>Total Capital Investment (TCI)</i>	70
4.4.2 Perhitungan Biaya Operasional.....	72
4.5 <i>Capital Budgeting</i>	76
4.6 Cost Breakdown	76
4.7 Aliran Kas Bersih	78
4.8 Break Even Point (BEP).....	79
4.8 Analisis Sensitivitas	80
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	83
5.1 Kesimpulan.....	83
5.2 Saran.....	83
DAFTAR PUSTAKA.....	84
LAMPIRAN.....	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur CNT secara 3-Dimensi [Wikipedia, 2009]	5
Gambar 2.2 (a) <i>armchair</i> ; (b) <i>zig-zag</i> ; (c) <i>chiral</i> SWNT [Wikipedia, 2009]	6
Gambar 2.3 <i>Multi-Walled carbon Nanotube</i> [Iijima, 2002]	6
Gambar 2.4 Skema transistor CNT [Daenan, 2003]	9
Gambar 2.5 Skema <i>arch-discharge</i>	10
Gambar 2.6 Skema <i>Laser Ablation</i> [Daenan, 2003]	11
Gambar 2.7 Skema proses CVD [Daenan, 2003]	11
Gambar 2.8 Mekanisme reaksi dekomposisi katalitik metana [Iijima, S., 2002] ..	13
Gambar 2.9 Skema Produksi CNT Skala Pilot [Purwanto, 2010]	16
Gambar 2.10 <i>Spouted bed reactor</i>	18
Gambar 2.11 Skema <i>fluidized bed reactor</i>	19
Gambar 2.12 <i>Two-staged fluidized bed reactor</i>	20
Gambar 2.13 Substrat anyaman kawat (gauze) baja sebelum (a) dan (b) setelah dibentuk [Muharam, 2007]	21
Gambar 2.14 Katalis terstruktur: (a) Bentuk katalis terstruktur dan (b) reaktor berisikan kawat yang dilapisi katalis dengan posisi lurus	22
Gambar 2.15 Bentuk molekul <i>molecular sieve</i> [Savary, 2004]	26
Gambar 2.16 Skema peralatan pemurnian magnetik [Daenan, 2003]	28
Gambar 2.17 Skema Diagram Sel Mikrofiltrasi [Bandow, 1997]	30
Gambar 2.18 Spektrum elektromagnetik dan frekuensi yang digunakan dalam proses gelombang mikro [Stein, 1998]	31
Gambar 2.19 Perbedaan antara (a) pemanasan konvensional dan (b) pemanasan dengan gelombang mikro [Letellier dan Budzinski, 1999]	32
Gambar 2.20 Penggunaan CNT untuk beberapa aplikasi utama	36
Gambar 2.21 Proyeksi Permintaan CNT	37
Gambar 2.22 Proyeksi Produksi CNT (MWNT)	38
Gambar 3.1 Diagram Alir Analisis Tekno-Ekonomi	45
Gambar 4.1 Peluang Pasar CNT	57
Gambar 4.2 Peta lokasi pabrik CNT	59
Gambar 4.3 <i>Block Flow Diagram</i> Produksi CNT	60
Gambar 4.4 <i>Process Flow Diagram</i> (PFD) Produksi CNT	61
Gambar 4.5 <i>Cost Breakdown</i> untuk Produksi CNT	77
Gambar 4.6 Aliran Kas sebelum dan Setelah Pajak	79
Gambar 4.7 <i>Break Even Point</i>	80
Gambar 4.8 Sensitivitas terhadap NPV	81
Gambar 4.9 Sensitivitas Terhadap IRR	81
Gambar 4.10 Sensitivitas terhadap Payback Periode	82

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan kekuatan mekanis beberapa jenis material dan CNT [Wikipedia, 2009].....	7
Tabel 2.2 Perbandingan metode-metode produksi CNT [Wijaya, 2007]	15
Tabel 2.3 Perbandingan Kinerja Reaktor.....	20
Tabel 2.4 Perbandingan teknologi penghilangan H ₂ S [Slamet, 2006].....	24
Tabel 2.5 Perbandingan teknologi penghilangan H ₂ O.....	25
Tabel 2.6 Produsen CNT (MWNT) komersial dan kapasitas produksinya (Update, April 2010)	37
Tabel 2.7 Harga Jual MWNT tahun 2010.....	38
Tabel 2.8 Komponen <i>Total Capital Investment</i>	39
Tabel 4.2 Neraca Massa Keseluruhan.....	64
Tabel 4.3 Data Kondisi dan Komposisi tiap Aliran.....	65
Tabel 4.4 Neraca Energi Keseluruhan.....	66
Tabel 4.5 Spesifikasi Reaktor Gauze.....	67
Tabel 4.6 Spesifikasi <i>Air Cooler</i>	67
Tabel 4.7 Spesifikasi H ₂ S Removal.....	68
Tabel 4.8 Spesifikasi Kompresor.....	68
Tabel 4.9 Spesifikasi H ₂ O Removal.....	68
Tabel 4.10 Spesifikasi Microwave.....	68
Tabel 4.11 Spesifikasi Alat Penukar Panas.....	69
Tabel 4.12 Spesifikasi Ultrasonik.....	69
Tabel 4.13 Spesifikasi Oven.....	69
Tabel 4.14 Spesifikasi Tangki.....	69
Tabel 4.15 <i>Cost of Fabricated Equipment</i>	70
Tabel 4.16 <i>Cost of Process Machinery</i>	70
Tabel 4.17 <i>Cost Spare</i>	70
Tabel 4.18 <i>Cost of Total Bare Module</i>	70
Tabel 4.19 <i>Cost of Total Capital Investment</i>	71
Tabel 4.20 Biaya Bahan Langsung.....	72
Tabel 4.21 Tenaga Kerja Langsung.....	72
Tabel 4.22 Biaya Tenaga Kerja Tidak Langsung.....	73
Tabel 4.23 Biaya Utilitas.....	74
Tabel 4.24 Biaya Asuransi.....	74
Tabel 4.25 Biaya Pajak Lokal dan Paten.....	75
Tabel 4.26 <i>Capital Budgeting</i>	76
Tabel 4.27 Aliran Kas Bersih.....	78

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi manusia saat ini sudah sampai pada taraf nanoteknologi. Nanoteknologi adalah ilmu dan teknik menyusun dan mengontrol atom demi atom atau molekul untuk membuat dunia baru. Namun, studi mengenai teknologi nano di Indonesia dirasakan masih minim. Jika pun ada, sifatnya masih parsial dan belum terintegrasi dengan baik. Berdasarkan hasil survei, 85 % responden perusahaan (khususnya bidang kosmetik dan farmasi) sudah mulai menerapkan riset nano. Akan tetapi 89 % bahan, terutama instrumennya, masih harus diimport [Kompas, 2008].

Salah satu produk nanoteknologi yang sedang berkembang adalah nanokarbon. Nanokarbon ini mulai berkembang pada tahun 1985 dengan ditemukannya sebuah struktur karbon murni yang baru bernama *fullerene* [Hill, 2002]. Penemuan *fullerene* ini kemudian memicu penemuan material baru bernama *carbon nanotube* (CNT). Struktur CNT mirip dengan *fullerene*. Bedanya atom – atom karbon pada *fullerene* membentuk struktur seperti bola sedangkan CNT berbentuk silinder yang tiap ujungnya ditutup oleh atom – atom karbon yang berbentuk setengah struktur *fullerene* [Hill, 2002]. Struktur CNT pertama kali ditemukan oleh Sumio Iijima dari NEC Laboratories di Jepang [Yardley, 1997; Ouellette, 2002, 2003; Weisman, 2004]. Kemudian, universitas, usaha kecil, serta perusahaan-perusahaan besar, terus berusaha untuk menyelidiki dan mengeksplorasi berbagai kemungkinan komersial untuk materi yang menarik ini. Akibatnya, pengaplikasian produk CNT cukup berkembang dan diproyeksikan akan semakin banyak dalam beberapa tahun ke depan.

Bukti paling nyata untuk pertumbuhan ini, terlihat dari munculnya sejumlah produsen baru yang mampu menawarkan CNT dalam skala komersial (dalam kilogram, ton, dan bahkan ratusan ton, tergantung pada kualitas yang diinginkan) dengan harga CNT per satuan unitnya yang semakin kompetitif. Selain itu, beberapa universitas dan perusahaan nanoteknologi ternama, menargetkan pengaplikasian CNT pada sektor-sektor spesifik. Bukti tambahan pertumbuhan CNT lainnya adalah peningkatan kapasitas produksi yang lebih

besar oleh perusahaan mapan yang mengakui adanya peluang pasar masa depan yang ditawarkan oleh CNT [Oliver, 2010].

CNT merupakan nanokarbon yang paling banyak dikaji dan dikembangkan karena struktur dan sifat fisiknya yang unik serta memiliki nilai tambah yang tinggi karena dapat digunakan sebagai penyimpan hidrogen, *nanoscale transistor*, *flat panel display*, *nanoprobes*, superkapasitor, dan sensor [Daenan, 2003].

Salah satu cara untuk memperoleh CNT adalah dengan reaksi dekomposisi katalitik metana yang menghasilkan gas hidrogen dan karbon, $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ $\Delta H_{298} = +75 \text{ kJ/mol}$. Selain menghasilkan CNT, reaksi dekomposisi katalitik metana dapat memproduksi hidrogen dengan kemurnian tinggi. Dalam menghasilkan hidrogen, reaksi dekomposisi katalitik metana memiliki keunggulan yaitu, tidak diperlukan pemurnian CO dan tidak dihasilkan produk samping CO_2 seperti yang terjadi pada proses *steam reforming of methane* (SRM). Selain itu, proses ini berlangsung pada temperatur yang lebih rendah dengan kebutuhan energi yang lebih sedikit (lebih tidak endotermis) dibandingkan dengan proses SRM [Martin-Gullon, 2006]. Hidrogen dapat digunakan sebagai umpan pada sel bahan bakar (*fuel cell*) yang ramah lingkungan karena apabila dibakar tidak menghasilkan polutan. Selain itu, hidrogen telah banyak digunakan sebagai bahan baku dalam jumlah yang besar untuk industri-industri kimia, pengilangan minyak, dan makanan.

Kesuksesan dalam hal pengembangan skala produksi CNT dari skala lab ke skala pilot untuk reaktor dekomposisi katalitik metana akan membuka peluang industri untuk menghasilkan gas hidrogen dan CNT harga yang lebih murah dibandingkan dengan teknologi yang ada saat ini. Oleh karena itu, perlu dilakukan sebuah analisis tekno-ekonomi dengan menggunakan parameter keekonomian seperti *net present value* (NPV), *internal rate of return* (IRR), dan *payback period* (PBP) dari proses produksi CNT, untuk mengetahui apakah dengan keterbaruan teknologi proses produksi CNT bisa menghasilkan keuntungan secara ekonomi apabila diterapkan dalam skala industri.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun yang menjadi pokok permasalahan dalam penulisan ini adalah dalam mendirikan pabrik yang memproduksi CNT, berapakah kapasitas produksi pabrik CNT, peralatan apa saja yang dibutuhkan, berapa biaya investasi pabrik serta bagaimanakah keekonomian pabrik tersebut.

1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan makalah ini adalah untuk mengetahui kelayakan produksi CNT di Indonesia melalui reaksi dekomposisi katalitik metana secara teknis dan ekonomis.

1.4 Batasan Masalah

Batasan-batasan yang dipakai untuk penulisan ini adalah sebagai berikut:

1. Bahan baku pabrik CNT menggunakan *sales gas* yang diasumsikan mengandung metana 99,5 % dan sisanya adalah air.
2. Reaktor yang digunakan untuk memproduksi CNT adalah jenis *gauze reactor* yang mampu menghasilkan CNT sebanyak 2 kg/harinya untuk tiap unit reaktor.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada makalah ini dibagi menjadi enam bab, yaitu:

BAB 1 : Pendahuluan

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

BAB 2 : Tinjauan Pustaka

Berisi dasar teori yang menjelaskan tentang CNT secara umum, teknologi yang digunakan dalam memproduksi CNT, seleksi teknologi dan pasar CNT serta teori-teori yang berhubungan dengan parameter keekonomian yang berupa IRR, NPV, PBP.

BAB 3 : Metodologi

Berisi tahapan yang dilakukan dalam melakukan analisis tekno-ekonomi, teknik pengumpulan data serta teknik analisis data, serta berbagai macam asumsi dan justifikasi yang digunakan.

BAB 4 : Hasil dan Pembahasan

Berisi tentang analisis permintaan dan penawaran CNT, penentuan lokasi dan kapasitas pabrik, *flowsheeting* CNT, neraca massa dan energi, spesifikasi peralatan yang diperlukan, dan keekonomian serta analisis sensitivitas pabrik.

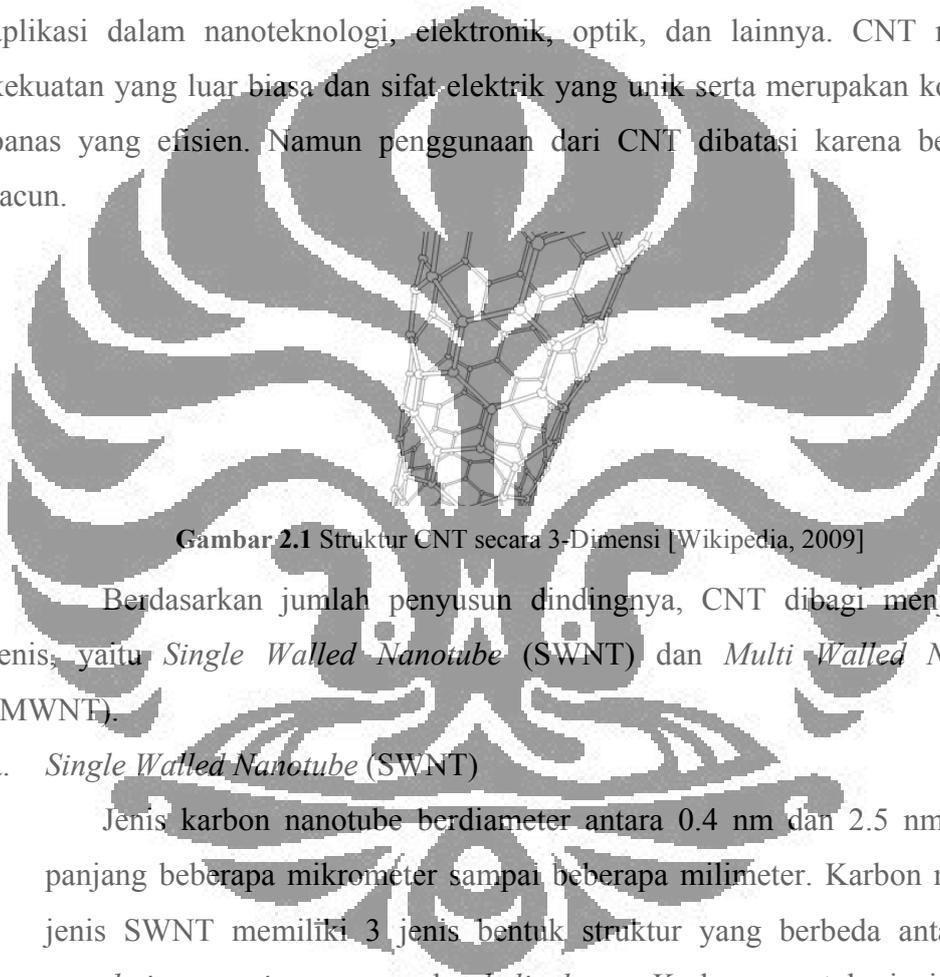
BAB 5 : Kesimpulan dan Saran

Berisi kesimpulan dari penelitian yang dilakukan serta saran pembangunan pabrik untuk produksi CNT.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Carbon Nanotube* (CNT)

Carbon nanotube (CNT) adalah suatu rangkaian karbon berukuran nano yang mempunyai rasio antara panjang dan diameter hingga 28.000.000 : 1 [L. X. Zheng et al., 2004]. Rasio ini jauh lebih besar dibanding material lain. CNT memiliki sifat-sifat yang baik sehingga berpotensi untuk digunakan pada berbagai aplikasi dalam nanoteknologi, elektronik, optik, dan lainnya. CNT memiliki kekuatan yang luar biasa dan sifat elektrik yang unik serta merupakan konduktor panas yang efisien. Namun penggunaan dari CNT dibatasi karena berpotensi racun.

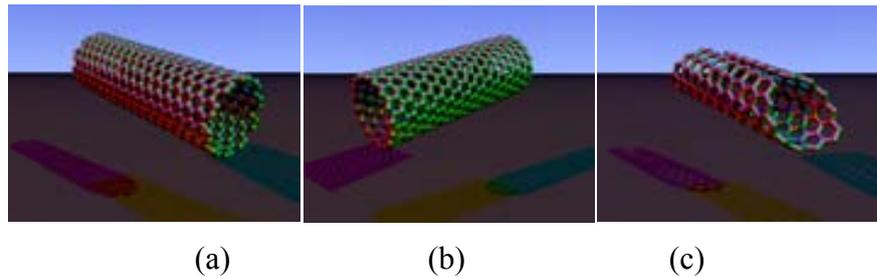


Gambar 2.1 Struktur CNT secara 3-Dimensi [Wikipedia, 2009]

Berdasarkan jumlah penyusun dindingnya, CNT dibagi menjadi dua jenis, yaitu *Single Walled Nanotube* (SWNT) dan *Multi Walled Nanotube* (MWNT).

a. *Single Walled Nanotube* (SWNT)

Jenis karbon nanotube berdiameter antara 0.4 nm dan 2.5 nm dengan panjang beberapa mikrometer sampai beberapa milimeter. Karbon nanotube jenis SWNT memiliki 3 jenis bentuk struktur yang berbeda antara lain: *armchair type*, *zig-zag type*, dan *helical type*. Karbon nanotube jenis SWNT memiliki sifat-sifat yang lebih unggul daripada bentuk MWNT, namun untuk memperoleh karbon jenis ini tidaklah mudah. Oleh karena diameternya yang sangat kecil, karbon jenis ini banyak diaplikasikan sebagai *hydrogen storage* untuk *fuel cell*.



Gambar 2.2 (a) *armchair*; (b) *zig-zag*; (c) *chiral* SWNT [Wikipedia, 2009]

SWNT adalah sebuah CNT yang sangat istimewa karena menunjukkan sifat-sifat elektrik yang tidak dimiliki oleh MWNT. Namun, SWNT sangat mahal untuk diproduksi (sekitar \$1500 per gram pada tahun 2000 tetapi pada tahun 2007, beberapa supplier menggunakan *arc-discharge* dengan biaya sebesar \$50-100 per gram).

b. *Multi Walled Nanotube* (MWNT)

Karbon nanotube jenis ini merupakan SWNT yang tersusun secara aksial konsentris dengan jarak antara SWNT yang satu dengan yang lainnya sebesar 0.34 nm (gambar 2.2.b). Jumlah lapisan yang terdapat MWNT bervariasi dari dua sampai beberapa puluh lapisan, sehingga memungkinkan diameter eksternalnya mencapai 100 nm. Meskipun harganya tidak semahal harga SWNT, yaitu sebesar \$55-150/g MWNT tergantung diameternya, karbon nanotube jenis ini memiliki banyak aplikasi yang tidak kalah dengan SWNT.



Gambar 2.3 *Multi-Walled carbon Nanotube* [Ijima, 2002]

Berbeda dengan SWNT, MWNT terdiri dari beberapa lapis grafit. Pelapisan ini menyerupai model “boneka Rusia”. Salah satu anggota dari MWNT adalah *double walled nanotube* (DWNT). DWNT sangatlah menarik

karena morfologi dan sifat-sifatnya mirip dengan SWNT, tetapi kekuatannya terhadap bahan kimia jauh meningkat.

2.1.1 Sifat Fisik CNT

CNT memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

a. Kekuatan

CNT merupakan salah satu material yang paling kuat dibandingkan dengan material lainnya, hal ini dirangkum dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan kekuatan mekanis beberapa jenis material dan CNT [Wikipedia, 2009]

Material	Young's Modulus (TPa)	Tensile Strength (GPa)	Elongation at Break (%)
SWNT	~1 (from 1 to 5)	13–53 ^E	16
Armchair SWNT	0.94 ^T	124.4.2 ^T	23.1
Zigzag SWNT	0.94 ^T	94.4.2 ^T	15.6–17.5
Chiral SWNT	0.92	-	-
MWNT	0.8–0.9 ^E	150	-
Stainless Steel	~0.2	~0.65–1	15–50
Kevlar	~0.15	~3.5	~2
Kevlar ^T	0.25	29.6	-

Keterangan: ^EExperimental observation; ^TTheoretical prediction

b. Elektrik

CNT memiliki sifat-sifat elektrik yang baik karena bersimetri dan memiliki struktur elektronik yang unik. Secara teoritis, CNT dapat membawa arus listrik sebesar 4×10^9 A/cm², sekitar 1000 kali lebih baik dibanding tembaga.

c. Termal

Sebuah CNT diprediksi memiliki kemampuan untuk mengirimkan 6000 W.m⁻¹.K⁻¹ pada temperatur ruang. Hal ini secara signifikan melampaui tembaga yang dapat mengirimkan 385 W. m⁻¹.K⁻¹.

d. Toksisitas

Menentukan tingkat toksisitas dari CNT adalah pertanyaan terbesar dalam nanoteknologi. Sebuah studi yang dilakukan oleh Alexandra Porter dari *University of Cambridge* menunjukkan bahwa CNT dapat memasuki sel manusia dan dapat berakumulasi pada sitoplasma yang dapat menyebabkan kematian sel.

2.1.2 Aplikasi CNT

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

a. Penyimpan energi

Bahan-bahan yang mengandung karbon biasanya digunakan sebagai elektroda pada *fuel cell*, baterai, dan aplikasi elektrokimia yang lainnya. Pada *fuel cell*, efisiensinya ditentukan oleh laju perpindahan elektron pada elektroda karbon. Efisiensi yang tinggi ditemukan dengan menggunakan CNT, dimana CNT memiliki ukuran yang kecil dan topologi permukaan yang halus [Daenan, 2003]. Sebagai penyimpan energi, CNT diaplikasikan sebagai penyimpan hidrogen dan superkapasitor.

CNT diprediksi dapat menyimpan cairan atau gas pada bagian dalamnya melalui efek kapiler, karena bentuknya yang berupa silinder kosong dan ukuran diameter yang berskala nanometer. Oleh karena itu, CNT dapat digunakan sebagai penyimpan hidrogen. Hidrogen dapat diabsorb 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 *nanotube* yang *single-wall* (diameternya kecil), panjang, dan seragam [Grujicic, 2002].

Superkapasitor berpotensi untuk digunakan pada peralatan elektronik karena kapasitansinya yang tinggi. Kapasitor adalah komponen listrik yang digunakan untuk menyimpan muatan listrik, dan secara sederhana terdiri dari dua elektroda yang dipisahkan oleh suatu penyekat (dielektrik). Dalam pemakaiannya, salah satu elektroda diberi muatan positif dan elektroda lainnya diberi muatan negatif yang besarnya sama. Antara kedua elektroda ini muncul medan listrik yang berarah dari positif ke elektroda yang bermuatan negatif. Kemampuan kapasitor dalam menyimpan muatan listrik atau kapasitansi bergantung pada geometri kapasitor, yaitu jarak pisah antar elektroda, luas elektroda, dan permitivitas bahan penyekat.

Pada elektroda nanotube, kapasitansi yang sangat besar timbul karena jarak pisah antar elektroda berskala nanometer dan luas permukaan nanotube yang besar. Oleh karena itu, muatan dalam jumlah besar dapat diberikan pada

elektroda, dengan hanya membutuhkan voltase (beda potensial) listrik yang kecil. Oleh karena itu, CNT dapat digunakan sebagai superkapasitor.

b. Peralatan elektronik

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

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 2.4



Gambar 2.4 Skema transistor CNT (Daenan, 2003)

c. *Nanoprobes* dan sensor

CNT dapat pula digunakan sebagai *scanning probe instruments* 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.

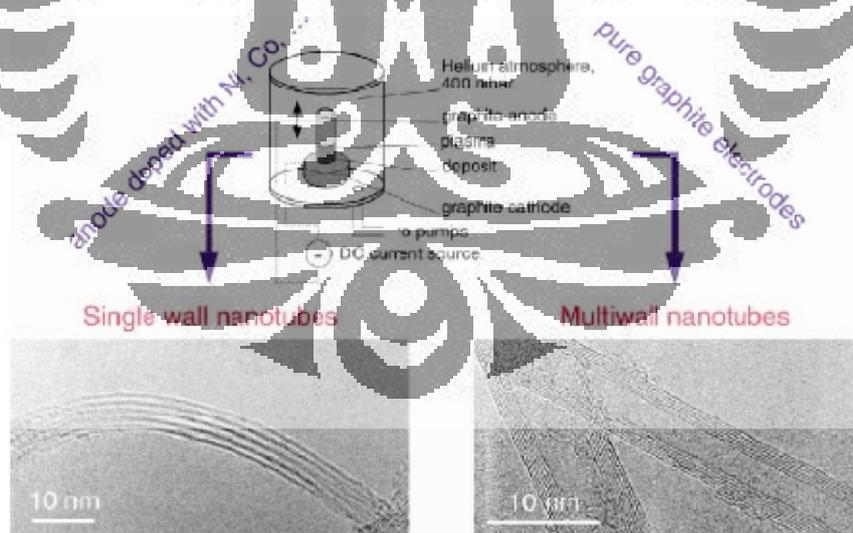
2.2 Teknologi Produksi CNT

Untuk memperoleh karbon nanotube baik SWNT maupun MWNT dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu:

a. *Arch-Discharge*

Metode ini merupakan metode yang paling sederhana jika dibandingkan dengan metode yang lain. Prosesnya cukup singkat, yaitu mengalirkan arus listrik searah melewati elektrode grafit di dalam *vessel* yang berisi gas argon atau gas *inert* lainnya (Gambar 2.5). Pada proses ini karbon nanotube tumbuh pada bagian elektroda negatif (anoda). Meskipun kelihatannya sederhana, metode *arch-discharge* tidak bernilai ekonomis, karena grafit yang digunakan merupakan material yang bernilai tinggi, di samping itu diperlukan pemurnian produk dari grafit.

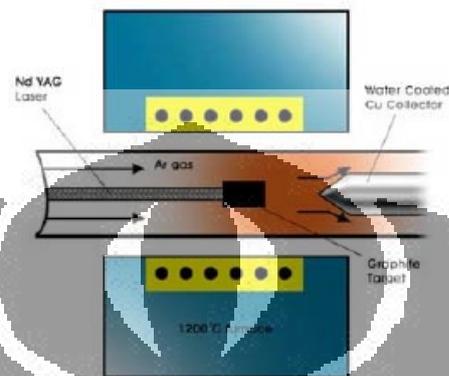
Metode ini pertama kali dilakukan oleh Iijima pada tahun 1991. Dari hasil penelitiannya didapatkan karbon nanotube jenis MWNT untuk pertama kalinya, dengan ukuran diameter 4-30 nm dan panjang lebih dari satu mikrometer. MWNT yang didapatkan oleh Iijima ini terdiri dari 2-50 silinder yang tersusun secara aksial konsentris.



Gambar 2.5 Skema *arch-discharge*. Dua elektrode grafit digunakan untuk memproduksi arus listrik searah *arch-discharge* dalam atmosfer gas *inert* [Daenan, 2003]

b. *Laser Ablation*

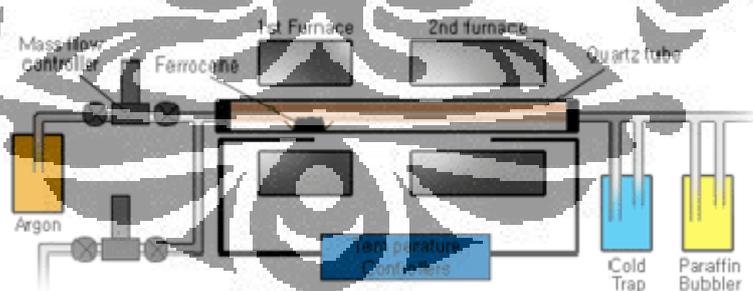
Metode ini diperkenalkan oleh Smalley dan rekan-rekannya pada tahun 1996 dan dihasilkan karbon *nanotube* jenis SWNT berdiameter 5-20 nm dalam bentuk *bundle*, dengan menggunakan metode *laser ablation* (penguapan) batang grafit dengan Ni dan Co pada suhu 1200°C (Gambar 2.6).



Gambar 2.6 Skema *Laser Ablation* [Daenan, 2003]

c. *Chemical Vapor Deposition (CVD)*

Proses CVD merupakan reaksi dekomposisi katalitik hidrokarbon (biasanya asetilen atau etilen) di dalam reaktor berbentuk *tube* pada temperatur 550-750°C, yang diikuti pertumbuhan karbon *nanotube* di permukaan katalis pada sistem pendinginan (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Skema proses CVD [Daenan, 2003]

d. 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. Definisi ini memiliki arti yang

sama dengan perengkahan (*cracking*). Salah satu contohnya adalah dekomposisi metana (hidrokarbon yang paling stabil) yang dapat diartikan sebagai pemutusan ikatan H-C dari metana menjadi komponen yang lebih sederhana yaitu hidrogen dan karbon. Pemilihan metana sebagai reaktan untuk produksi nanokarbon dan hidrogen adalah karena metana merupakan hidrokarbon dengan perbandingan hidrogen/karbon yang paling tinggi. Selain itu, metana bisa didapat langsung dari alam tanpa harus diolah terlebih dahulu, sehingga mengurangi biaya produksi. Adapun reaksi dekomposisi metana atau *Methane Decomposition Reaction* (MDR) adalah sebagai berikut:

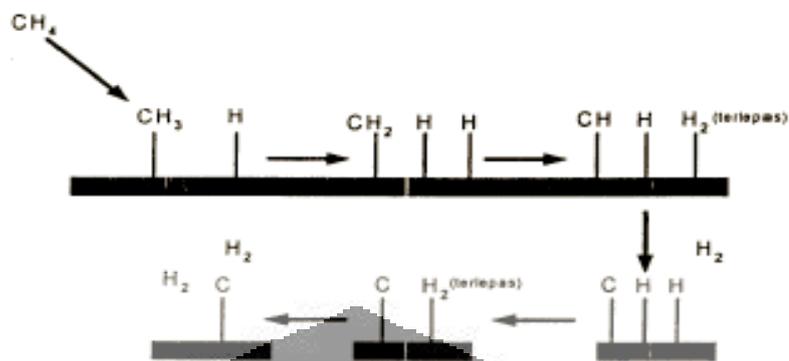


Analisis termodinamika reaksi dekomposisi metana menyatakan bahwa nilai untuk energi bebas Gibbs (ΔG_r^0) dan energi reaksi dekomposisi metana (ΔH_r^0) pada suhu 25°C, masing-masing sebesar 50,8 kJ/mol dan 75 kJ/mol (Song, 2005). Nilai ΔG_r^0 yang positif menunjukkan bahwa reaksi tidak akan bisa berjalan dengan spontan. Walaupun reaksi dapat berjalan, konversi yang dihasilkan tidak akan maksimal. Dan nilai ΔH_r^0 yang positif menandakan reaksi bersifat endotermis. Sehingga konversi akan meningkat seiring dengan meningkatnya suhu reaksi sehingga reaksi ini harus dilakukan pada suhu sangat tinggi.

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

Pada reaksi dekomposisi katalitik metana, sebuah molekul metana direngkah menjadi sebuah molekul karbon dan dua buah molekul hidrogen (Gambar 2.8). Atom hidrogen terputus satu persatu membentuk ion karbonium dan pada akhirnya didapatkan sebuah molekul atom karbon dan dua molekul hidrogen pada akhir reaksi. Produk *intermediate* dari reaksi ini tidak terdeteksi. Maksudnya selama reaksi tidak terlihat adanya produk antara. *By-*

product yang dihasilkan biasanya berupa *carbon amorf*, namun biasanya ditemukan dalam komposisi yang sangat kecil.



Gambar 2.8 Mekanisme reaksi dekomposisi katalitik metana [Iijima, S., 2002]

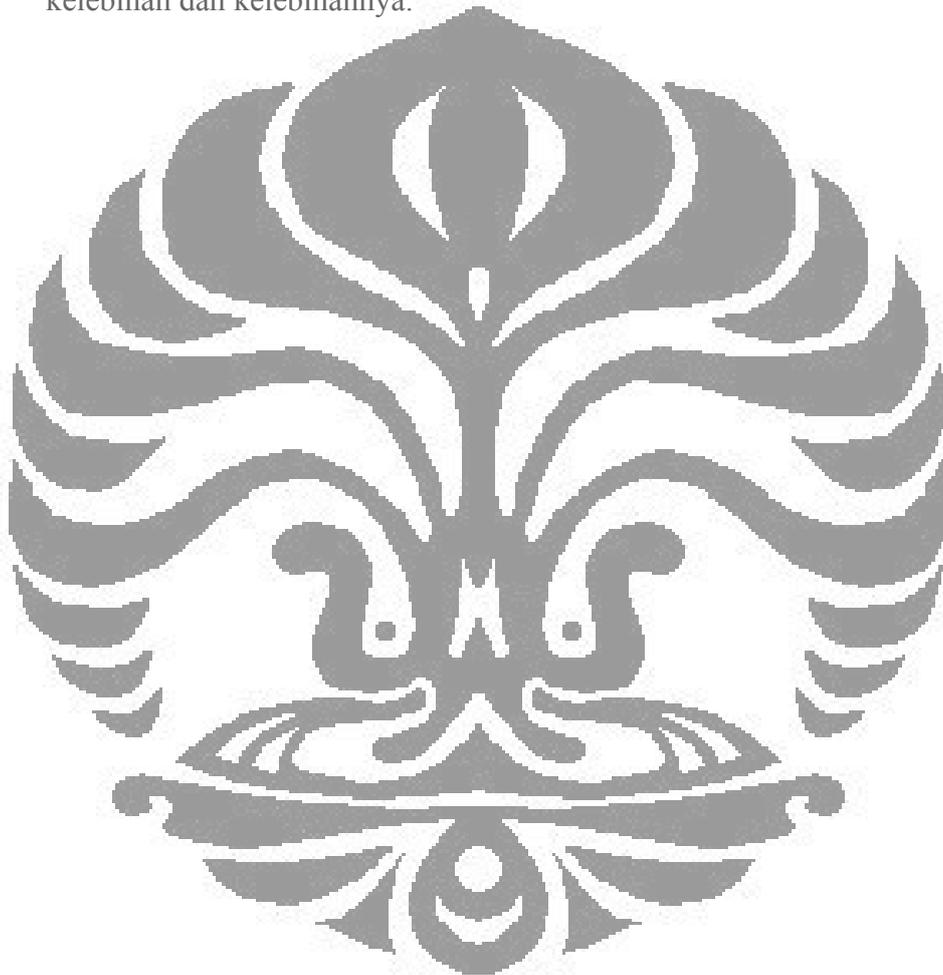
Mekanisme pertumbuhan CNT menurut Baker and Harris terdiri dari empat tahap. Pada tahap pertama, hidrokarbon terdekomposisi di atas lapisan logam untuk mengeluarkan hidrogen dan karbon yang terlarut di dalam partikel. Tahap kedua adalah tahap difusi. Karbon berdifusi melalui partikel logam dan terpresipitasi untuk membentuk badan-badan filamen. Masuknya karbon lebih cepat jika dibandingkan dengan difusi yang terjadi pada *bulk*, sehingga menyebabkan terjadinya akumulasi karbon pada permukaan yang harus dihilangkan untuk mencegah terjadinya penyumbatan pada permukaan aktif. Hal ini dilakukan dengan difusi permukaan dan karbon yang membentuk kulit pada badan filamen utama, pada tahap ketiga. Pada tahap keempat, terjadi deaktivasi katalis dan terjadi terminasi pada pertumbuhan tabung. Obrelin et al. mengusulkan mekanisme dimana difusi bulk tidak signifikan dan karbon ditransportasikan di sekitar partikel dengan difusi permukaan. Diameter dari CNT dikontrol dengan ukuran partikel katalis, ukuran partikel katalis yang nano akan menghasilkan SWNT.

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. Bentuk nanokarbon yang dihasilkan ini dinamakan nanofilamen. Proses pembentukan MWNT hampir sama dengan pembentukan nanofilamen tetapi MWNT terbentuk pada permukaan partikel logam yang lebih jenuh karbon. Pertumbuhan SWNT terjadi jika beberapa nukleus

mengendap pada permukaan partikel logam yang sama sehingga permukaan partikel logam sangat jenuh karbon.

Pada metode ini, material yang digunakan sebagai bahan baku harganya tidak terlampau tinggi dan proses pemurnian produknya cukup sederhana karena hanya memisahkan karbon nanotube yang terbentuk dari logam katalis tempat nanotube tersebut menempel.

Tabel 2.2 ini adalah perbandingan metode produksi CNT berikut kelebihan dan kekurangannya.



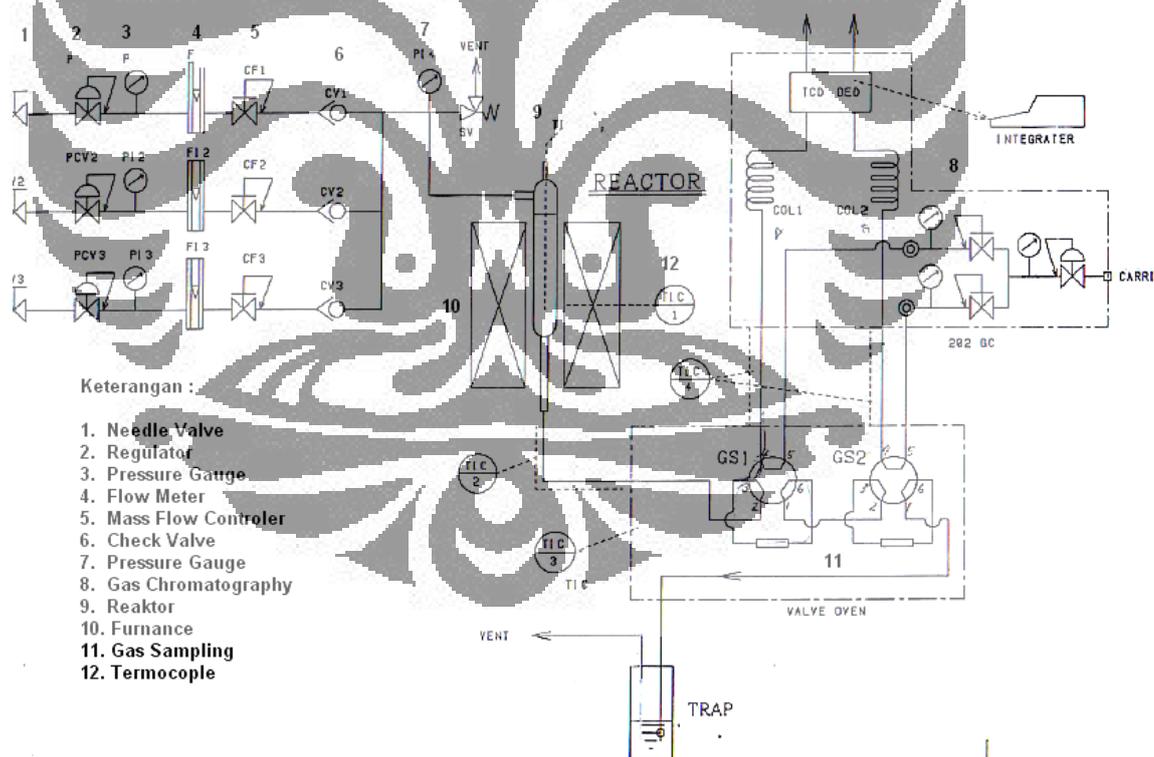
Tabel 2.2 Perbandingan metode-metode produksi CNT [Wijaya, 2007]

Metode	<i>Arch discharge</i>	<i>Chemical Vapour Deposition</i>	<i>Laser Ablation</i>	Dekomposisi Katalitik Metana
Oleh	Ebbesen dan Ajayan NEC, Jepang, 1992	Endo, Shinsui 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 suhu 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 industri. 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.

2.3 Proses Produksi CNT

Seperti telah di bahas di bagian sebelumnya, ada banyak cara untuk memproduksi CNT secara simultan. Salah satunya adalah reaksi dekomposisi katalitik metana. Reaksi dekomposisi metana merupakan proses sintesis CNT yang paling ekonomis di antara metode lainnya. Pada metode ini, material yang digunakan sebagai bahan baku harganya tidak terlampau tinggi dan proses pemurnian produknya cukup sederhana karena hanya memisahkan CNT yang terbentuk dari logam katalis tempat *nanotube* tersebut menempel.

Untuk memproduksi CNT menggunakan reaksi dekomposisi katalitik metana telah banyak dilakukan penelitian agar proses ini dapat diterapkan di skala industri. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, (DTK-UI) telah berhasil melakukan penelitian hingga skala pilot untuk memproduksi CNT melalui reaksi dekomposisi katalitik metana dengan menggunakan reaktor gauze seperti terlihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Skema Produksi CNT Skala Pilot [Purwanto, 2010]

Proses ini menggunakan gas metana (kemurnian mencapai 99%) sebagai bahan baku yang akan masuk ke dalam reaktor katalitik terstruktur (*wire mesh*) skala kecil (1 cm diameter) yang beroperasi pada suhu sekitar 700 °C. Katalis yang digunakan pada proses ini adalah katalis Ni-Cu-Al yang sebelumnya telah dipreparasi. Kondisi operasi optimum untuk konversi reaksi dekomposisi katalitik metana adalah pada suhu 700 °C dan tekanan 1 atm, serta dengan rasio berat katalis dibagi laju alir umpan adalah sebesar 0,006 gr menit / mL [Yulianti,2009]. Dalam proses *scale-up* ke skala industri, sangat sulit untuk mendapatkan gas metana murni dalam jumlah yang cukup besar sehingga dalam prosesnya bahan baku utama yang digunakan adalah *sales gas* dari perusahaan gas.

Sales gas adalah gas alam yang dijual secara komersial oleh perusahaan gas, kandungan utamanya adalah metana. *Sales gas* dijual berdasarkan *heating value* yang dimilikinya.

2.4 Seleksi Teknologi

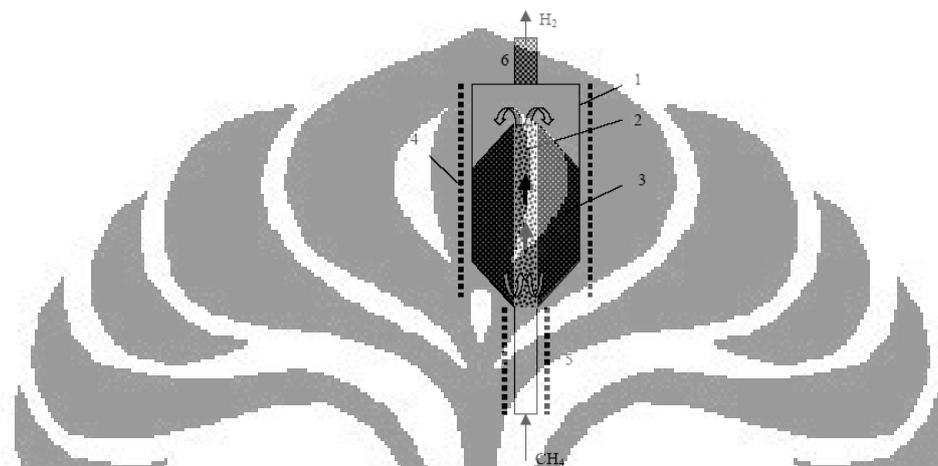
Dalam pengaplikasiannya ke skala industri, ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam aspek produksi CNT, salah satunya adalah pemilihan teknologi yang akan digunakan di tiap proses yang akan terjadi di pabrik yang akan didirikan. Adapun proses-proses yang berlangsung di pabrik CNT adalah sebagai berikut.

2.4.1 Reaktor

Perancangan reaktor adalah salah satu pendekatan untuk memperoleh hasil yang optimum dari reaksi dekomposisi katalitik metana selain pendekatan dari segi katalis yang digunakan. Beberapa penelitian telah dilakukan dalam merancang reaktor untuk reaksi dekomposisi katalitik metana, diantaranya adalah penelitian Nazim Muradov dan Qian Weizhong.

Muradov menggunakan dua jenis reaktor, yaitu *spouted bed reactor* dan *fluidized bed reactor*. Pada *spouted bed reactor* (SBR), metana dialirkan dari dasar reaktor dengan kecepatan tinggi sehingga menimbulkan *spouting zone* di tengah reaktor. Sebagian katalis akan terbawa aliran metana di sepanjang *spouting zone* dan akan tersembur keluar di bagian atas *spouting zone*. Proses ini dapat

dilakukan dengan menetapkan kecepatan superfisial gas 2 cm/s dan rasio tinggi reaktor terhadap diameternya 5 sampai 6. Jika kecepatan superfisial dan rasio tinggi per diameter reaktor lebih besar, maka fluidisasi katalis akan tidak homogen. Namun, dengan kondisi tersebut konversi metana yang dihasilkan sangat kecil, yaitu 7%. Hal ini dapat terjadi karena waktu kontak yang sangat singkat antara metana dengan katalis [Muradov, 2000]. *Spouted bed reactor* yang digunakan oleh Muradov dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 *Spouted bed reactor*: (1) dinding luar reaktor, (2) *spouting zone*, (3) katalis, (4) *electric heater*, (5) *pre-heater*, dan (6) *filter*. [Muradov,2000]

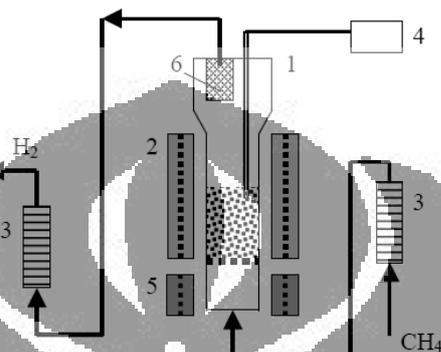
Selain menggunakan SBR, Muradov pun menggunakan *fluidized bed reactor* (FBR). FBR sudah digunakan secara luas dalam industri kimia, metalurgi, dan perminyakan. Metana dialirkan dari dasar reaktor dengan kecepatan tertentu sehingga menyebabkan katalis terfluidisasi. Kecepatan aliran minimum metana agar terjadi fluidisasi dihitung dengan persamaan:

$$G = \frac{0,005 d_p^2 \varepsilon^3 (\rho_p - \rho_f) \rho_f g}{\psi^2 (1 - \varepsilon) \mu} \quad (2.2)$$

dimana:

G	=	kecepatan aliran yang dibutuhkan agar terjadi fluidisasi
d_p	=	diameter partikel
ε	=	<i>fraction voids</i> (kekosongan)
ρ_p	=	densitas partikel
ρ_f	=	densitas metana
g	=	percepatan gravitasi
ψ	=	<i>shape factor</i>
μ	=	viskositas

Selama fluidisasi akan terjadi kontak antara katalis dengan metana selama waktu tertentu yang lamanya dapat dikontrol dengan menentukan rasio antara kecepatan umpan dengan massa katalis. Dari hasil penelitian ini, setelah 1,5-2 jam laju dekomposisi metana mulai menurun karena berkurangnya permukaan inti katalis akibat deposit karbon. Sistem reaktor yang digunakan oleh Muradov dapat dilihat pada Gambar 2.11.



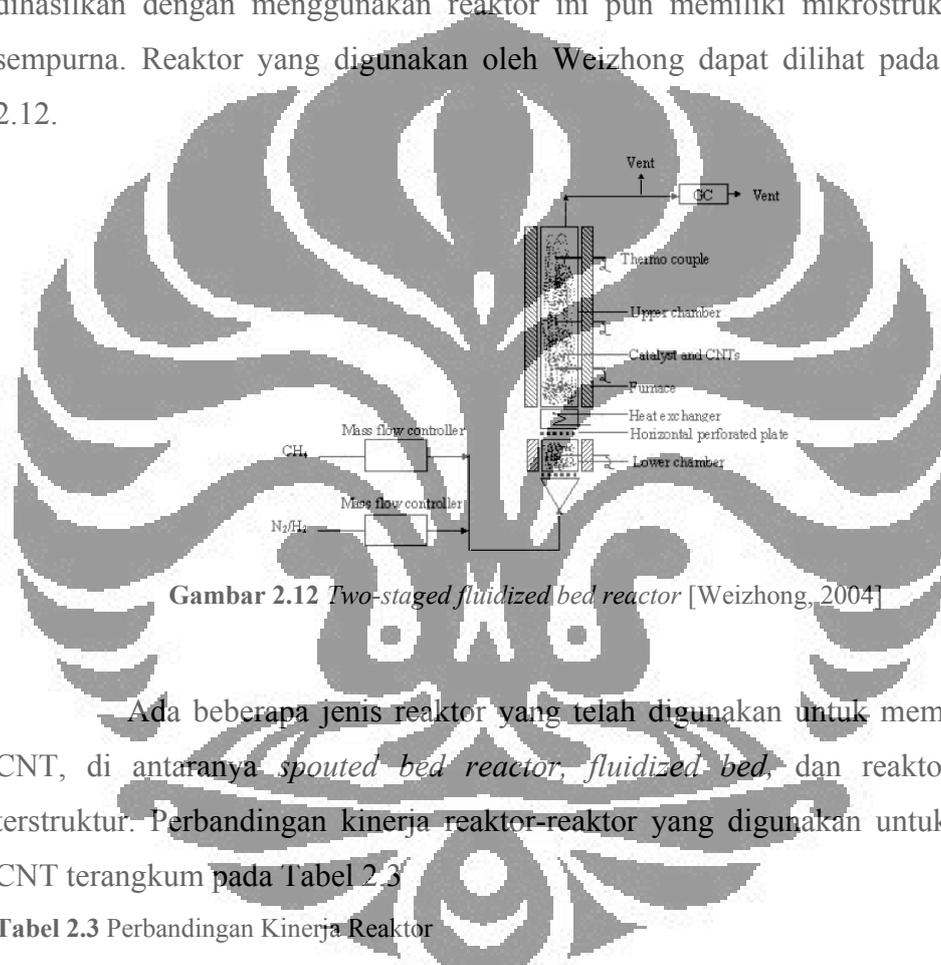
Gambar 2.11 Skema *fluidized bed reactor*: (1) *fluidized bed reactor*, (2) *electric heater*, (3) *flow meter*, (4) *temperature controller*, (5) *pre-heater*, dan (6) *filter* [Muradov,2000]

Dekomposisi katalitik pada metana adalah cara yang relatif singkat untuk memproduksi hidrogen dan karbon tanpa menghasilkan karbon oksida. Untuk memutuskan ikatan kuat C-H dari metana yang merupakan reaksi endotermis, diperlukan temperatur tinggi dan katalis dengan aktivitas tinggi. Namun, karbon yang dihasilkan dalam jumlah besar dan pada temperatur tinggi akan merusak struktur katalis dan menyebabkan deaktivasi katalis. Untuk menjaga kesetimbangan antara produksi dan difusi karbon pada operasi yang berlangsung kontinu, maka diperlukan temperatur rendah. Oleh karena itu, diperlukan reaktor dengan temperatur tinggi dan rendah. Hal inilah yang membuat Weizhong menggunakan *two-stage fluidized bed reactor* untuk reaksi dekomposisi katalitik metana [Weizhong, 2004].

Pada penelitian Weizhong, dekomposisi metana dilakukan dengan menggunakan *two-stage fluidized bed reactor* yang memungkinkan temperatur berbeda untuk stage yang berbeda. *Lower stage* menggunakan temperatur rendah yaitu 773 K, sedangkan *upper stage* menggunakan temperatur tinggi yaitu dari 773 K sampai 1123 K. Hal ini menyebabkan katalis yang terfluidisasi dapat

mendekomposisi metana dengan aktivitas tinggi pada temperatur tinggi dan karbon dapat berdifusi secara efektif untuk membentuk *carbon nanotubes* (CNTs) pada daerah bersuhu rendah dan tinggi.

Dengan menggunakan *two-stage fluidized bed reactor*, usia katalis dapat diperpanjang pada temperatur tinggi. Selain itu, konversi metana untuk waktu operasi yang lama dapat meningkat dari 20% pada 873 K menjadi 40% pada 1123 K, sehingga konsentrasi hidrogen pada produk pun tinggi. CNTs yang dihasilkan dengan menggunakan reaktor ini pun memiliki mikrostruktur yang sempurna. Reaktor yang digunakan oleh Weizhong dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 *Two-staged fluidized bed reactor* [Weizhong, 2004]

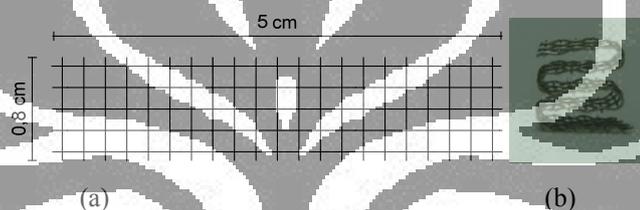
Ada beberapa jenis reaktor yang telah digunakan untuk memproduksi CNT, di antaranya *spouted bed reactor*, *fluidized bed*, dan reaktor katalis terstruktur. Perbandingan kinerja reaktor-reaktor yang digunakan untuk sintesis CNT terangkum pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Perbandingan Kinerja Reaktor

Peneliti	Tahun	Jenis Reaktor	Konversi	Pressure drop	Lifetime katalis	Aglomerasi & penyumbatan
Muradov	2000	<i>Spouted bed</i>	7%	Rendah	-	Tidak
	2001	<i>Fluidized bed</i>	20%	Rendah	-	Tidak
Qian, dkk	2003	<i>2-stage fluidized bed</i>	20-40%	Rendah	~ 17 jam	Tidak
Siang-Pao, dkk	2006	<i>Fixed bed</i>	47%	Tinggi	~ 1 jam	Ya
Muharam dan Purwanto	2007	Reaktor katalis terstruktur mikro	59%	Rendah	~ 24 jam	Ya setelah waktu yang lama
Yulianti	2008	Reaktor gauze skala bench	95%	Rendah	~ 33 jam	Ya setelah waktu yang lama

Berdasarkan keunggulan-keunggulannya, dipilih reaktor katalis terstruktur untuk dekomposisi metana menjadi CNT dan hidrogen. Meskipun penelitian yang dilakukan baru sampai tahap skala *bench*, metode ini sangat berpotensi untuk menghasilkan CNT dan hidrogen. Konversi reaktor jenis ini juga paling besar dibandingkan reaktor lainnya. Selain itu, *pressure drop* reaktor rendah dan kualitas CNT yang dihasilkan cukup baik.

Muharam dan Purwanto, 2007 telah melakukan riset menggunakan reaktor katalitik terstruktur (*wire mesh*) skala kecil (1 cm diameter) untuk reaksi dekomposisi metana, seperti terlihat pada Gambar 2.13. Kemudian dengan metode *dip-coating*, Ni, Cu dan Al dilapiskan sebagai katalis. Ni berfungsi sebagai inti aktif, Cu sebagai promotor dan Al sebagai penyangga.



Gambar 2.13 Substrat anyaman kawat (*gauze*) baja sebelum (a) dan (b) setelah dibentuk [Muharam, 2007]

2.4.2 Katalis

Masalah yang sering timbul pada reaksi dekomposisi katalitik metana adalah deaktivasi katalis yang terjadi akibat pembentukan karbon pada permukaan katalis (Muradov, 2001). Karbon yang dihasilkan dari perengkahan metana akan membentuk deposit karbon yang dapat menutupi inti aktif katalis sehingga terjadi deaktivasi katalis dan menurunnya *lifetime* katalis [He, Chunnian, 2007].

Penggunaan katalis berbasis nikel (Ni) pada berbagai penelitian dekomposisi metana karena nikel merupakan katalis yang paling aktif untuk reaksi dekomposisi katalitik metana diantara logam-logam lainnya. Namun Ni mudah terdeaktivasi dan *sintering* sehingga menyebabkan diameter partikel Ni membesar, hal ini akan mempengaruhi kualitas CNT [He, Chunnian, 2007; Maria Jesus Lazaro, 2007; Muharam, 2007].

Katalis terstruktur adalah katalis yang dibentuk dengan struktur tertentu sebagai alternatif pengganti katalis bentuk konvensional yang masih mempunyai kekurangan dalam aplikasinya [Cybulski, 1998]. Contoh katalis terstruktur yang

umum dipakai adalah sarang tawon (*honeycomb*) yang biasa diaplikasikan pada kendaraan bermotor.

Penggunaan katalis terstruktur mempunyai keuntungan dibanding dengan katalis bentuk konvensional seperti bubuk, antara lain: aliran yang seragam, *pressure drop* yang rendah, distribusi katalis yang teratur, dan tidak sensitif terhadap *fouling* akibat debu.

Ada beberapa jenis katalis terstruktur yang umum digunakan :

1. Katalis Monolitik

Katalis ini terdiri dari struktur yang mempunyai kesatuan yang seragam, dengan saluran-saluran sempit yang teratur baik paralel maupun zig-zag. Katalis ini memungkinkan untuk mengontrol selektivitas dari reaksi yang kompleks, mempunyai hambatan difusi internal yang kecil, *pressure drop* yang lebih kecil 2-3 kali dari reaktor *fixed bed*. Unsur yang aktif secara katalitik terdispersi diseluruh struktur monolitik. Nama yang umum dipakai untuk model ini adalah struktur sarang tawon (*honeycomb*). Katalis ini sering diaplikasikan sebagai katalitik konverter pada kendaraan bermotor.

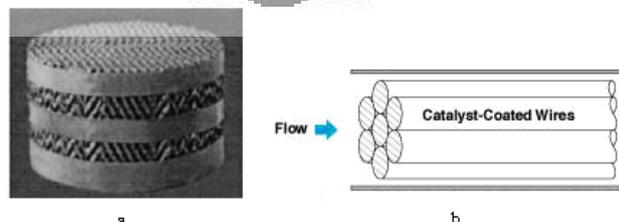
2. Katalis Membran

Katalis jenis ini tidak hanya mempunyai interaksi terhadap dinding akan tetapi terjadi juga perpindahan massa melewati dinding yang permibel (difusi) yang memiliki pori-pori yang kecil.

3. *Arranged Catalyst*

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

Gambar dari contoh katalis terstruktur dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.14 Katalis terstruktur: (a) Bentuk katalis terstruktur dan (b) reaktor berisikan kawat yang dilapisi katalis dengan posisi lurus [Beers, 2003; Voecks]

Dari hasil penelitian memperlihatkan bahwa katalis multimetal Ni-Cu-Al merupakan katalis yang paling baik ditinjau dari kualitas produk CNT maupun yield produk hidrogen serta *life time*. Promotor Cu mempunyai peran pencegah *sintering* karena partikel Cu akan menyisip diantara partikel Ni dan promotor tekstural alumina berperan sebagai *stronger-metal-interaction* (SMI) sehingga mencegah terjadinya *sintering* dan menjaga diameter partikel Ni tetap kecil.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis Ni-Cu-Al mampu bertahan sampai 1400 menit (24 jam) untuk reaktor mikro dengan penurunan laju alir yang relatif kecil sekitar 10%. Kualitas CNT yang dihasilkan dari metode ini cukup baik dengan diameter 30-50 nm dan ketebalan dinding 10-20 nm dan kemurnian hidrogen mencapai lebih dari 99%. Untuk reaktor skala lab mampu beroperasi selama 33 jam dengan yield CNT sebesar 200 gr C/gr katalis dan kemurnian hidrogen 95%.

Pada reaktor skala pabrik ini akan menggunakan katalis Ni-Cu-Al sebagai katalis terstruktur. Katalis terstruktur adalah katalis yang dibentuk dengan struktur tertentu sebagai alternatif pengganti katalis bentuk konvensional yang masih mempunyai kekurangan dalam aplikasinya. Penggunaan katalis terstruktur mempunyai keuntungan dibanding dengan katalis bentuk konvensional seperti bubuk, antara lain: aliran yang seragam, *pressure drop* yang rendah, distribusi katalis yang teratur, dan tidak sensitif terhadap *fouling* akibat debu.

2.4.3 H₂S Removal

Pada *sales gas* secara umum sudah tidak terdapat kandungan H₂S, tetapi demi alasan kelangsungan proses produksi dan keamanan peralatan yang lain dari bahaya korosi yang mungkin ditimbulkan, pengadaan unit ini dirasa dibutuhkan sebagai proses *pretreatment* bahan baku. Gas ini sangat tidak diinginkan berada di dalam aliran proses karena banyak alasan. Oleh karena itu, penghilangan H₂S dari aliran umpan diperlukan agar tidak mengganggu jalannya proses atau menyebabkan korosi. Dalam proses yang melibatkan katalis, H₂S yang terkandung dalam aliran umpan harus lebih kecil dari 1 ppm agar tidak meracuni katalis. Pada Tabel 2.4. disajikan perbandingan teknologi-teknologi yang umum digunakan untuk menghilangkan H₂S dari gas alam.

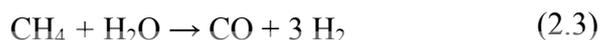
Tabel 2.4 Perbandingan teknologi penghilangan H₂S (Slamet, 2006)

Teknologi	Deskripsi Proses	Kelebihan	Kekurangan
Absorpsi dengan pelarut MDEA	Penghilangan CO ₂ dan H ₂ S secara simultan dengan absorpsi kimia oleh pelarut amina kemudian pelarut diregenerasi di kolom <i>stripping</i> .	<ul style="list-style-type: none"> - Sesuai untuk gas bertekanan rendah - Tidak korosif - Selektivitas CO₂ : H₂S = 1 : 3. - Mampu menghasilkan gas dengan kandungan CO₂<5 ppmv dan H₂S<1 ppmv. 	<ul style="list-style-type: none"> - Memerlukan proses regenerasi dan penggunaan <i>steam</i> - Kurang praktis untuk laju alir kecil - Konsumsi energi cukup besar - Biaya investasi dan operasional cukup besar - Diperlukan banyak peralatan tambahan.
Proses Benfield (<i>Hot Potassium Carbonat</i>)	Penghilangan H ₂ S dan CO ₂ dengan absorpsi kimia oleh pelarut K ₂ CO ₃ dan aktivator DEA kemudian pelarut diregenerasi di kolom <i>stripping</i> .	<ul style="list-style-type: none"> - Penggunaan aktivator DEA meningkatkan laju reaksi - Kemungkinan korosi dan <i>foaming</i> sangat kecil - Cenderung selektif terhadap H₂S 	<ul style="list-style-type: none"> - Memerlukan proses regenerasi dan penggunaan <i>steam</i>. - Kemampuan penghilangan H₂S tidak terlalu tinggi (maksimal 1 ppm dengan <i>Hi-Pure</i>) - Kurang praktis untuk proses dengan laju alir kecil - Penggunaan aditif dan aktivator menyebabkan biaya tambahan
Proses Selexol	Menghilangkan H ₂ S, CO ₂ , COS, CS ₂ , BTX, air, dan hidrokarbon melalui proses absorpsi fisika oleh pelarut <i>selexol</i> kemudian diregenerasi di kolom <i>stripping</i> .	<ul style="list-style-type: none"> - Kemampuan penghilangan H₂S, CO₂ dan air tinggi. - Tingkat korosi rendah - Pelarut relatif stabil - Selektivitas CO₂ : H₂S = 1 : 9. 	<ul style="list-style-type: none"> - Memerlukan banyak peralatan tambahan dan proses regenerasi - Harga pelarut mahal - Biaya kapital tinggi - Kebutuhan <i>steam</i> dan listrik tinggi.
Adsorpsi Besi Oksida (<i>Iron Sponge</i>)	Adsorpsi kimia H ₂ S dengan mengubah Fe ₂ O ₃ menjadi FeS.	<ul style="list-style-type: none"> - Peralatan yang digunakan sederhana - Mampu menghasilkan produk dengan kadar H₂S hingga 0,01 ppm. - Adsorben dapat diregenerasi jika sudah jenuh - Biaya awal dan operasional murah. 	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorben mudah terbakar saat diregenerasi - Umpan maksimum mengandung H₂S 200 ppm. - Tidak dapat menghilangkan CO₂ secara simultan.

Berdasarkan perbandingan teknologi-teknologi tersebut, dipilih proses *iron sponge* karena paling sesuai dengan spesifikasi proses dan aliran umpan *flare* gas. Sedangkan kandungan H₂S diprediksi sangat kecil (skala ppm). Untuk mengantisipasi keracunan katalis, H₂S perlu dihilangkan hingga nyaris nol. Proses adsorpsi *iron sponge* adalah yang paling cocok untuk persyaratan ini.

2.4.4 H₂O Removal

Untuk pabrik yang memproduksi CNT, umpan yang digunakan berasal dari *sales gas*, spesifikasi *sales gas* tentu saja masih mengandung sedikit senyawa-senyawa yang sangat merugikan untuk reaksi, salah satunya adalah adanya kandungan air (H₂O). Ketika senyawa H₂O berada dalam reaktor, maka CH₄ akan cenderung membentuk *syngas* dengan reaksi:



Sedangkan senyawa CH₄ merupakan senyawa dengan konversi terbesar untuk membentuk CNT. Reaksi ini juga berlaku pada semua hidrokarbon lain tetapi dengan rasio CO dan H₂ yang berbeda. Hal di atas membuktikan metode dehidrasi dibutuhkan dalam pabrik ini agar reaksi dapat berjalan dengan baik. Adapun perbandingan seleksi metode gas dehidrasi yaitu *molecular sieve* dan glikol tersaji pada Tabel 2.5

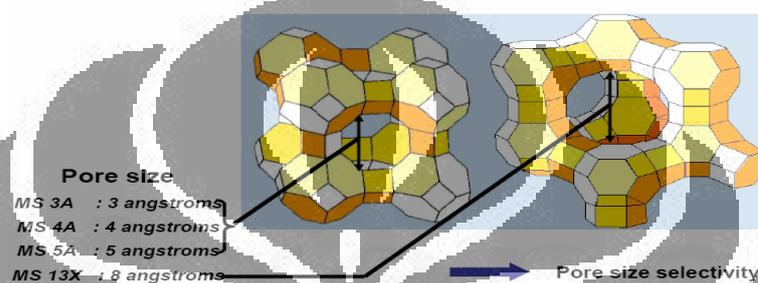
Tabel 2.5 Perbandingan teknologi penghilangan H₂O

	Keuntungan	Kerugian
Dehidrasi Glikol	<ul style="list-style-type: none"> • Selektivitas lebih tinggi • Lebih reaktif 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulit untuk melakukan evaluasi terhadap kerusakan (<i>dew point</i> keluaran dehidrator, <i>dew point inlet dehidrator</i>, <i>gas rate</i>, <i>glikol rate</i>, <i>glikol purity</i>, <i>glikol loss</i>, serta kontaminan seperti kondensat, solid, garam, oksigen, <i>foam stability</i>, <i>iron content</i>)
<i>Molecular Sieve</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Cocok untuk laju alir kecil 	<ul style="list-style-type: none"> • Kurang selektif dibanding dehidrasi glikol • Kurang reaktif

Umpan gas pada pabrik CNT adalah sebesar 1 MMSCFD, sehingga untuk mengeringkan gas tersebut akan lebih ekonomis menggunakan *molecular sieve*. Senyawa ini merupakan unit material dari logam alumino silikat yang terhubung secara tiga dimensi dengan kristal silika dan alumina tetrahedral [Schweitzer,1996]. Adsorben ini memiliki pori-pori kecil/halus dimana ukurannya sudah sangat terstandarisasi dan seragam. Pori-pori tersebut dapat dengan selektif "melanjutkan" atau "menangkap" molekul-molekul yang lewat berdasarkan besar-kecilnya ukuran molekul. Ukuran diameter ini mempengaruhi senyawa apa yang akan ditangkap atau diteruskan. *Molecular sieve* sering digunakan untuk menyerap air (jari-jari molekular air sekitar 0,28 nm). Kemampuannya untuk menyerap H₂O cukup tinggi, yaitu sampai mencapai 25% beratnya sendiri.

Berdasarkan bentuk molekulnya, *molecular sieve* terdiri dari dua jenis, yaitu tipe A (yang berbentuk *pellet* dan serbuk) dan X. Bentuk molekul dari *molecular sieve* dapat dilihat pada Gambar 2.15. *Molecular sieve* ini juga bisa diregenerasi dengan metode pemanasan dan *purging*. Jenis-jenis *molecular sieve* yang banyak digunakan di industri selain *silica gel* adalah:

- 3A (*pore size* 3 Å): bagus untuk menyerap NH_3 , H_2O , (tidak C_2H_6).
- 4A (*pore size* 4 Å): menyerap H_2O , CO_2 , SO_2 , H_2S , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , EtOH . tidak mampu menyerap C_3H_8 atau hidrokarbon yang lebih besar.



Gambar 2.15 Bentuk molekul *molecular sieve* [Savary, 2004]

Kekurangan dari adsorben ini adalah kebutuhan energi yang dibutuhkan untuk meregenerasi cukup besar. Besarnya energi tersebut disebabkan oleh tingginya temperatur yang dibutuhkan untuk proses desorpsi air yang terjebak di pori-pori. Namun, biaya yang dikeluarkan untuk kekurangan tersebut dapat segera ditutupi dengan banyaknya adsorbat yang dapat diserap oleh *molecular sieve*. Kemampuan penyerapan *molecular sieve* dapat berkurang akibat kontaminasi zat-zat seperti minyak, olefin, dan diolefin. Selain oleh zat-zat tersebut, kemampuan penyerapan *molecular sieve* juga dapat berkurang akibat terbentuknya *coke* di permukaan *molecular sieve*.

2.4.5 Pemurnian CNT

Pemurnian merupakan *post treatment* dari CNT setelah disintesis dengan berbagai metode. Setelah diproduksi, CNT masih mengandung berbagai macam pengotor yang pada aplikasinya akan mengurangi performa dari CNT itu sendiri karena untuk memaksimalkan fungsi CNT menjadi berbagai material diperlukan CNT dengan kemurnian yang tinggi. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu metode yang tepat dalam menghilangkan berbagai macam pengotor yang terdapat dalam produk CNT.

Pemurnian CNT adalah tahapan yang cukup penting dan harus dipertimbangkan dengan cermat karena harus dipilih metode yang paling tepat untuk mendapatkan yield karbon dengan kemurnian tinggi tanpa merusak struktur dan sifat-sifat yang diinginkan dari karbon nanotube tersebut.

CNT keluaran reaktor biasanya masih mengandung berbagai bahan atau zat pengotor, diantaranya adalah :

- a. Berbagai tipe karbon, diantaranya adalah: grafit ukuran nanopartikel, karbon *amorf*, dan *fullerene*.
- b. Material katalis, yaitu: kandungan logam transisi, pendukung katalis (untuk metode CVD).

Untuk menghasilkan CNT yang sesuai dengan spesifikasi pasar, CNT perlu dimurnikan terlebih dahulu. Secara umum metode pemurnian CNT ada 3, yaitu: metode kimia, metode fisika, metode kimia dan fisika. Penentuan metode yang digunakan dalam proses purifikasi CNT harus mempertimbangkan beberapa hal diantaranya, yaitu : reaktivitas pengotor dan kestabilan CNT.

Beberapa teknik dasar pemurnian karbon nanotube adalah oksidasi, perlakuan dengan asam, annealing, ultrasonikasi, mikrofiltrasi, pemutusan ikatan, fungsionalisasi dan teknik kromatografi.

a. Oksidasi

Oksidasi CNT adalah cara yang baik untuk menghilangkan pengotor karbon atau untuk membersihkan permukaan logam [Goto, 2002]. Namun, pada perlakuan oksidasi ini tidak hanya pengotor yang dioksidasi, tetapi juga CNT yang dihasilkan walaupun jumlahnya tidak terlalu banyak dibandingkan pengotor yang teroksidasi. Hal ini disebabkan karena struktur pengotor lebih terbuka. Alasan lain mengapa oksidasi sering dipilih untuk pemurnian adalah biasanya karbon pengotor menempel pada logam katalis sehingga metode ini dapat juga menjadi pengoksidasi logam katalis.

Banyak faktor yang mempengaruhi teknik ini seperti kandungan logam, waktu oksidasi, lingkungan, zat pengoksidasi dan juga suhu karena pada suhu yang tinggi karbon juga dapat teroksidasi walaupun tanpa katalis.

b. Perlakuan dengan Asam

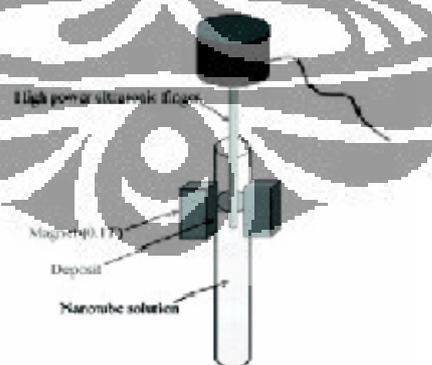
Secara umum, asam dapat melarutkan logam katalis. Tetapi sebelum dihilangkan dengan asam, permukaan logam harus terlebih dahulu dibersihkan dari karbon pengotor secara oksidasi ataupun sonikasi. Kemudian logam katalis dilarutkan dalam asam dan CNT akan mengendap membentuk fasa tersuspensi. Ketika digunakan larutan HNO_3 , asam hanya memberikan efek terhadap logam katalis dan tidak memberikan efek kepada CNT dan partikel pengotor karbon lainnya.

c. Annealing

Pada suhu yang tinggi (873–1873 K) CNT akan mengalami penataulangan struktur di mana karbon grafit dan *fullerenes* akan terpirolisis [Borowiak-Palen, 2002]. Selain itu juga dapat melelehkan logam katalis sehingga logam tersebut akan dapat dihilangkan dari CNT.

d. Pemisahan Magnetik

Pada metode ini, partikel ferromagnetik dihilangkan secara mekanik dari grafit bagian luar. Suspensi karbon nanotube dicampurkan dengan nanopartikel inorganik (biasanya ZrO_2 atau CaCO_3) di bejana ultrasonik untuk menghilangkan partikel ferromagnetik. Lalu, partikel akan terperangkap di kutub magnetik dan setelah itu, CNT mengalami pelakuan kimia untuk menghasilkan CNT dengan kemurnian tinggi.



Gambar 2.16 Skema peralatan pemurnian magnetik [Daenan, 2003]

e. Ultrasonikasi

Teknik ini adalah teknik pemisahan dengan menggunakan getaran ultrasonik. Nanopartikel akan dipaksa untuk bergetar sehingga menjadi lebih

terdispersi. Pemisahan partikel sangat bergantung kepada surfaktan, pelarut, dan reagen yang digunakan. Pelarut akan mempengaruhi kestabilan karbon nanotube yang terdispersi di dalam sistem (Hou, 2002). Ketika asam digunakan, kemurnian karbon nanotube dipengaruhi oleh waktu sonikasi. Ketika nanotube disonikasi di dalam asam dalam waktu singkat, hanya logam yang akan terlarutkan, tetapi semakin lama waktu sonikasi, karbon nanotube juga akan terlarutkan secara kimia.

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 [Chang, 1994]:

$$E=2\pi^2f^2A^2\mu vt \quad (2.4)$$

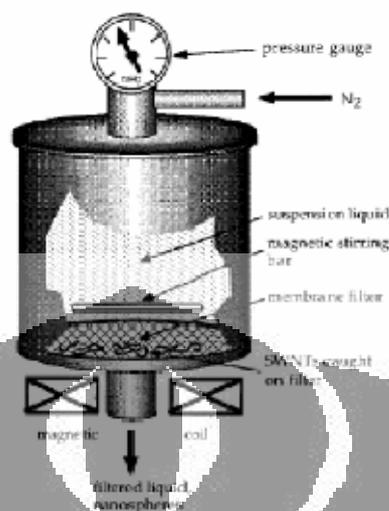
Dimana: E = Energi gelombang
 f = Frekuensi gelombang
 A = Amplitude gelombang
 μ = Massa per satuan panjang dan medium yang dilewati
 v = Cepat rambat gelombang
 t = Waktu yang diperlukan untuk merambat

Ultrasonikasi dengan intensitas tinggi dapat mengeksitasi dan memberikan efek yang besar. Pada tekanan dan suhu yang cukup tinggi dapat membuat kondisi yang ekstrim untuk reaksi kimia yang meningkatkan reaktivitas komponen. Gelombang kejut yang dihasilkan oleh gelombang suara dapat memperbesar tumbukan berkecepatan tinggi diantara partikel padatan yang tersuspensi yang mengakibatkan terbentuknya butiran individual yang lebih kecil. Selain itu, ultrasonikasi juga bisa mengagglomerasikan partikel.

f. Mikrofiltrasi

Metode mikrofiltrasi adalah teknik pemisahan yang didasarkan adanya perbedaan partikel. SWNT dan karbon nanopartikel akan terperangkap di

filter. Nanopartikel lain seperti logam katalis, *fullerenes* dan karbon nanopartikel tidak akan tersaring dan akan melewati filter.



Gambar 2.17 Skema Diagram Sel Mikrofiltrasi [Bandow, 1997]

Salah satu cara untuk memisahkan *fullerenes* dari SWNT dengan mikrofiltrasi adalah dengan cara melarutkan SWNT di dalam larutan CS₂. Partikel yang tidak dapat larut di dalam larutan CS₂ akan terperangkap di dalam filter. Sedangkan *fullerenes* dan karbon amorf akan terlarut dan melewati filter.

g. Pemutusan Ikatan

Proses pemurnian dapat dilakukan secara kimia, mekanis, maupun kombinasi keduanya. Pemutusan ikatan secara kimia dapat dilakukan dengan cara mengontakkan sampel, contohnya adalah proses pemotongan dengan fluor [Gu,2002]. Kemudian karbon yang terfluorinasi akan dipirolisis dalam bentuk CF₄ atau COF₂ sehingga akan terpisah dari karbon nanotube yang telah terputus ikatannya.

Pemutusan ikatan secara mekanik dapat dilakukan dengan *milling*. Ikatan karbon akan terputus karena adanya friksi yang tinggi antara partikel nano dan CNT akan terdispersi. Kombinasi dari pemutusan ikatan secara kimia dan mekanik adalah dengan cara ultrasonik yang dapat memutuskan ikatan karbon dengan menggunakan asam. Getaran dari ultrasonik akan memberikan energi yang cukup kepada karbon untuk meninggalkan permukaan katalis.

h. Fungsionalisasi

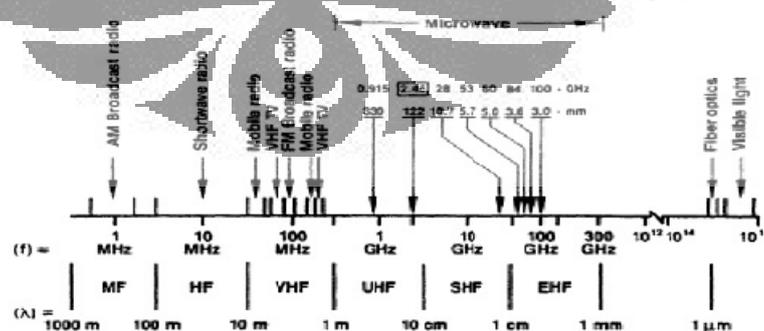
Fungsionalisasi adalah metode yang membuat CNT menjadi lebih larut dibandingkan dengan pengotor dengan cara menambahkan senyawa lain ke karbon nanotube sehingga dengan mudah dapat dipisahkan melalui filtrasi [Niyogi, 2001].

i. Kromatografi

Teknik ini digunakan terutama untuk memisahkan sejumlah kecil karbon nanotube dengan distribusi panjang dan diameter yang kecil. CNT akan lewat keluar kolom kromatografi yang menggunakan membrane porous. Metode ini membutuhkan selektivitas pori untuk pemisahan yang akurat karena jika karbon nanotube berada dalam ukuran yang berbeda, maka proses separasi berjalan dengan kurang baik. Untuk mengatasi masalah ini diperlukan ultrasonikasi yang dapat mendispersikan padatan menjadi molekul yang lebih homogen.

j. Metode Pemanasan *Microwave*

Gelombang mikro merupakan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang antara 1 mm sampai dengan 1 m, atau memiliki frekuensi antara 300 megahertz dan 300 gigahertz [Letellier dan Budzinski, 1999]. Pengaplikasian iradiasi gelombang mikro untuk reaksi kimia memiliki prinsip sebagai sumber energi dengan frekuensi tinggi yang menghasilkan panas [Loupy, 2006]. Panas tersebut dapat dihasilkan untuk memanaskan apapun yang mengandung sumber elektrik yang tidak seimbang.

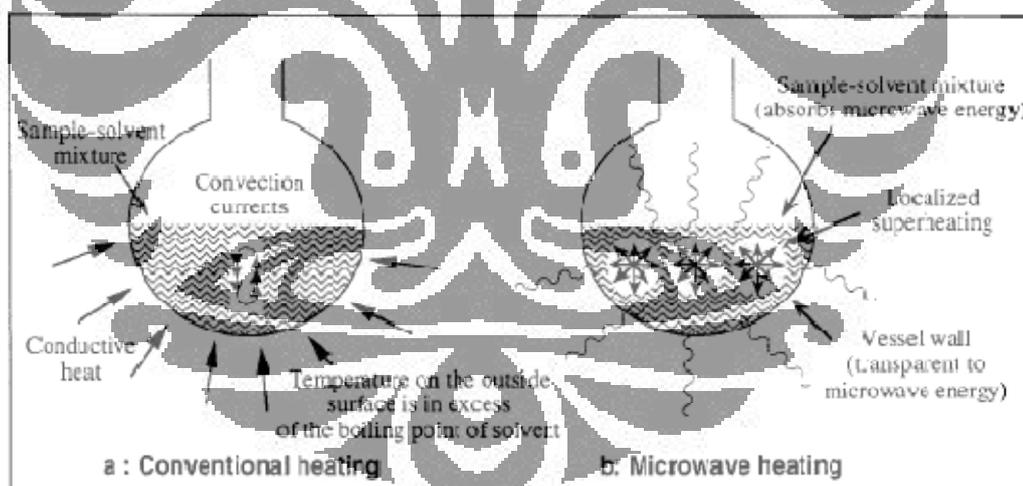


Gambar 2.18 Spektrum elektromagnetik dan frekuensi yang digunakan dalam proses gelombang mikro (Stein, 1998)

Gelombang mikro dengan panjang gelombang 1-25 cm secara luas digunakan untuk radar dan telekomunikasi [Stein, 1998]. Sedangkan,

gelombang mikro dengan frekuensi 2.450 MHz atau setara dengan panjang gelombang 12,2 cm digunakan sebagai oven gelombang mikro. Pada frekuensi tersebut gelombang mikro memiliki energi sebesar 0,23 kal/mol (0,94 J/mol) [Letellier dan Budzinski, 1999].

Dalam ilmu pengetahuan modern, gelombang mikro memiliki dua tujuan utama yaitu komunikasi dan sebagai garis vektor energi. Aplikasi selanjutnya gelombang mikro langsung berinteraksi dengan material yang memiliki kemampuan untuk mengubah energi elektromagnetik yang diserapnya menjadi energi panas. Gelombang mikro terbentuk dari dua bidang tegak lurus yang berosilasi, misalnya bidang dan medan magnet elektrik yang menimbulkan pemanasan [Mandal, dkk, 2007]. Tidak seperti pemanasan konvensional yang bergantung pada peristiwa konduksi-konveksi yang sebagian besar energinya berpindah ke lingkungan, sedangkan pemanasan dengan gelombang mikro terjadi pada target dan selektif. Oleh karena itu, tidak ada panas yang berpindah ke lingkungan ketika pemanasan dengan gelombang mikro terjadi dalam sistem tertutup.



Gambar 2.19 Perbedaan antara (a) pemanasan konvensional dan (b) pemanasan dengan gelombang mikro [Letellier dan Budzinski, 1999]

Pemanasan secara konvensional biasanya menggunakan furnace ataupun bejana pemanas yang akan memanaskan dinding reactor secara konveksi dan konduksi. Pemanasan dengan *microwave* mampu untuk memanaskan komponen tanpa memanaskan keseluruhan furnace atau bejana yang dapat menghemat waktu dan energi. Selain itu *microwave* juga dapat memanaskan

benda yang tipis melalui volumenya yang secara teori akan menghasilkan pemanasan yang lebih merata.

Pemanasan dengan menggunakan *microwave* akan memberikan lebih banyak keuntungan, diantaranya percepatan laju reaksi, kondisi operasi yang lebih halus, *yield* yang lebih tinggi, energi yang digunakan lebih sedikit dan selektivitas yang berbeda sesuai dengan reaksinya.

Sistem yang heterogen bisa bersifat anisotropik yang dapat menghasilkan pemanasan yang tidak merata oleh *microwave* untuk tiap bagian sistem. Ketidakmerataan energi panas ini memungkinkan terjadinya pemanasan selektif dari suatu material dan memberikan suatu gradien temperatur diantaranya. Adanya perbedaan tersebut menyebabkan terdapat bagian yang lebih panas (*hot spot*) dibanding dengan bagian lain.

Banyak *paper* mengenai *microwave* dari bidang kimia yang menyatakan adanya kemungkinan eksitasi dari suatu molekul atau suatu gugus fungsional diantara molekul. Osilasi dari radiasi akan tersampaikan secara instan lewat tumbukan dengan molekul materi. Proses dengan fasa solid berbeda dengan *liquid*, di mana dibutuhkan transfer panas yang lebih tinggi. *Macroscopic hotspot* digunakan untuk volume yang besar dan non-isothermal yang dapat dideteksi dengan menggunakan *pyrometer optic*. Sedangkan *microscopic hot spot* adalah bagian isothermal yang berada pada skala mikro atau nano sehingga *microwave* dapat digunakan untuk memanaskan dan mengoksidasi karbon nanotube.

Proses pemurnian CNT yang digunakan dalam proses ini merupakan penggabungan dari beberapa teknik dasar, yang intinya menggunakan fasa cair. Langkah-langkahnya adalah: penyaringan awal, dengan tujuan untuk menyingkirkan partikel grafit yang berukuran besar; melarutkan dalam pelarut organik dan konsentrat asam untuk menghilangkan *fullerene* dan partikel katalis, pengadukan ultrasonik dan pemanasan menggunakan *microwave*; menetralkan dan mencuci nanokarbon, menyaring nanokarbon menggunakan kertas saring dan yang terakhir adalah mengeringkan nanokarbon menggunakan oven [Paramitha, 2009].

CNT hasil dari reaksi dekomposisi katalitik metana dengan katalis terstruktur mengandung pengotor berupa partikel katalis. CNT akan menempel pada katalis dan ada kemungkinan pelapis logam akan tercampur pada CNT sehingga diperlukan proses pemurnian berupa pelarutan CNT dalam pelarut organik dan konsentrat asam. Selain partikel katalis, pengotor pada CNT ini bisa berupa karbon amorf atau partikel nano lainnya seperti *fullerene* sehingga diperlukan pemurnian melalui mikrofiltrasi. Sedangkan partikel yang lebih besar tidak akan terbentuk karena pada reaktor katalis terstruktur ini partikel yang dihasilkan dapat diatur ukurannya melalui ukuran katalis (diameter *mesh*). Dan pada proses ini, kemurnian CNT yang dihasilkan cukup tinggi, jadi tidak terlalu diperlukan banyak proses pemurnian [Muharam Y., Purwanto W.W., Afianty A. 2007]. Oleh karena itu, dapat disimpulkan ini sudah cukup untuk memurnikan CNT yang dihasilkan dari pabrik ini.

2.5 Unit Operasi Proses

2.5.1 Reaktor

Proses perancangan reaktor katalitik terstruktur untuk produksi CNT pada memiliki basis perhitungan sebagai berikut.

- a. Menghitung *scale-up* rasio reaktor dari data reaktor skala pilot kapasitas 1000 gr/hari menjadi skala komersial dengan kapasitas produksi 2000 gr/hari. Nilai *scale up* rasio, nantinya akan digunakan untuk proses perhitungan dimensi reaktor, diameter *wire* yang akan digunakan,, dan perhitungan luas katalis (selengkapnya dapat dilihat di LAMPIRAN).
- b. Menghitung kebutuhan panas yang dibutuhkan oleh reaktor dengan menggunakan prinsip reaksi dan termodinamika yang terjadi di dalam reaktor.

2.5.2 H₂S Removal

Proses perancangan unit H₂S *removal* untuk produksi CNT pada memiliki basis perhitungan sebagai berikut.

- a. Menghitung diameter vessel yang dibutuhkan dengan persamaan:

$$d_m^2 (\text{in}^2) = f \frac{Q_g TZ}{P} \quad (2.5)$$

dimana,

f	= faktor nilai, maksimum 1800, dan minimum 360
Q_g (MMSCFD)	= laju alir gas
P (psig)	= tekanan operasi
T (Rankine)	= temperatur operasi
Z	= faktor kompresibilitas gas

- b. Menghitung konsumsi harian *iron sponge* (R , ft³/hari), dengan persamaan:

$$R=0.00133Q_g(X_{AG}) \quad (2.6)$$

dimana,

X_{AG} (ppm)	= konsentrasi inlet H ₂ S
----------------	--------------------------------------

- c. Menghitung volume unggun *iron sponge* dengan persamaan:

$$V(\text{ft}^3)=0.7854D^2L \quad (2.7)$$

Dimana,

D	= diameter vessel
L	= tinggi unggun

2.5.2 H₂O Removal

Proses perancangan unit H₂O *removal* untuk produksi CNT pada memiliki basis perhitungan sebagai berikut.

- Menghitung jumlah kandungan air yang akan diadsorb setiap siklus
- Menghitung nilai kapasitas *dessicant* yang digunakan dengan persamaan:

$$(x)(h_T)=(x_s)(h_T) - (0,45)(h_z)(x_s) \quad (2.8)$$

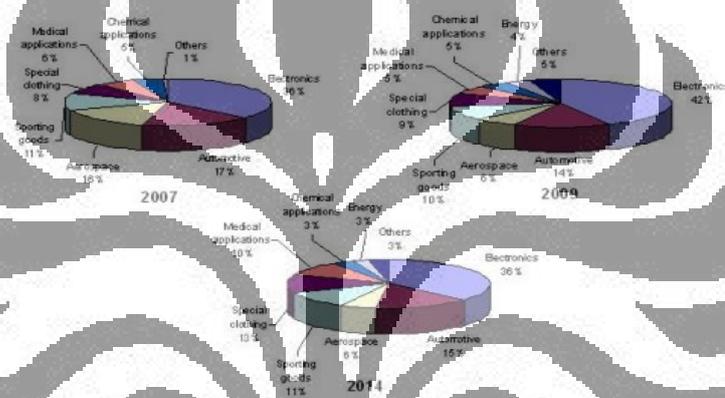
dimana,

x	= kapasitas <i>dessicant</i> maksimal
x_s	= kapasitas dinamis saat penjenuhan
h_z	= MTZ length
ht	= tinggi bed

- Menghitung massa total *dessicant* yang dibutuhkan setiap vessel
- Menghitung volume *dessicant*
- Menghitung nilai diameter unggun minimum
- Menghitung *breaktrough time*
- Menghitung panjang bed minimum
- Melakukan perhitungan untuk proses regenerasi

2.6 Pasar CNT

Saat ini, CNT telah menjadi sebuah komoditas yang sangat menjanjikan, pasar CNT berkembang secara pesat dalam beberapa tahun terakhir seiring dengan perkembangan nanoteknologi. Penggunaan CNT secara umum terdapat pada dua sektor, yaitu sektor riset dan komersial. Kebutuhan CNT meningkat seiring dengan laju pertumbuhan ekonomi global. CNT juga memiliki banyak aplikasi dari segi komersial, antara lain sebagai salah satu komponen peralatan elektronik berteknologi nano, sensor, semikonduktor, sel bahan bakar, bidang kesehatan dan lain-lain. Berdasarkan aplikasinya, persentase penggunaan CNT di dunia dari tahun ke tahun digambarkan dalam diagram di Gambar 2.20.



Gambar 2.20 Penggunaan CNT untuk beberapa aplikasi utama
[www.nanophotonicsmarket.files, 2009]

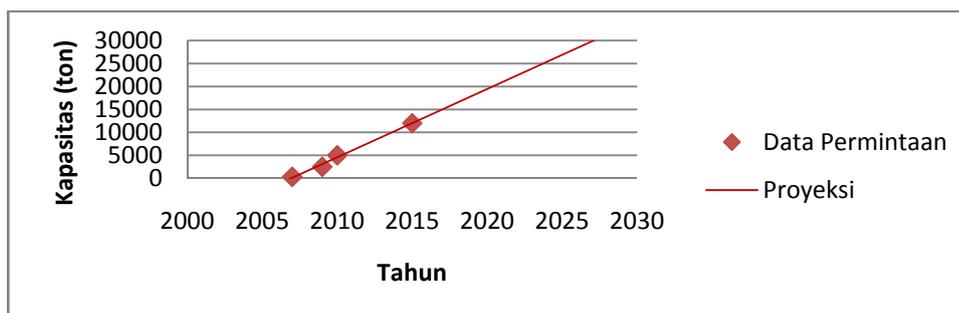
Secara umum, proyeksi permintaan CNT baik dari sektor riset maupun komersial adalah sebagai berikut.

a. Permintaan

Hasil riset berbagai lembaga analisis dunia seperti BCC dan Royal Society, baik pada sektor riset maupun komersial diketahui bahwa kebutuhan CNT setiap tahunnya akan meningkat. Seiring dengan waktu harga CNT akan semakin turun.

Tingginya permintaan pasar akan CNT didorong oleh semakin banyaknya penggunaan material ini di berbagai sektor kehidupan. Mulai dari sektor industri, luar angkasa dan pertahanan, serta industri otomotif. Sektor tersebut merupakan kunci dari pertumbuhan permintaan CNT yang sangat pesat.

Data permintaan dan proyeksinya terlihat CNT terlihat pada grafik berikut.



Sumber : Lux Research Inc, April 2010

Gambar 2.21 Proyeksi Permintaan CNT

b. Penawaran

Pada saat ini, telah ada beberapa perusahaan yang memproduksi CNT secara komersial. Berikut ini disajikan daftar perusahaan-perusahaan tersebut dan kapasitas produksi tahunannya pada Tabel 2.6

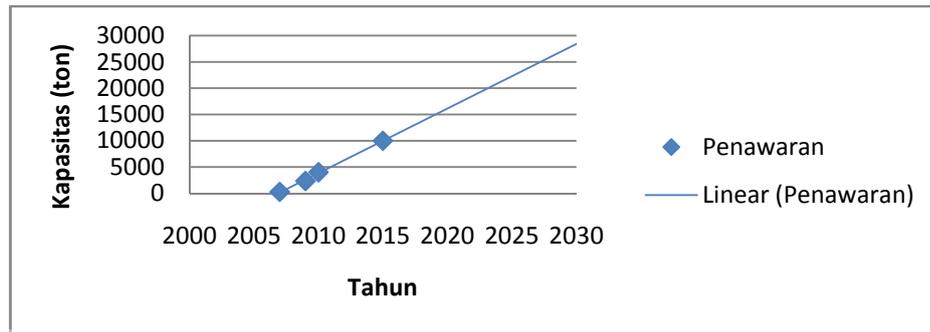
Tabel 2.6 Produsen CNT (MWNT) komersial dan kapasitas produksi tahunannya (Update, April 2010)

Produsen	Produksi (ton/tahun)
Showa Denko	500
CNano Technology Ltd	500
Arkema	400
Nanocyl SA	400
Bayer MaterialScience AG	260
Kumho Petrochemical	60
Timesnano	30
CNT Co	24
Hodogaya Chemical	20
Honjo	20
Hyperion Catalysis Int'l	20
South West Nanotechnologies	12
Shenzhen Nanotech Port Company	10
Carbon Nanotube & Fiber 21	10
Blue Nano	10
Arry Nano	6
NanoSolution	6
Hanwha Nanotech	5
Applied Carbon Nanotechnology	5
NanoLab	5
Sun Nano	5
Others	16
TOTAL	2324

Sumber : Lux Research Inc, April 2010

Produsen CNT tiap tahunnya diproyeksikan akan bertambah berdasarkan tren permintaan. Laju produksi rata-rata diprediksikan akan meningkat setiap tahunnya.

Prediksi produksi CNT ditunjukkan oleh Gambar 2.22.



Sumber : Lux Research Inc, April 2010

Gambar 2.22 Proyeksi Produksi CNT (MWNT)

Kemurnian CNT akan berbanding lurus dengan harganya. Selain itu, harga MWNT juga dipengaruhi oleh ukuran diameternya. Namun secara umum, harga CNT di pasaran baik untuk SWNT ataupun MWNT cenderung turun dari tahun ke tahun.

Berikut ini adalah daftar harga MWNT yang ada dijual di pasaran pada tahun 2010.

Tabel 2.7 Harga Jual MWNT tahun 2010

Berat (gr)	MWNT (Diameter in nm)					
	<10	10-20	10-30	20-40	40-60	60-100
Harga (\$)						
1	75	40	28	28	28	28
10	600	300	190	190	190	190
50	2200	1300	700	700	700	700
100	3300	2000	930	930	930	930
500	10000	6700	3000	3000	3000	3000
1000	13000	8800	4000	4000	4000	4000

Sumber : <http://www.helixmaterial.com/Ordering.html>, November 2010

2.7 Estimasi Biaya

2.7.1 Total Capital Investment (TCI)

Total capital investment (TCI) adalah jumlah dana keseluruhan yang dibutuhkan sebagai investasi awal dari sebuah pabrik. Tujuan dari perhitungan TCI adalah untuk mengetahui kelayakan pembangunan suatu pabrik serta apakah pabrik tersebut memberikan margin keuntungan yang memadai. Biaya total modal investasi (TCI) terdiri dari beberapa komponen perhitungan yang dapat dilihat pada tabel berikut (sumber : Timmerhaus, 1991).

Tabel 2.8 Komponen *Total Capital Investment*

Komponen (TCI)					
Total bare-module costs for fabricated equipment and storage	C_{FE}				
Total bare-module costs for process machinery	C_{PM}				
Total bare module costs for spares	C_{Spare}				
Total costs for initial catalyst charges	$C_{catalyst}$				
Total bare module-investment (TBM)		C_{TBM}			
Cost of site preparation		C_{site}			
Cost of service facilities		C_{serv}			
Allocated costs for utility plants and related facilities		C_{alloc}			
Total of direct permanent investment, DPI			C_{DPI}		
Cost of contingencies and contractor's fee			C_{cont}		
Total depreciable capital, TDC				C_{TDC}	
Cost of land				C_{land}	
Cost of royalties				C_{royal}	
Cost of plant startup				$C_{startup}$	
Total permanent investment, TPI					C_{TPI}
Working capital					C_{WC}
Total capital investment, TCI					C_{TCI}

a. C_{FE} (*Cost of Fabricated Equipment*)

C_{FE} adalah total biaya alat yang akan dirancang. Harga masing-masing alat didapatkan dari referensi buku Timmerhaus dengan memasukkan nilai parameter yang berasal dari sizing peralatan.

b. C_{PM} (*Cost of Process Machinery*)

Perhitungan C_{PM} adalah total biaya peralatan yang terkait langsung dengan proses seperti pompa, kompresor, oven, dan peralatan lainnya.

c. C_{Spare} (*Cost of Spare*)

Perhitungan C_{Spare} adalah biaya peralatan cadangan yang terkait langsung dengan proses.

- d. C_{Catalyst} (*Cost of Initial Catalyst Charge*)
Perhitungan C_{Catalyst} adalah biaya yang dikeluarkan untuk pembelian katalis di awal-awal proses produksi.
- e. C_{TBM} (*Cost of Total Bare Module*)
Nilai Cost of Total Bare Modul merupakan penjumlahan dari nilai C_{FE} , C_{PM} , C_{Spare} , dan C_{Catalyst} .
- f. C_{site} (*Cost of Site Preparation*)
 C_{site} meliputi biaya untuk survey lahan, pengairan dan drainase, pembersihan permukaan lahan, penghilangan batu-batuan, *grading*, pemasangan tiang pancang, pembuatan jalan, pagar, jalan setapak, trotoar, selokan, fasilitas pemadam api, dan *landscaping*.
- g. C_{serve} (*Cost of Service Facilities*)
 C_{serve} adalah biaya untuk *control room*, laboratorium untuk uji *feed* dan produk, *maintenance shop*, fasilitas medis, kantin, garasi, gudang, dan bangunan plant.
- h. C_{alloc} (*Cost of Allocated Cost for Utility Plants and Related Facilities*)
 C_{alloc} adalah biaya alokasi untuk mengembangkan plant utilitas dan fasilitas terkait seperti fasilitas *steam*, listrik, *cooling water*, air proses, refrigerasi, *fuel*, dan *waste water treatment*.
- i. C_{DPI} (*Cost of Total of Direct Permanent Investment*)
 C_{DPI} biaya permanent langsung adalah penjumlahan dari nilai C_{TBM} , C_{site} , C_{serve} , C_{building} , dan C_{alloc} .
- j. C_{cont} (*Cost of Contingencies and Contractor's Fee*)
 C_{cont} biaya contingencies dan kontraktor adalah biaya tak terduga selama konstruksi plant dan biaya kontraktor.
- k. C_{TDC} (*Cost of Total Depreciable Capital*)
 C_{TDC} total biaya terdepresiasi yang nilainya meliputi C_{DPI} dan C_{cont} .
- l. C_{land} (*Cost of Land*)
 C_{land} adalah biaya lahan yang tidak dapat terdepresiasi.
- m. C_{royal} (*Cost of Royalties*)
 C_{royal} adalah biaya pembayaran royalties.

- n. C_{startup} (*Cost of Plant Startup*)
 C_{startup} adalah biaya plant *start-up* sebagai awal proses.
- o. C_{TPI} (*Cost of Total Permanent Investment*)
 C_{TPI} (total investasi permanen) adalah penjumlahan dari nilai C_{TDC} , C_{land} , C_{royal} , dan C_{startup} .
- p. C_{WC} (*Cost of Working Capital*)
Working Capital adalah penjumlahan dari *cash reserves*, *inventory*, *account receivable*, dan *account payable*.

2.7.2 Biaya Operasional

Biaya operasi adalah biaya-biaya yang dikeluarkan selama pabrik beroperasi seperti biaya bahan, tenaga kerja, biaya operasional, asuransi, depresiasi, distribusi dan pemasaran serta administrasi. Biaya operasi dibagi menjadi dua jenis yaitu biaya tetap dan biaya variabel.

a. Biaya Tetap

Merupakan biaya yang selalu tetap tiap tahunnya dan tidak terpengaruh oleh kapasitas produksi atau jumlah penjualan produk. Yang termasuk biaya ini adalah:

- *Factory overhead* (bahan tidak langsung, tenaga kerja tidak langsung, utilitas kantor dan sarana selain pabrik, asuransi, depresiasi) yang tidak terpengaruh kapasitas produksi
- Biaya pemasaran (biaya distribusi dan pemasaran yang tidak terpengaruh kapasitas produksi), dan biaya perawatan

b. Biaya Variabel

Merupakan biaya yang tidak tetap tiap tahunnya dan terpengaruh oleh beberapa faktor seperti kapasitas produksi dan jumlah penjualan produk.

Yang termasuk biaya ini adalah:

- Biaya bahan baku
- Biaya tenaga kerja langsung
- *Factory overhead* terpengaruh kapasitas produksi
- Biaya pemasaran (biaya distribusi yang terpengaruh kapasitas produksi)
- Biaya umum dan administrasi

2.8 Teori Ekonomi

Dalam mengevaluasi keekonomian suatu perancangan pabrik, terdapat dua pendekatan yang umum dilakukan. Pendekatan tersebut adalah pendekatan *tangible* dan pendekatan *intangibile*. Pendekatan *tangible* adalah pendekatan dari sisi profitabilitas secara finansial dari suatu perancangan. Pendekatan *intangibile* adalah pendekatan dari sisi manfaat secara makro terhadap kehidupan sosial masyarakat maupun Negara.

Bagi perancangan yang dijalankan oleh pihak swasta, pendekatan *tangible* umumnya lebih diutamakan karena menyangkut keuntungan atau profit yang diterima langsung oleh perusahaan. Dari aspek *tangible*, terdapat 3 variabel yang umum digunakan untuk mengukur profitabilitas suatu perancangan pabrik, yaitu nilai sekarang dari sejumlah keuntungan proyek yang terakumulasi sampai akhir usia pabrik atau NPV (*Net Present Value*), laju pengembalian internal atau IRR (*Internal Rate of Return*), waktu pengembalian atau PBP (*Payback Period*).

2.8.1 NPV (*Net Present Value*)

Net Present Value (NPV) adalah nilai *benefit* atau keuntungan yang diperoleh selama masa hidup pabrik yang ditinjau pada kondisi saat ini. NPV menunjukkan nilai absolute keuntungan (*earning power*) dari modal yang diinvestasikan pada pabrik, yaitu total pendapatan dikurangi total biaya selama proyek. Bentuk umum persamaan NPV adalah:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{X_t}{(1+i)^t} \quad (2.9)$$

Atau dapat juga ditulis sebagai berikut:

$$NPV = X_0 + \frac{X_1}{(1+i)} + \frac{X_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{X_N}{(1+i)^N} \quad (2.10)$$

Dimana:

X_t : Cash flow di tahun ke-t

i : suku bunga (*discount rate*)

Penyelesaiannya bukan secara trial & error, tetapi dengan memperhitungkan nilai waktu dan uang, serta dapat pula mempertimbangkan resiko. NPV dihitung dengan menggunakan *discount rate* sama dengan *Marginal*

Average Rate of Return. Suatu pabrik dikatakan layak apabila NPV adalah positif dan semakin besar *discount rate* yang dipakai, makin kecil NPV yang diperoleh.

Dalam hal ini, suatu perusahaan biasanya menilai suatu investasi berdasar pada prestasi yang telah berlaku. Artinya, analisis ekonomi dilakukan dengan menggunakan *interest rate* yang dianggap normal bagi perusahaan. Perusahaan tidak menghitung berapa *interest* yang mampu dibangkitkan oleh suatu proyek baru, tetapi cenderung untuk meninjau apakah investasi baru tersebut mampu mencapai prestasi normal. Pengukurannya dilakukan dengan menghitung *Net Present Value* dari investasi yang bersangkutan, dimana *Net Present Value* dari suatu proyek investasi merupakan *total Discounted Cashflow* dari proyek tersebut dengan memakai harga *discount rate* tertentu. Apabila NPV positif maka berarti proyek menguntungkan dan sebaliknya apabila NPV negatif, berarti proyek tidak mampu mencapai prestasi normal dari perusahaan, artinya secara finansial tidak menguntungkan perusahaan sehingga tidak perlu diimplementasikan. NPV merupakan salah satu parameter evaluasi keuangan yang paling sehat dan kuat untuk mengestimasi nilai investasi.

2.8.2 IRR (*Internal Rate of Return*)

Internal Rate of Return (IRR) adalah suatu tingkat bunga yang bila dipakai mengkonversikan semua penghasilan dan pengeluaran dan kemudian menjumlahkannya maka akan didapat nilai nol.

Persamaan di bawah ini merupakan persamaan IRR dalam suatu investasi, dimana kurva memotong sumbu *discount rate* pada *Net Present Value* = 0. *Discount rate* dimana NPV sama dengan nol disebut *Rate of Return* (ROR atau IRR). IRR menunjukkan nilai *relative earning power* dari modal yang diinvestasikan, yaitu *discount rate* yang menyebabkan NPV sama dengan nol. Harga ROR dapat dihitung secara trial and error dengan persamaan berikut:

$$\sum_{t=0}^T \frac{X_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (2.11)$$

Dimana:

X_t : *cashflow* di tahun ke-t

i : suku bunga (*discount rate*)

Suatu investasi dianggap baik apabila ROR lebih besar daripada *cost of capital* (bunga bank) ditambah risk premium yang mencerminkan tingkat resiko dari proyek tersebut serta ditambah tingkat keuntungan yang diharapkan. Perbedaan NPV dan ROR adalah bahwa NPV menunjukkan besar keuntungan secara absolute, sedangkan ROR menunjukkan keuntungan secara relatif (terhadap skala investasi). Dalam hal situasi beresiko tinggi, *payback period* menjadi indikator yang lebih menentukan.

2.8.3 PBP (*Payback Period*)

Periode pengembalian atau *payback period* dari suatu proyek dapat didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan agar jumlah penerimaan sama dengan jumlah investasi. PBP menunjukkan berapa lama modal investasi dapat kembali. PBP harus memenuhi persamaan berikut:

$$\sum_{k=1}^{PBP} (R_k - E_k) - I \geq 0 \quad (2.12)$$

Dimana:

R_k : total pendapatan tahunan

E_k : total pengeluaran tahunan

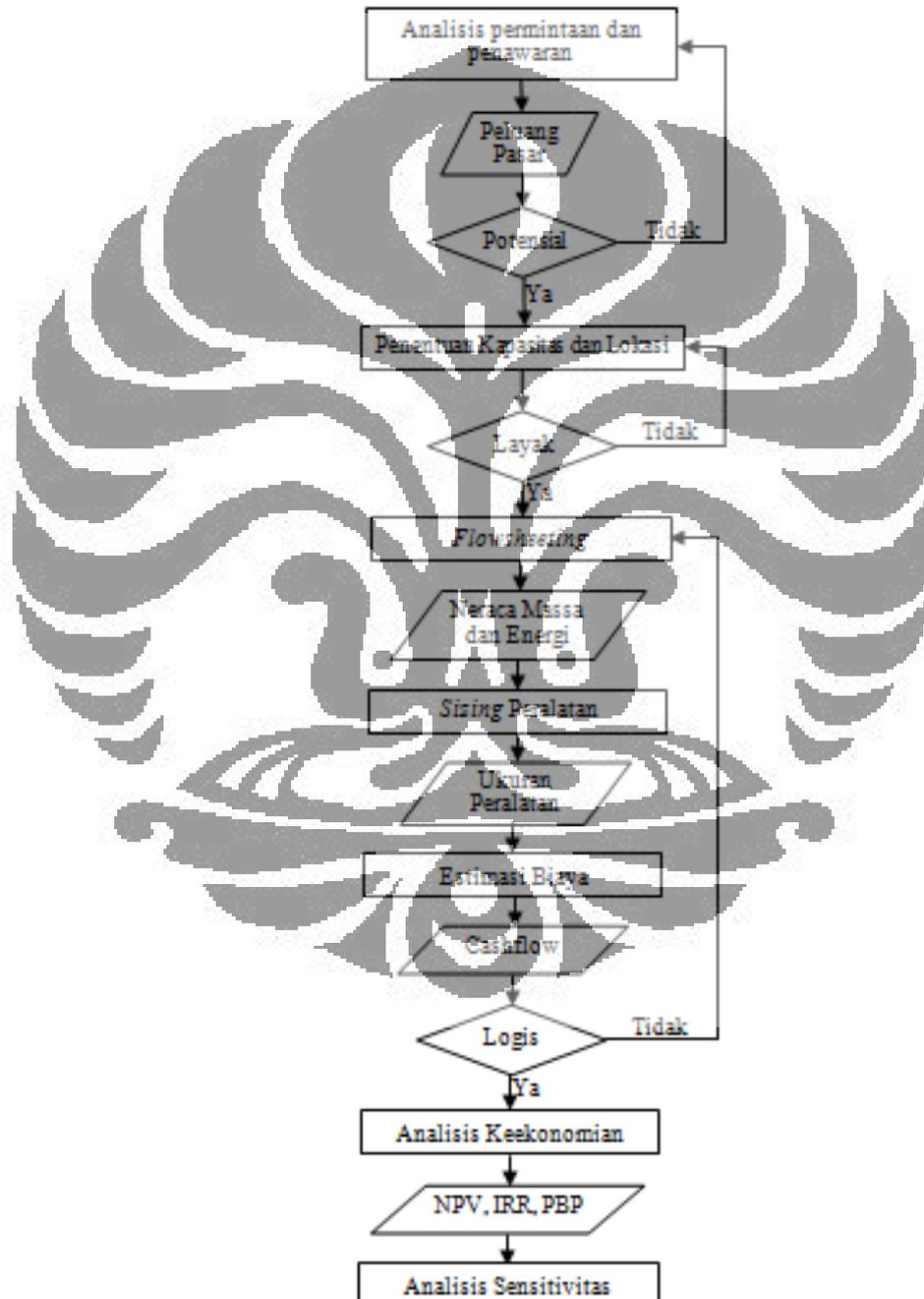
I : investasi awal

Pabrik yang memiliki PBP kecil berarti pabrik tersebut baik dan beresiko kecil. Nilai dari PBP juga menunjukkan tingkat resiko. Makin panjang PBP, makin besar resiko yang dihadapi. Untuk situasi dimana ketidakpastiannya tinggi, seperti misalnya negara yang pemerintahannya tidak stabil, investor akan memilih investasi yang memiliki PBP pendek (*quick yielding*).

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Metode Analisis

Dalam melakukan analisis tekno ekonomi produksi CNT, ada beberapa tahapan kerja yang harus dilalui. Adapun diagram alir dari tahap metode pelaksanaan analisis yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram Alir Analisis Tekno-Ekonomi

3.1.1 Analisis Permintaan dan Penawaran

Langkah awal yang dilakukan dalam melakukan analisis tekno ekonomi adalah melakukan analisis permintaan dan penawaran terhadap produk CNT.

a. Analisis Permintaan

Analisis permintaan ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kebutuhan CNT dalam beberapa tahun yang akan datang. Analisis dilakukan secara makro berdasarkan atas data kebutuhan CNT dunia dalam beberapa tahun terakhir. Kemudian data-data ini diolah sehingga diperoleh nilai proyeksi kebutuhan CNT untuk masa yang akan datang.

b. Analisis Penawaran

Analisis penawaran dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kapasitas produksi CNT secara global. Analisis dilakukan secara makro dengan mencari data perusahaan yang memproduksi CNT di seluruh dunia beserta kapasitas produksi setiap tahunnya. Data-data ini kemudian dikumpulkan dan kemudian diolah sehingga diperoleh total kapasitas produksi CNT dunia saat ini.

Setelah dilakukan analisis permintaan dan penawaran akan diketahui seberapa besar potensi pasar untuk pabrik CNT baru yang akan didirikan. Hal ini bisa diketahui dengan membandingkan hasil analisis permintaan dan penawaran. Apabila kapasitas pabrik yang ada saat ini belum bisa memenuhi kebutuhan konsumen terhadap CNT, maka pendirian pabrik baru diharapkan akan mendatangkan keuntungan secara ekonomis. Sebaliknya, apabila kapasitas pabrik yang ada saat ini masih melebihi tingkat kebutuhan konsumen, maka pendirian pabrik baru akan semakin menambah tingkat persaingan antar produsen yang ada yang bermain di bidang CNT.

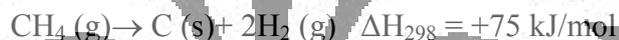
3.1.2 Menentukan Kapasitas dan Lokasi Pabrik

Penentuan kapasitas pabrik dilakukan dengan menghitung seberapa besar *market share* yang diinginkan terhadap potensi pasar yang muncul dari analisis permintaan dan penawaran. Setelah kapasitas pabrik ditentukan kemudian dilakukan pemilihan lokasi pabrik dengan mempertimbangkan berbagai aspek seperti kemudahan mendapatkan bahan baku, tenaga kerja dan aspek lainnya.

3.1.3 Flowsheeting

Proses *flowsheeting* dimulai dengan membuat rancangan proses konseptual. Dalam melakukan analisis tekno ekonomi proses ini bersifat sangat penting dan vital karena ini akan menjadi landasan utama dalam membuat dan mengembangkan *flowsheet*. Rancangan proses konseptual dimulai dengan menetapkan bahan baku yang akan diolah menjadi produk. Bahan baku yang digunakan untuk menghasilkan CNT adalah gas metana (C1) yang berasal dari *sales gas* dengan kandungan berupa molekul metana dan sedikit *impurities*.

Setelah jenis bahan baku dan produk ditentukan, langkah selanjutnya adalah mengeliminasi perbedaan jenis molekul dengan melakukan reaksi kimia. Proses reaksi kimia dirancang agar berlangsung secara kontinyu selama 20 jam. Dari penelitian terdahulu, diketahui bahwa salah satu cara yang paling ekonomis untuk menghasilkan CNT dengan umpan berupa gas metana adalah melalui reaksi dekomposisi katalitik metana. Adapun reaksi dekomposisi katalitik metana adalah sebagai berikut



Reaksi diatas sangat endotermik dan diperlukan energi yang sangat besar untuk merengkah molekul metana menjadi CNT dan gas hidrogen. Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa reaktor katalitik terstruktur memiliki keunggulan apabila dibandingkan dengan jenis reaktor lainnya (lihat Tabel 2.3).

Dengan menggunakan reaktor katalitik terstruktur, reaksi yang terjadi di dalam reaktor adalah reaksi dekomposisi metana menjadi produk karbon yang mengandung CNT dan gas hidrogen. Reaksi ini berlangsung dalam sebuah reaktor katalitik terstruktur (*gauze*), yang menggunakan anyaman kawat sebagai penyangga katalis. Kualitas CNT yang dihasilkan dari metode ini cukup baik dengan diameter 30-50 nm dan ketebalan dinding 10-20 nm serta kemurnian hidrogen mencapai lebih dari 90%.

Reaksi yang terjadi adalah reaksi endotermik, sehingga reaksi harus berlangsung pada suhu yang cukup tinggi. Penggunaan katalis mampu menurunkan energi aktivasi reaksi. Namun berdasarkan hasil percobaan, masih

diperlukan energi dari luar yang cukup besar untuk memicu terjadinya reaksi. Kebutuhan energi ini dipenuhi dengan penambahan *heater* di luar reaktor.

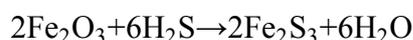
Reaksi ini berlangsung pada suhu 700°C dan tekanan atmosferik dengan katalis Ni-Cu-Al. Kondisi operasi tersebut dipilih karena mampu menghasilkan produk yang optimal (. Sedangkan katalis berbasis nikel dipilih karena merupakan katalis yang paling aktif untuk reaksi dekomposisi katalitik metana. Kekurangannya, katalis ini mudah terdeaktivasi dan hanya mampu bertahan hingga 24 jam. Hasil reaksi dekomposisi katalitik hidrokarbon ini adalah CNT yang melekat pada kawat katalis dan aliran gas H_2 .

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan di laboratorium, reaktor gauze memiliki tingkat konversi metana menjadi CNT hingga mencapai 95 %. Karena hampir semua reaktan terkonversi menjadi produk berupa CNT dan gas H_2 , proses perancangan aliran *recycle* tidak dibutuhkan karena aliran gas keluaran reaktor memiliki tingkat kemurnian H_2 diatas 90% sehingga gas hidrogen yang dihasilkan bisa langsung dijual karena telah memenuhi spesifikasi yang diminta oleh konsumen.

Setelah merancang konsep proses produksi CNT menggunakan reaktor gauze, tahapan mensintesis *flowsheet* selanjutnya adalah merancang sebuah konsep proses untuk mengeliminasi perbedaan komposisi dengan jalan proses pemisahan. Proses pemisahan yang dilakukan di dalam pabrik ini adalah proses penghilangan kandungan *impurities* yang terdapat di *sales gas* sebagai bahan baku utama sebelum memasuki reaktor. Unit pemisahan yang dirancang sebagai proses perlakuan awal pada umpan adalah unit penghilangan kandungan gas H_2S , dan sebuah unit untuk proses penghilangan kandungan air.

Salah satu metode pemisahan H_2S dari aliran gas tanpa penghilangan CH_4 secara simultan adalah dengan menggunakan *iron sponge*. Proses ini dapat diaplikasikan untuk gas asam dengan konsentrasi H_2S yang rendah (300 ppm). Unit H_2S Removal ini digunakan untuk menghilangkan H_2S yang dapat meracuni katalis nikel. Karena unit ini beroperasi dengan sistem *batch*, maka dibuat dua buah unit yang identik agar proses keseluruhan dapat berlangsung secara kontinu. Unit ini beroperasi pada tekanan atmosferik dan temperatur $37,78^{\circ}\text{C}$.

Proses pemurnian berlangsung dengan cara mengalirkan gas ke arah bawah melintasi unggun tetap berisi *iron sponge*. Besi oksida akan bereaksi dengan H₂S sehingga membentuk besi sulfida dan air. Reaksi dasarnya adalah:



Air akan turun ke bagian bawah unggun bersama gas dan harus didrainasi untuk mencegah akumulasi. Zat pembau seperti merkaptan dalam aliran gas juga akan dihilangkan dengan *iron sponge*. Agar *iron sponge* mampu bekerja secara efektif, pH harus bernilai 8-10 dan kandungan uap air harus dipertahankan dalam jangkauan nilai tertentu. Persyaratan ini biasanya dapat terpenuhi jika gas berada dalam keadaan jenuh dengan uap air. Jika tidak, semprotan air dapat membantu mengatasi masalah ini.

Untuk meminimalisasi korosi di bagian *downstream* yang disebabkan oleh H₂S, proses ini harus ditempatkan sedekat mungkin dengan sumber gas. Proses ini biasanya diletakkan sebelum proses dehidrasi gas. Temperatur maksimum tidak boleh melewati 50 °C. Sedangkan temperatur minimumnya adalah 10 °C atau pada nilai yang cukup untuk menghindari pembentukan hidrat. Proses *iron sponge* tidak sensitif terhadap tekanan dan tidak dipengaruhi oleh komposisi gas.

Gas akan mengalir ke bagian bawah disertai penghilangan H₂S untuk memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Saat *iron sponge* telah jenuh, unggun harus diganti dengan yang baru. Saat membuka unggun, udara yang masuk dapat menyebabkan kenaikan temperatur sehingga menghasilkan pembakaran spontan pada unggun. Oleh karena itu, unggun harus dibasahi sebelum diisi ulang. Karena kinerjanya, jarang operasi yang menggunakan *iron sponge* secara seri.

Setelah kandungan H₂S dihilangkan, kandungan H₂O dalam *feed gas* juga harus dihilangkan. Hal ini dilakukan karena *feed gas* akan membentuk *syngas* ketika adanya H₂O. Ini perlu diwaspadai karena reaksi *steam reforming* dan reaksi dekomposisi metana terjadi pada suhu yang relatif sama (*steam reforming* pada 700°C-1000°C, dekomposisi metana pada 700°C) dan menggunakan katalis yang sama (Ni-Al₂O₃). Penghilangan H₂O juga didasarkan

pada prinsip adsorpsi fisika. Adsorpsi ini menggunakan adsorben berupa *molecular sieve 3A*. Sistem ini merupakan sistem *batch* karena pada suatu waktu adsorben ini akan jenuh dengan air yang diadsorb sehingga perlu diregenerasi atau diganti. Biasanya dalam pabrik yang kontinu, dibuat minimal 2 buah kolom dehidrasi yang identik.

Proses selanjutnya adalah tahapan pemurnian CNT keluaran reaktor. Proses pemurnian CNT ini bertujuan untuk menghilangkan sisa-sisa kandungan katalis dan pengotor lainnya. Proses pemurnian CNT ini berlangsung secara *batch*. Setelah reaktor beroperasi secara kontinu selama 20 jam, CNT yang terbentuk akan menempel di permukaan kawat katalis. Kemudian dilakukan proses *unloading* CNT dari permukaan kawat secara manual oleh operator. CNT yang telah diunloading siap untuk dimurnikan. Proses pemurnian diawali dengan proses penyaringan awal untuk memisahkan CNT dengan grafit, kemudian CNT dilarutkan dalam larutan HNO_3 1 M. Larutan CNT dan HNO_3 ini kemudian dipanaskan di dalam microwave selama kurang lebih 20 menit. Setelah dipanaskan, kemudian dilakukan proses pengadukan secara ultrasonik selama kurang lebih 20 menit, setelah diaduk larutan CNT dan HNO_3 ini kemudian disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan CNT dengan larutan HNO_3 . Berikutnya adalah proses penetralan dan pencucian CNT. Proses penetralan dilakukan dengan menambahkan larutan NaOH pada CNT hasil penyaringan untuk menghilangkan sisa asam yang masih tertinggal hingga membentuk suspensi. Suspensi yang terbentuk kemudian disaring menggunakan kertas saring. Hasil penyaringan ini kemudian dicuci dengan menggunakan larutan metanol dan demin water untuk menghilangkan sisa-sisa kandungan logam, asam dan basa yang masih tertinggal di dalam CNT. Proses pemurnian tahap akhir CNT adalah mengeringkannya dengan menggunakan pemanasan oven pada suhu $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 20 menit.

Tahap perancangan proses konseptual berikutnya adalah integrasi energi dalam pabrik. Tahapan integrasi energi ini berkaitan dengan sistem pertukaran kalor yang terjadi. Faktor yang mempengaruhi sistem pertukaran kalor ini adalah, laju alir massa, dan laju alir kalor pada setiap aliran bahan baku maupun produk. Oleh karena itu temperatur dan laju alir kalor pada tiap aliran penting diketahui

untuk merancang suatu sistem penukar panas yang terintegrasi. Sistem tersebut menunjukkan bahwa setiap aliran panas dapat dipertukarkan kalornya dengan aliran dingin untuk memperkecil energi yang dibutuhkan. Aliran gas keluaran reaktor memiliki suhu yang sangat tinggi, sekitar 500 °C. Aliran ini dapat dimanfaatkan untuk memanaskan aliran umpan yang akan masuk reaktor. Aliran umpan yang telah mengalami proses pertukaran panas ini, akan mengurangi kebutuhan energi *furnace heater* untuk memanaskan reaktor. Sedangkan aliran gas keluaran reaktor yang telah dipertukarkan panasnya dengan aliran umpan kan menjadi lebih dingin dan akan mengurangi beban kerja *cooler*.

Dari perancangan proses konseptual di atas, akan muncul *block flow diagram* (BFD) yang mendeskripsikan proses produksi CNT menjadi sederhana dan dapat dimengerti. BFD kemudian akan diproses lebih lanjut menjadi *process flow diagram* (PFD). Di dalam PFD akan terlihat dengan jelas jenis-jenis peralatan dan proses yang akan digunakan di dalam produksi CNT. Selain menghasilkan BFD dan PFD proses *flowsheeting* akan menghasilkan data-data berupa kondisi operasi serta neraca massa dan energi yang terjadi di setiap aliran proses. Proses *flowsheeting* bertujuan untuk mendapatkan kondisi operasi yang efektif dan efisien dari pabrik yang akan dibangun sehingga biasanya proses ini memakan waktu yang cukup lama karena akan dilakukan revisi secara kontinyu hingga kondisi operasi proses dianggap cukup layak (efektif dan efisien).

3.1.4 Sizing Peralatan

Data-data neraca massa dan energi dari hasil *flowsheeting* untuk seluruh aliran kemudian diolah untuk menentukan ukuran (*sizing*) masing-masing peralatan proses yang ada di dalam pabrik pembuatan CNT. Pengolahan data neraca massa dan energi tersebut menggunakan dasar-dasar ilmu proses sehingga diharapkan dapat menghasilkan ukuran peralatan yang dibutuhkan agar proses di pabrik dapat berlangsung sesuai dengan rancangan yang telah digambarkan di dalam PFD. Data-data ukuran yang berasal dari perhitungan ini kemudian dibandingkan dengan spesifikasi peralatan yang beredar di pasaran (diproduksi oleh vendor). Diharapkan data hasil perhitungan ukuran peralatan ini memiliki hasil yang kurang lebih sama dengan yang ada di pasaran sehingga memudahkan

untuk proses pemesanan dan fabrikasinya. Apabila hasil sizing peralatan yang dihasilkan ini sudah dianggap layak dan dirasa dapat diimplementasikan sesuai dengan PFD yang telah dibuat barulah dilakukan pemesanan kepada vendor terkait untuk masing-masing peralatan proses.

3.1.5 Estimasi Biaya

Estimasi biaya merupakan proses selanjutnya untuk melakukan analisis tekno ekonomi. Dalam estimasi biaya dilakukan perhitungan untuk seberapa besar biaya investasi dan operasional untuk mendirikan dan menjalankan sebuah pabrik CNT. Proses ini mencakup perhitungan seberapa besar biaya untuk peralatan, tanah, gedung, utilitas, pajak, royalti, serta biaya operasional lainnya seperti gaji pekerja, biaya pemasaran dan distribusi asuransi dan biaya-biaya lainnya yang akan dibahas lebih mendetail di bab 4. Proses estimasi biaya ini menggunakan pendekatan ekonomi yang ada di literatur untuk proses perancangan pabrik seperti Seader-Seider dan Timmerhaus. Selain itu, dari estimasi biaya ini akan didapatkan juga data berupa aliran kas pabrik yang nantinya akan diolah lebih lanjut dengan menggunakan teori keekonomian untuk mendapatkan nilai parameter-parameter yang dibutuhkan untuk mengetahui apakah suatu proyek bernilai ekonomis.

3.1.6 Analisis Keekonomian

Dari aliran kas yang berasal dari proses estimasi biaya dapat diperoleh beberapa parameter-parameter keekonomian agar sebuah proyek dikatakan ekonomis. Pada bagian ini akan dilakukan tinjauan analisis keekonomian produksi CNT yang meliputi *Internal Rate of Return* (IRR), *Net Present Value* (NPV), dan *Pay Back Period* (PBP). Keseluruhan parameter yang disebutkan di atas akan dianalisis sehingga nantinya akan diketahui apakah proyek ini bernilai ekonomis atau tidak.

3.1.7 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui dampak dari ketidakpastian suatu parameter yang mempengaruhi kelayakan dan untuk melihat pengaruh perubahan beberapa parameter yang cukup penting dalam investasi. Pada

analisis ini dilakukan sensitivitas terhadap kapasitas produksi CNT, harga bahan baku CNT, dan biaya operasional serta harga jual CNT.

3.2 Teknik Pengumpulan Data

Dalam melakukan analisis tekno ekonomi, proses pengumpulan data dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu :

- a. Data primer, data primer ini diperoleh dari hasil perhitungan. Data primer ini meliputi besar kapasitas produksi pabrik, data kondisi aliran neraca massa dan energi setiap aliran proses, ukuran dan spesifikasi alat yang digunakan untuk memproduksi CNT, data aliran kas yang terjadi selama umur pabrik dan juga parameter-parameter keekonomian pabrik beserta nilai sensitivitasnya.
- b. Data sekunder, yang merupakan data yang didapat berdasarkan dokumen-dokumen yang telah tersedia di buku-buku, jurnal terkait yang dipublikasikan di situs-situs ilmiah serta studi-studi terdahulu yang berkaitan dengan produksi CNT. Data sekunder ini meliputi data produksi CNT, data produksi dan kebutuhan CNT secara global, serta hasil-hasil penelitian terdahulu yang berkaitan yang dapat dijadikan referensi (mencakup data entalpi, karakteristik dan sifat dari bahan baku serta produk, dan data-data lainnya yang terkait).

Keseluruhan data-data tersebut, baik primer maupun sekunder akan diolah dengan teori-teori terkait sehingga dihasilkan sebuah analisis tekno ekonomi yang layak secara ilmiah dan dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya.

3.3 Asumsi dan Justifikasi

3.3.1 Reaktor

Asumsi kondisi, konversi serta kinetika reaksi yang digunakan pada perancangan reaktor ini adalah sebagai berikut:

1. Nilai konversi reaktor diperoleh dari hasil penelitian yang telah dilakukan di laboratorium dengan menggunakan jenis reaktor katalitik terstruktur pada suhu 700 oC, tekanan atmosferik dan perbandingan berat katalis dengan laju alir umpan sebesar 0,006 gr menit/mL.

2. Umpan reaktor mengalami pemanasan awal dengan mempertukarkan panas aliran keluaran reaktor dengan aliran umpan serta menggunakan alat pemanas tambahan yang dipasang pada reaktor sehingga umpan mencapai temperatur reaksi yang diinginkan yaitu 700°C.
3. Kondisi operasi reaktor berada pada temperatur 700°C dan tekanan 1 atm.
4. Reaksi dekomposisi katalitik metana menjadi karbon dengan menggunakan katalis Ni-Cu-Al memiliki konversi 90% dan menghasilkan MWNT.
5. Reaktor yang digunakan adalah reaktor katalitik terstruktur.
6. *Pressure drop* dianggap tidak ada karena nilainya sangat kecil. Hal ini dikarenakan katalis yang digunakan adalah katalis gauze.
7. Tekanan operasi yang digunakan adalah 1 atm.
8. Unit pemanas yang digunakan adalah *furnace* yang dipasang pada bagian dinding luar reaktor (seperti jaket).

3.3.2 H₂S Removal

Untuk unit H₂S *removal* digunakan beberapa asumsi yang digunakan dalam perhitungan dimensi unit tersebut, diantaranya:

1. Seluruh alat dirancang mampu melakukan beban pemisahan sesuai data neraca massa unit, proses, maupun *overall*.
2. Perhitungan perancangan mekanik menggunakan persamaan perancangan yang terdapat dalam literatur [Walas, 1988] dan [Marcel Dekker, 2003].
3. Nilai *corrosion allowance* yang digunakan adalah sebesar 3,8 mm
4. Bentuk head yang dipilih adalah *torispherical dishes head* yang memiliki jangkauan tekanan operasi 15-200 psia
5. *Allowable Stress Carbon Steel SA 283 grade C* = 12.650 psi [Walas, 1988]
6. Nilai *joint efficiency* yang digunakan adalah sebesar 0,8.

3.3.3 H₂O Removal

Asumsi yang digunakan dalam perancangan unit H₂O removal adalah:

1. Seluruh alat dirancang mampu melakukan beban pemisahan sesuai data neraca massa unit, proses, maupun *overall*.
2. Perhitungan perancangan mekanik menggunakan persamaan perancangan yang terdapat dalam literatur [Walas, 1988]
3. Adsorben yang digunakan adalah *molecular sieve 3A*.
4. Adsorben secara selektif mengadsorpsi H₂O serta melewatkan *dry gas*.
5. Nilai *Corrosion allowance* yang digunakan adalah sebesar 3,8 mm.
6. Bentuk head yang dipilih adalah *torispherical dishes head* yang memiliki jangkauan tekanan operasi 15-200 psia
7. Nilai (L/D) yang digunakan adalah 4 sehingga pada perhitungan tebal separator menggunakan persamaan untuk silinder tebal.
8. Nilai *joint efficiency* yang digunakan adalah sebesar 0,8.

3.3.4 Pemurnian CNT

Asumsi yang digunakan dalam perancangan unit pemurnian CNT adalah:

1. Proses pemisahan CNT dilakukan dalam beberapa tahapan proses, yakni penyaringan awal, pengadukan dan pemanasan, penetralan dan pencucian CNT, penyaringan dan terakhir adalah pengeringan.
2. Proses penyaringan awal menggunakan kertas saring biasa untuk memisahkan CNT dengan partikel grafit yang berukuran besar
3. Proses pengadukan dilakukan secara ultrasonik dan proses pemanasan menggunakan *microwave*
4. Proses penetralan dan pencucian dilakukan untuk menghilangkan sisa-sisa katalis logam dan grafit yang masih menempel di CNT
5. Proses penyaringan kembali dilakukan di tahap akhir untuk memastikan bahwa MWNT yang dihasilkan sesuai dengan tingkat kemurnian yang diinginkan oleh pasar
6. Proses pengeringan dilakukan dengan menggunakan oven
7. Keseluruhan proses pemurnian dilakukan secara *batch*

8. Setiap tahapan pemurnian ada sebagian kecil CNT yang terbawa sehingga massa produk CNT menjadi berkurang

3.3.5 Keekonomian

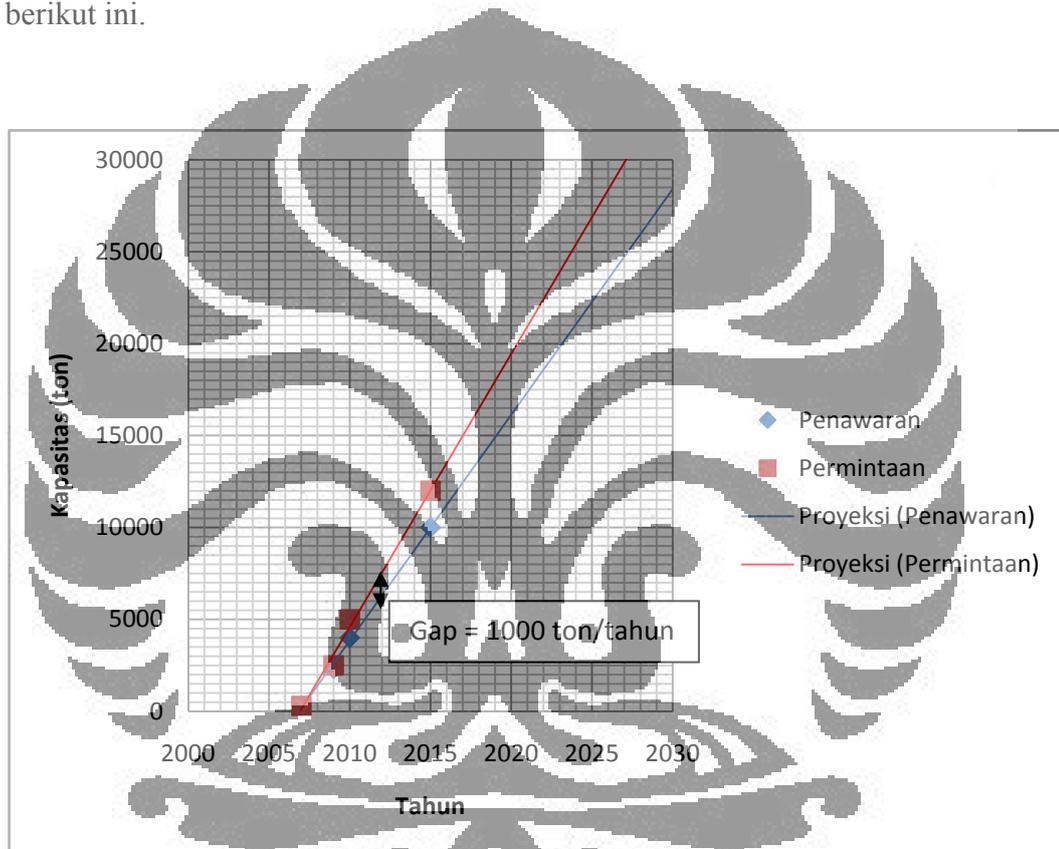
Asumsi awal yang digunakan untuk menghitung keekonomian adalah sebagai berikut :

1. Kurs rupiah terhadap dollar Amerika diasumsikan 1 US\$ = Rp. 9.000,00
2. Tingkat suku bunga yang digunakan adalah 10%, sedangkan MARR 20%
3. Umur pabrik ini adalah 20 tahun
4. Harga jual CNT per kgnya adalah sebesar US\$300.
5. Metode yang digunakan cocok untuk Chemical Plant
6. Metode perhitungan yang digunakan adalah metode modular Guthrie
7. Menggunakan Chemical Engineering Plant Cost Index sesuai Chemical Engineering Magazine (Revisi: 13 Okt 2010)
8. Parameter-parameter yang akan diubah dan dianalisa sensitivitasnya adalah: Perubahan $\pm 25\%$ kapasitas, Perubahan $\pm 25\%$ harga bahan baku, Perubahan $\pm 25\%$ biaya operasional, Perubahan $\pm 25\%$ harga jual produk
9. Tujuan dari perhitungan sensitivitas ini adalah untuk mengetahui: pengaruh terhadap NPV, pengaruh terhadap IRR, pengaruh terhadap *Payback Period*

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Penawaran dan Permintaan

Dari data-data permintaan dan penawaran yang telah disajikan di atas, setiap tahunnya kebutuhan akan MWNT selalu meningkat begitu juga dengan kapasitas produksinya. Peluang pasar untuk MWNT dapat dilihat pada grafik berikut ini.



Gambar 4.1 Peluang Pasar CNT

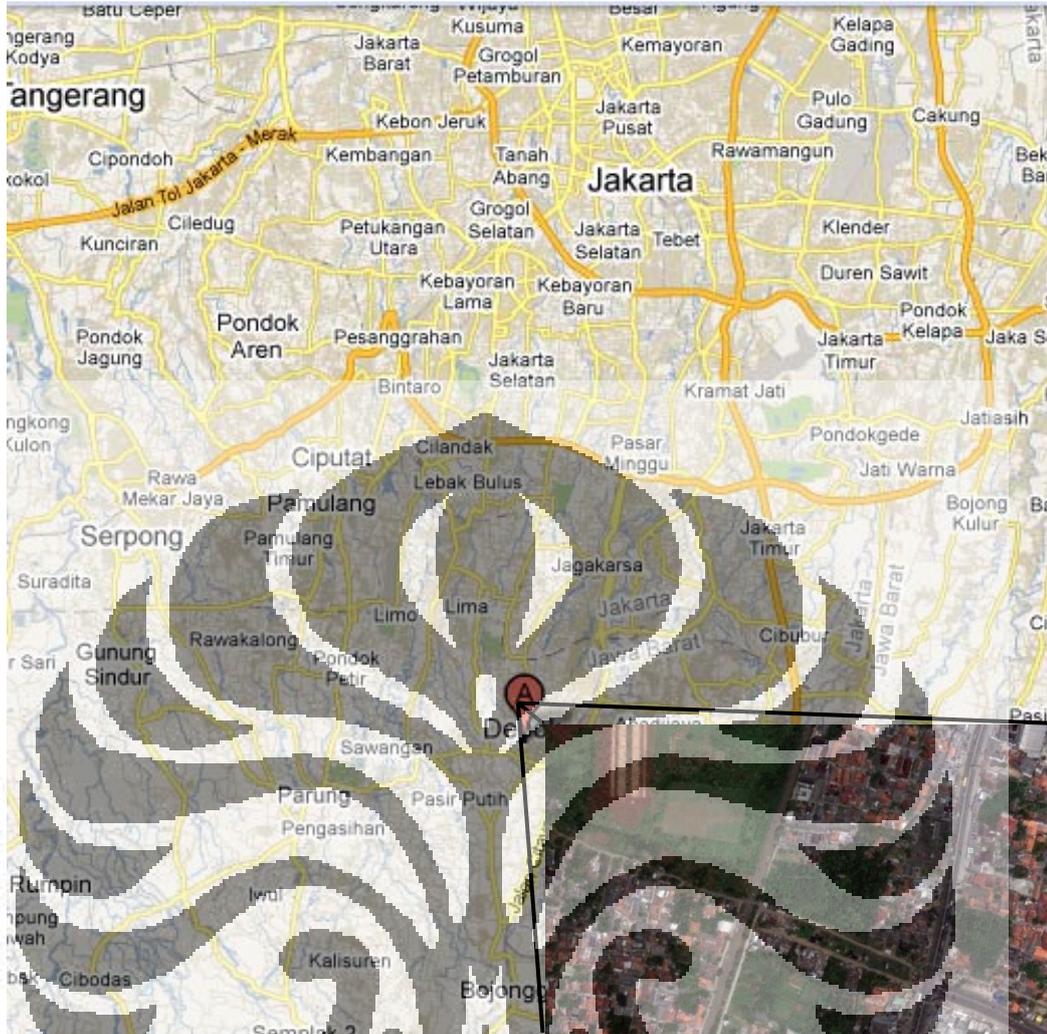
Dari grafik diatas terlihat bahwa pada tahun 2012 terdapat potensi pasar baru CNT sebesar 1000 ton. Dalam analisis tekno ekonomi ini, pabrik CNT yang akan dibangun memiliki kapasitas sebesar 10 ton/tahun, atau dengan kata lain menguasai market share sebesar kurang lebih 1 % dari nilai pasar CNT dunia.

4.2 Penentuan Lokasi Pabrik

Hal-hal yang menjadi pedoman untuk menentukan lokasi pabrik antara lain:

- Lokasi memiliki jarak yang dekat dengan sumber bahan baku.
- Lokasi memiliki jarak yang dekat dengan daerah pemasaran.
- Lokasi memiliki kepadatan penduduk yang sedikit.
- Lokasi memiliki kemudahan dalam hal transportasi.
- Lokasi memiliki jarak yang dekat dengan sumber air.
- Lokasi mudah untuk mendapatkan sumber energi.

Bahan baku utama yang diperlukan pada pabrik CNT ini adalah pasokan gas alam metana. Pada poin pertama, pertimbangan lebih didasarkan pada jarak dengan sumber bahan baku. Pabrik CNT ini akan didirikan di daerah yang dilalui oleh jalur perpipaan gas PGN. Permintaan terhadap produk CNT terutama berada pada daerah Jakarta dan sekitarnya. Pertimbangan terhadap lokasi yang dekat dilalui oleh jalur perpipaan gas dan dekat dengan konsumen lebih diutamakan dalam pembuatan CNT karena dapat sangat menghemat biaya operasional pabrik. Oleh karena itulah dipilih lokasi di daerah Depok.

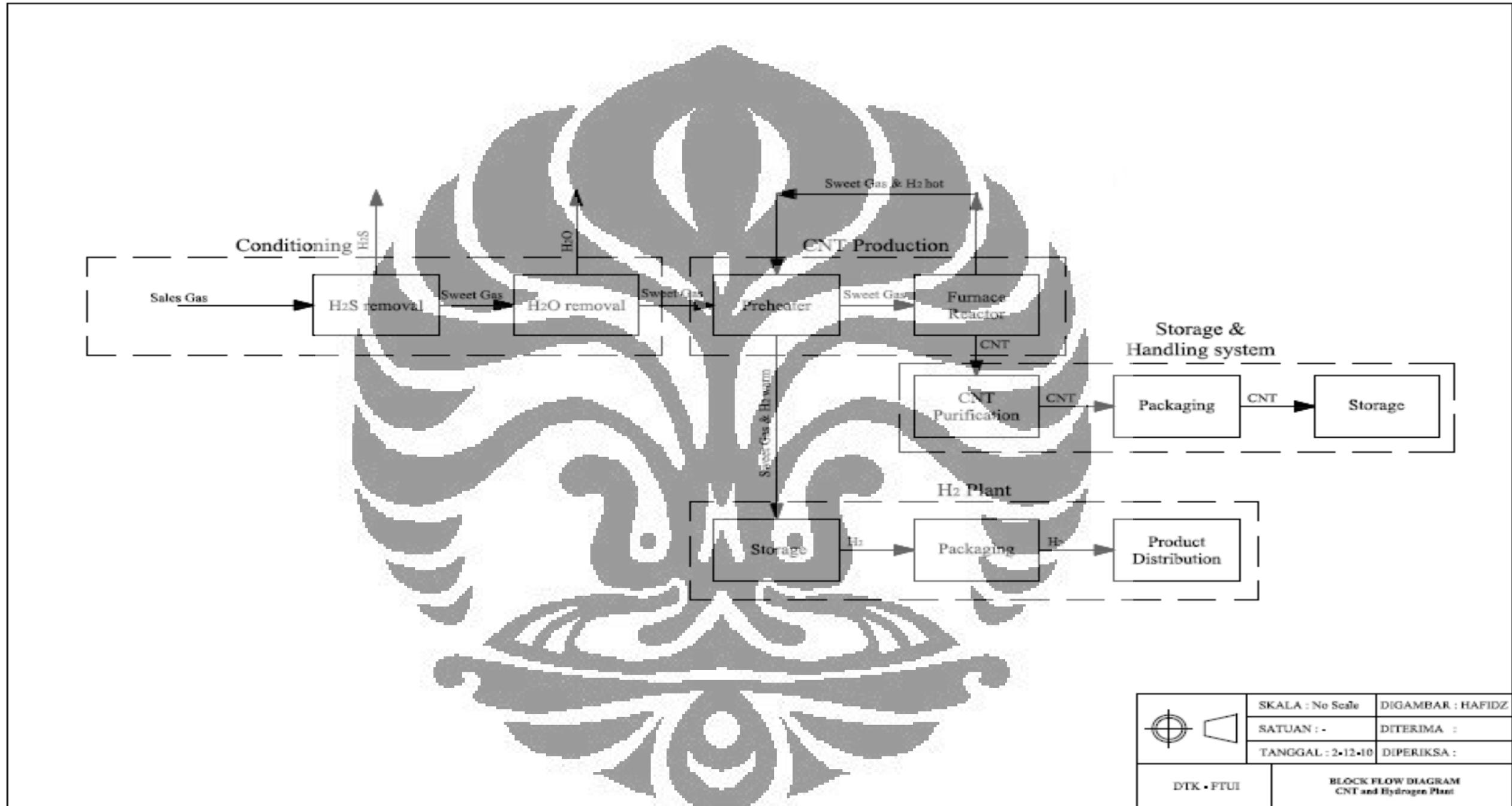


Gambar 4.2 Peta lokasi pabrik CNT

Pertimbangan lokasi di daerah Depok juga didukung oleh kemudahan transportasi dan jaraknya yang dekat dengan sumber air dan sumber energi. Selain itu, kepadatan penduduk di daerah Depok belum sepadat jika dibandingkan dengan lokasi di Jakarta.

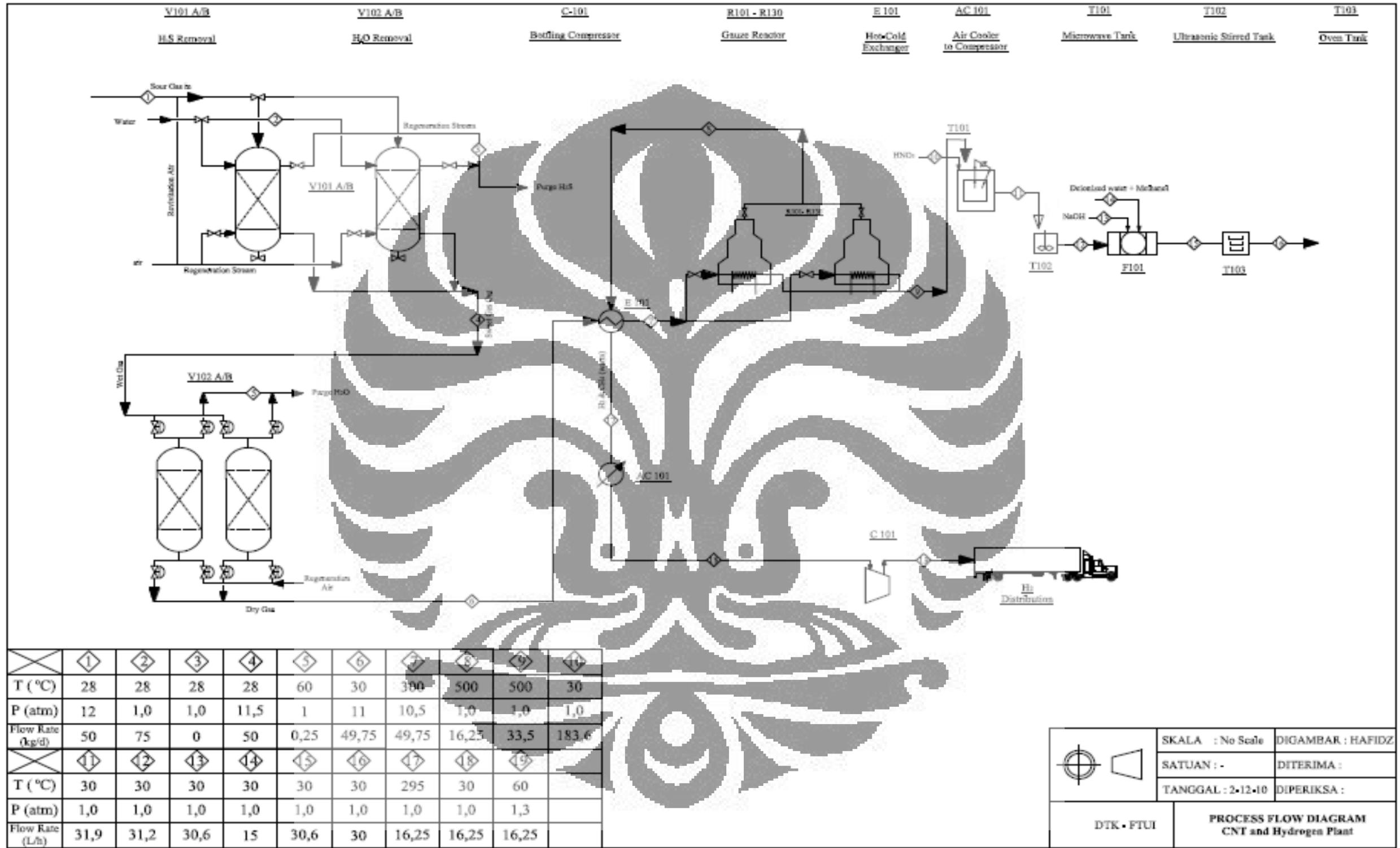
4.3 Flowsheeting

4.3.1 Block Flow Diagram (BFD)



Gambar 4.3 Block Flow Diagram Produksi CNT

4.3.2 Process Flow Diagram (PFD)



Gambar 4.4 Process Flow Diagram (PFD) Produksi CNT

4.3.3 Deskripsi Proses

Bahan baku dari pabrik ini berasal dari *sales gas* yang dipasok oleh Perusahaan Gas Negara (PGN) dengan spesifikasi kandungan metana sekitar 99,5 % dan sisanya adalah etana, propana, butana, pentana dan sedikit kandungan air. *Sales gas* yang masuk ke aliran proses kemungkinan masih mengandung H_2S yang dapat meracuni katalis sehingga perlu dimurnikan terlebih dahulu dengan proses *iron sponge*. *Sweet gas* yang dihasilkan dari proses *iron sponge* juga perlu dihilangkan kandungannya dengan menggunakan *molecular sieve adsorber*. Jenis adsorben yang digunakan adalah *molecular sieve 3A*. Gas yang sudah dihilangkan kandungannya, sebelum menuju reaktor akan melewati sebuah alat penukar panas yang mempertukarkan kalor antara aliran umpan dengan aliran produk hidrogen keluaran reaktor. Aliran dinginnya adalah gas umpan yang akan dinaikkan suhunya dari $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ke suhu $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, sedangkan aliran panasnya adalah gas hidrogen keluaran reaktor yang akan didinginkan dari suhu sekitar $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ke suhu $295\text{ }^{\circ}\text{C}$. Penukaran kalor ini bertujuan sebagai tahap awal pemanasan umpan sebelum masuk ke gauze reaktor tempat terjadinya reaksi dekomposisi katalitik metana untuk memproduksi CNT. Ada 30 buah reaktor gauze yang disusun secara paralel dan berpasangan secara modular dengan setiap reaktornya memiliki kapasitas produksi sebesar 2 kg/hari. Reaktor beroperasi pada suhu sekitar $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 1 atm.

Di dalam reaktor terjadi reaksi dekomposisi katalitik metana dengan katalis Ni-Cu-Al. Produk yang dihasilkan adalah CNT yang menempel pada katalis serta gas hidrogen dan sebagian kecil *sweet gas* yang tidak terkonversi. Setelah dilakukan reaksi selama kurang lebih 20 jam di dalam reaktor, CNT yang terbentuk di katalis akan diambil secara manual oleh operator. Proses selanjutnya, yakni pemurnian CNT adalah proses secara *batch*.

Mekanisme pemurniannya adalah, CNT yang telah diproduksi sebanyak 30 kg akan disimpan terlebih dahulu untuk dimurnikan keesokan harinya. Proses pemurnian dimulai dengan tahap penyaringan awal untuk keseluruhan CNT. Setelah CNT disaring, kemudian CNT akan dipanaskan dalam *microwave*, kapasitas 60 L, selama 20 menit. Sebelum dipanaskan, CNT terlebih dahulu dilarutkan dalam larutan HNO_3 1 M sebanyak 60 L untuk setiap kg CNT. Sesaat

setelah dipanaskan menggunakan *microwave*, tahap selanjutnya adalah pengadukan ultrasonik selama 20 menit. Setelah diaduk selama 20 menit CNT kemudian dinetralkan dan dicuci dengan larutan metanol dan demin *water*, untuk kemudian disaring tahap akhir sebelum dikeringkan di dalam oven selama 15 menit. Proses reaksi dan pemurnian disetiap tahapnya dikerjakan secara terpisah oleh operator yang berbeda. Sehingga dalam 1 hari proses produksi dan purifikasi dapat berlangsung secara paralel, artinya produk yang dihasilkan hari ini akan dimurnikan keesokan harinya, dan produk hasil reaksi besok akan dimurnikan lusa, begitu seterusnya.

Sedangkan untuk gas hidrogen sebagai hasil reaksi samping akan langsung dijual dalam tabung kemasan.

4.3.4 Neraca Massa

Proses yang dipilih untuk produksi CNT adalah reaksi yang kontinu meskipun proses pemurnian CNT dilakukan secara semi kontinu. Pabrik beroperasi dalam 327 hari kalender dalam setahun. Sisa hari lainnya digunakan untuk kegiatan inspeksi dan pemeliharaan alat-alat pabrik.

Kapasitas produksi pabrik ditetapkan adalah sebesar 10 ton/tahun. Artinya pabrik ini akan menghasilkan CNT sebanyak 10 ton setiap tahunnya.

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas produksi} &= \text{Kebutuhan pasar} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \times \frac{1 \text{ tahun}}{330 \text{ hari}} \\
 &= 10 \text{ ton/tahun} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \times \frac{1 \text{ tahun}}{330 \text{ hari}} \\
 &= 30 \text{ kg/hari}
 \end{aligned}$$

Neraca Massa secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Neraca Massa Keseluruhan

Komponen	Input	Output		
	1	5	16	19
Laju alir (kg/hari)	50	0,25	30	16,25
C1	0,995	0	0	0,300
C2	0	0	0	0
C3	0	0	0	0
i-C4	0	0	0	0
n-C4	0	0	0	0
i-C5	0	0	0	0
n-C5	0	0	0	0
CO ₂	0	0	0	0
H ₂ O	0,005	0	0	0
H ₂ S	0	0	0	0
H ₂	0	0	0	0,700
HNO ₃	0	0	0	0
NaOH	0	0	0	0
CH ₃ OH	0	0	0	0
C	0	1	1	0

Aliran nomor 1 merupakan aliran *feed (sales gas)*, di mana laju alir massa bahan baku adalah 45 kg/hari, sedangkan untuk aliran outputnya adalah aliran nomor 5 (aliran H₂O removal) sebesar 1,2 kg/hari, aliran nomor 16 (aliran CNT) sebesar 30,6 kg/hari, kemudian aliran nomor 19 (aliran keluaran H₂) sebesar 12,175 kg/hari, sehingga:

Basis 1 hari

Aliran input = 50 kg

Aliran Output = 0,25 kg + 30 kg + 16,25 = 46,5 kg.

Dari perhitungan di atas dapat diketahui bahwa perhitungan neraca massa menghasilkan nilai yang tidak sama karena adanya sejumlah padatan karbon yang ikut terbuang ketika dilakukan proses pemurnian CNT. Jumlah karbon yang terbuang adalah sebesar 50 kg – 46,5 kg = 3,5 kg

Efisiensi secara keseluruhan :

$$\frac{\text{Jumlah aliran input}}{\text{Jumlah aliran output}} \times 100\%$$

$$= \frac{46,5 \text{ kg}}{50 \text{ kg}} \times 100\% = 93\%$$

Universitas Indonesia

Untuk Karbon:

$$\frac{\text{Massa Karbon di produk}}{\text{Massa Karbon di umpan}} \times 100\%$$

$$\eta_c = \frac{30 \text{ kg}}{37,5 \text{ kg}} \times 100\% = 80\%$$

Untuk Hidrogen :

$$\frac{\text{Massa Hidrogen di produk}}{\text{Massa Hidrogen di umpan}} \times 100\%$$

$$\eta_c = \frac{11,2 \text{ kg}}{12,5 \text{ kg}} \times 100\% = 90\%$$

Tabel 4.2 Data Kondisi dan Komposisi tiap Aliran

Aliran	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P (atm)	12	1	1	11,5	1	11	10,5	1	1	1
T (°C)	28	28	28	28	60	30	300	500	500	30
Laju alir (kg/hari)	50	75	0	50	0,25	49,75	49,75	16,25	33,5	183,6
Fraksi Massa										
C1	0,995	0	0	0,950	0	1	1	0,300	0	0
C2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i-C4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n-C4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i-C5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n-C5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H ₂ O	0,005	1	0	0,005	1	0	0	0	0	0,99
H ₂ S	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
H ₂	0	0	0	0	0	0	0	0,700	0	0
HNO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01
NaOH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CH ₃ OH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Tabel 4.2 Data Kondisi dan Komposisi tiap Aliran (continue)

Aliran	11	12	13	14	15	16	17	18	19
P (atm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1,3
T (°C)	30	30	30	30	30	30	295	30	60
Laju alir (kg/hari)	31,9	31,2	30,6	15	30,6	30	16,25	16,25	16,25
Fraksi Massa									
C1	0	0	0	0	0	0	0,300	0,300	0,300
C2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i-C4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n-C4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i-C5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
n-C5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H ₂ O	0,02	0,016	0,97	0,66	0,01	0	0	0	0
H ₂ S	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H ₂	0	0	0	0	0	0	0,700	0,700	0,700
HNO ₃	0,005	0,004	0	0	0	0	0	0	0
NaOH	0	0	0,03	0	0	0	0	0	0
CH ₃ OH	0	0	0	0,34	0	0	0	0	0
C	0,975	0,98	0	0	0,99	1	0	0	0

4.3.5 Neraca Energi

Neraca energi setiap alat diperoleh dari hasil perhitungan yang telah dilakukan pada bagian lampiran. Neraca energi total untuk keseluruhan pabrik terangkum pada Tabel 4.3 di bawah ini.

Tabel 4.3 Neraca Energi Keseluruhan

Input	Energi (J/hari)	Output	Energi (J/hari)
Gas Umpan	316588,06	Hidrogen	192517,80
Pemanas reaktor	2710720,00	Product Cooler	823654,00
Kompresor	1020960,00		
Total	4410354,03	Total	1016171,80

Efisiensi energi dihitung berdasarkan perbandingan energi keluaran terhadap energi total yang masuk ke dalam sistem.

$$\eta = \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} \times 100\% = \frac{1016171,80 \text{ J/hari}}{4048268,06 \text{ J/hari}} \times 100\% = 25\%$$

Dari hasil perhitungan diperoleh nilai efisiensi energi sebesar 25 %. Tingkat efisiensi energi sebesar 25 % cukup wajar, mengingat bahwa produk utama dari proses produksi bukanlah suatu komoditas berbasis energi, sedangkan bahan baku yang digunakan dalam berbasis energi.

4.3.6 Daftar Peralatan

Pabrik CNT ini memiliki 6 unit besar, yaitu reaktor, H₂S *removal*, H₂O *removal*, purifikasi, storage, dan utilitas. Untuk utilitas, dibutuhkan 1 buah penukar panas dan 1 buah *cooler* untuk dapat memenuhi proses pertukaran panas yang terjadi pada semua aliran. Di bawah ini adalah tabel spesifikasi alat-alat yang digunakan pada setiap unit berdasarkan perhitungan yang terdapat pada lampiran.

Tabel 4.4 Spesifikasi Reaktor Gauze

Reaktor Gauze		R-101 – R-130	
Desain		Operasi	
Temperatur (°C)	1000	Temperatur (°C)	700
Tekanan (atm)	1,5	Tekanan (atm)	1,0
Kebutuhan Pemanasan (kJ/hari)	270.695,00	187.014,00	
Karakteristik Mekanis		Data Katalis	
<i>Shell</i>	Silinder	Jenis	Katalis terstruktur
O.D. (mm)	160	Bentuk	Gauze
I.D. (mm)	155	Diameter (mm)	2,7
Panjang (m)	1,5	Massa total katalis (kg)	2
Ketebalan (mm)	25	Mesh	10
<i>Head</i>	<i>torispherical</i>		
Tebal head (mm)	0,31		
Material	Quartz		

Tabel 4.5 Spesifikasi Air Cooler

Spesifikasi	Product Cooler (AC101)
Tipe	Air Cooler
Jumlah kipas	1
Kecepatan kipas (rpm)	60
LMTD (°C)	63,0
UA (kJ/°C-hari)	544,32
Kebutuhan udara pendingin (kg/hari)	$1,02 \times 10^7$
Beban kerja (kJ/hari)	192.517,00

Tabel 4.6 Spesifikasi H₂S Removal

		H ₂ S Removal	V-101
Karakteristik Bejana Bertekanan		Karakteristik Adsorben	
ID (m)	0,2	Tipe	<i>Iron Sponge (Fe₂O₃)</i>
Tinggi (m)	1	Volume (m ³)	4,1 x 10 ⁻³
Tebal (mm)	4,1	Kapasitas Adsorpsi H ₂ S Maksimum	30 ppm H ₂ S
Faktor Korosi (mm)	3,8	Konsumsi Harian (m ³)	5,4 x 10 ⁻⁶¹
Material	<i>Carbon Steel (1020)</i>		
Karakteristik Head			
		Top	Bottom
Tipe	<i>Torispherical</i>		<i>Torispherical</i>
ID (m)	0,12		0,12
Ketebalan (mm)	1,9		1,9
Faktor Korosi	1,6		1,6
Material	<i>Carbon Steel (1020)</i>		<i>Carbon Steel (1020)</i>

Tabel 4.7 Spesifikasi Kompresor

Spesifikasi	<i>Compressor to Bottling (C-101)</i>
Tipe	<i>Reciprocating</i>
Daya (kW)	0,40

Tabel 4.8 Spesifikasi H₂O Removal

		H ₂ O Removal	V-102
Karakteristik Vessel		Karakteristik Adsorben	
Waktu Adsorpsi (jam)	24	Jenis	Molecular Sieve 3A
Diameter Dalam (m)	0,068	Volume (m ³)	0,18
Tinggi (m)	0,292	Densitas (kg/m ³)	704
Ketebalan (mm)	2,1	Massa (kg)	126,72
<i>Corrosion Allowance</i> (mm)	2	<i>Void Fraction</i>	0,34
Material	Low CS (1020)		
Karakteristik Head			
		Top	Bottom
Jenis	<i>Torispherical</i>		<i>Torispherical</i>
Diameter Dalam (m)	0,068		0,068
Ketebalan (mm)	2,2		2,2
<i>Corrosion Allowance</i> (mm)	2		2
Material	Low CS (1020)		Low CS (1020)

Tabel 4.9 Spesifikasi Microwave

Spesifikasi	Microwave
Merek	BOSCH
Kapasitas (liter)	62
Daya (kW)	1,2

Tabel 4.10 Spesifikasi Alat Penukar Panas

Heat Exchanger		E-101
Tipe		Shell and Tube
TEMA class		AEU
U (kJ/jam.m ² .°C)		64
A (m ²)		54,81
LMTD (°C)		234,86
Karakteristik	Shell Side	Tube Side
Aliran Masuk	Produk atas reaktor	Umpan segar
Fasa	Gas	Gas
Laju Alir (kg/hari)	12,875	44,775
Temperatur Inlet (°C)	500,0	50,5
Temperatur Outlet (°C)	295,0	309,9
Tekanan (atm)	0,89	1,30
O.D. (mm)	730,07	20,00
I.D. (mm)	726,07	16,00
Panjang (m)	2,19	6,00
Baffle Cut (%Area)	20	20
Jumlah Pass	1	2
Jumlah Tube	-	156
Pitch	-	Triangular; (30°)
Material	SS 304	SS 304

Tabel 4.11 Spesifikasi Ultrasonik

Spesifikasi	Ultrasonik
Merek	BRANSON
Kapasitas (liter)	80
Frekuensi (kHz)	40
Daya (kW)	1

Tabel 4.12 Spesifikasi Oven

Spesifikasi	Oven
Merek	JENNAIR
Kapasitas (liter)	80
Frekuensi (kHz)	40
Daya (kW)	1

Tabel 4.13 Spesifikasi Tangki

Spesifikasi	Karakteristik Tangki		
	HNO ₃ Tank	Demin Water Tank	Methanol Tank
Jenis	Closed Tank	Closed Tank	Closed Tank
Jumlah Unit	1	1	1
Kapasitas (m ³)	2,5	2,5	2,5
Bahan	SS-316	SS-316	SS-316

4.4 Estimasi Biaya

4.4.1 Perhitungan Total Capital Investment (TCI)

Tabel 4.14 *Cost of Fabricated Equipment*

Komponen Alat	C_{FE} (juta Rp)
Reaktor 30 unit	3600
Vessel H_2S Removal	672
Vessel H_2O Removal	672
Penukar Panas	140
Air Cooler	73,8
Tangki Penyimpanan 3 unit	504
TOTAL	5.661,8

Tabel 4.15 *Cost of Process Machinery*

Komponen Alat	C_{FE} (juta Rp)
Kompresor	32,4
Microwave	10
Ultrasonic Cleaner	60
Oven	10
TOTAL	112,4

Tabel 4.16 *Cost Spare*

Komponen Alat	C_{FE} (juta Rp)
Kompresor	32,4
Microwave	10
Ultrasonic Cleaner	60
Oven	10
TOTAL	112,4

Tabel 4.17 *Cost of Total Bare Module*

Komponen Biaya	(juta Rp)
C_{FE}	5.661,8
C_{PM}	112,4
C_{Spare}	112,4
$C_{Catalyst}$	120
TOTAL	6.006,6

Perhitungan komponen-komponen biaya pada Total Capital Investment dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. 18 *Cost of Total Capital Investment*

Komponen	Cost (Rp)			
Cost of Fabricated Equipment, (C_{FE})	5.661.924.600,00			
Cost of Process Machinery, (C_{PM})	112.400.000,00			
Cost of Spare, (C_{spare})	112.400.000,00			
Cost of Initial Catalyst Charge, ($C_{catalyst}$)	120.000.000,00			
Total bare module-investment (C_{TBM})		6.006.724.600,00		
Cost of site preparation, (C_{site})		1.201.344.920,00		
Cost of building, ($C_{building}$)		1.201.344.920,00		
Cost of service facilities, (C_{serv})		4.084.572.728,00		
Allocated costs for utility plants and related facilities, C_{alloc}		4.529.539.680,00		
Total of direct permanent investment, C_{DPI}			17.023.526.848,00	
Cost of contingencies and contractor's fee, C_{cont}			3.064.234.832,64	
Total depreciable capital, C_{TDC}				20.087.761.680,64
Cost of land, C_{land}				401.755.233,61
Cost of Royalties, C_{royal}				401.755.233,61
Cost of plant startup, $C_{start-up}$				2.611.409.018,48
Total permanent investment, C_{TPI}				23.502.681.166,35
Working capital, C_{WC}				2.350.268.116,63
Total capital investment, C_{TCI}				25.852.949.282,98

4.4.2 Perhitungan Biaya Operasional

4.4.2.1 Biaya Bahan Langsung

Biaya bahan langsung merupakan biaya bahan yang terpengaruh kapasitas produksi dan proses produksi. Dalam pabrik CNT ini ada lima bahan yang terlibat langsung dalam proses produksi yakni bahan baku berupa *sales gas*, katalis, larutan HNO₃, larutan NaOH dan larutan metanol dan oksigen sebagai bahan baku. Berikut ini adalah rincian biaya untuk bahan langsung:

Tabel 4.19 Biaya Bahan Langsung

Bahan Mentah	Harga/unit (Rp)	Kebutuhan (kg/hari)	Biaya/bulan (Rp)	Biaya/tahun (juta Rp)
Sales Gas	63.000/MMSCFD	45	1.890.000	22,68
Katalis Ni-Cu-Al	1.000.000/kg	4	120.000.000	1440
Larutan HNO ₃	9.000/kg	1	270.000	3,24
Larutan NaOH	5.000/kg	1	150.000	1,8
Larutan Metanol	10.000/L	5	1.500.000	18
Total				1485,72

Jadi, setelah dihitung maka didapatkan biaya bahan langsung (*direct material*) sebesar Rp1.485.720.000,00

4.4.2.2 Biaya Tenaga Kerja Langsung

Biaya tenaga kerja langsung adalah biaya atau gaji yang dibayarkan kepada orang-orang yang terlibat langsung di lapangan, seperti operator lapangan, laboran penginspeksi, dan sebagainya. Perincian biaya tenaga kerja langsung dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.20 Tenaga Kerja Langsung

Jabatan	Jumlah	Gaji setiap bulan (Rp)	Gaji total tiap bulan (Rp)
Engineer Produksi	5	9.000.000	45.000.000
Kepala Pabrik	3	8.000.000	24.000.000
Supervisor Produksi	5	5.000.000	25.000.000
Operator Produksi	20	4.000.000	80.000.000
Engineer Pemeliharaan	3	9.000.000	27.000.000
Supervisor Pemeliharaan	5	5.000.000	25.000.000
Operator Pemeliharaan	10	4.000.000	40.000.000
Engineer HSE	1	9.000.000	9.000.000
Total			275.000.000

4.4.2.3 Biaya Tenaga Kerja Tak Langsung

Biaya tenaga kerja tidak langsung adalah biaya untuk karyawan-karyawan yang bekerja di kantor atau tidak berhubungan secara langsung dengan proses produksi CNT. Untuk tenaga *plant service* seperti *cleaning service*, koki, dan *security* kami menggunakan jasa *outsourcing* dengan sistem kontrak.

Tabel 4.21 Biaya Tenaga Kerja Tidak Langsung

Jabatan	Jumlah	Gaji setiap bulan (Rp)	Gaji total tiap bulan (Rp)
Presiden Direktur	1	50.000.000	50.000.000
Direktur Operasional	1	35.000.000	35.000.000
Direktur SDM	1	35.000.000	35.000.000
Direktur Keuangan	1	35.000.000	35.000.000
Manajer Litbang	1	10.000.000	10.000.000
Staff Litbang	3	5.000.000	15.000.000
Manajer Inspeksi	1	12.000.000	12.000.000
Manajer HSE	1	15.000.000	15.000.000
Manajer Humas	1	10.000.000	10.000.000
Manajer Personalia	1	10.000.000	10.000.000
Staff Personalia	4	4.000.000	16.000.000
Manajer TI	1	12.000.000	12.000.000
Manajer Keuangan	1	15.000.000	15.000.000
Manajer Pemasaran	1	15.000.000	15.000.000
Total			285.000.000

Total biaya tenaga kerja tidak langsung adalah Rp285.000.000,00 dan ditambahkan dengan biaya *outsourcing* sebesar Rp50.000.000,00 menjadi Rp335.000.000,00/ bulan dan menjadi sekitar Rp 4 miliar/ tahun.

4.4.2.4 Biaya Bahan Tidak Langsung (Indirect Material)

Bahan tidak langsung mencakup semua material yang tidak terkait secara langsung dengan proses produksi CNT, seperti peralatan kantor, dsb. Diperkirakan biaya ini bernilai Rp570.300.000,00 per tahun.

4.4.2.5 Biaya Utilitas

Biaya utilitas merupakan biaya yang dapat menunjang proses produksi pabrik baik secara langsung seperti listrik untuk peralatan produksi pabrik maupun yang tidak terlibat langsung dengan proses produksi CNT seperti

penerangan kantor, jalan dan telpon yang digunakan di kantor. Tabel berikut ini, menjelaskan komponen biaya utilitas.

Tabel 4.22 Biaya Utilitas

Variabel	Fixed Cost (Rp)	Variabel Cost (Rp)
Listrik	70.000.000	180.000.000
Telpon	70.000.000	
Air		120.000.000

4.4.2.6 Biaya Asuransi

Berdasarkan buku Seider-Seader, estimasi untuk biaya asuransi adalah :

- Biaya Asuransi Kesehatan dan Keselamatan Kerja = 1% dari gaji pegawai
- Biaya Asuransi Alat Plant = 3% dari harga alat
- Biaya Asuransi Bangunan = 3% dari biaya konstruksi bangunan (C_{building})

Tabel 4.23 Biaya Asuransi

Jenis Asuransi	Persentase	dari	Biaya Total (Rp)
Biaya Asuransi K3	1%	Gaji pegawai	73.200.000,00
Biaya Asuransi Alat-alat Plant	3%	Harga Alat	169.857.738,00
Biaya Asuransi Bangunan	3%	Harga Bangunan	36.040.347,60
Total			73.200.000,00

4.4.2.7 Biaya Maintenance

Biaya maintenance bernilai 10% dari C_{TDC} , sehingga nilainya Rp2.008.776.168,06

4.4.2.8 Biaya Depresiasi

Biaya depresiasi merupakan biaya yang disebabkan oleh penggunaan properti sehingga berkurang nilai gunanya seiring dengan waktu. Depresiasi dihitung per alat dan tergantung dari nilai salvage value dan umur barang terdepresiasi dengan rumus sebagai berikut:

$$d_k = (B - SV_N) / N$$

Dengan d_k = depresiasi tahunan
 B = basis harga (investasi)
 N = umur terdepresiasi aset
 SV_N = nilai sisa yang diperkirakan pada akhir tahun ke- N

Total Biaya Depresiasi per tahun Rp933.508.733,75

4.4.2.9 Biaya Distribusi dan Pemasaran

Pada umumnya, biaya distribusi dan pemasaran bernilai 5% dari penjualan (berdasarkan buku Seider-Seader). Adapun penjualan dari produk adalah :

$$\begin{aligned} \text{Biaya Distribusi dan Pemasaran} &= 5\% \times \text{Rp}27.016.740.000,00 \\ &= \text{Rp}1.350.837.000,00 \end{aligned}$$

4.4.2.10 Biaya Administrasi

Berdasarkan buku Timmerhaus, pada umumnya biaya administrasi bernilai sekitar 20% dari gaji pekerja langsung. Biaya ini digunakan untuk kegiatan perijinan, surat-menyurat, dan biaya-biaya administrasi lainnya yang terkait dengan proses produksi dan penjualan CNT.

$$\text{Biaya administrasi} = 20\% \times \text{Rp}3.300.000.000,00 = \text{Rp}660.000.000,00 .$$

4.4.2.11 Biaya Pajak Lokal, Royalti, dan Paten

Berdasarkan buku Timmerhaus, estimasi dari biaya ini adalah :

- Biaya Pajak Lokal = 4% dari penjualan
- Biaya Royalti = 3% dari biaya depresiasi total
- Biaya Paten = 3% dari biaya penjualan

Tabel 4.24 Biaya Pajak Lokal dan Paten

Jenis Biaya	Persentase	dari	Biaya Total (Rp)
Biaya Pajak Lokal	4%	C_{TPI}	873.764.174,79
Biaya Royalti	3%	Biaya Depresiasi total	560.105.240,25
Biaya Paten	3%	Penjualan	810.502.200,00
Total			2.244.371.615,04

4.4.2.12 Biaya Pinjaman dan Bunga

Biaya bunga pinjaman adalah biaya yang dibayarkan setiap tahun kepada bank yang memberikan pinjaman. Dalam memperoleh dana untuk biaya investasi, pabrik ini meminjam kepada bank sebesar 40% dari biaya investasi. Tingkat suku bunga yang digunakan adalah 15% dengan lama pinjaman 20 tahun sehingga besar bunga pinjaman adalah

$$\begin{aligned} \text{Biaya pinjaman dan bunga} &= 30\% \times \text{Rp}24.028.514.806,78 \times \left(\frac{A}{P}, 15\%, 20 \right) \\ &= \text{Rp}1.151.649.257,12 \end{aligned}$$

4.5 Capital Budgeting

Setelah mempertimbangkan umur kelayakan dari pabrik, diputuskan umur pabrik kami yaitu 20 tahun. Nilai investasi dari pabrik yaitu sebesar Rp24.028.514.806,78. Untuk dapat mendirikan pabrik CNT ini, dibutuhkan pinjaman dari bank sebesar 30% dari investasi atau sebesar Rp7.755.884.784,90 dengan bunga pinjaman sebesar 15%. Sisanya sebesar 70% dari investasi merupakan biaya mandiri dari investor.

Tabel 4. 25 Capital budgeting

	Composition	Amount (Rp)
Pinjaman Bank	30%	7.204.558.442,04
Modal Patungan	70%	16.819.960.364,74
Total	100%	24.028.514.806,78

4.6 Cost Breakdown

Untuk menentukan *cost breakdown*, kami melihat biaya produksi dalam 1 kg CNT terdiri dari biaya investasi, dan biaya operasional:

1. Biaya investasi

Total investasi selama 20 tahun adalah Rp24.028.514.806,78. Untuk mengubah biaya investasi menjadi CAPEX, digunakan A/P untuk investasi selama 20 tahun sebesar 0,2053565307 dan akan diperoleh (dengan MARR 20%):

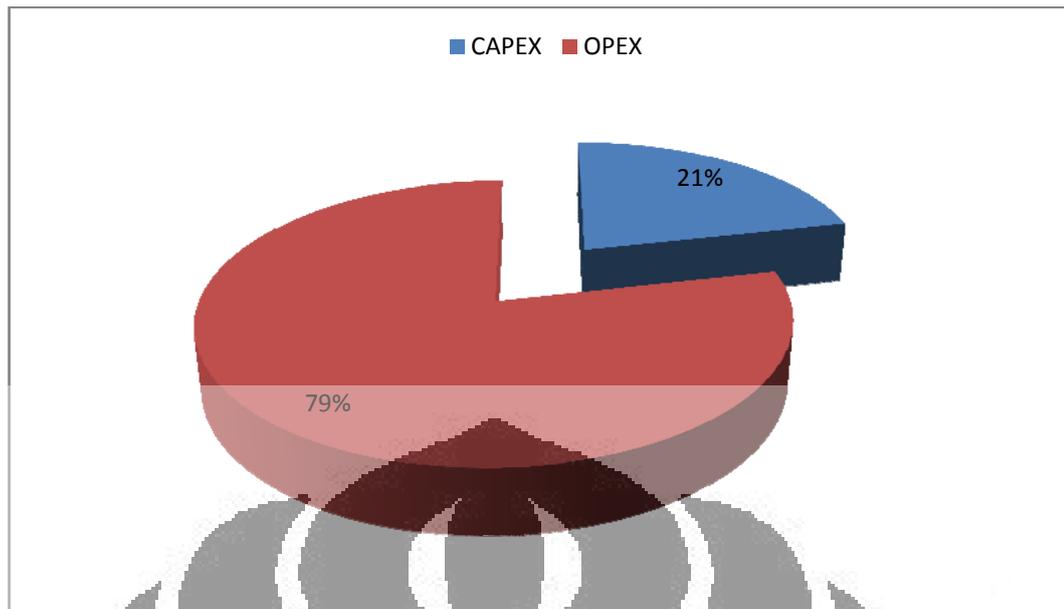
$$\begin{aligned} \text{Investasi per tahun} &= \text{Rp}24.028.514.806,78 \times 0,2053565307 \\ &= \text{Rp}4.934.412.438,59 \text{ per tahun} \end{aligned}$$

$$\frac{\text{Investasi per tahun}}{\text{kapasitas produksi per tahun}} = \frac{\text{Rp}4.934.412.438,59}{10000 \text{ kg}} = \text{Rp}493.441,24/ \text{kg}$$

2. Biaya operasional

$$\frac{\text{Biaya operasional per tahun}}{\text{kapasitas produksi per tahun}} = \frac{\text{Rp}18.049.530.425,06}{10000 \text{ kg}} = \text{Rp}1.804.953,04/ \text{kg}$$

Untuk lebih jelasnya, dapat kita lihat pada Gambar 4.4 di bawah ini:



Gambar 4.5 *Cost Breakdown* untuk Produksi CNT

Dari gambar diatas, terlihat bahwa beban terbesar yang ditanggung oleh harga produksi 1 kg CNT adalah berasal dari biaya operasional, yaitu sebesar 79% dari total biaya produksi keseluruhan.

4.7 Aliran Kas Bersih

Aliran kas bersih merupakan gabungan dari pendapatan dan pengeluaran per tahun hingga menghasilkan nilai tertentu yang dapat berupa keuntungan ataupun kerugian bagi pabrik itu sendiri. Dalam membuat *cash flow*, digunakan MARR 20%, tingkat pajak pendapatan 28%, umur manfaat pabrik 20 tahun, dan CNT dijual dengan harga US\$300/kg.

Tabel 4.26 Aliran Kas Bersih (dalam Rp)

Akhir periode	Pengeluaran	Pendapatan	BTCF	Depresiasi	Taxable Income	Pajak	ATCF	Cumulative PW (0%)	Cumulative PW (MARR)
0	24.028.514.806,78	0,00	(24.028.514.806,78)	0,00	0,00	0,00	(24.028.514.806,78)	(24.028.514.806,78)	(24.028.514.806,78)
1	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	(18.244.250.201,27)	(19.208.294.302,19)
2	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	(12.459.985.595,76)	(15.191.443.881,69)
3	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	(6.675.720.990,25)	(11.844.068.531,29)
4	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	(891.456.384,74)	(9.054.589.072,61)
5	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	4.892.808.220,76	(6.730.022.857,05)
6	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	10.677.072.826,27	(4.792.884.344,08)
7	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	16.461.337.431,78	(3.178.602.249,94)
8	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	22.245.602.037,29	(1.833.367.171,49)
9	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	28.029.866.642,80	(712.337.939,45)
10	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	33.814.131.248,30	221.853.087,26
11	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	39.598.395.853,81	1.000.345.609,51
12	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	45.382.660.459,32	1.649.089.378,05
13	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	51.166.925.064,83	2.189.709.185,17
14	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	56.951.189.670,34	2.640.225.691,10
15	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	62.735.454.275,84	3.015.656.112,71
16	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	68.519.718.881,35	3.328.514.797,39
17	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	74.303.983.486,86	3.589.230.367,95
18	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	80.088.248.092,37	3.806.493.343,42
19	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	85.872.512.697,88	3.987.545.822,98
20	18.049.530.425,26	27.016.740.000,00	8.967.209.574,74	933.508.733,75	8.033.700.840,98	2.249.436.235,48	5.784.264.605,51	91.656.777.303,38	4.138.422.889,27

Dari aliran kas tersebut, dapat diperoleh:

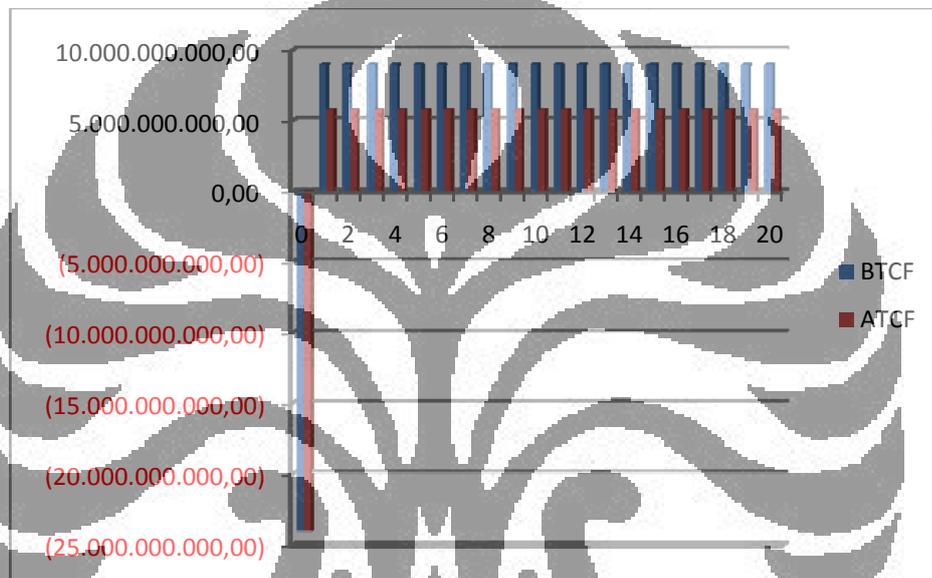
NPV = Rp4.138.422.889,27

IRR = 23,73%

Pay Back Period = 9,12 tahun

$$ROI = \frac{ATCF}{C_{TCI}} = \frac{Rp5.784.264.605,51}{Rp24.028.514.806,78} = 0,334$$

Berikut merupakan grafik aliran kas yang didapat berdasarkan hasil perhitungan.



Gambar 4.6 Aliran Kas sebelum dan Setelah Pajak.

4.8 Break Even Point (BEP)

Break Even Point (BEP) adalah suatu titik dimana biaya total produksi sama dengan total pendapatan yang diperoleh. BEP bisa juga disebut titik impas. BEP ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas minimal yang diperlukan agar total pendapatan dapat menutupi biaya total produksi. Margin kontribusi adalah selisih dari pendapatan yang dihasilkan dengan total biaya yang harus dikeluarkan selama satu tahun.

Nilai Break Even Quantity dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Q_{BE} = \frac{FC}{(p - v)}$$

Dengan:

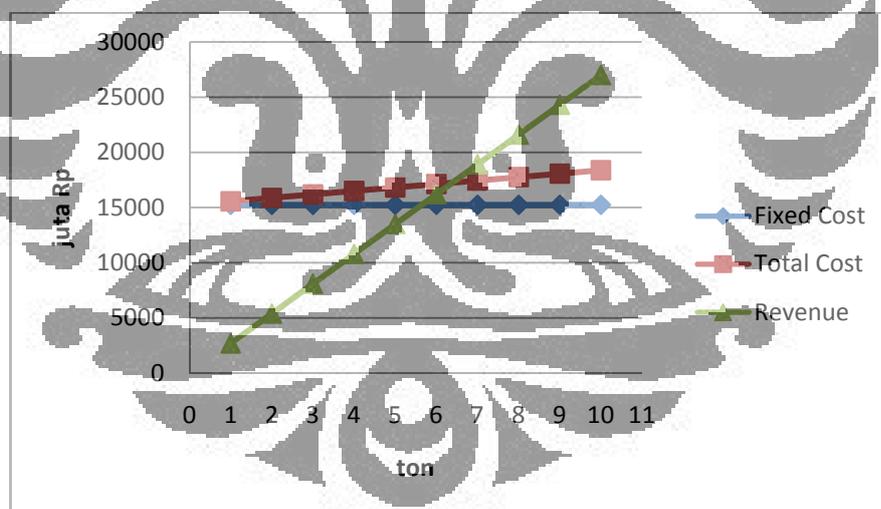
Q_{BE} = Break even quantity (kg)
 FC = Fixed Cost
 P = Harga per kg
 V = variable cost per kg

$$Q_{BE} = \frac{FC}{(p-v)} = \frac{Rp14.912.973.425,26}{(Rp2.700.000,00 - Rp313.461,35)} = 0,6386 = 62,45\%$$

Perhitungan break even quantity dilakukan dengan menggunakan asumsi:

- Tidak ada stock (jumlah produksi = jumlah penjualan)
- Harga tidak berubah
- Biaya produksi tidak berubah

Perhitungan *break even quantity* merupakan target jangka pendek dan bukan untuk jangka panjang. Jadi, nilai Q_{BE} terhadap kapasitas normal adalah 63,86% sehingga titik impas dapat tercapai. Hal ini dapat dilihat pada grafik berikut, dimana pada titik tersebut terjadi perpotongan antara *revenue* dan *total cost*.



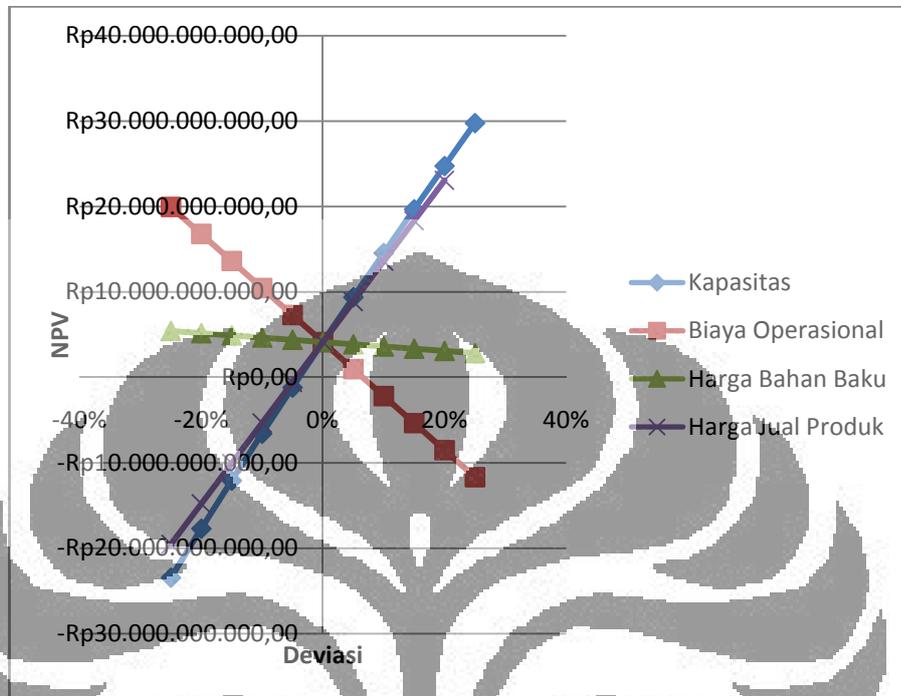
Gambar 4.7 Break Even Point

4.8 Analisis Sensitivitas

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa kapasitas produksi, harga jual produk dan biaya operasional sangat berpengaruh terhadap parameter-parameter keekonomian seperti NPV, IRR, dan Payback Periode. Sedangkan, faktor harga bahan baku tidak terlalu mempengaruhi parameter keekonomian tersebut. Gambar-gambar di bawah ini menunjukkan pengaruh sensitivitas

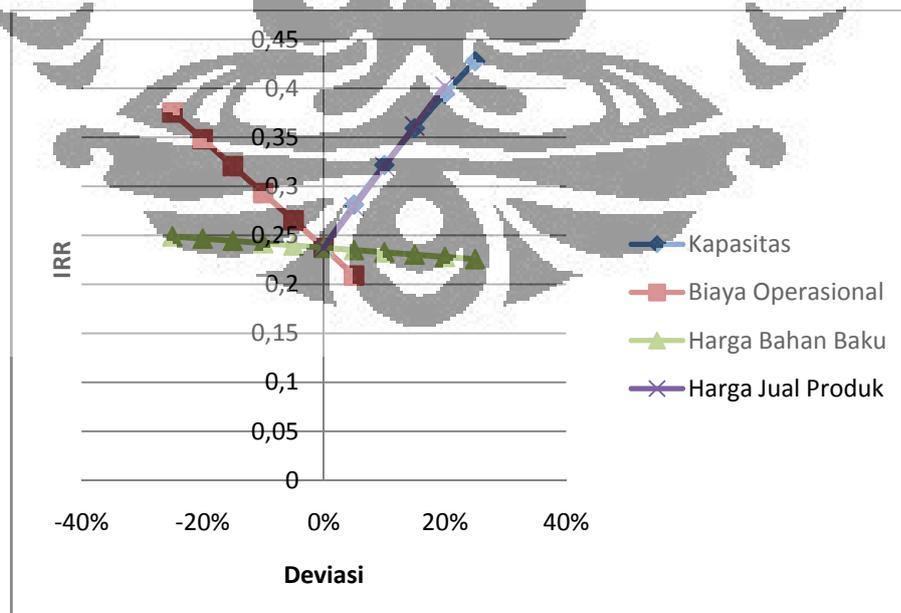
terhadap kapasitas, harga bahan baku, biaya operasional dan harga jual produk terhadap NPV, IRR, dan *Payback Periode*.

a. Pengaruh Sensitivitas terhadap NPV



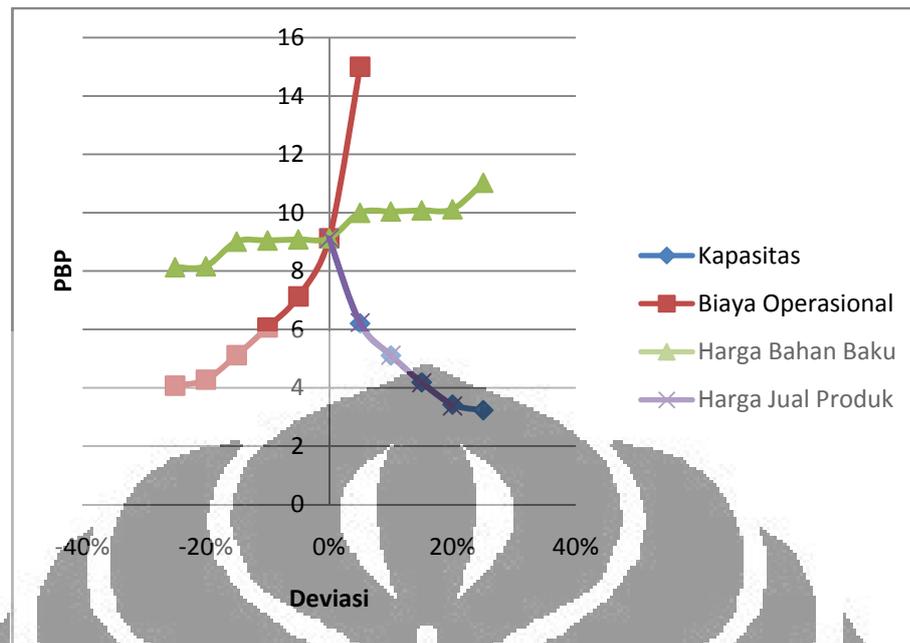
Gambar 4.8 Sensitivitas terhadap NPV

b. Pengaruh Sensitivitas terhadap IRR



Gambar 4.9 Sensitivitas Terhadap IRR

c. Pengaruh Sensitivitas terhadap *Payback periode*



Gambar 4.10 Sensitivitas terhadap Payback Periode

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- Produk utama yang dihasilkan pabrik ini adalah CNT dan juga gas hidrogen dengan kapasitas produksi CNT tiap harinya sebesar 30 kg dan gas hidrogen sebanyak 16 kg.
- Lokasi pabrik berada di kawasan Depok karena pertimbangan dekat dengan bahan baku dan daerah pemasaran.
- Pabrik CNT ini terdiri dari beberapa unit proses, yaitu unit *H₂S removal* dan *H₂O removal* untuk *pretreatment* umpan, reaktor sebagai alat utama penghasil CNT dan yang terakhir adalah unit pemurnian CNT.
- Efisiensi pabrik untuk mengolah dari bahan baku menjadi produk adalah 93%, dengan tingkat efisiensi energi 25%.
- Total biaya investasi untuk pabrik ini adalah kurang lebih sebesar Rp 24 milyar dengan biaya operasi pertahunnya adalah Rp 18 milyar.
- Dari hasil analisis didapatkan $NPV = \text{Rp}4.138.422.889,27$, $IRR = 23,73\%$, $Pay\ Back\ Period = 9,12$ tahun. Artinya pabrik ini ekonomis dan menarik untuk didirikan.

5.2 Saran

Pabrik ini berpotensi untuk direalisasikan karena memenuhi kelayakan ditinjau dari segi teknis dan ekonomi. Di samping itu, produk yang dihasilkan memiliki nilai jual yang tinggi serta potensi pemanfaatan yang besar di masa yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. Nanoteknologi. (2008) [diakses pada 10 November 2010]. Tersedia di:<http://www.kompas.com/index.php/read/xml/2008/05/17/15584879/na-noteknologi.dbd>.
- Daenan M, de Fouw RD, Hamers B, Janssen PGA, Schouteden K, Veld MAJ. (2003). *Wondrous World of Carbon Nanotubes*. Eindhoven University of Technology.
- Grujicic M, Cao G, Gersten B. (2002). *An Atomic-Scale Analysis of Catalytically-Assisted Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes*. *Materials Science and Engineering*, B94: 247-259.
- Ijima, S. (2002). *Carbon Nanotubes: Past Present and Future*. *Physica B*, 323, 1-5.
- Kónya, Z. (2000). *NATO-ASI Carbon Filaments and Nanotubes: (Eds.: Biró, L.P., Bernardo, C.A., Tibbetts, G.G., Lambin, Ph.): Carbon Filaments and Nanotubes: Common Origins, Differing Applications*, Chapter VI, 85. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Muharam Y., Purwanto W.W., Afianty A. (2007). *Uji kinerja reaktor katalitik terstruktur untuk reaksi dekomposisi katalitik metana*. Laporan Riset Departemen Teknik Kimia UI.
- Oliver, Jhon D. (2010). *Global Nanotechnology Market Reports*. (diakses 19 November 2010) <http://www.marketresearch.com/product/display.asp?productid=1005860&g=1>
- Paramitha, Shantya S. (2009). *Aplikasi Pengadukan Ultrasonik dan Pemanasan Microwave untuk Memurnikan Karbon Nanotube yang Disintesis dengan Metode Dekomposisi Katalitik Metana*. Skripsi. Departemen Teknik Kimia FTUI

- Peter, M.S. and K.D. Timmerhaus. (1991). *Plant Design and Economic for Chemical Engineering 4th edition*. USA: McGraw Hill.
- Slamet. (2006). *Diktat Kuliah Pengolahan Gas*. Departemen Teknik Kimia FTUI
- Sutopo, Francy. (2009). *Scale-up Reaktor Katalis Terstruktur Gauze Skala Pilot untuk Produksi Hidrogen dan Nanokarbon Melalui Reaksi Dekomposisi Katalitik Metana*. Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Yulianti, Dwi. (2009). Pengaruh *space time*, temperatur, dan rasio umpan terhadap kinerja reaktor *gauze* untuk produksi hidrogen dan nanokarbon melalui reaksi dekomposisi metana. Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Yulianti, Ira (2008). Perancangan Reaktor Katalis Terstruktur untuk Produksi Karbon Nanotube dan Hidrogen melalui Proses Dekomposisi Katalitik Metana. Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Wijaya, Felani. (2008). *Pengaruh Perlakuan Ultrasonik pada Preatrasi Katalis Ni-Cu-Al₂O₃ dengan Metode Koprinsipitasi Terhadap Kualitas Karbon Nanotube pada Reaksi Dekomposisi Katalitik Metana*. Skripsi. Departemen Teknik Kimia FTUI
- Wikipedia, the free encyclopedia. (2009). *Methane Decomposition Reaction*. 17 November 2010. en.wikipedia.org/methane.

LAMPIRAN

Scale-up Diameter Reaktor

$$s = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{\pi}{4} D_2^2 L_2}{\frac{\pi}{4} D_1^2 L_1}$$

Apabila kita substitusikan persamaan *geometric similarity*,

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{D_2}{D_1}$$
$$s = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{\pi}{4} D_2^2 L_2}{\frac{\pi}{4} D_1^2 L_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3$$

Sehingga didapatkan:

$$\frac{D_2}{D_1} = S^{1/3}$$

Scale-up Bilangan Reynold

Dengan menggunakan persamaan

$$Q = AV$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$

Maka didapatkan *scale-up* untuk Re adalah:

$$\frac{\text{Re}_2}{\text{Re}_1} = \frac{\frac{\rho v_2 D_2}{\mu}}{\frac{\rho v_1 D_1}{\mu}} = \frac{v_2 D_2}{v_1 D_1} = \frac{\frac{Q_2}{A_2} \cdot D_2}{\frac{Q_1}{A_1} \cdot D_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot \frac{\frac{\pi}{4} D_1^2}{\frac{\pi}{4} D_2^2} \cdot \frac{D_2}{D_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot \frac{D_1}{D_2} = S \cdot S^{-1/3} = S^{2/3}$$

Scale-up Koefisien Perpindahan Panas

Korelasi yang umum digunakan untuk koefisien perpindahan panas di dalam reaktor untuk aliran laminar dan nilai $Gz < 75$ adalah:

$$\frac{h.D}{\lambda} = 1.86 Gz^{1/3} \left(\frac{\mu_{bulk}}{\mu_{wall}} \right)^{0.14}$$

Dengan:

$$Pr = \frac{Cp\mu}{\lambda}, \quad Re = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad Gz = \frac{Re.Pr.D}{L}$$

Penurunan rumus *scale-up factor* untuk h adalah:

$$\frac{\frac{h_2.D_2}{\lambda} = 1.86 Gz_2^{1/3} \left(\frac{\mu_{bulk}}{\mu_{wall}} \right)^{0.14}}{\frac{h_1.D_1}{\lambda} = 1.86 Gz_1^{1/3} \left(\frac{\mu_{bulk}}{\mu_{wall}} \right)^{0.14}}$$

$$\frac{\frac{h_2.D_2}{\lambda} = 1.86 \left(\frac{Re_2.Pr.D_2}{L_2} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{bulk}}{\mu_{wall}} \right)^{0.14}}{\frac{h_1.D_1}{\lambda} = 1.86 \left(\frac{Re_1.Pr.D_1}{L_1} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{bulk}}{\mu_{wall}} \right)^{0.14}}$$

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1.86 (Pr)^{1/3} \left(\frac{\mu_{bulk}}{\mu_{wall}} \right)^{0.14} \cdot \lambda \left(\frac{Re_2}{Re_1} \right)^{1/3} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{1/3} \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^{1/3} \frac{D_1}{D_2}}{1.86 (Pr)^{1/3} \left(\frac{\mu_{bulk}}{\mu_{wall}} \right)^{0.14} \cdot \lambda}$$

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(S^{2/3} \right)^{1/3} \left(S^{1/3} \right)^{1/3} \left(S^{-1/3} \right)^{1/3} \cdot S^{-1/3}$$

$$\frac{h_2}{h_1} = S^{-1/9}$$

Scale-up ΔP

Untuk aliran laminar, berlaku Hukum Poiseuille:

$$\Delta P = \frac{8\mu v L}{R^2}$$

Sehingga,

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \frac{\frac{8\mu\vartheta_2 L_2}{R_2^2}}{\frac{8\mu\vartheta_1 L_1}{R_1^2}}$$

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \frac{\frac{\vartheta_2 L_2}{R_2^2}}{\frac{\vartheta_1 L_1}{R_1^2}}$$

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \frac{\frac{Q_2}{A_2} L_2 R_1^2}{\frac{Q_1}{A_1} L_1 R_2^2}$$

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \frac{\frac{Q_2}{\pi R_2^2} L_2 R_1^2}{\frac{Q_1}{\pi R_1^2} L_1 R_2^2}$$

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \frac{Q_2 L_2 R_1^4}{Q_1 L_1 R_2^4}$$

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = S \cdot S^{1/3} \cdot S^{-4/3}$$

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = S^0$$

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = 1$$

Scale-up A_{ext}

Untuk reaktor tubular, A_{ext} merupakan luas selimut reaktor, yaitu:

$$A_{\text{ext}} = \pi D L$$

Sehingga perbandingannya menjadi:

$$\frac{A_{\text{ext},2}}{A_{\text{ext},1}} = \frac{\pi D_2 L_2}{\pi D_1 L_1} = S^{1/3} \cdot S^{1/3} = S^{2/3}$$

SIZING PERALATAN

Reaktor

1. Data Reaktor Skala Pilot (Sutopo, 2009)

Dari data reaktor skala laboratorium, diperoleh data:

Diameter reaktor $\rightarrow D_1 = 8 \text{ cm}$

Panjang reaktor $\rightarrow L_1 = 32 \text{ cm}$

Laju alir metana $\rightarrow Q_1 = 140 \text{ L/h}$

Diameter *wire* $\rightarrow d_{wl} = 0,65 \text{ mm}$

Separating gap (jarak antara 2 *wire sheet*) = 1,89 mm

Meshes/inch = 10

Kapasitas produksi = 1000 gr/day

2. Menghitung *Scale-up* Rasio

Kita akan melakukan *scale-up* reaktor skala pilot (1) menjadi skala komersial (2) dengan kapasitas produksi 2000 gr/day. Kita dapat menghitung *scale-up* rasio, yaitu:

$$S = \frac{\text{kapasitas produksi reaktor skala komersial}}{\text{kapasitas produksi reaktor skala pilot}}$$

$$S = \frac{2000 \text{ gr/day}}{1000 \text{ gr/day}} = 2$$

3. Menghitung Diameter dan Panjang Reaktor

Menghitung diameter dan panjang efektif reaktor skala pilot (L_2 dan D_2) dengan prinsip *geometric similarity* [Nauman, 2001]:

$$\frac{D_2}{D_1} = S^{1/3}$$

$$D_2 = D_1 \times S^{1/3} = 8 \text{ cm} \times 2^{1/3} = 10 \text{ cm}$$

$$\frac{L}{D} = 10$$

$$D = L \times 10 = 10 \text{ cm} \times 10 = 100 \text{ cm}$$

Jadi, diameter dan panjang reaktor skala komersial adalah 10 cm dan 100 cm.

4. Menghitung diameter *wire*

Selanjutnya, kita akan menghitung diameter *wire* reaktor skala pilot (d_{w2}) dari perbandingan nilai Reynold. Dari Nauman, 2001, dinyatakan bahwa untuk *geometric similarity* berlaku $Re_2/Re_1 = S^{2/3}$.

Perbandingan bilangan Reynold:

$$\frac{Re_2}{Re_1} = \frac{\frac{\rho v_2 d_{w2}}{\mu}}{\frac{\rho v_1 d_{w1}}{\mu}}$$

Dimana:

- ρ = densitas massa
- z = jarak antara dua *wire*
- d_{w1} = diameter *wire* reaktor 1 (skala *lab*) = 1 mm
- d_{w2} = diameter *wire* reaktor 2 (skala pilot)
- v = kecepatan superficial fluida (metana) = Q/A
- Q = laju alir volumetrik metana
- A = luas spesifik (= $1/4 \pi D^2$)
- D = diameter efektif reaktor (katalis)
- μ = viskositas

Oleh karena sifat fisik fluida pada reaktor 1 dan 2 diasumsikan sama, maka:

$$\frac{Re_2}{Re_1} = \frac{\frac{\rho v_2 z_2}{\mu}}{\frac{\rho v_1 z_1}{\mu}}$$

$$\frac{Re_2}{Re_1} = \left(\frac{\frac{Q_2}{\frac{1}{4} \pi D_2^2}}{\frac{Q_1}{\frac{1}{4} \pi D_1^2}} \right) \left(\frac{z_2}{z_1} \right)$$

$$\frac{Re_2}{Re_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)$$

$$S^{2/3} = S \cdot (S^{-1/3})^2 \left(\frac{z_2}{1 \text{ mm}} \right)$$

$$S^{1/3} = \frac{z_2}{1 \text{ mm}}$$

$$2^{1/3} = \frac{z_2}{1,89 \text{ mm}}$$

$$z_2 = 2,4 \text{ mm}$$

Untuk menyesuaikan dengan *wiremesh* yang dijual, maka digunakan wiremesh dengan spesifikasi sbb:

$$z_2 = 2,4 \text{ mm}$$

$$d_w = 0,65 \text{ mm}$$

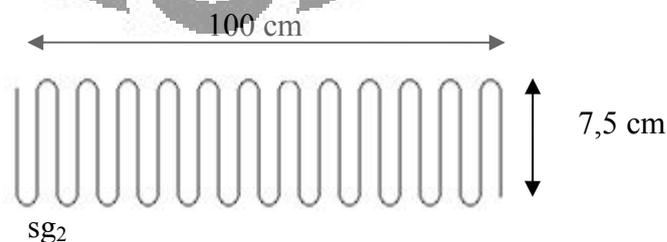
$$\text{mesh/inch} = 10 \times 10$$

5.1 Menghitung luas katalis 2

Luas katalis 2 diperoleh dengan menggunakan nilai W/F yang memberikan konversi sebesar 90%, nilai W/F adalah sebesar adalah 0,006 gr min/mL. Dengan laju alir sebesar 280 L/h, dibutuhkan katalis seberat 28 gr. Loading katalis untuk setiap cm² luasan reaktor gauze adalah sebesar 0,0011 gr/cm² Sehingga dibutuhkan luasan permukaan katalis 2 sebesar 25454,54 cm²

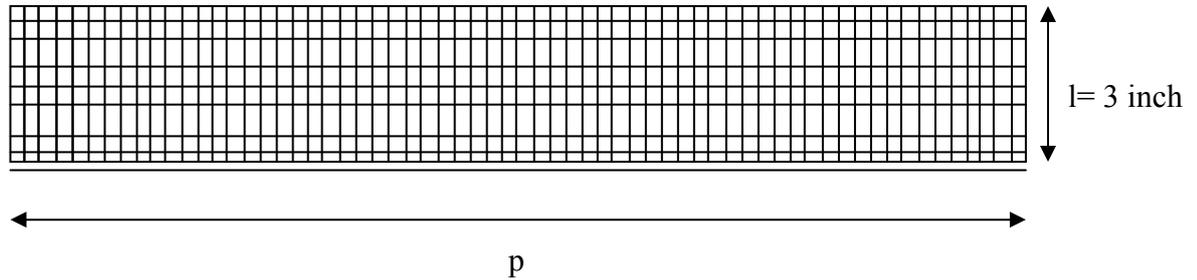
6. Menghitung *wire sheet* (n_2), *separating gap*, dan panjang *wire* yang diperlukan untuk reaktor 2

Bila *separating gap* reaktor 2 = sg_2 , maka ukuran katalis terstrukturnya menjadi:



dengan: $sg_2 \times (n_2 - 1) = 640 \text{ mm}$ sehingga $sg_2 = \frac{1000 \text{ mm}}{n_2 - 1}$

Bila katalis tersebut dibentangkan, maka akan menjadi:



Selanjutnya kita akan menghitung *meshes*/inch untuk reaktor 2, yaitu:

Dengan jumlah *meshes*/inch = 10, maka kita dapat menghitung jumlah *meshes*:

$$\begin{aligned}
 p &= p \text{ mm} = p/25,4 \text{ inch} \\
 \rightarrow \text{meshes} &= (p/25,4) \text{ inch} \times 10 \text{ meshes/inch} \\
 &= 0,394p \text{ meshes} \\
 l &= 3 \text{ inch} = 7,62 \text{ cm} \\
 \rightarrow \text{meshes} &= 3 \text{ inch} \times 10 \text{ meshes/inch} = 30 \text{ meshes}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A &= \text{luas permukaan wire} \\
 2545454,54 &= 21 (2\pi(0,65/2)^2 + \pi \cdot 0,65 \cdot p) + (0,394p+1)(2\pi(0,65/2)^2 + \pi \cdot 0,65 \cdot 76,2) \\
 2545454,54 &= 13,937 + 42,883 p + 41,133p + 155,603 \\
 2545285,00 &= 84,016 p \\
 p &= 30294,159 \approx 30300
 \end{aligned}$$

Jadi, panjang *wire mesh* = 30300 mm.

Selanjutnya, kita dapat menghitung n_2 dan sg_2 , yaitu:

$$\begin{aligned}
 p &= (n_2 \times l) + (sg_2 \times (n_2 - 1)) \\
 30300 \text{ mm} &= (n_2 \times 76,2 \text{ mm}) + \left(\frac{640 \text{ mm}}{n_2 - 1} \times (n_2 - 1)\right) \\
 30300 \text{ mm} &= 76,2 n_2 \text{ mm} + 640 \text{ mm} \\
 n_2 &= 384,51 \approx 385
 \end{aligned}$$

sehingga,

$$\begin{aligned}
 sg_2 &= \frac{1000 \text{ mm}}{n_2 - 1} \\
 &= 2,65 \text{ mm} \approx 2,7 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Jadi, jumlah *wire sheet* reaktor 2 = 385 dengan *separating gap* = 2,7 mm.

$$\begin{aligned}
 \text{Total katalis yang dibutuhkan} &= A_2 \times \text{loading katalis} \\
 &= 25454,54 \text{ cm}^2 \times 0,001099 \text{ gr katalis/cm}^2 \\
 &= 28 \text{ gr katalis}
 \end{aligned}$$

$$\text{Nilai W/F} = 28 \text{ gr} \times 60 \text{ min} / 280000 \text{ ml} = 0,006 \text{ gr min} / \text{mL}$$

H₂S Removal

Diketahui:

$$Q_g \text{ (MMSCFD)} = 0,002$$

$$P \text{ (psig)} = 50$$

$$T \text{ (Rankine)} = (100^\circ\text{F}+460) = 560 \text{ R}$$

$$X_{AG} \text{ (ppm)} = 30$$

$$Z = 0,99 \text{ (dari perhitungan dengan metode gas asam)}$$

$$SG = 0,0034 \text{ (dari perhitungan dengan metode gas asam)}$$

Prosedur perhitungan:

1. Diameter minimum:

$$d_m^2 \text{ (in}^2\text{)} = 360 \frac{Q_g TZ}{P}$$

dimana,

Q_g (MMSCFD) = laju alir gas

P (psig) = tekanan operasi

T (Rankine) = temperatur operasi

Z = faktor kompresibilitas gas

$$d_m^2 \text{ (in}^2\text{)} = 360 \frac{0,002(560)(0,99)}{50} = 7,98 \text{ in}^2$$

$$d_m \text{ (in)} = 2,825 \text{ in}$$

Sedangkan diameter maksimum untuk menghindari *channeling*:

$$d_{max}^2 \text{ (in}^2\text{)} = 1800 \frac{Q_g TZ}{P}$$

$$d_{max}^2 \text{ (in}^2\text{)} = 1800 \frac{0,002(560)(0,99)}{50} = 39,92 \text{ in}^2$$

$$d_{max} \text{ (in)} = 6,318 \text{ in}$$

Diameter yang dipilih adalah 4,572 inchi (0,116 m).

2. Hitung konsumsi harian *iron sponge* (R , ft³/hari):

$$R = 0.00133Q_g (X_{AG})$$

dimana,

X_{AG} (ppm) = konsentrasi inlet H₂S

$$R=0,00133(0,002)(30)=8 \times 10^{-5} \frac{\text{ft}^3}{\text{hari}}$$

3. Tinggi unggun yang dikehendaki, 1 ft untuk operasi bertekanan rendah.

Maka volume unggun (V):

$$V(\text{ft}^3)=0.7854D^2L$$

$$V(\text{ft}^3)=0.7854(0,381)^2(1)=0,144 \text{ ft}^3$$

$$\text{umur unggun}=\frac{0,144}{8 \times 10^{-5}}=1428 \text{ hari}=4 \text{ tahun}$$

4. Tebal *Shell*

$$t=\frac{pr_i}{fE-0,6p}+c$$

dengan:

t = ketebalan minimum shell (in);

p = tekanan disain atau tekanan maksimum yang diperbolehkan (psi);

E = efisiensi sambungan las;

f = stress maksimum yang diperbolehkan (psi);

r_i = radius dalam shell (in);

c = *corrosion allowance* (in).

$$t=\frac{(64,68)(2,286)}{(12.650)(0,8)-0,6(64,68)}+0,15$$

$$t=0,16 \text{ in}$$

5. Faktor ketebalan untuk *corrosion allowance*:

$$W=\frac{1}{4}\left(3+\sqrt{r_c/r_1}\right)$$

dimana:

W = faktor ketebalan untuk *corrosion allowance*;

r_c = jari-jari dalam *dish* (in);

r_1 = jari-jari *knuckle* (in).

Asumsi: $\sqrt{r_c/r_1}=10$

$$W=\frac{1}{4}\left(3+\sqrt{10}\right)=1,54$$

6. Tebal head:

$$t = \frac{pr_c W}{2fE - 0,2P}$$

dimana:

t = ketebalan minimum *head* (in);

P = tekanan disain atau tekanan maksimum yang diperbolehkan (psi);

E = efisiensi sambungan las;

f = stress maksimum yang diperbolehkan (psi);

r_c = jari-jari dalam *dish* (in).

$$t = \frac{(64,68)(2,286)(1,54)}{2(12.650)(0,8) - 0,2(64,68)}$$

$$t = 0,011 \text{ in}$$

H₂O Removal

Diketahui:

Temperatur = 37,8 °C

Tekanan = 445,8 kPa (4,5 bar)

Laju molar = $9,991 \times 10^{-2}$ (0,002 MMSCFD)

Laju massa = 2,651 kg/h

Prosedur Perhitungan:

1. Pengumpulan data yang diperlukan dalam perancangan

Laju volumetrik umpan (Q_u) = 0,567 m³/h

Kapasitas desain (dinaikkan 10 %) = 0,624 m³/h = 0,0001733 m³/s

Fraksi massa H₂O pada aliran umpan = 0,005

Densitas *bulk* adsorben = 720 kg/m³

Fraksi kosong *molecular sieve* pellet (ϵ) = 0,34

kecepatan fraksi linear rancangan = 0,001 m/s

2. Perhitungan dimensi adsorber

Waktu adsorpsi = 24 jam

Luas penampang kolom adsorpsi =

$$A = \frac{Q_u}{v} = \frac{1,73 \times 10^{-4}}{0,001} = 0,173 \text{ m}^2$$

Laju massa H₂O = 0,009 kg/h

Jumlah H₂O yang teradsorpsi = 0,225 kg/day

Kemampuan adsorpsi *molecular sieve* = 0,7 kg H₂O/kg adsorben

Kebutuhan adsorben =

$$\frac{0,225}{0,7} = 0,321 \text{ kg}$$

Volume *molecular sieve* (V_a) =

$$\frac{0,321}{720} = 4,47 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Volume adsorben total (V_t) =

$$\frac{1}{(1-\epsilon)} \times V_a = \frac{1}{(1-0,34)} \times 4,47 \times 10^{-4} = 6,77 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Diameter adsorber (D) =

$$\sqrt[3]{\frac{V_t}{\frac{1}{4} \times 4 \times \pi}} = \sqrt[3]{\frac{6,77 \times 10^{-4}}{\frac{1}{4} \times 4 \times \pi}} = 6,78 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Tinggi adsorber (L) = 4 x D = 0,272 m

Tinggi adsorber total = L + 2 x tinggi tutup = 0,292 m

3. Penentuan ketebalan adsorber

Penentuan ketebalan adsorber dilakukan melalui persamaan berikut

$$P_{\text{desain}} = P_{\text{operasi}} + 10\% P_{\text{operasi}} = 4,5 \text{ bar} + 10\% \times 4,5 \text{ bar} = 4,95 \text{ bar}$$

$$P_{\text{desain gauge}} = P_{\text{desain}} - P_{\text{atm}} = 4,95 \text{ bar} \times 14,7 \frac{\text{psi}}{\text{bar}} - 14,7 \text{ psi} = 58,065 \text{ psig}$$

$$\text{Joint efficiency } (\eta) = 0,8$$

$$\text{Tensile strength } (\bar{\sigma}) = 57289,91 \text{ psi}$$

$$\text{Jari-jari dalam adsorber } (R_1) = 3,37 \times 10^{-2} \text{ m} = 1,33 \text{ in}$$

$$A = \frac{\sigma \eta + p}{\sigma \eta - p} = \frac{(57289,91 \times 0,8) + 58,065}{(57289,91 \times 0,8) - 58,065} = 1,0025$$

$$\text{Corrosion allowance} = 2 \text{ mm} = 0,079 \text{ in}$$

$$\begin{aligned} \text{Tebal adsorber } (t) &= ((A^{0,5} - 1) \times R_1) + C = ((1,0025^{0,5} - 1) \times 1,33 \text{ in}) + 0,079 \\ &= 0,08 \text{ in} = 0,2 \text{ cm} \end{aligned}$$

4. Penentuan ketebalan head

Tipe head yang digunakan adalah *torispherical dishes head*. Ketebalan *head* dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini.

$$t = \frac{pr_c W}{2fE - 0,2P}$$

dengan:

t = ketebalan minimum *head* (in);

P = tekanan disain atau tekanan maksimum yang diperbolehkan (psi);

E = efisiensi sambungan las;

f = stress maksimum yang diperbolehkan (psi);

r_c = jari-jari dalam *dish* (in).

$$t = \frac{(72,765)(1,33858)(1,54)}{2(12.650)(0,8) - 0,2(72,765)}$$

$$t = 0,0074 \text{ in}$$

Diketahui :

$$T_H = 425 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$m_d = 6,4 \text{ lb}$$

$$m_1 = 912,8 \text{ lb}$$

$$w_1 = 5,195 \text{ lb}$$

$$C_d = 0,23 \text{ Btu/lb }^\circ\text{F}$$

$$C_t = 0,12 \text{ Btu/lb }^\circ\text{F}$$

$$C_g = 0,26 \text{ Btu/lb }^\circ\text{F}$$

$$\Delta H_d = 183,67 \text{ Btu/lb }^\circ\text{F}$$

$$T_m = 360 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_a = 110 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{av} = (T_m + T_a)/2 = 235 \text{ }^\circ\text{F}$$

- Asumsi

Cycle berlangsung selama 12 jam, waktu operasi untuk memanaskan yaitu 9 jam dan mendinginkan yaitu 3 jam

- Kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan tiap *cycle*

$$Q_H = m_d(T_m - T_a)C_d + m_1(T_m - T_a)C_t + w_1\Delta H_d + w_1(T_{av} - T_a)$$

$$Q_H = 93,18 \times (360 - 110) \times 0,23 + 912,8 \times (360 - 110) \times 0,12 + 5,195 \times 183,67 + 5,195 \times (360 - 110)$$

$$Q_H = 5876665,5 \text{ Joule/cycle (34345,391 Btu/Cycle)}$$

Q_H = Kalor yang dibutuhkan (Btu/cycle)

m_d = massa *desiccant* (lbs)

m_1 = massa *tower* (lbs)

T_m = Suhu maksimum keluaran ($^\circ\text{F}$)

T_a = Suhu *ambient* ($^\circ\text{F}$)

- C_d = panas spesifik *desiccant*
- C_t = panas spesifik *tower*
- W_1 = air yang teradsorpsi (lbs/cycle)
- ΔH_d = panas yang diberikan ke air yang diadsorpsi (btu/lb)
- Laju alir gas pemanas

$$V_H = \frac{Q_H}{(T_{av} - T_a)C_g}$$

$$V_H = \frac{34345,391}{(235-110) \times 0,26} = 25,520196 \text{ kg/cycle} \quad (346,923 \text{ lb/cycle})$$

- Kalor yang ditambahkan pada gas

$$Q_G = \frac{V_H(T_H - T_a)C_g}{\theta_H}$$

$$Q_G = \frac{346,923 \times (400-110) \times 0,26}{9}$$

$$Q_G = 108541151 \text{ Joule/kg} \quad (287738,05 \text{ Btu/lb})$$

Kebutuhan energi untuk *cooling*

$$H_C = m_d(T_m - T_a)C_d + m_l(T_m - T_a)C_t$$

$$H_C = 93,18 \times (360-110) \times 0,23 + 912,8 \times (360-110) \times 0,12$$

$$H_C = 5651956,4 \text{ Joule/cycle} \quad (32741,85 \text{ Btu/cycle})$$

- Laju alir gas untuk mendinginkan selama 2 jam

$$V_C = \frac{H_C}{(T_{av} - T_a)C_g \theta_C}$$

$$V_C = \frac{32741,85}{(235-110) \times 0,26}$$

$$V_C = 24,921973 \text{ kg/h} \quad (335,81385 \text{ lb/h})$$

HEAT EXCHANGER

$$\text{Exchanger Surface Area (A)} = \frac{Q}{U \cdot \text{LMTD}}$$

$$\text{LMTD} = \frac{\Delta T_h - \Delta T_c}{\ln \Delta T_h / \Delta T_c}$$

MSDS

A. Analisis Potensi Bahaya Bahan Baku dan Produk

1. Gas Metana

Rumus kimia	: CH ₄
Berat molekul	: 16,04
Tampilan dan bau	: gas ,tidak berwarna, dan tidak berbau
Jenis	: gas yang sangat mudah terbakar
Titik didih	: -161,5 °C
Titik leleh	: -182,5 °C
Berat jenis	: 0,554
Tekanan Uap	: permanen dan gas yang tidak terkondensasi
Tempat penyimpanan	: tabung gas bertekanan
<i>Hazard Rating System</i>	: <i>Health</i> = 1 (sedikit berbahaya) <i>Flammability</i> = 4 (sangat berbahaya) <i>Reactivity</i> = 0 (tidak berbahaya)
<i>Flammable Range</i>	: 5 % - 15 %
<i>Autoignition</i>	: 537 °C
Produk pembakaran	: Karbon dioksida, Karbon monoksida, dan uap air

Potensi Bahaya

- Kontak dengan mata: tidak menimbulkan efek tertentu.
- Kontak dengan kulit: tidak menimbulkan efek tertentu.
- Terhirup: metana tidak bersifat racun, namun dapat mengurangi jumlah oksigen di udara (kurang dari 19,5 %) sehingga dapat menyebabkan berkurangnya *supply* oksigen ke paru-paru. Akibatnya dapat menyebabkan pusing, mual, muntah, hilang kesadaran hingga kematian.

Pertolongan Pertama

- Kontak mata: tidak membutuhkan perlakuan khusus.
- Kontak kulit: tidak membutuhkan perlakuan khusus.

- Terhirup: pindahkan korban ke udara terbuka. Jika tidak bernafas, bantu dengan nafas buatan atau alat bantu pernafasan.

Jika Terjadi kebocoran

Evakuasi semua orang ke tempat yang lebih aman. Hilangkan kemungkinan adanya sumber yang dapat membuat percikan api. Gunakan pengukur nyala api gas untuk memantau konsentrasi metana. Jangan memasuki area dimana konsentrasi metana lebih dari 1 % (20 % dari batas terendah nyala api). Api dan ledakan akan terjadi ketika konsentrasi metana di atmosfer lebih dari 5 %. Gunakan peralatan perlindungan yang tepat (pakaian tahan api).

Kontrol dan Perlindungan Personal

- *Engineering control*: nyalakan ventilasi udara untuk mengurangi konsentrasi metana di udara.
- Perlindungan pernapasan: gunakan alat bantu pernafasan jika konsentrasi metana lebih dari 1 % (20 % dari batas rendah nyala api).
- Perlindungan mata: gunakan pelindung mata atau wajah.
- Perlindungan kulit: gunakan sarung tangan tahan api.
- Perlindungan lainnya: gunakan *safety shoes*.

Pencegahan Terjadinya Kebakaran atau Ledakan

- Jangan merokok di dekat sumber gas metana (*pipa/storage*).
- Cek peralatan elektronik yang digunakan, jangan sampai menimbulkan percikan api.
- Menghindari sesuatu yang dapat menimbulkan percikan api (benturan antar logam, blitz kamera, dan lainnya).
- Jalur pipa gas metana harus jauh dari pemukiman penduduk, minimal 500 meter.

2. Gas Hidrogen

Rumus kimia	: H ₂
Berat molekul	: 2,016
Tampilan dan bau	: gas, tidak berwarna, dan tidak berbau
Jenis	: gas yang sangat mudah terbakar
Titik didih	: -252,8 °C
Titik leleh	: -259,9 °C
Berat jenis	: 0,0696
Tekanan Uap	: tidak tersedia
Tempat penyimpanan	: tabung gas bertekanan, pipa gas, dan tangki
<i>Hazard Rating System</i>	: <i>Health</i> = 0 (tidak berbahaya) <i>Flammability</i> = 4 (sangat berbahaya) <i>Reactivity</i> = 0 (tidak berbahaya)
<i>Flammable Range</i>	: 4 % - 74 %
<i>Autoignition</i>	: 1050 °C
Produk pembakaran	: uap air

Potensi Bahaya

- Kontak dengan mata : tidak ada.
- Kontak dengan kulit: tidak ada.
- Terhirup: Asphyxiant. Batas flamabilitas bawah hidrogen dalam udara dapat menyebabkan udara yang miskin oksigen dan sangat mudah terbakar. Paparan dengan konsentrasi moderat (<19.5%) dapat menyebabkan pening, sakit kepala, mual, atau pingsan. Paparan terhadap udara yang mengandung 8-10% atau kurang oksigen akan menyebabkan ketidaksadaran tanpa peringatan terlebih dahulu terhadap individu. Kekurangan oksigen dapat mengakibatkan cedera serius atau kematian.

Pertolongan Pertama

- Kontak mata: tidak ada
- Kontak kulit: tidak ada.

- Terhirup: pindahkan korban ke udara terbuka. Jika tidak bernafas, bantu dengan nafas buatan atau alat bantu pernafasan lainnya. Segera beri pertolongan medis.

Jika Terjadi kebocoran

Evakuasi semua orang ke tempat yang lebih aman. Hilangkan kemungkinan adanya sumber yang dapat membuat percikan api. Gunakan pengukur nyala api gas untuk memantau konsentrasi hidrogen. Jangan memasuki area dimana konsentrasi hidrogen lebih dari 1 % (25 % dari batas terendah nyala api). Api dan ledakan akan terjadi ketika konsentrasi hidrogen di atmosfer lebih dari 4 %. Gunakan peralatan perlindungan yang tepat (pakaian tahan api). Jangan mulai memadamkan api sebelum menutup sumber aliran hidrogen. Hidrogen lebih ringan dari udara sehingga jika terjadi kebocoran maka akan langsung terlepas ke udara (ke atas). Jika terbakar, maka hidrogen tidak memiliki warna api (tidak terlihat).

3. Carbon Nanotube (CNT)

Rumus kimia : C (Carbon)
 Densitas (20°C) : ~ 2.1 g/cm³
 Tampilan dan bau : serbuk kehitaman, tidak berbau
 Bahaya ledakan : tidak menimbulkan bahaya ledakan
 Titik leleh : 3652-3697 ° C (estimasi)
 Kelarutan : tidak larut dalam air
 Penyimpanan : letakan dalam kontainer yang tertutup rapat, simpan dalam ruang yang sejuk dan cukup ventilasi. Jauhkan dari halogen dan pengoksidasi kuat.

Potensi Bahaya

- Kontak mata: dapat menyebabkan iritasi mata.
- Kontak kulit: hingga saat ini belum diketahui apakah penetrasi partikel nano menyebabkan efek merusak pada hewan. Akan tetapi penelitian pengaruh SWCNT terhadap tikus menunjukkan adanya iritasi kulit (Murray et al, 2007). Studi in vitro pada kultur sel kulit manusia

menunjukkan bahwa CNT dapat memasuki sel dan melepas *inflammatory cytokines*, *oxidative stress*, and menurunkan viabilitas (Monteiro-Riviere et al, 2005; Shvedova et al, 2003).

- Terhirup: saluran pernapasan adalah jalur pemaparan yang paling utama dari partikel yang berterbangan di tempat kerja. Hal ini dapat menyebabkan Granuloma paru-paru atau Mesothelioma.
- Tertelan: dapat menyebabkan gastrointestinal akut dan membran mukosa.

Pertolongan Pertama

- Kontak mata: basuh mata selama beberapa menit di bawah air yang mengalir. Segera konsultasi ke dokter.
- Kontak kulit: segera basuh dengan air serta sabun secara menyeluruh. Segera konsultasi ke dokter.
- Terhirup: beri udara segar atau pernapasan buatan jika diperlukan. Jaga agar korban tetap hangat. Segera konsultasi ke dokter.
- Tertelan: Segera beri pertolongan medis.

Perlindungan Personal

- Respirator/ masker
- Google
- Sarung tangan
- Pakaian pelindung yang sesuai.

4. Molecular Sieve 5A

Nama Senyawa	: Molecular sieve tipe 5A
Komposisi	: Silikon oksida (< 60 %) Aluminium oksida (< 40 %) Sodium oksida (< 20 %) Kalsium oksida (< 20 %) Kuarsa (< 1 %)
Berat Molekul	: -

Sifat Fisika dan Kimia

- Titik lebur : 1760°C
- Titik didih : -
- Tekanan uap : -
- Densitas uap : -
- Kelarutan : larut dalam air dingin, air panas, methanol, dietil eter, n-oktanol,aseton
- Keadaan fisik : solid
- Penampakan dan bau : krem, tidak berbau, tidak berasa
- *Specific gravity* : 2,1
- Persen volatilitas : -
- Stabilitas : stabil
- Reaktivitas : sangat reaktif (mengadsorpsi) terhadap bahan kimia panas (olefin, HCl).
- Material yang dihindari : klorin, klorin triflorida, mangan trioksida, hidrogen peroksida, oksigen diflorida, asetilena, dan amonia

Identifikasi Bahaya

- Organ sasaran: mata, kulit, sistem pernapasan.
- Kontak kulit/mata : dapat mengakibatkan iritasi
- Terhirup: dapat mengakibatkan iritasi paru – paru.
- Paparan dalam jumlah yang berlebih dapat menyebabkan kematian

Data Potensi Ledakan dan Kebakaran

- Tidak mudah terbakar
- Dapat menimbulkan api dan ledakan dengan oksida yang kuat

Pertolongan Pertama

- Terhirup: Bawa korban ke udara segar. Beri pernapasan buatan jika diperlukan. Jika korban sulit bernapas, berikan oksigen. Berikan perawatan medis secepatnya.

- Kontak mata: periksa dan lepaskan jika ada lensa kontak. Basuh mata dengan banyak air minimal selama 15 menit. Berikan perawatan medis.
- Kontak kulit : Basuh kulit dengan banyak air. Balut kulit yang teriritasi dengan perban. Lepaskan pakaian dan sepatu yang terkontaminasi. Cuci pakaian dan sepatu sebelum digunakan kembali. Berikan perawatan medis.
- Tertelan: Jangan merangsang muntah jika tidak dianjurkan oleh petugas medis. Longgarkan pakaian (seperti dasi, kerah baju, ikat pinggang). Berikan perawatan medis jika terlihat gejalanya.

Penyimpanan dan Penanganan

Simpan di tempat yang sejuk, kering, serta tertutup rapat. Jangan disimpan dengan suhu di atas 23°C. Jauhkan dari zat kimia yang harus dihindari (alkali, pengoksida, asam).

5. Larutan HNO₃

Nama Senyawa : Asam Nitrat
 Berat Molekul : 63,012

Sifat Fisika dan Kimia

- Titik lebur : -41 °C
- Titik didih : 121 °C
- Tekanan uap : 6 kPa pada 20°C
- Densitas uap : 2,5
- Kelarutan dalam air : larut
- Penampakan dan bau : bening, cairan sedikit beruap
- *Specific gravity* : 1,408
- Persen volatilitas : >99 (% volume)
- Stabilitas : stabil
- Reaktivitas : sangat reaktif terhadap zat pereduksi kuat, logam, alkali, dan basa kuat
- Material yang dihindari : basa terkonsentrasi, zat yang reaktif terhadap air, zat yang mudah teroksidasi

Identifikasi Bahaya

- Cukup korosif. Dapat mengakibatkan iritasi pada area kontak
- Organ sasaran: mata, kulit, sistem pernapasan, gigi.
- Kontak kulit/mata : dapat mengakibatkan rasa terbakar
- Terhirup: dapat mengakibatkan iritasi
- Tertelan: dapat mengakibatkan mual, muntah, dan diare.

Pertolongan Pertama

- Terhirup: bawa korban ke udara segar, beri pernapasan buatan jika diperlukan. Jika korban sulit bernapas, berikan oksigen.
- Kontak kulit/mata: lepaskan pakaian dan sepatu yang terkontaminasi. Basuh daerah yang terkena dengan banyak air minimal selama 15 menit. Hubungi dokter bila iritasi berlanjut.
- Tertelan: cuci mulut dengan air. Jika tertelan, jangan dimuntahkan dengan paksa. Jika korban tak sadar berikan banyak susu atau susu. Hubungi dokter untuk semua kasus.

Jika Terjadi Kebakaran

- Bahaya kebakaran dan ledakan: walau tidak mudah terbakar, asam nitrat merupakan pengoksidasi kuat yang dapat bereaksi dengan material yang mudah terbakar. Panas reaksinya dengan agen pereduksi atau material yang mudah terbakar dapat menyebabkan ignisi. Asam nitrat dapat bereaksi dengan logam dan menghasilkan gas hidrogen.
- Alat pemadam api: gunakan alat pemadam yang sesuai dengan area disekitarnya. Gunakan siraman air untuk melarutkan asam nitrat dan mengabsorpsi nitrogen oksida yang terlepas.
- Metode spesifik: pemadam kebakaran harus mengenakan peralatan pelindung kebakaran yang layak dan dilengkapi dengan pelindung wajah serta alat bantu pernapasan mandiri.

Penyimpanan dan Penanganan

Simpan di tempat yang sejuk, kering, dan berventilasi dengan lantai yang tahan asam serta berdrainase bagus. Hindari sinar matahari dan jauhkan dari sumber panas langsung, air, dan material yang mampu mengakibatkan bahaya. Saat melarutkan, asam nitrat harus ditambahkan perlahan ke dalam air sedikit demi sedikit.

6. Molecular Sieve 3A

Nama lain	: Zeolit sintetik, dapat mengandung quartz > 3%
Sifat	: Higroskopis
Tampilan dan bau	: padatan berwarna putih pucat atau keabu-abuan, tidak berbau
Ukuran	: 4-8 mesh
Berat jenis	: 2,1 (air = 1)
Kelarutan	: tidak larut dalam air dingin
Stabilitas	: stabil
<i>Hazard Rating System</i>	: <i>Health</i> = 1 (sedikit berbahaya) <i>Flammability</i> = 0 (tidak berbahaya) <i>Reactivity</i> = 1 (sedikit berbahaya)

Identifikasi Bahaya

- Sedikit menimbulkan bahaya jika terjadi kontak dengan kulit (iritasi), kontak dengan mata (iritasi), tertelan, dan terhirup.
- Bersifat higroskopis, bereaksi dengan air dan menghasilkan panas. Tidak cocok dengan pengoksidasi kuat: fluorine, klorin trifluorida, manganese trioksida, oksigen diflorida, hidrogen peroksida, dan lain-lain. Jauhkan dari asetilen dan amonia. Silika dapat larut dalam asam hidroklorida dan menghasilkan gas silikon tetrafluorida yang korosif.

Pertolongan Pertama

- Kontak mata

Cek dan lepaskan lensa kontak. Segera bilas mata dengan air yang banyak selama kurang lebih 15 menit. Berikan penanganan lebih lanjut jika iritasi terus berlanjut.

- **Kontak kulit**

Cuci dengan sabun dan air. Berikan penanganan lebih lanjut jika iritasi terus berlanjut.

- **Terhirup**

Pindahkan korban ke udara terbuka. Jika tidak bernafas, bantu dengan nafas buatan atau alat bantu pernafasan. Berikan penanganan lebih lanjut

- **Tertelan**

Jangan berikan apapun lewat mulut kepada korban. Jika tertelan dalam jumlah banyak, hubungi segera dokter. Longgarkan pakaian ketat seperti kerah, dasi, dan sabuk.

Jika Tertumpah

Sedikit

Gunakan alat yang tepat untuk memindahkan material ke tempat pembuangan limbah. Bersihkan dengan cara disiram dengan air dan buang sesuai peraturan lokal yang berlaku.

Banyak

Gunakan sekop untuk meletakkan material ke wadah pembuangan limbah. Selesaikan pembersihan dengan cara menyiram permukaan yang terkontaminasi dengan air dan buang ke sistem pembersihan.

Kontrol dan Perlindungan Personal

- *Engineering control*: berikan ventilasi yang sesuai agar tingkat partikel di udara selalu berada di bawah ambang batas yang diperbolehkan. Jika penggunaan menyebabkan timbulnya debu, asap, atau uap, nyalakan ventilasi.
- Perlindungan pernapasan: gunakan alat bantu pernafasan yang sesuai
- Perlindungan mata: gunakan pelindung mata atau wajah.
- Perlindungan kulit: gunakan sarung tangan dan jas lab.

7. Iron Sponge

Nama senyawa	: besi oksida (<i>iron oxide</i>)
Rumus Molekul	: Fe_3O_4
Berat Molekul	: 231,54
Sinonim	: besi oksida hitam, magnetit, triron tetroksida,

Sifat Fisik dan Kimia

Wujud dan Penampakan	: padatan berwarna hitam, tidak berbau
Titik Beku/ Leleh	: 1588,9°C
Kelarutan	: tidak larut dalam air
<i>Specific Gravity</i>	: 5,18 (air = 1)
Stabilitas	: stabil dalam tekanan dan suhu normal
Kondisi yang harus dihindari	: suhu tinggi, material yang tak sesuai
Material yang harus dihindari	: aluminium, kalsium hipoklorid, sesium karbide, kloroformat, etilen oksida, peroksida
Produk dekomposisi berbahaya	: gas yang iritan dan beracun

Peralatan Pelindungan Personal

- Mata: gunakan kacamata pelindung atau *safety goggles* yang sesuai seperti yang dideskripsikan dalam peraturan OSHA
- Kulit: gunakan sarung tangan pelindung untuk meminimalisasi kontak dengan kulit
- Pakaian : gunakan pakaian pelindung yang sesuai
- Respirator : gunakan sesuai peraturan OSHA

Potensi Bahaya

- Mata : dapat menyebabkan iritasi mata. Paparan partikel besi dapat menyebabkan efek racun.
- Kulit : dapat menyebabkan iritasi kulit
- Tertelan: dapat menyebabkan iritasi gastrointestinal dan mual, muntah, dan diare.
- Terhirup : dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan. Uap yang terhirup dapat menyebabkan demam uap logam, yang menyerupai gejala flu (demam,

dingin, batuk, lemas, sakit dada, sakit otot, dan peningkatan jumlah sel darah putih).

Pertolongan Pertama

- Mata: segera basuh mata dengan banyak air minimal selama 15 menit, angkat kelopak mata atas dan bawah secara bergantian. Beri pertolongan medis.
- Kulit : basuh kulit dengan banyak air minimal selama 15 menit, lepaskan pakaian dan sepatu yang terkontaminasi. Segera beri pertolongan medis jika iritasi tidak hilang atau bertambah parah.
- Tertelan : jika korban sadar, berikan 2-4 gelas penuh susu atau air. Segera beri pertolongan medis.
- Terhirup: segera beri pertolongan medis. Jauhkan dari area yang terpapar dan pindahkan ke udara segar. Jika korban tak bernapas, beri pernapasan buatan.

Jika Terjadi Kebakaran

Jika terjadi kebakaran, gunakan alat bantu pernapasan dan pakaian pelindung yang sesuai. Gunakan alat pemadam yang sesuai dengan lingkungan sekitarnya.

Penanganan dan Penyimpanan

- Penanganan: cuci tangan secara menyeluruh setelah kontak dengan alat. Beri ventilasi yang sesuai. Minimalkan timbulnya debu. Jauhkan dari kontak dengan mata dan kulit. Jaga agar wadah penyimpanan tertutup rapat.
- Penyimpanan: simpan dalam area yang sejuk, kering, dan berventilasi baik. Jauhkan dari material yang tidak sesuai.

Standard Operating Procedure (SOP) untuk aktivitas yang melibatkan nanopartikel

CNT dan fullrene ada dalam bentuk asli mereka sebagai karbon dan sering digunakan dengan bahan kimia lain. Seperti kebanyakan zat novel lainnya, nanopartikel dan efeknya pada kesehatan manusia dan lingkungan tidak sepenuhnya dipahami, oleh karena itu mereka harus diperlakukan dengan hati-hati sampai disediakan informasi yang lebih lengkap.

- **Potensi terkena paparan di tempat kerja**

Kurangnya data kandungan udara akibat paparan nanopartikel yang terproduksi tidak ada kaitannya dengan sebuah kegiatan industri. Banyaknya nanopartikel yang terpapar ketika bekerja dengan zat berukuran nano bergantung terhadap kecenderungan partikel yang dilepaskan selama proses penanganan. Secara umum, nanopartikel dihasilkan dalam fasa gas, atau juga dalam bentuk bubuk maupun cair yang akan meningkatkan resiko terkena paparan apabila terlepas ke lingkungan yang lebih luas.

Paparan nanopartikel hasil rekayasa kemungkinan dapat menyebabkan efek buruk terhadap kesehatan. Pada ukuran nano, luas permukaan dan kereaktifan suatu zat meningkat. Para peneliti yang bekerja dengan zat berukuran nano berada dalam resiko terkena paparan, begitupun dengan orang di sekitarnya, misalnya dalam sistem penanganan pelayanan udara dan juga hasil pembuangan limbah.

- **Faktor yang mempengaruhi paparan nanopartikel**

Tingkat paparan partikel nano hasil rekayasa tergantung pada banyak faktor. Jumlah bahan yang digunakan dan frekuensi kontak merupakan faktor paling mudah untuk dilihat. Bubuk dapat dengan mudah tersebar, cairan dapat dengan mudah membentuk tetesan atau aerosol dan gas-gas yang mengandung nanopartikel dapat menimbulkan risiko apabila digunakan.

Untuk udara, partikel material atau diameter partikel akan menentukan apakah material bisa masuk ke saluran pernafasan. Partikel kecil yang berdiameter 10um memiliki beberapa probabilitas mencapai daerah alveolar jauh di dalam paru-paru dimana pertukaran gas berlangsung. Sebagai ukuran

partikel menurun hingga $4\mu\text{m}$ atau kurang probabilitas ini meningkat menjadi 50%. Partikel kecil dari 30nm kemungkinan akan disimpan di saluran pernapasan bagian atas maupun di daerah alveolar.

Untuk saat ini, ada beberapa informasi yang cukup untuk memprediksi seluruh situasi dan skenario di tempat kerja yang cenderung mengarah ke resiko terkena paparan nanopartikel. Beberapa faktor yang dapat meningkatkan potensi untuk pemaparan mencakup:

- bekerja dengan nano partikel dalam media cair tanpa alat perlindungan diri akan meningkatkan resiko kulit terkena paparan
 - bekerja dengan nano partikel di media cair selama proses penuangan mengakibatkan kemungkinan terbentuknya tetesan dan terhirup oleh saluran pernapasan.
 - bekerja dengan nano partikel dalam bentuk cair atau padat dalam proses sonikasi dan pencampuran memungkinkan resiko terkena paparan.
 - proses yang menghasilkan nano partikel dalam fasa gas di sistem yang terbuka membuat peluang terlepasnya aerosol ke tempat kerja
 - nano partikel dalam bentuk bubuk dapat mengakibatkan kemungkinan kulit dan saluran pernapasan terkena paparan nano partikel
 - perawatan peralatan proses yang menghasilkan nano partikel akan membuat pekerja terkena resiko paparan nano partikel
 - proses pembersihan sistem penangkap debu akan menyebabkan munculnya resiko terkena paparan nano partikel terhadap kulit dan saluran pernapasan
 - pembuangan limbah yang mengandung material nano partikel akan meningkatkan resiko terkena paparan selama proses pengumpulan, transportasi dan incinerasi.
- Prosedur untuk mengurangi paparan

Hal ini berguna sebagai informasi terbatas tentang nanopartikel hasil rekayasa dan efeknya saat terpapar di tempat kerja, prosedur kerja dan pengendalian rekayasa yang harus disesuaikan untuk setiap proses individu dimana pemaparan mungkin terjadi.

Untuk kebanyakan proses dan pekerjaan, kontrol paparan udara pada nanopartikel kemungkinan besar dapat dicapai dengan menggunakan teknik kontrol yang ada, praktek-praktek kerja yang aman dan sebagai alat pertahanan adalah peralatan perlindungan diri.

- Pengawasan rekayasa

Sistem ventilasi pembuangan lokal harus cukup untuk melindungi individu dari paparan sementara individu tersebut bekerja dengan nanopartikel. Penyaring udara partikulat berefisiensi tinggi harus digunakan dalam setiap system ventilasi pembuangan jika berurusan dengan nanopartikel.

Penyaring udara tersebut harus ada dalam rumah filter yang telah dirancang, jika rumah filter tersebut tidak dipasang dengan benar, maka ada kemungkinan nanopartikel tersebut melewati filter.

- Pengaturan kerja

Penggabungan dari pengaturan kerja yang baik dapat membantu meminimalisasi paparan individu terhadap nanopartikel. Pengaturan berikut ini harus dilaksanakan pada setiap daerah dimana nanopartikel dikerjakan.

Daerah kerja harus dibersihkan setiap harinya menggunakan *High Efficiency Particulate Air (HEPA) filtered vacuum cleaner*. Menyapu secara kering atau dengan selang yang berisikan gas bertekanan tidak dianjurkan untuk membersihkan karena dapat menyebabkan nanopartikel terbang ke udara bebas. Pembersihan harus dilakukan sedemikian rupa sehingga mencegah kontak pribadi dengan bahan limbah.

- Peralatan Pelindung Diri (PPD)

Saat ini tidak ada petunjuk pakaian yang sesuai untuk mencegah paparan kulit terhadap nanopartikel. Pengujian dilakukan pada berbagai bahan dengan berbagai tingkat efisiensi. Hal yang dianjurkan adalah sarung tangan pelindung dari partikel bubuk, jas laboratorium, kacamata harus dikenakan pada saat menangani nanopartikel dalam skenario LEV.

- Pembersihan dan pembuangan limbah nano partikel

Saat ini tidak ada petunjuk yang tersedia mengenai pembersihan dari tumpahan nanomaterial atau untuk membuat aman daerah yang terkontaminasi nano material. Disarankan, setiap tumpahan atau kontaminasi ditangani dengan baik.

Standar pendekatan untuk membersihkan tumpahan bubuk dan cairan, termasuk penggunaan *HEPA-filtered vacuum cleaners*, menggunakan kain yang dibasahi untuk menyeka bubuk dan mengaplikasikan bahan yang mampu mengabsorb. Setiap bahan pembersih atau kain yang digunakan harus dibuang untuk mencegah penggunaan ulang dan kemudian dikeringkan yang dapat mendistribusikan nano material ke udara.

Sementara itu, *vacuum cleaner* bisa efektif sebagai pembersih tumpahan nanomaterial dan limbah, beban elektrostatis yang dibangun tempat *vacuum cleaner* bisa mengakibatkan penyebaran ketimbang menghisap nanopartikel kecuali desain dari *vacuum cleaners* tersebut telah dibuat sedemikian rupa sehingga dapat menetralkan nanopartikel.

- Teknik penanganan yang direkomendasikan

Pertama dan yang terutama semua upaya harus dilakukan untuk mencegah nano partikel memasuki lingkungan yang lebih luas dan di mana mungkin harus ditangani dengan menggunakan ventilasi pembuangan lokal. Penanganan harus sangat hati-hati ketika mengambil nano partikel yang direayasa dari peralatan eksperimen untuk menghindari peningkatan debu. Teknologi masker debu saat ini masih memiliki efektivitas yang terbatas untuk digunakan sebagai perlindungan dari nano partikel.