

**PEMODELAN DAN SIMULASI *TRICKLE BED*
REACTOR UNTUK PENGHILANGAN
DIBENZOTHIOPHENE PADA NAFTA**

Laporan Penelitian

Disusun untuk memenuhi tugas akhir guna mencapai gelar
sarjana di bidang ilmu Teknik Kimia

Oleh:

Stephen Joel Sitorus

(2015620060)

Pembimbing:

Herry Santoso S.T., M.T.M., Ph.D.

Yansen Hartanto S.T., M.T.



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**

2022

LEMBAR PENGESAHAN

**JUDUL : PEMODELAN DAN SIMULASI *TRICKLE BED REACTOR* UNTUK
PENGHILANGAN *DIBENZOTHIOPHENE* PADA NAFTA**

CATATAN :




Telah diperiksa dan disetujui,

Bandung, 11 Februari 2022

Pembimbing I

Pembimbing 2



Herly Saptoso S.T., M.T.M., Ph.D.



Yansen Hartanto S.T., M.T.



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Stephen Joel

NPM : 2015620060

Dengan ini menyatakan bahwa penelitian dengan judul:

**PEMODELAN DAN SIMULASI *TRICKLE BED REACTOR* UNTUK
PENGHILANGAN *DIBENZOTHIOPHENE* PADA NAFTA**

adalah hasil pekerjaan saya. Seluruh ide, pendapat, data ilmiah, materi dari sumber lain telah dikutip dengan penulisan referensi yang sesuai.

Pernyataan tertulis ini saya buat dengan sejujur-jujurnya dan sebenar-benarnya. Jika pernyataan ini tidak sesuai dengan kenyataan yang ada, maka saya bersedia menanggung segala sanksi akademik dan non-akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Bandung, 11 Februari 2022



**Stephen Joel
(2015620060)**

INTISARI

Hydrotreating merupakan proses katalik hidrogenasi yang berfungsi untuk mereduksi senyawa sulfur, nitrogen, oksigen dan logam yang terkandung dalam fraksi-fraksi minyak bumi. Proses yang paling umum dipelajari pada proses *hydrotreating* adalah penyingkiran sulfur karena pengotor yang paling banyak pada minyak bumi adalah sulfur. Sulfur pada minyak bumi sendiri memiliki beberapa jenis yang salah satunya disebut dibenzothiophene atau DBT. DBT dianggap sebagai pengotor dengan rantai yang paling kompleks dan paling susah dipisahkan sehingga pada penelitian ini mempelajari simulasi penghilangan DBT. Tujuan utama dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari beberapa variable yaitu temperatur, laju alir umpan, konsentrasi umpan, rasio H₂/Nafta dan Tekanan.

Penelitian ini terdiri dari 2 tahap utama yaitu validasi dan simulasi. Simulasi dilakukan dengan memodelkan kinerja *reactor trickle bed* dengan katalis NiMo/Al₂O₃. Data percobaan yang digunakan untuk memvalidasi model diperoleh berdasarkan hasil percobaan (Subagjo, 2013). Simulasi dilakukan dengan berbagai variasi, yaitu temperatur, laju alir umpan, konsentrasi umpan, rasio H₂/Nafta dan Tekanan untuk melihat pengaruhnya terhadap konversi.

Berdasarkan hasil penelitian, konversi pada suhu 573.15 K, 593.15K, dan 613.15K berturut turut adalah 98.29%, 99.75% dan 99.98%; konversi pada laju alir 30 m³/h, 33 m³/h, dan 36 m³/h berturut turut adalah 98.29%, 97.53% dan 96.64%; konversi pada konsentrasi awal 5 x10⁻⁴ kmol, 5,3 x10⁻⁴ kmol, dan 5,5 x10⁻⁴ kmol berturut turut adalah 98.2934%, 98.2930% dan 98.2927%; konversi pada perbandingan H₂/Nafta 42, 44 dan 48 berturut turut adalah 98.54%, 98.29% dan 97.73%; konversi pada Tekanan 20 bar, 25 bar dan 30 bar berturut turut adalah 98.29%, 99.77% dan 99.98%.

Kata kunci: dibenzothiophene, *hydrotreating*, konversi, pemodelan, simulasi, *trickle bed reactor*

ABSTRACT

Hydrotreating is a catalytic hydrogenation process that functions to reduce sulfur, nitrogen, oxygen and metal compounds contained in petroleum fractions. The most commonly studied process in the hydrotreating process is sulfur removal because the most abundant impurities in petroleum is sulfur. Sulfur in petroleum itself has several types, one of which is called dibenzothiophene or DBT. DBT is considered as an impurity with the most complex chains and the most difficult to separate, so in this research, we study the simulation of DBT removal. The main objective in this research is to determine the effect of several variables, namely temperature, feed flow rate, feed concentration, H₂/Naphtha ratio and pressure.

This research consists of two main stages, which are validation and simulation. Simulations were performed by simulating the performance of a trickle bed reactor with NiMo/Al₂O₃ catalyst. The experimental data used to validate the model was obtained based on the experimental results (Subagjo, 2013). Simulations were carried out with various variations, namely temperature, feed flow rate, feed concentration, H₂/Naphtha ratio and pressure to see the effect on conversion.

Based on the results of the study, the conversions at temperatures of 573.15 K, 593.15K, and 613.15K respectively are 98.29%, 99.75% and 99.98%; conversion at flow rates of 30 m³/h, 33 m³/h, and 36 m³/h respectively are 98.29%, 97.53% and 96.64%; conversion at initial concentrations of 5 x10⁻⁴ kmol, 5.3 x10⁻⁴ kmol, and 5.5 x10⁻⁴ kmol respectively are 98.2934%, 98.2930% and 98.2927%; conversion at the ratio of H₂/Naphtha 42, 44 and 48 respectively are 98.54%, 98.29% and 97.73%; Conversion at pressure of 20 bar, 25 bar and 30 bar respectively are 98.29%, 99.77% and 99.98%.

Keywords: conversion, dibenzothiophene, hydrotreating, modelling, simulation, trickle bed reactor

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa oleh karena berkat, rahmat dan kasih Nya yang melimpah penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian dengan judul “Pemodelan dan Simulasi *Trickle Bed Reactor* untuk Penghilangan *Dibenzothiophene* pada Nafta” dengan baik dan tepat waktu.

Penulisan laporan penelitian ini tidak terlepas dari hambatan-hambatan yang penulis hadapi. Namun, berkat adanya bimbingan, saran, kritik dan dorongan semangat dari banyak pihak, akhirnya laporan penelitian ini dapat selesai. Untuk itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih yang tulus kepada:

1. Bapak Herry Santoso S.T., M.T.M., Ph.D. dan Bapak Yansen Hartanto S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah membantu penulis dengan sabar, memberikan bimbingan, pengarahan, dan ilmu pengetahuan, saran dan nasihat dalam penyusunan laporan penelitian ini
2. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan yang senantiasa memberikan ilmu dan pengarahan kepada penulis
3. Orangtua, saudara dan khususnya Kak Ruth yang selalu memberi semangat dan dukungan baik dalam bentuk moral maupun materil
4. Henry, Lanang, Nathan, dan Daryl yang telah membantu dalam perkuliahan dan membuat masa perkuliahan penulis lebih menyenangkan
5. Rekan-rekan serta pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang turut membantu kelancaran penyusunan laporan penelitian ini

Penulis menyadari bahwa pada laporan penelitian ini masih terdapat kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat membutuhkan dukungan berupa kritik dan saran yang bersifat membangun sebagai bahan perbaikan bagi penulis. Akhir kata, penulis berharap agar laporan penelitian ini bermanfaat bagi pembacanya.

Bandung, 11 Februari 2022

Penulis

DAFTAR ISI

1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Tema Sentral Masalah	2
1.3 Identifikasi Masalah	3
1.4 Premis	3
1.5 Hipotesis	3
1.6 Tujuan Penelitian	3
1.7 Manfaat Penelitian	4
2.1 <i>Crude Oil</i>	5
2.1.1. Ikatan Hidrokarbon	5
2.1.2. Ikatan Non-hidrokarbon	5
2.2 <i>Oil Refinery</i>	6
2.2.1 <i>Gasoline</i>	7
2.2.2 <i>Naphtha</i>	8
2.2.3 <i>Kerosene</i>	8
2.2.4 <i>Diesel Fuel Oil</i>	8
2.3.5 <i>Heavy Fuel Oil</i>	8
2.2.6 <i>Atmospheric Residue dan Vacuum Residue</i>	9
2.3 Pengotor Minyak Bumi	9
2.3.1 Sulfur.....	10
2.4 <i>Hydrotreating</i>	11
2.4.1 <i>Naphtha Hydrotreating</i>	15
2.4.2 <i>Middle Distillates Hydrotreating</i>	15
2.4.3 <i>Atmospheric Residue Desulphurization</i>	15
2.5 Persamaan Model <i>Hydrotreating</i>	16
2.5.1 Model Aguilar	16
2.5.2 Model Fyre	16
2.5.3 Model Ferdous (2006).....	17
2.5.4 Model Vanryssel berghe dan Froment (1996).....	17

2.5.5 Model Singhal dkk. (1981)	18
2.5.6 Model Broderick dan Gate (1981)	18
2.5.7 Model Girgis dan Gates (1991).....	19
2.5.8 Model VIII.....	19
2.5.9 Model IX	20
2.6 Persamaan Reaktor	20
2.7 Data Fisik Nafta DBT.....	21
2.8 Metode Penyelesaian Numerik.....	22
2.8.1 Metode Euler	22
2.8.2 Metode Heun	23
2.8.3 Metode Beda Hingga (<i>Finite Difference Method</i>)	24
2.8.4 Runge-Kutta	25
3.1 Kondisi Operasi	27
3.2 Estimasi Parameter Model.....	29
3.2.1 Kinetika persamaan reaksi	29
3.2.2 Persamaan Reaktor	31
3.3 Penyelesaian Persamaan	34
3.4 Validasi Parameter Model	34
3.5 Variasi Percobaan	38
4.1 Data Percobaan	40
4.2 Validasi Parameter.....	40
4.3 Simulasi	42
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran	55
A.1. Validasi Parameter.....	56
A.2. Simulasi	57
B.1 Validasi Parameter	61
B.2. Simulasi.....	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Kimia Senyawa Sulfur Organik Minyak Bumi (Shennan, 1996) ...	11
Gambar 2.2 Pemisahan Sulfur Mercaptan (Doddy, 2010).....	11
Gambar 2.3 Pemisahan Sulfur Sulfida (Doddy, 2010)	11
Gambar 2.4 Pemisahan Sulfur Di sulfida (Doddy, 2010)	11
Gambar 2.5 Pemisahan Sulfur Sulfida Siklik (Doddy, 2010).....	12
Gambar 2.6 Pemisahan Sulfur Thiophen (Doddy, 2010).....	12
Gambar 2.7 Pemisahan Nitrogen <i>Pyridine</i> (Doddy, 2010).....	12
Gambar 2.8 Pemisahan Nitrogen <i>Quinoline</i> (Doddy, 2010).....	13
Gambar 2.9 Pemisahan Nitrogen <i>Pyrrole</i> (Doddy, 2010).....	13
Gambar 2.10 Pemisahan Nitrogen <i>Methyl Amine</i> (Doddy, 2010)	13
Gambar 2.11 Pemisahan Oksigen (Doddy, 2010).....	13
Gambar 2.12 Penjenuhan Olefin Liner (Doddy, 2010).....	14
Gambar 2.13 Penjenuhan Olefin Siklik (Doddy, 2010).....	14
Gambar 2.14 Penghilangan Senyawa Halida (Doddy, 2010)	14
Gambar 2.15 Penghilangan Senyawa Logam (Doddy, 2010).....	15
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> tahap-tahap penyelesaian.....	27
Gambar 3.2 <i>Trickle Bed Reactor</i> (Green and Perry, 2008).....	28
Gambar 3.3 <i>Flowchart</i> Validasi Parameter Model	35
Gambar 3.4 Grafik Hukum Henry	36
Gambar 3.5 Simulasi Kerja Reaktor (a) Profil Suhu, dan (b) Profil Konsentrasi Sulfur (Subagjo, 2013)	38
Gambar 4.1 Validasi (a) Profil Suhu, dan (b) Profil Konsentrasi Sulfur.....	41
Gambar 4.2 Simulasi Kerja Reaktor (a) Profil Suhu, dan (b) Profil Konsentrasi Sulfur (Subagjo, 2013)	41
Gambar 4.3 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Konsentrasi DBT.....	43
Gambar 4.4 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Suhu.....	43
Gambar 4.5 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Konversi	44
Gambar 4.6 Pengaruh Temperatur terhadap Konsentrasi DBT	45
Gambar 4.7 Pengaruh Temperatur terhadap Suhu.....	45
Gambar 4.8 Pengaruh Temperatur terhadap Konversi.....	46
Gambar 4.9 Pengaruh Laju Alir Umpan terhadap Konsentrasi DBT	47

Gambar 4.10 Pengaruh Laju Alir Umpan terhadap Suhu	47
Gambar 4.11 Pengaruh Laju Alir Umpan terhadap Konversi.....	48
Gambar 4.12 Pengaruh H ₂ /Nafta terhadap Konsentrasi DBT.....	49
Gambar 4.13 Pengaruh H ₂ /Nafta terhadap Suhu	49
Gambar 4.14 Pengaruh H ₂ /Nafta terhadap Konversi	50
Gambar 4.15 Pengaruh Tekanan terhadap Konsentrasi DBT	51
Gambar 4.16 Pengaruh Tekanan terhadap Temperatur	51
Gambar 4.17 Pengaruh Tekanan terhadap Konversi	52
Gambar 4.17 Grafik perubahan suhu pada reaktor	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Crude Oil (Roussel and Boulet, 1995)	5
Tabel 2.2 Data Nomor Karbon Minyak Bumi (Collins, 2007).....	6
Tabel 2.3 Data Kondisi Operasi Nafta Hydrotreater RU II-Dumai	21
Tabel 2.4 Data Tambahan (Tarhan, 1983).....	22
Tabel 2.5 Penghampiran Maju (Chapra, 2012).....	25
Tabel 2.6 Penghampiran Terpusat (Chapra, 2012)	25
Tabel 2.7 Penghampiran Mundur (Chapra, 2012)	25
Tabel 3.1 Variasi Variabel	38
Tabel 4.1 Variasi Variabel	42

DAFTAR ISTILAH

r	=Laju Reaksi
k	= Konstanta k
K	= Konstanta Keseimbangan Adsorpsi
C	= Konsentrasi
P	= Tekanan Parsial
ΔH	= Panas Reaksi
ε	= Fraksi Fasa
C_p	= Kapasitas Panas
ρ	= Densitas
U	= Kecepatan Superfisial

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Minyak bumi merupakan hasil dari pelapukan berbagai macam sisa-sisa organisme yang tertimbun dalam dasar lautan bersama lumpur selama jutaan tahun. Lumpur tersebut akan mengendap di dasar lautan dan akan berubah menjadi berbagai batuan sedimen yang berpori, sedangkan sisa-sisa organisme akan bergerak ke tempat yang bertekanan rendah dan berkumpul dan berakumulasi di batuan kedap yang kemudian menjadi deposit minyak bumi. Minyak bumi dan gas alam sering disebut juga sebagai bahan bakar fosil karena minyak bumi terbentuk dari sisa-sisa organisme. Proses pembentukan minyak bumi yang dapat memakan waktu jutaan tahun ini menjadikan minyak bumi sebagai sumber daya alam yang tidak terbarukan.

Minyak bumi merupakan campuran kompleks dimana 90%-97% komposisinya terdiri dari senyawa hidrokarbon. Hidrokarbon yang terkandung dalam minyak bumi yang paling banyak adalah alkena, sedangkan sisanya adalah siklo-alkana, alkena, alkuna, dan senyawa aromatik. Komponen lainnya selain hidrokarbon adalah senyawa-senyawa karbon yang mengandung oksigen, belerang, dan nitrogen. (Ridlo, 2021)

Minyak bumi yang ditemukan biasanya akan bercampur dengan gas alam. Minyak bumi yang telah dipisahkan dari gas alam berupa cairan kental berwarna hitam yang disebut sebagai minyak mentah atau *crude oil*. Minyak mentah harus melalui proses *refining* atau pemurnian dengan prinsip distilasi bertingkat agar minyak mentah dapat dimanfaatkan. Prinsip distilasi ini merupakan pemisahan komponen-komponen berdasarkan perbedaan titik didih dan panjang rantainya sehingga diperoleh fraksi-fraksi minyak bumi. Proses distilasi berlangsung di kilang minyak. Proses pada kilang minyak ini menghasilkan beberapa gas alam dan beberapa jenis minyak dengan panjang rantai dan fungsi yang berbeda, seperti gas yang digunakan sebagai bahan bakar gas (LPG) dan bahan baku sintesis senyawa organik, eter petroleum sebagai pelarut dan cairan pembersih, bensin (*gasoline*) untuk bahan bakar kendaraan bermotor, nafta untuk bahan baku sintesis senyawa organik, kerosin untuk bahan bakar jet dan bahan bakar kompor parafin, minyak solar (*diesel*) untuk bahan bakar kendaraan mesin *diesel* dan bahan bakar tungku di industri, minyak pelumas untuk oli dan

pelumas, lilin untuk membuat lilin parafin dan *petroleum jelly*, minyak bakar untuk bahan bakar kapal, pemanas industri (*boiler plant*) dan pembangkit listrik, serta bitumen (residu) dengan jumlah rantai hidrokarbon terpanjang yang biasa digunakan sebagai material aspal jalan dan atap bangunan.

Selain ikatan hidrogen dan karbon, terdapat juga beberapa senyawa pengotor pada minyak bumi seperti Sulfur, Oksigen, Nitrogen, dan Senyawa Logam. Senyawa-senyawa tersebut dapat menimbulkan beberapa dampak negatif pada minyak bumi. Keberadaan sulfur pada minyak bumi dapat menyebabkan korosi, meracuni katalis, serta produk samping berupa gas beracun (SO_2) yang dapat menimbulkan polusi udara serta hujan asam. Keberadaan oksigen dapat menurunkan kualitas bahan bakar jika bereaksi dengan hidrokarbon. Keberadaan nitrogen memiliki sifat racun terhadap katalis dan dapat membentuk getah pada bahan bakar minyak. Senyawa logam seperti besi, tembaga, nikel, dan vanadium yang dapat menurunkan kualitas pada bensin, membentuk kerak pada *rotor turbine* dan dapat menyebabkan kerusakan pada *furnance*.

Kandungan sulfur pada gas alam dan minyak bumi dapat dihilangkan melalui beberapa upaya seperti oksidasi, adsorpsi selektif, ekstraksi, *hydrotreating*, dll. Pada dasarnya terdapat dua cara desulfurisasi, yaitu dengan ekstraksi menggunakan pelarut serta dekomposisi senyawa sulfur secara katalik dengan proses hidrogenasi selektif menjadi hidrogen sulfida (H_2S) dan senyawa hidrokarbon asal dari senyawa belerang tersebut. H_2S tersebut kemudian dipisahkan dengan cara fraksinasi atau pencucian.

Proses *hydrotreating* desulfurisasi merupakan proses untuk menghilangkan senyawa sulfur dengan mereaksi kan minyak bumi dengan gas hidrogen. Kilang minyak di berbagai daerah memiliki kandungan sulfur yang berbeda-beda, sehingga dibutuhkan simulasi untuk mengetahui jumlah umpan gas hidrogen yang optimum agar mendapatkan konversi reaksi yang tinggi.

1.2 Tema Sentral Masalah

Tema sentral masalah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah **Pemodelan Hydrotreating DBT pada Nafta** sehingga diperoleh model yang sesuai.

1.3 Identifikasi Masalah

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi bahan baku (umpan) terhadap perubahan konsentrasi tiap titik reaktor?
2. Apakah pengaruh temperatur terhadap konsentrasi tiap titik reaktor?

1.4 Premis

1. Umpan reaktor yang digunakan adalah umpan nafta dengan menggunakan katalis NiMo/Al₂O₃ (Subagjo dan Ulfah, 2013)
2. Kinetika reaksi DBT dilakukan dalam reaktor batch dengan variasi suhu 300-340°C dan tekanan 20 bar (Subagjo dan Ulfah, 2013)
3. Gas yang digunakan untuk pemisahan DBT adalah gas H₂ (Subagjo dan Ulfah, 2013)
4. Persamaan laju reaksi yang digunakan adalah persamaan model IX dengan menunjukkan konversi keluaran sebesar 98% (Subagjo dan Ulfah, 2013)
5. Reaksi desulfurisasi berlangsung satu arah (Muhammad Husein, dkk, 2017)

1.5 Hipotesis

1. Semakin besar umpan reaktor, maka semakin rendah konversinya
2. Semakin tinggi temperatur, maka semakin tinggi konversinya
3. Semakin besar konsentrasi sulfur, maka semakin rendah konversinya

1.6 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh konsentrasi *dibenzothiophene* pada umpan nafta terhadap konversi reaktor
2. Mengetahui pengaruh temperatur umpan nafta terhadap konversi reaktor
3. Mengetahui pengaruh laju alir umpan nafta terhadap konversi reaktor

4. Mengetahui pengaruh rasio H₂/Nafta terhadap konversi reaktor
5. Mengetahui pengaruh tekanan terhadap konversi reaktor

1.7 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Manfaat bagi mahasiswa dan ilmuwan

Penelitian ini diharapkan dapat menentukan kondisi operasi optimum sehingga mendapatkan kualitas bahan bakar yang terbaik

2. Manfaat bagi masyarakat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan hasil produk bahan bakar terbaik untuk digunakan

3. Manfaat bagi industri

Penelitian ini diharapkan dapat memberi informasi dan pengetahuan untuk mengetahui kondisi operasi dan umpan yang optimum