**TK4093 PENELITIAN TEKNIK KIMIA II**  
**Semester II - 2021/2022**

**Judul**

**STUDI KINETIK DAN SIMULASI KONSEPTUAL REAKTOR PRODUKSI BIOAVTUR**

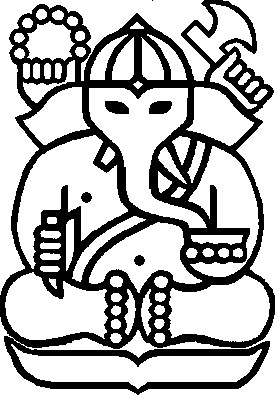
**Kelompok C2.2021.K.11**

Hanif Muhammad Dhiya U (13018019) Prama Pradipta Andrisi (13018032)

**Pembimbing**

Dr. I.G.B.N. Makertiharta

Dr. Haryo Pandu Winoto



PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

Mei 2022

# LEMBAR PENGESAHAN

TK4093 PENELITIAN TEKNIK KIMIA II

Semester II – 2021/2022

**STUDI KINETIK DAN SIMULASI KONSEPTUAL REAKTOR PRODUKSI BIOAVTUR**

Kelompok C2.2021.K.11

Hanif Muhammad Dhiya Ulhaq (13018019)

Prama Pradipta Andrisi (13018032)

|  |
| --- |
| Catatan Pembimbing |

Bandung, Mei 2022

|  |  |
| --- | --- |
| Disetujui Pembimbing 1  Dr.Ir. I.G.B.N. Makertiharta | Disetujui Pembimbing 2  Dr. Haryo Pandu Winoto, S.T., M. Sc. |

# SURAT PERNYATAAN

TK4092 PENELITIAN TEKNIK KIMIA II

Semester II Tahun 2021/2022

Kami yang bertanda tangan di bawah ini :

Kelompok : C2.2021.K.11

Nama (NIM) : Hanif Muhammad Dhiya Ulhaq (13018019)

Nama (NIM) : Prama Pradipta Andrisi (13018032)

dengan ini menyatakan bahwa laporan dengan judul:

**STUDI KINETIK DAN SIMULASI KONSEPTUAL REAKTOR PRODUKSI BIOAVTUR**

adalah hasil penelitian kami sendiri di mana seluruh pendapat dan materi dari sumber lain telah dikutip melalui penulisan referensi yang sesuai. Publikasi yang dibuat berdasarkan materi yang tercakup dalam dokumen penelitian ini **hanya dapat dilakukan dengan sepengetahuan dan seijin dosen pembimbing penelitian.**

Surat pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya dan jika pernyataan dalam lembar pernyataan ini di kemudian hari diketahui keliru, kami bersedia menerima sangsi sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 24 Mei 2021

|  |  |
| --- | --- |
| A picture containing text  Description automatically generated  Hanif Muhammad Dhiya Ulhaq | Logo  Description automatically generated  Prama Pradipta Andrisi |

**TK4092 PENELITIAN TEKNIK KIMIA II**

**Studi Kinetik Dan Simulasi Konseptual Reaktor Produksi Bioavtur**

Kelompok C2.2021.K.11

Hanif Muhammad Dhiya Ulhaq (13018019) dan Prama Pradipta Andrisi(13018032)

Pembimbing

Dr. Ir. I.G.B.N. Makertiharta

Dr. Haryo Pandu Winoto, S.T., M. Sc.

|  |
| --- |
|  |

# ABSTRAK

Bioavtur merupakan salah satu sumber bahan bakar terbarukan yang menggunakan minyak nabati sebagai umpan dalam proses produksinya. Pembuatan bioavtur biasanya dilakukan dengan proses konversi minyak nabati menjadi alkana melalui reaksi hidrodeoksigenasi. Minyak inti kelapa sawit (PKO) berpotensi menjadi umpan pembuatan bioavtur karena kandungan utamanya adalah asam laurat yang memiliki rantai karbon pada rentang yang sesuai dengan avtur (C9 – C15). Kinerja proses HDO, seperti konversi dan selektivitas, dapat dipengaruhi beberapa faktor seperti temperatur, tekanan, katalis, dan waktu tinggal. Oleh karena itu, simulasi reaktor HDO dapat membantu dalam menentukan kondisi operasi untuk mendapatkan proses produksi bioavtur yang optimal.

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap, antara lain studi literatur dan pengumpulan data, pemodelan dan pengolahan data serta simulasi reaktor. Pemodelan dilakukan mengikuti data penelitian oleh (Brandão dkk., 2020) yang melakukan reaksi HDO asam laurat dalam reaktor partaianmenggunakan katalis NiMo/Al2O3 yang disulfidasi pada tekanan 30 bar dan temperatur 280 – 340 oC. Data penelitian meliputi konversi asam laurat dan yield undekana dan dodekana pada beberapa kondisi temperatur dan waktu reaksi. Data ini kemudian digunakan untuk membangun model neraca massa dan energi reaktor pipa adiabatik. Permodelan reaktor dibangun sesuai dengan dimensi reaktor *hydrotreatment* di Pertamina RU II-Dumai (L = 3 m, d = 1.6 m, V = 6 m3). Hasil permodelan kemudian disimulasikan pada beberapa variasi fraksi massa asam laurat umpan, temperatur umpan, dan kecepatan ruang menggunakan perangkat lunak Python untuk menentukan kondisi operasi agar reaksi menghasikan konversi asam laurat dan selektivitas HDO yang optimal sambil menjaga agar temperature reaktor tidak melebihi batasan desain reaktor *hydrotreating*.

Kata kunci : Asam laurat, hidrodeoksigenasi, model, NiMo/Al2O3

**TK4092 CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH II**

**Kinetic Study and Conceptual Simulation of Reactor for Bioavtur Production**

Group C2.2021.K.11

Hanif Muhammad Dhiya Ulhaq (13018019) and Prama Pradipta Andrisi(13018032)

Advisor

Dr. Ir. I.G.B.N. Makertiharta

Dr. Haryo Pandu Winoto, S.T., M. Sc.

|  |
| --- |
|  |

# ABSTRACT

Bioavtur is one of the renewable fuels which use vegetable oil as feedstock in its production. The production of bioavtur usually involves hydrodeoxygenation reaction to convert vegetable oil to paraffin. Palm kernel oil (PKO) has potential to be used as feedstock for bioavtur production due to its high lauric acid content which is already in the suitable carbon chain range for avtur (C9-C15). The performance of HDO process, such as conversion and selectivity, can be influenced by several factors, including temperature, pressure, catalyst, and residence time. Therefore, the simulation of HDO reactor can be utilized in determining the operating conditions that lead to optimal bioavtur production.

This study consists of several stages, including literature study, data collection, data processing, modelling and reactor simulation. The modelling is based of the research data by (Brandão et al., 2020) who carried out HDO reaction of lauric acid in a batch reactor using sulfided NiMo/Al2O3 catalyst at 30 bar of pressure and 280 – 340 oC of temperature. The data provided includes lauric acid conversion and undecane and dodecane yield at several temperature and reaction time. This data is then used to build the mass and energy balance of an adiabatic plug flow reactor. Reactor modelling is built in accordance with the hydrotreating reactor dimension from Pertamina RU II-Dumai (L = 3 m, d = 1.6 m, V = 6 m3). The reactor model will be simulated at several variation of feed lauric acid mass fraction, feed temperature, and space velocity using Python as the programming software to determine the operating conditions that will lead to optimal conversion and HDO selectivity while ensuring reactor temperature does not exceed the maximum threshold of typical hydrotreatingreactor.

Keyword**:** Hydrodeoxygenation, lauric acid, modelling, NiMo/Al2O3

# KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan proposal penelitian yang berjudul “Studi Kinetik Dan Simulasi Konseptual Reaktor Produksi Bioavtur ” tepat waktu. Proposal penelitian ini merupakan salah satu syarat kelulusan mata kuliah TK4092 Penelitian Teknik Kimia I, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.

Dalam menyusun laporan akhir penelitian ini, penulis mendapat banyak bantuan dari pihak-pihak lain. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Dr. I.G.B.N. Makertiharta dan Dr. Haryo Pandu Winoto sebagai dosen pembimbing dalam penulisan proposal.
2. Orang tua dari kedua penulis yang telah memberikan dukungan moral dan material selama proses penulisan proposal, terutama pada masa pandemi.
3. Mahasiswa yang tergabung di dalam Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis (TRKK) sebagai rekan seperjuangan dalam penulisan proposal penelitian.
4. Seluruh teman dan kerabat yang telah memberikan dukungan selama penulisan proposal penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa proposal penelitian yang telah disusun masih memiliki kesalahan, kekurangan, dan belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang dapat meningkatkan kualitas penulisan proposal penelitian ini. Akhir kata, penulis berharap proposal penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi para pembacanya.

# DAFTAR ISI

[LEMBAR PENGESAHAN i](#_Toc104359729)

[SURAT PERNYATAAN iii](#_Toc104359730)

[ABSTRAK v](#_Toc104359731)

[ABSTRACT vi](#_Toc104359732)

[KATA PENGANTAR vii](#_Toc104359733)

[DAFTAR ISI viii](#_Toc104359734)

[DAFTAR TABEL x](#_Toc104359735)

[DAFTAR GAMBAR xi](#_Toc104359736)

[BAB I PENDAHULUAN 1](#_Toc104359737)

[1.1 Latar Belakang 1](#_Toc104359738)

[1.2 Rumusan Masalah 2](#_Toc104359739)

[1.3 Tujuan dan Sasaran Penelitian 3](#_Toc104359740)

[1.4 Ruang Lingkup 3](#_Toc104359741)

[BAB II TINJAUAN PUSTAKA 4](#_Toc104359742)

[2.1 Avtur 4](#_Toc104359743)

[2.1.1 Karakteristik Avtur 4](#_Toc104359744)

[2.2 Bioavtur 5](#_Toc104359745)

[2.2.1 Perkembangan Bioavtur 5](#_Toc104359746)

[2.2.2 Rute Produksi Bioavtur 7](#_Toc104359747)

[2.3 Minyak Nabati 8](#_Toc104359748)

[2.4 Hidrodeoksigenasi 9](#_Toc104359749)

[2.5 Katalis 22](#_Toc104359750)

[2.6 Efek Kondisi Operasi 24](#_Toc104359751)

[2.6.1 Efek Temperatur 24](#_Toc104359752)

[2.6.2 Efek Tekanan 26](#_Toc104359753)

[2.6.3 Efek Waktu Tinggal 28](#_Toc104359754)

[BAB III METODOLOGI PENELITIAN 31](#_Toc104359755)

[3.1 Tahapan Penelitian 31](#_Toc104359756)

[3.2 Dasar Pemodelan 33](#_Toc104359757)

[3.3 Prosedur Kerja 34](#_Toc104359758)

[3.3.1 Studi Literatur dan Pengumpulan Data 34](#_Toc104359759)

[3.3.2 Permodelan dan Pengolahan Data Kinetika Reaksi HDO 35](#_Toc104359760)

[3.3.3 Simulasi Reaktor 36](#_Toc104359761)

[3.4 Variasi Percobaan 38](#_Toc104359762)

[3.4.1 Variabel Kontrol 38](#_Toc104359763)

[3.4.2 Variabel Terikat 38](#_Toc104359764)

[3.4.3 Variabel Bebas 39](#_Toc104359765)

[3.5 Jadwal Kerja 39](#_Toc104359766)

[BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 41](#_Toc104359767)

[4.1 Model Reaksi 41](#_Toc104359768)

[4.1.1 Data Fisik dan Kimia 41](#_Toc104359769)

[4.1.2 Model Reaksi dan Asumsi yang Digunakan 42](#_Toc104359770)

[4.1.3 Penentuan Parameter Kinetika Reaksi HDO 42](#_Toc104359771)

[4.1.4 Neraca Massa dan Energi Permodelan Reaktor 48](#_Toc104359772)

[4.2 Evaluasi Pengaruh Kondisi Operasi terhadap Reaksi HDO 49](#_Toc104359773)

[4.2.1 Pengaruh Fraksi Massa Asam Laurat dalam Umpan 49](#_Toc104359774)

[4.2.2 Pengaruh Temperatur Umpan 53](#_Toc104359775)

[4.2.3 Pengaruh Kecepatan Ruang 55](#_Toc104359776)

[BAB V KESIMPULAN 58](#_Toc104359777)

[DAFTAR PUSTAKA 59](#_Toc104359778)

[DAFTAR SIMBOL 63](#_Toc104359779)

[LAMPIRAN A Algoritma Python untuk Simulasi HDO pada Reaktor Pipa Adiabatik Ideal 65](#_Toc104359780)

[LAMPIRAN B Rumus-Rumus untuk Simulasi HDO Asam Laurat 68](#_Toc104359781)

# DAFTAR TABEL

[**Tabel 2.1** Spesifikasi Avtur (Nelson dan Reddy, 2017) 4](#_Toc104360471)

[**Tabel 2.2** Perkembangan bioavtur (W. C. Wang dan Tao, 2016) 5](#_Toc104360472)

[**Tabel 2.3** Keunggulan dan kelemahan dari bioavtur (Doliente dkk., 2020) 6](#_Toc104360473)

[**Tabel 2.4** Kandungan asam lemak dalam berbagai minyak nabati (Khan dkk., 2019), (Noriega dkk., 2020), (Orsavova dkk., 2015), dan (Mancini dkk., 2015) 9](#_Toc104360474)

[**Tabel 2.5** Rangkuman reaksi HDO pada berbagai minyak nabati 12](#_Toc104360475)

[**Tabel 2.6** Rangkuman reaksi HDO pada berbagai asam lemak dan trigliserida 16](#_Toc104360476)

[**Tabel 3.1** Data indeks keasaman pada berbagai kondisi operasi (Brandão dkk., 2020) 33](#_Toc104360477)

[**Tabel 3.2** Data yield undekana, dodekana dan produk *cracking* pada berbagai kondisi operasi (Brandão dkk., 2020) 33](#_Toc104360478)

[**Tabel 3.3** Variabel kontrol pada simulasi reaksi HDO di PFR 38](#_Toc104360479)

[**Tabel 3.4** Rencana jadwal kerja penelitian 39](#_Toc104360480)

[**Tabel 4.1** Data fisik dan kimia senyawa kimia organik 41](#_Toc104360481)

[**Tabel 4.2** Data fisik dan kimia senyawa anorganik 41](#_Toc104360482)

[**Tabel 4.3** Data berat molekul senyawa 41](#_Toc104360483)

[**Tabel 4.4** Nilai indeks keasaman masing masing kondisi 43](#_Toc104360484)

[**Tabel 4.5** Data *yield* dodekana dan undekana pada masing masing kondisi 43](#_Toc104360485)

[**Tabel 4.6** Nilai indeks keasaman masing masing kondisi dan konversinya 43](#_Toc104360486)

[**Tabel 4.7** Penentuan orde dan konstanta laju reaksi menggunakan metode tabulasi 44](#_Toc104360487)

[**Tabel 4.8** Data konstanta laju reaksi 45](#_Toc104360488)

[**Tabel 4.9** Nilai konstanta Arrhenius dan energi aktivasi reaksi utama dan samping 46](#_Toc104360489)

[**Tabel 4.10** Parameter kinetika reaksi HDO asam laurat 47](#_Toc104360490)

[**Tabel 4.11** Model reaksi hasil pengolahan data 47](#_Toc104360491)

[**Tabel 4.12** Perbandingan data konversi asam laurat dan selektivitas HDO pada literatur dengan data pemodelan kinetika reaksi 48](#_Toc104360492)

[**Tabel A.1** Penjelasan algoritma simulasi pada python 65](#_Toc104360493)

# DAFTAR GAMBAR

[**Gambar 2.1** Proses HEFA (W.-C. Wang dkk., 2016) 8](#_Toc104360589)

[**Gambar 2.2** Skema umum reaksi deoksigenasi trigliserida (Sotelo-Boyas dkk., 2012) 11](#_Toc104360590)

[**Gambar 2.3** Skema reaksi hidrodeoksigenasi *refined rapeseed oil* (Bejblova dan Kubic, 2010) 20](#_Toc104360591)

[**Gambar 2.4** Skema reaksi hidrodeoksigenasi tripalmitin dan tristearin (Yenumala dkk., 2017) 21](#_Toc104360592)

[**Gambar 2.5** Skema reaksi deoksigenasi minyak PKO (Itthibenchapong dkk., 2017) 21](#_Toc104360593)

[**Gambar 2.6** Konversi TG pada katalis NiMo dengan Ni/Ni+Mo = 0,3 (biru), Mo (hitam), dan Ni (merah). T = 260 oC, P = 3,5 MPa (Kubic dan Kaluza, 2010). 23](#_Toc104360594)

[**Gambar 2.7** Selektivitas n-oktadekana (HDO) terhadap yield hidrokarbon pada katalis NiMO dengan (a) Ni/Ni+Mo = 0,3 (biru), 0 (hitam), dan 1 (merah). T = 260 – 280 oC, P = 3,5 MPa, V/F = 0,25 – 4 h ; (b) Ni/Ni+Mo = 0,2 (hitam), 0,3 (biru), dan 0,4 (merah). T = 260 –280 oC, P = 3,5 MPa, V/F = 0,25 – 1 h (Kubic dan Kaluza, 2010). 23](#_Toc104360595)

[**Gambar 2.8** Efek temperatur terhadap deoksigenasi asam laurat pada tekanan hidrogen 20 bar dan waktu reaksi 2 jam (Yang dan Carreon, 2017). 25](#_Toc104360596)

[**Gambar 2.9** Efek temperatur terhadap deoksigenasi PKO pada tekanan hidrogen 50 bar dan LHSV 1 jam-1 pada produk cair (Itthibenchapong dkk., 2017). 25](#_Toc104360597)

[**Gambar 2.10** Efek atmosfer gas terhadap deoksigenasi asam laurat pada suhu 320 oC, waktu reaksi 2 jam, dan tekanan 20 bar (Yang dan Carreon, 2017). 27](#_Toc104360598)

[**Gambar 2.11** Efek tekanan hidrogen terhadap deoksigenasi PKO pada suhu 300 oC LHSV 1 jam-1 pada produk cair (Itthibenchapong dkk., 2017). 27](#_Toc104360599)

[**Gambar 2.12** Efek LHSV terhadap deoksigenasi PKO pada suhu 300 oC dan tekanan hidrogen 50 bar pada produk cair (Itthibenchapong dkk., 2017). 28](#_Toc104360600)

[**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian 32](#_Toc104360601)

[**Gambar 3.2** Mekanisme reaksi HDO asam laurat 34](#_Toc104360602)

[**Gambar 3.3** Diagram alir prosedur simulasi reaktor pada python 37](#_Toc104360603)

[**Gambar 4.1** Model reaksi HDO 42](#_Toc104360604)

[**Gambar 4.2** Kurva regresi ln (k1) terhadap 1/T 46](#_Toc104360605)

[**Gambar 4.3** Kurva regresi ln (k2) terhadap 1/T 47](#_Toc104360606)

[**Gambar 4.4** Profil temperatur di sepanjang reaktor pada berbagai variasi fraksi massa LA umpan pada temperatur umpan 573 K dan LHSV 1 jam-1 50](#_Toc104360607)

[**Gambar 4.5** Profil konversi LA pada berbagai variasi fraksi massa LA umpan pada temperatur umpan 573 K dan LHSV 1 jam-1 51](#_Toc104360608)

[**Gambar 4.6** Profil selektivitas HDO pada berbagai variasi fraksi massa LA umpan pada temperatur umpan 573 K dan LHSV 1 jam-1 52](#_Toc104360609)

[**Gambar 4.7** Profil (a) konversi LA dan (b) selektivitas HDO pada berbagai variasi fraksi massa LA umpan pada fraksi massa LA umpan 30% dan LHSV 1 jam-1 54](#_Toc104360610)

[**Gambar 4.8** Kurva sensitivitas total produk dodekana terhadap temperatur inlet 55](#_Toc104360611)

[**Gambar 4.9** Profil (a) temperatur, (b) konversi LA, dan (c) selektivitas HDO pada berbagai variasi fraksi massa LA umpan pada fraksi massa LA umpan 30% dan LHSV 1 jam-1 56](#_Toc104360612)

[**Gambar 4.10** Kurva sensitivitas total produk dodekana terhadap temperatur inlet 57](#_Toc104360613)

# PENDAHULUAN

## Latar Belakang

Menurut Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia, pada tahun 2018, konsumsi avtur mencapai 8,43% dari total konsumsi energi pada bidang transportasi di Indonesia atau terbesar ketiga setelah bensin dan *biogasoil*. Data konsumsi avtur tahunan di Indonesia pada tahun 2015 adalah 4.336,6 juta liter dan meningkat menjadi 5.717,7 juta liter pada tahun 2018 atau meningkat 31,8% dalam 3 tahun. Sementara itu, Indonesia masih mengimpor avtur sebesar 1.518 juta liter pada tahun 2018 atau sekitar 26,5% dari total konsumsi avtur (Adi dkk., 2020). Mulai dari tahun 2019, Indonesia menekan impor avtur menjadi 280 juta liter dan meningkatkan ekspor avtur menjadi 795 ribu barrel (Adi dkk., 2020) . Sehingga produksi avtur di Indonesia diharapkan dapat terus meningkat baik untuk memenuhi pasar dalam negeri maupun diekspor ke negara lain.

Salah satu bahan bakar alternatif adalah bioavtur dari minyak nabati (*vegetable oil*). Salah satu contoh minyak nabati adalah minyak kelapa sawit. Indonesia merupakan negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia sejak tahun 2006 dengan produksi minyak sawit mencapai 31 juta ton (Sequiño dan Magallon-Avenido, 2015). Oleh karena itu, produksi bioavtur dari minyak inti kelapa sawit sangat mungkin dilakukan di Indonesia. Namun, saat ini, di Indonesia belum ada produksi bioavtur dari minyak inti kelapa sawit secara komersil dan diuji coba langsung kepada pesawat terbang.

Minyak inti kelapa sawit mengandung mayoritas trigliserida dengan jumlah karbon alkil (C12 & C14) yang sesuai sebagai produk avtur pada rentang C9 – C15. Pembuatan avtur dari *vegetable oil* dilakukan dalam beberapa tahap: hidrogenasi trigliserida (TG), hidrodeoksigenasi (HDO) dan hidroisomerisasi (HIS). Hidrogenasi TG dilakukan untuk mengubah TG tak jenuh menjadi TG jenuh. Hidrodeoksigenasi dilakukan untuk memutuskan oksigen dari trigliserida membentuk asam lemak dan akan lanjut terkonversi membentuk alkana rantai lurus, dan hidroisomerisasi dilakukan untuk mengubah alkana rantai lurus menjadi bentuk rantai bercabang untuk meningkatkan properti *cold flow* yang diperlukan dalam penggunaannya di bidang aviasi. Reaksi hidroisomerisasi biasanya terjadi bersamaan dengan reaksi *hydrocracking*.

Untuk mengetahui kondisi operasi yang tepat agar dapat menghasilkan bioavtur dari asam laurat, dibutuhkan simulasi reaktor proses HDO. Simulasi dilakukan untuk reaktor pipa adiabatik skala industri. Dengan adanya simulasi ini, diharapkan akan mendorong perkembangan penelitian dan industrialisasi proses produksi bioavtur dari minyak inti kelapa sawit, khususnya di Indonesia.

## Rumusan Masalah

Proses hidrodeoksigenasi dimulai dengan pemotongan ikatan C – O pada trigliserida yang akan membentuk asam lemak. Asam lemak akan mengalami konversi menjadi hidrokarbon alkana rantai lurus melalui tiga jalur reaksi, yaitu jalur hidrodeoksigenasi (HDO), dekarbonilasi (DCO), dan dekarboksilasi (DCO2). Proses HDO, DCO, atau DCO2 akan bergantung dengan katalis yang digunakan. Selekivitas jalur reaksi akan bergantung pada keasaman penyangga katalis yang digunakan.

Penelitian sebelumnya (Brandão dkk., 2020) mengkaji proses HDO asam laurat menggunakan katalis NiMo/Al2O3 yang disulfidasi dalam reactor *batch*. Kinetika reaksi penting dalam proses perancangan reactor. Digunakan data konversi dan *yield* proses HDO asam laurat pada berbagai temperature dan waktu reaksi untuk mendapatkan nilai parameter kinetika reaksi. Parameter kinetika reaksi digunakan untuk mensimulasikan reaktor kontinu pipa ideal dengan aliran adiabatik (*Adiabatic PFR*). Kinerja dari proses HDO akan bergantung pada kondisi operasi seperti konsentrasi umpan, temperatur, dan waktu tinggal.

Sehingga, diperlukan simulasi reaktor proses HDO asam laurat menjadi n-dodekana menggunakan katalis NiMo/Al2O3 yang disulfidasi untuk mengetahui kondisi operasi yang akan menghasilkan hidrokarbon alifatik rentang avtur terbaik dan menjaga agar temperatur reaktor tidak melebihi batas desain reaktor *hydrotreating* lainnya.

## Tujuan dan Sasaran Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk membuat model proses dan menentukan konfigurasi parameter operasi pada reaksi HDO dari asam laurat menjadi bioavtur secara kontinu pada reaktor pipa adiabatik ideal.

Sasaran penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat model matematika simulasi proses HDO asam laurat yang dilakukan dalam reaktor pipa adiabatik ideal dengan menggunakan *software* python.
2. Mengevaluasi %-wt asam laurat pada umpan agar temperatur reaktor tidak melebihi batas desain reaktor *hydrotreating* tipikal.
3. Mengevaluasi temperatur umpan untuk mencapai konversi dan selektivitas HDO yang optimal.
4. Mengevaluasi kecepatan ruang reaktor untuk mencapai konversi dan selektivitas HDO yang optimal.

## Ruang Lingkup

Batasan-batasan dalam penelitian ini adalah :

1. Umpan yang digunakan pada proses HDO adalah asam laurat
2. Katalis yang digunakan untuk reaksi HDO adalah NiMo/Al2O3.
3. Tekanan operasi adalah 30 bar
4. Rasio H2/asam laurat = 300 v/v (Nm3 gas H2/ m3 asam laurat cair)
5. Dimensi reaktor yang digunakan adalah reaktor pipa *hydrotreater* RU II-Dumai dengan panjang = 3 m, diameter = 1,6 m, dan volume = 6 m3 (Subagjo dan Ulfah, 2013).
6. Reaktor pipa beroperasi secara ideal

# TINJAUAN PUSTAKA

## Avtur

*Aviation fuels* atau bahan bakar penerbangan terbagi atas 4 bagian yaitu, *aviation gasolines (avgas), aviation wide-cut gasoline (avtag), aviation kerosene/aviation turbine (avtur),* dan *aviation high-flash kerosine (avcat)*. Perbedaannya adalah pada komposisi dan aplikasinya, avgas merupakan aero piston engine fuels, avtag biasanya digunakan untuk militer di Eropa dan Amerika, avtur digunakan pada penerbangan sipil, dan avcat digunakan oleh angkatan laut. (Goodger dan Vere, 1985).Jenis jenis avtur diantaranya Jet A, Jet A-1, dan JP-8.

### Karakteristik Avtur

Avtur merupakan senyawa kimia yang tidak berwarna, relatif tidak volatil dan komposisinya secara rata rata ekivalen dengan C12,5H24,4 dengan massa molar 175 g/mol (Goodger dan Vere, 1985). Avtur merupakan senyawa hidrokarbon yang berada di rentang C9 – C15. Secara umum komposisi avtur terdiri atas 79% paraffin dan sikloalkana, 20% senyawa aromatic, dan 1 % senyawa olefin Rata rata titik didih avtur berada di rentang 144-252 oC, dan memiliki rapat masa 0,8 kg/L (Goodger dan Vere, 1985)

Ada 2 jenis avtur yang digunakan secara besar di dunia penerbangan, khususnya penerbangan sipil, yaitu Jet-A dan Jet-A1. Jet-A banyak digunakan di Amerika Serikat dan memiliki titik beku ≤ -40 oC. Sedangkan Jet-A1 banyak digunakan di luar Amerika Serikat dengan titik beku lebih rendah dari Jet-A yaitu ≤ -47 oC Sedangkan jenis avtur yang lain yaitu JP-8 digunakan oleh militer dengan penambahan berupa inhibitor korosi dan *anti-icing* (Nelson dan Reddy, 2017). Spesifikasi avtur disajikan pada Tabel 2.1.

###### Spesifikasi Avtur (Nelson dan Reddy, 2017)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Properti | Jet-A1a | Jet Ab | JP-8c |
| Densitas pada 15 oC, (kg/m3) | 775-840 | 775-840 | 775-840 |
| Viskositas pada -20 oC (mm2/s) | ≤ 8 | ≤ 8,0 | ≤ 8,0 |
| *Flash Point* (oC) | ≥ 38 | ≥ 38 | ≥ 38 |
| Titik Beku (oC) | ≤ -47 | ≤ -40 | ≤ -47 |
| Energi spesifik (MJ/kg) | ≥ 42,8 | ≥ 42,8 | ≥ 42,8 |
| Total asiditas (mg KOH/g) | ≤ 0,015 | ≤ 0,010 | ≤ 0,015 |
| Aromatik (% v/v) | ≤ 25 | ≤ 25 | ≤ 25,0 |
| Sulfur (% m/m) | ≤ 0,30 | ≤ 0,30 | ≤ 0,30 |
| Hidrogen (% m/m) | - | - | ≤ 13,4 |
| a Spesifikasi dari DEF STAN 91-91 | | | |
| b Spesifikasi dari ASTM D | | | |
| c Spesifikasi dari MIL-DTL-83133E | | | |

## Bioavtur

Bioavtur merupakan bahan bakar penerbangan yang umpannya adalah biomassa ataupun minyak nabati.

### Perkembangan Bioavtur

Sudah banyak uji coba bioavtur pada pesawat terbang, baik kandungan bioavtur dari 20% sampai dengan 100%. Berbagai jenis umpan dan Rangkuman perkembangan bioavtur tertera pada Tabel 2.2

###### Perkembangan bioavtur (W. C. Wang dan Tao, 2016)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Tahun | Umpan | Maskapai Penerbangan | Kandungan Bioavtur | Rute konversi |
| 2008 | Kelapa & *Babassu* | Virgin Atlantic | 20% | *Oil to jet* |
| 2008 | *Jatropha* | Air New Zealand | 50% | *Oil to jet* |
| 2009 | *Camelina* | KLM | 50% | *Oil to jet* |
| 2011 | *Waste cooking oil* | KLM | 50% | *Oil to jet* |
| 2011 | *Waste cooking oil* | Air France | 50% | *Oil to jet* |
| 2011 | Minyak jarak | AeroMexico | 30% | *Oil to jet* |
| 2011 | Alga | Continental Airlines |  | *Alcohol to jet* |
| 2013 | *Palm oil & waste cooking oil* | China Eastern Airlines |  | *Oil to jet* |

Bioavtur memiliki keunggulan yaitu bahan baku/ umpan yang mudah diperoleh dan melimpah, tidak perlu menggali sumur untuk mendapatkan bahan baku hidrokarbon. Namun, bioavtur juga memiliki kelemahan yaitu jika bahan bakunya merupakan minyak nabati, maka pada tumbuhan tertentu tidak selalu berbuah dan menghasilkan minyak nabati setiap tahun, sehingga akan berdampak pada fluktuasi harga bahan baku maupun proses produksi bioavtur. Beberapa keunggulan dan kelemahan dari bioavtur terangkum dalam Tabel 2.3.

###### Keunggulan dan kelemahan dari bioavtur (Doliente dkk., 2020)

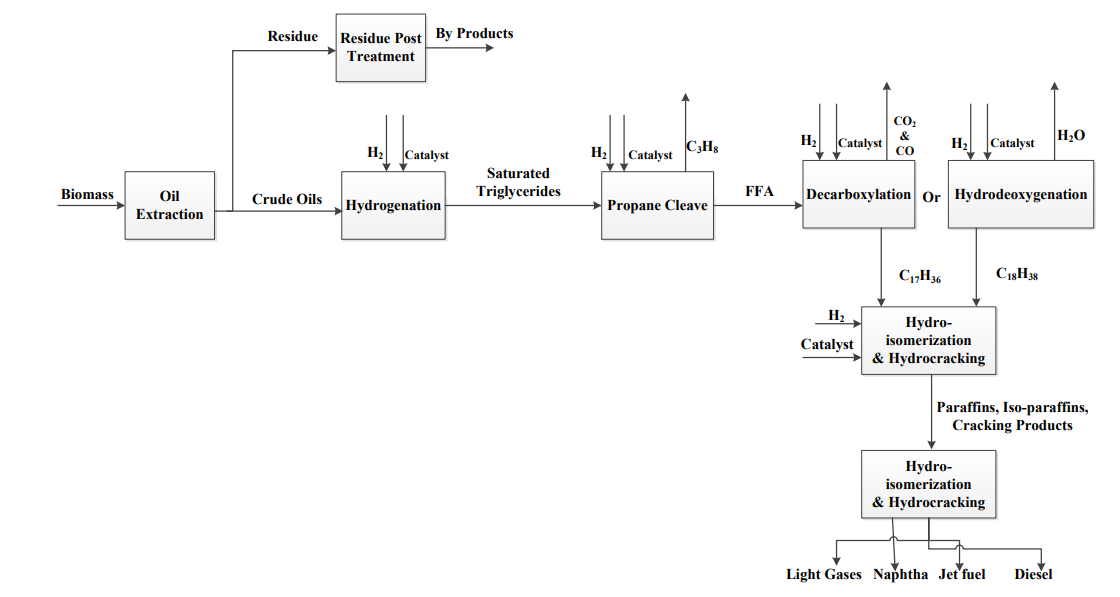
|  |  |
| --- | --- |
| Keunggulan | Kelemahan |
| Ketersediaan sebagai bahan baku tak terbatas (secara teori) | Masalah terkait dengan monokultur, seperti kurangnya keanekaragaman hayati dan rentan terhadap hama |
| Lebih rendah risiko untuk kasus tumpahan minyak dalam jangka Panjang | Kompetisi dengan industri makanan jika bahan baku yang digunakan bisa dimakan |
| Mampu mengurangi emisi CO2 ketika dibakar bergantung pada metode produksinya | Kerugian akibat pembukaan lahan dan penggunaan tanah seperti adanya eutrofikasi akibat penggunaan pupuk, penggunaan air selama budidaya, dll. |
| Secara umum, mengandung sedikit kontaminan | Batasan spasial dan temporal, seperti bahan baku tidak tersedia setiap tahunnya. |

### Rute Produksi Bioavtur

Umpan untuk sintesis bioavtur dari biomassa terbagi menjadi 4, yaitu umpan generasi pertama (*First-Generation Feedstocks*), umpan generasi kedua (*Second-Generation Feedstocks*), umpan generasi ketiga (*Third-Generation Feedstocks*), dan umpan generasi keempat (*Fourth-Generation Feedstocks*) . Pada umpan generasi pertama, umpan yang digunakan adalah bahan yang bisa dimakan seperti minyak kelapa sawit,minyak kelapa, jagung, gula, dll. Minyak atau lemak bisa dikonversi ke avtur melalui HEFA. Sampai tahun 2020, HEFA adalah satu satunya rute untuk memproduksi bioavtur yang telah diimplementasikan pada skala industri. Etanol bisa diproduksi dari jagung lalu dikonversi ke bioavtur melalui proses ATJ. Tantangan dari umpan generasi pertama adalah beban untuk sumber daya air akan meningkat, karena kebanyakan tanaman pangan memiliki kebutuhan air dan nutrisi yang tinggi. Selain itu, persaingan untuk mendapatkan lahan, air, dan energi dengan pertanian atau tanaman pangan lainnya. Keunggulannya adalah biayanya yang murah dan *sustainable* (Doliente dkk., 2020).

Pada umpan generasi kedua, umpan yang digunakan berasal dari bahan yang tidak bisa dimakan yang terdiri atas tanaman energi (*energy crop*) dan *waste biomass*. Contohnya adalah minyak jarak, minyak jelantah. Sudah ada produksi biofuel yang dilakukan namun jumlahnya masih dibawah generasi pertama. Tantangan penggunaan minyak jelantah sebagai umpan adalah komposisinya yang bervariasi dan biaya operasi logistik yang tinggi . Pada umpan generasi ketiga, umpannya berupa alga. Keunggulannya adalah tidak memerlukan lahan yang luas, dan biaya yang relatif rendah. Namun adanya masalah dalam budidaya, pemanenan dan ekstraksi minyak yang tidak efisien dan sampai saat ini tidak feasible secara ekonomi. Pada umpan generasi keempat, umpannya berasal dari organisme yang dimodifikasi secara genetik atau bukan makhluk hidup, seperti gas CO2 dan cahaya matahari (Doliente dkk., 2020).

Salah satu rute produksi bioavtur adalah proses HEFA (*Hydroprocessed esters and fatty acids*) yang disajikan pada Gambar 2.1. Proses produksinya dimulai dengan hidrogenasi katalitik untuk mengonversi asam lemak tak jenuh menjadi asam lemak jenuh dengan penambahan hidrogen. Selanjutnya, dengan penambahan gas hidrogen trigliserida akan terkonversi menjadi 3 asam lemak bebas dan gas propana dengan bantuan katalis. Propana berfasa gas akan dipisahkan, dan asam lemak bebas yang berfasa cair akan di deoksigenasi dengan cara dekarbonilasi atau hidrodeoksigenasi dengan penambahan gas hidrogen dan bantuan katalis. Prodk yang berfasa gas (CO, CO2, dan H2O) akan dipisahkan, selanjutnya produk fasa cair (n-alkana) akan melalui proses hidroisomerisasi dan hidro-*cracking* untuk mencapai spesifikasi avtur, yaitu tidak hanya falsh point yang tinggi, namun juga properti cold flow yang bagus (W.-C. Wang dkk., 2016).



##### Proses HEFA (W.-C. Wang dkk., 2016)

## Minyak Nabati

Kandungan utama minyak inti kelapa sawit (PKO) adalah asam laurat (C12) dan asam miristat (C14) yang Menyusun sekitar 64,1% massa dari PKO. Asam laurat merupakan komponen utama penyusun PKO dengan komposisi 47,8% massa. Asam laurat dan asam miristat merupakan senyawa C12 dan C14 yang berada pada rentang avtur yaitu C9 – C15. Oleh karena itu dengan rute HDO asam laurat akan menghasilkan n-dodekana dan dilanjutkan dengan HIS untuk meningkatkan properti *cold flow* dari avtur. Sehingga jika menggunakan asam laurat yang berasal dari minyak kelapa tidak membutuhkan reaksi *cracking* karena rentang senyawa karbon sudah sesuai dengan avtur. Sebagai contoh, jika digunakan minyak jarak dengan kandungan utama asam oleat dan asam linoleat maka setelah melalui HDO akan terbentuk alkana dengan rantai C18. Sehingga harus dicracking dan di isomerisasi agar sesuai dengan rentang karbon avtur. Hal yang sama juga diperlukan jika ingin membuat bioavtur dari minyak kelapa sawit, *rapeseed*, minyak biji bunga matahari, dan minyak kedelai yang kandungan utamanya adalah asam oleat dan asam linoleate yang keduanya merupakan senyawa C18. Kandungan asam lemak pada berbagai minyak nabati disajikan dalam Tabel 2.4

###### Kandungan asam lemak dalam berbagai minyak nabati (Khan dkk., 2019), (Noriega dkk., 2020), (Orsavova dkk., 2015), dan (Mancini dkk., 2015)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Asam Lemak | Struktur | % massa | | | | | |
| *Palm* | *Rapeseed* | *Jatropha* | *Sunflower* | PKO | *Coconut* |
| Asam Kaprilat | C8:0 | - | - | *­*- | - | 3,3 | ­7,6 |
| Asam Kuprat | C10:0 | - | - | - | - | 3,5 | 5,5 |
| Asam Laurat | C12:0 | 0,1 | - | 0,0 | 0,0 | 47,8 | 47,7 |
| Asam Miristat | C14:0 | 0,7 | 0,11 | 0,0 | 0,0 | 16,3 | 19,9 |
| Asam Palmitat | C16:0 | 36,7 | 4,8 | 15,9 | 6,2 | 8,5 | - |
| Asam Palmitoleat | C16:1 | 0,1 | 0,33 | 0,9 | 0,1 | - | - |
| Asam Stearat | C18:0 | 6,6 | 1,89 | 6,9 | 3,7 | 2,4 | 2,7 |
| Asam Oleat | C18:1 | 46,1 | 61,9 | 41,1 | 25,2 | 15,4 | 6,2 |
| Asam Linoleat | C18:2 | 8,6 | 19,8 | 34,7 | 63,1 | 2,4 | 1,6 |
| Asam Linolenat | C18:3 | 0,3 | 9,21 | 0,3 | 0,2 | - | - |
| Asam Arakidat | C20:0 | 0,4 | 0,62 | 0,0 | 0,3 | 0,1 | - |
| Asam Gadroleat | C20:1 | 0,2 | 1,41 | 0,2 | 0,2 | - | - |

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa proses HEFA sangat *feasible* karena biayanya yang relatif murah. Minyak nabati sangat berperan sebagai umpan untuk proses produksi bioavtur. Minyak kelapa sawit merupakan minyak nabati yang paling bagus digunakan sebagai umpan untuk bioavtur khususnya di Indonesia. Kelapa tidak membutuhkan nutrisi yang banyak dan cukup dengan curah hujan alami di negara tropis sudah mencukupi kebutuhan air dari kelapa sawit. Hal inilah yang membuat harga minyak kelapa sawit menjadi murah. Indonesia dan Malaysia memasok lebih dari 80% total permintaan kelapa sawit di dunia. Dan saat ini kelapa sawit banyak digunakan untuk produksi biodiesel karena energi yang dihasilkan per energi input lebih besar daripada minyak nabati lainnya (Doliente dkk., 2020).

## Hidrodeoksigenasi

*Hydrotreatment* adalah proses untuk meningkatkan kualitas minyak nabati dengan mengurangi kandungan senyawa sulfur, nitrogen, oksigen, maupun logam dalam minyak. Proses *hydrotreatment* meliputi *hydrodesulfurization* (HDS) untuk menghilangkan kandungan sulfur, *hydrodenitrogenation* (HDN) untuk menghilangkan kandungan nitrogen, hydrodeoxygenation (HDO) untuk menghilangkan kandungan oksigen, dan hydrodemetallization (HDM) untuk menghilangkan kandungan logam dalam trigliserida.

Reaksi deoksigenasi (DO) merupakan proses reaksi yang digunakan dalam produksi hidrokarbon dari trigliserida (TG) menggunakan katalis yang tepat pada tekanan hidrogen tinggi. Reaksi deoksigenasi menghasilkan alkana rantai lurus sebagai produk utama dan air sebagai produk samping. Reaksi deoksigenasi tergolong sebagai reaksi eksotermik yang berarti reaksinya akan menghasilkan panas. Pada reaksi deoksigenasi, ikatan trigliserida tak jenuh dapat diubah menjadi ikatan jenuh pada tekanan hidrogen tinggi menggunakan katalis yang tepat. Melalui intermediate ‘mono’ dan ‘di’ gliserida, ikatan jenuh trgliserida dapat diubah membentuk propana dan asam lemak bebas (Galadima dan Muraza, 2015). Asam lemak jenuh kemudian dapat direduksi melalui tiga jalur reaksi: dekarboksilasi (DCO2), dekarbonilasi (DCO), dan hidrodeoksigenasi (HDO). Lalu, senyawa alkana yang didapat dari proses deoksigenasi dilakukan *hydrocracking* dan hidroisomeriasi yang menghasilkan fraksi iso-alkana pada rentang C5 – C15­. Reaksi umum deoksigenasi trigliserida menjadi alkana disajikan dalam Gambar 2.2.

Dalam reaksi HDO, dapat terjadi reaksi samping seperti *water gas shift reaction* dan CO *methanation*. Produk utama fasa gas dari reaksi HDO trigliserida antara lain CO2, CO, H2, dan propana. Reaksi HDO memiliki tingkat konsumsi hidrogen lebih tinggi daripada DCO2 dan DCO namun menghasilkan alkana dengan jumlah karbon yang sama dengan asam lemaknya dan air sebagai byproduct. Reaksi DCO2 dan DCO memiliki konsumsi hidrogen lebih rendah namun menghasilkan alkana dengan jumlah karbon satu dibawah asam lemaknya. Selama reaksi DCO2, terbentuk CO2 yang dapat bereaksi dengan empat mol H2 membentuk metana dan air. CO dan tiga mol H2 juga dapat bereaksi membentuk metana dan air (Jȩczmionek dan Porzycka-Semczuk, 2014). Rangkuman reaksi HDO dengan serta rangkuman reaksi HDO dengan umpan berbagai minyak nabati disajikan dalam Tabel 2.5, umpan berbagai asam lemak dan trigliserida disajikan dalam Tabel 2.6,

A picture containing chart

Description automatically generated

A screenshot of a computer

Description automatically generated with low confidence

##### Skema umum reaksi deoksigenasi trigliserida (Sotelo-Boyas dkk., 2012)

###### Rangkuman reaksi HDO pada berbagai minyak nabati

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Umpan | Katalis | Kondisi | Produk | Penjelasan | Referensi |
| *Refined Rapeseed Oil* | MoO3/CoO/MCM-41 | Dilakukan dalam reaktor unggun tetap dengan diameter 17 mm. Jumlah katalis = 8 g. T = 300 – 320 oC. P = 2-11 MPa. WHSV = 1-4 h-1 . Perbandingan konsenttrasi molar H2 : minyak = 50. | n-alkana (C15 – C18)  sedikit iso alkana | Efek tekanan (H2) : Rasio C18/C17 meningkat seiring peningkatan tekanan hidrogen. Pada tekanan hidrogen yang rendah (2,3 MPa, akan menyebabkan rasio C18/C17 < 1. Sehingga reaksi didominasi oleh dekarboksilasi.  Efek WHSV : rasio C18/C17 berkurang seiring peningkatan WHSV. Semakin besar WHSV semakin kecil selektivitas terhadap hidrokarbon. | (Bejblova dan Kubic, 2010) |
| *Rapeseed Oil* | Mo/Al2O3,  Ni/ Al2O3,  0,3NiMo/ Al2O3, | Dilakukan dalam reactor unggun tetap yang dipanaskan dengan listrik dengan diameter 17 mm. T = 260 – 280 oC. WHSV = 0,25 – 4 h-1 Perbandingan konsenttrasi molar H2 : Rapeseed oil = 50. P = 3,5 MPa. | n-oktadekana  n-heptadekana  n-heksadekana  n-pentadekana | Efek katalis: urutan katalis yang memberikan konversi tinggi ke rendah adalah NiMo>Mo>Ni. Mo memiliki waktu tinggal 2 kali lipat dan 4 kali lipat untuk Ni untuk memberikan konversi yang sama dengan NiMo. Ni lebih menyukai rute DCO2 sedangkan Mo lebih menyukai rute HDO. Katalis NiMo memberikan selektivitas cukup baik terhadap n-oktadekana sekitar 70% pada *yield* hidrokarbon 100% untuk rasio Ni/(Ni+Mo) 0,3. Pada rasio Ni/(Ni+Mo) lebih rendah, memberikan selektivitas n-oktadekana yang lebih tinggi. | (Kubic dan Kaluza, 2010) |
| *Waste Vegetable Oil* | NiMo/Al2O3, CoMo/ Al2O3, dan NiW/ Al2O3 | Dilakukan dalam reactor kontinu berunggun tetap bertekanan tinggi. 2 g katalis dan 10 g waste cooking oil diumpankan. P = 5 MPa H2. T = 350 oC. Waktu = 3 jam. WHSV = 2,8 h-1 | n-alkana | Pada suhu 350 oC, reaksi HDO mencapai 99,4 % dan produk utama dari HDO adalah n-paraffin dengan komposisi 97,2 % pada katalis NiMo. Efek katalis : Katalis NiW dan NiMo lebih baik untuk reaksi HDO darpada CoMo karena pada CoMo membentuk olefin. NiW menempuh jalur DCO2 dan DCO dibanding HDO. | (Toba dkk., 2011) |
| Minyak jarak | CoMo/MTS  CoMo/Al2O3 | Direaksikan dalam reaktor tubular berdiameter 0,8 cm dan panjang 35 cm. P = 80 bar. T = 300 – 425 oC. LHSV = 2 – 12 h-1 . | C15 – C18 | Pada temperatur yang lebih rendah (320 oC) dan space-velocity yang lebih besar akan menyebabkan terjadinya oligomerisasi (produk utama lebih besar dari C18). Data kinetik berupa nilai k untuk masing masing reaksi. | (Sharma dkk., 2012) |
| Minyak kelapa | NiMo/-Al2O3 | Menggunakan reaktor unggun tetap aliran kontinu dengan diameter dalam 8 mm. Katalis 1Ml. P = 0,4 – 0,8 MPa, T = 350 C. LHSV = 1-20 h-1 | n-alkana C8-C16 | Efek tekanan : Karena tekanan hydrogen yang digunakan rendah, maka reaksi DCO2 lebih dominan dibanding HDO.  Efek waktu reaksi : semakin lama waktu reaksi semakin besar konversi (konversi saat 1 jam = 96,9%). *Yield* C1-C3 meningkat seiring meningkatnya waktu reaksi karena hidrogenasi CO dan CO2 ke metana. | Kimura dkk. (2013) |
| *Waste Cooking Oil* | CoMoS | Dalam reactor partaian. Temperatur = 375 oC. Perbandingan katalis dengan minyak = 1:200. Jumlah katalis = 0,6 g. P = 1300 psi. WHSV = 2,8 h-1 | n-oktadekana  n-oktadekena  n-heptadekana  n-heptadekena | Terdapat data kinetik berupa nilai k.  Efek katalis: katalis yang tidak berpenyangga memberikan rasio C18/C17 yang lebih rendah dibanding katalis berpenyangga seperti Al2O3.  Efek temperatur: semakin tinggi temperatur, rasio C18/C17 semakin rendah, selektivitas paraffin semakin tinggi, dan selektivitas hidrokarbon rantai panjang semakin rendah. | (Zhang dkk., 2014) |
| Minyak inti kelapa sawit | NiMoS2/-Al2O3 Ni/NiMo = 0,33 | P = 30-50 bar, T = 270 – 330 C, LHSV = 1-5 h-1, H2/Minyak = 1000 (Ncm3/cm3) pada trickle-bed reaktor | nC11 – nC18 | Kondisi optimal adalah P = 50 bar, T = 330 oC, LHSV = 1h-1, rasio H2/minyak = 1000 N(cm3/cm3) yang menghasilkan konversi 92%, selektivitas HDO = 60%.  Efek LHSV: Semakin besar LHSV maka yield akan semakin berkurang dan selektivitas HDO akan semakin berkurang juga, namun distribusi produk dari reaksi DCO dan DCO2 sedikit meningkat. | (Itthibenchapong dkk., 2017) |
| Minyak sawit, kosambi, nyamplung, kemiri sunan, kedelai dan *sunflower*. | NiMo/Al2O3 | Direaksikan dalam reactor kinetic. P = 1-5 MPa dengan interval 1 MPa. T = 250 – 350 oC. dengan interval 10 oC. | n-alkana | Minyak kedelai memberikan konversi tertinggi pada suhu 340 oC diikuti oleh minyak kelapa sawit dan minyak nyamplung pada tekanan 2 MPa. Konversi terendah ada pada minyak biji bunga matahari. % *yield* terbesar ada pada minyak kelapa sawit yaitu 17 – 22,5 % pada tekanan 2 MPa. | (Susanto dkk., 2020) |
| Minyak kelapa sawit | 0,2 -NiMoS2  MoS2-A (amorf)  MoS2-C (kristalin) | Palm oil, dekana dan katalis diumpankan ke 250 mL Parr reactor. P = 30 bar. T = 280 – 320 oC Kecepatan pengadukan = 150 rpm. | C14 – C18 | Kondisi paling ideal adalah 300 oC, 30 bar, dan waktu 2 jam dengan *yield* n-alkana (C14-C18) = 75,3% dengan menggunakan katalis 0,2 -NiMoS2  Efek katalis : Konversi, produk n-alkana dan *yield* C18 mencapai nilai maksimum pada rasio Ni/(Ni+Mo) = 0,2. Katalis dengan 0,2NiMoS2 memberikan nilai *yield* n-alkana paling besar dibanding MoS2-C dan MoS2-A.  Efek temperatur : pada rasio minyak : katalis = 13,3 :1, ketika temperatur meningkat dari 280 ke 300 C, *yield* n-alkana meningkat dari 65,5% menjadi 75,3%. Namun pada temperatur 320 C *yield* n-alkana berkurang menjadi 47,6 % karena terjadi *cracking*. | (Burimsitthigul dkk., 2021) |

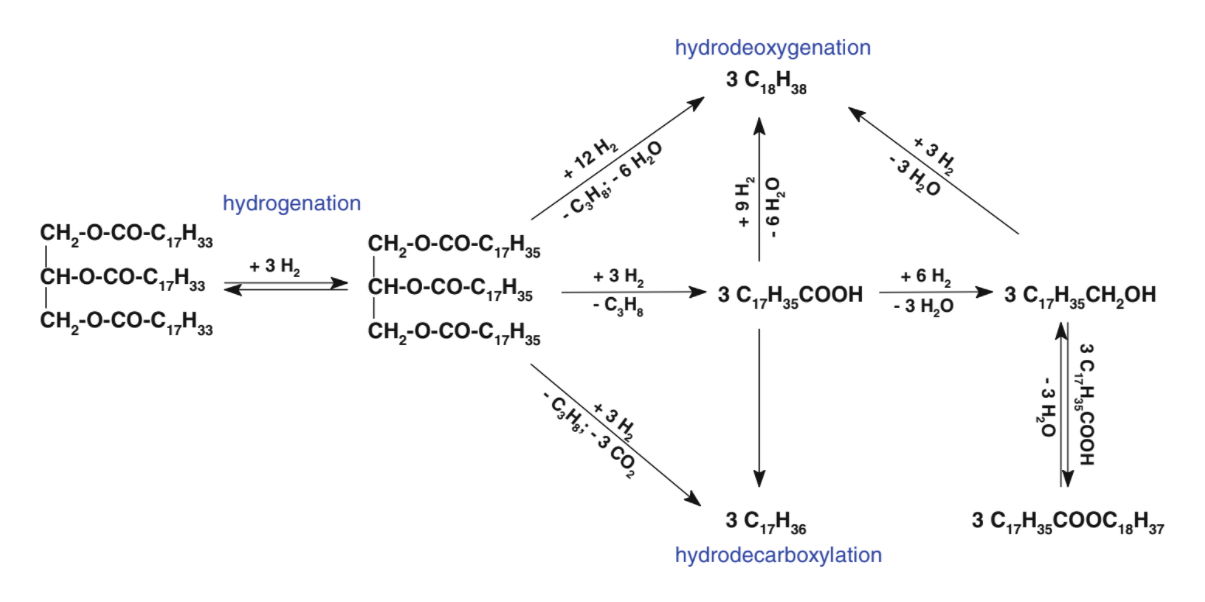
###### Rangkuman reaksi HDO pada berbagai asam lemak dan trigliserida

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Umpan | Katalis | Kondisi | Produk | Penjelasan | Referensi |
| Asam stearat | γ-Al2O3 supported Ni (5-25 NiAl), SiO2 supported Ni (10 NiSi), HZSM-5 supported Ni (10NiZSM) | Dilakukan dalam reactor partaian bertekanan tinggi (12-14,5 bar) dengan volume 400 mL. T = 533 – 563 K . Waktu = 360 menit. Kecepatan pengadukan =1200 rpm | n-pentadekana  n-heksadekana  n-heptadekana  n-oktadekana | n-heptadekana merupakan produk dominan. Reaksi dekarbonilasi lebih cepat daripada reaksi HDO. Data kinetik berupa konstanta laju reaksi, konstanta Arrhenius dan energi aktivasi  Efek katalis : semakin besar *loading* nikel maka semakin besar juga selektivitas terhadap oktadekoanol dan oktadekana.  Efek konsentrasi umpan: semakin besar konsentrasi asam stearate, maka semakin kecil konversinya, namun selektivitas heptadekana konstan | (Kumar dkk., 2014) |
| Asam oleat | FMoOX/Zeol | Dilakukan dalam reactor semi-partaian bertekanan tinggi (20 bar) volume 100 mL. T = 320 – 380 oC. Jumlah katalis = 10 – 30 mg. Waktu = 120 menit | n-oktadekana  i-oktadekana | Temperatur terbaik adalah 360 oC, dengan waktu terbaik 60 menit.  Data kinetik berupa konsatanta laju reaksi, konstanta Arrheniu dan energi aktivasi | (Ayodele dkk., 2015) |
| Trigliserida yang terdiri atas Tripalmitin & tristearin (1:2) | γ-Al2O3 supported Ni (15NiAl) | Dilakukan dalam reactor partaian bertekanan tinggi (30 bar). T = 553 – 633 K. Katalis digunakan 5-20 w/w%. Waktu reaksi = 360 menit. Kecepatan pengadukan = 1200 rpm | n-pentadekana  n-heksadekana  n-heptadekana  n-oktadekana | TG terkonversi ke FAs dalam waktu yang sangat cepat (~ 0 menit). Reaksi dekarbonilasi lebih dominan dari reaksi deokssigenasi. Data kinetik berupa konsatanta laju reaksi, konstanta Arrhenius dan energi aktivasi  Efek katalis : konversi asam lemak akan meningkat seiring peningkatan *loading* katalis karena meningkatnya sisi aktif katalis.  Efek tekanan : konversi asam lemak meningkat seiring peningkatan fraksi mol hydrogen pada fasa gas. Namun seiring peningkatan rasio hydrogen terhadap nitrogen, maka produk alkana akan semakin menurun.  Efek temperatur : konversi asam lemak akan meningkat seiring peningkatan temperatur. | (Yenumala dkk., 2016) |
| Asam stearat | 5 wt% Ni-γ-Al2O3  5 wt% Ni/SiO2  5 wt% Pd/C | Dilakukan dalam reactor semi partaian bertekanan tinggi (7,10,15,20,dan 30 bar) dengan volume = 300 mL. T = 300 oC. Kecepatan pengadukan = 1200 rpm. Waktu reaksi = 6 jam. | n-heptadekana  n-oktadekana | Tekanan 30 bar memberikan konversi dan *yield* C17 terbesar (pada katalis 5 wt% Ni-γ-Al2O3 ) yaitu 99% dan 96%. Selektivitas C18OH dan C17 saat 50% konversi pada tekanan 30 bar juga yang terbesar yaitu 14% dan 88%. Deaktivasi parsial katalis selama reaksi HDO karena adanya penutupan pori oleh deposit karbon. Data kinetic berupa nilai k untuk masing masing reaksi dengan masing masing katalis. | (Jeništová dkk., 2017) |
| *Fatty Acids Methyl Esters* (FAME) | 5wt% Ni/H-Y-80 &  5 wt% Pd/C | Dilakukan pada reactor semi-partaian. T= 300 oC, P = 30 bar dan V = 300 mL. .. Jumlah katalis 0,25 g. | Oktadekana  Heksadekana | Data kinetik nilai k untuk masing masing reaksi | (Hachemi dan Murzin, 2017) |
| *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD) | NiMo/-Al2O3 | Dilakukan pada reaktor autoclave. T = 350 & 400 oC. Tekanan 32,5 = 40 bar. K. Waktu = 4 jam | n-alkana | Konversi terbesar yaitu 98,7% pada suhu 400 oC tekanan 40 bar rasio pelarut = 2:1 dan jumlah katalis = 3%.  Efek katalis : semakin besar *loading* katalis semakin besar juga konversinya,  Efek tekanan : tidak ada pengaruh yang signifikan pada konversi PFAD pada variasi tekanan 40 dan 32,5 bar. Tekanan merupakan parameter yang paling sedikit pengaruhnya terhadap konversi asam lemak. | (Sabarman dkk., 2019) |
| Asam Laurat | *Sulfided* NiMo/Al2O3 | Direaksikan dalam reaktor partaian silinder dengan V= 100 cm3. Jumlah katalis = 0,5 g. P = 30 bar.  T = 400 oC. | C12 dan C11 | Efek temperatur : semakin tinggi temperatur, semakin besar produk *cracking* dan semakin dominan jalur DCO dan DCO2 | (Brandão dkk., 2020) |

Bejblova dan Kubic (2010) melaksanakan reaksi HDO dengan umpan *refined rapeseed oil* dengan menggunakan katalis CoMo/MCM-41 diperoleh mekanisme seperti pada Gambar 2.3 Mekanisme reaksinya adalah umpan *refined rapeseed oil* dengan kandungan utama asam oleat dihidrogenasi membentuk TG jenuh. Lalu TG jenuh dapat mengalami 3 mekanisme reaksi paralel oleh gas hidrogen, yaitu HDO menjadi oktadekana, DCO2 menjadi heptadekana, dan *fatty acid*. Lalu *fatty acid* akan bereaksi melalui 3 reaksi parallel yaitu HDO, DCO2, dan terbentuknya *fatty alcohol*. *Fatty alcohol* akan bereaksi dengan *fatty acid* membentuk *fatty ester* atau bereaksi dengan hydrogen melalui rute HDO. *Fatty ester* sebagai senyawa intermediet yang akan melalui rute HDO. Semakin banyak *fatty ester* yang terbentuk, seleektivitas alkana rantai genap akan semakin tinggi dibanding semakin banyak *fatty acid* yang terbentuk.

Yenumala dkk. (2016) melaksanakan proses HDO dengan umpan campuran tripalmitin dan tristearin dengan perbandingan mol 1:2 menggunakan katalis Ni/-Al2O3. Ditemukan bahwa mayoritas produk dari proses HDO ini adalah hidrokarbon dalam bentuk heptadekana (C17H36) dan pentadekana (C15H32) dengan oktadekana (C18H38) dan heksadekana (C16H34) hadir dalam jumlah yang kecil. Dapat dilihat pada Gambar 2.4, terjadi konversi trigliserida membentuk asam lemaknya. Kemudian, asam lemak akan tereduksi oleh hidrogen menjadi aldehid. Senyawa aldehid ini akan mengalami konversi menjadi alkana melalui dua jalur reaksi, yaitu dekarbonilasi dan hidrodeoksigenasi. Pada jalur dekarbonilasi, aldehid terkonversi menjadi heptadekana dan pentadekana, serta CO sebagai *by-product*. Pada jalur hidrodeoksigenasi, aldehid tereduksi oleh hidrogen membentuk alkohol dilanjutkan dengan dehidrasi menjadi olefin dan berakhir dengan hidrogenasi membentuk senyawa oktadekana dan heksadekana. Jalur reaksi pertama, dekarbonilasi, menghasilkan alkana dengan jumlah karbon satu dibawah dari asam lemaknya sedangkan jalur reaski kedua, hidrodeoksigenasi, menghasilkan alkana dengan jumlah karbon yang sama dengan asam lemaknya. Jalur reaksi DCO yang terjadi pada situs logam katalis lebih dominan daripada jalur HDO yang terjadi pada situs asam disebabkan katalis Ni/-Al2O3 bersifat asam lemah.

Itthibenchapong dkk (2017) melakukan deoksigenasi PKO dengan menggunakan katalis NiMoS2/-Al2O3 rasio Ni/NiMo = 0,33. Mekanisme reaksi deoksigenasi PKO disajikan pada Gambar 2.5. Trigliserida akan terhidrogenasi menjadi asam lemak bebas dan propana. Propana akan mengalami cracking menjadi etana dan metana dengan adanya gas hidrogen dan pada temperatur tinggi (> 330 C). Asam lemak bebas akan mengalami deoksigenasi melalui proses HDO, DCO ataupun DCO2. Pada proses HDO akan dihasilkan hidrokarbon rantai genap dan uap air, pada DCO2 akan dihasilkan hidrokarbon rantai ganjil dan gas CO2 sedangkan pada DCO akan dihasilkan hidrokarbon rantai ganjil, uap air dan gas CO. Gas CO dapat mengalami reaksi metanasi dengan adanya gas hidrogen menjadi metana dan uap air terutama pada tekanan hidrogen tinggi (> 50 bar)

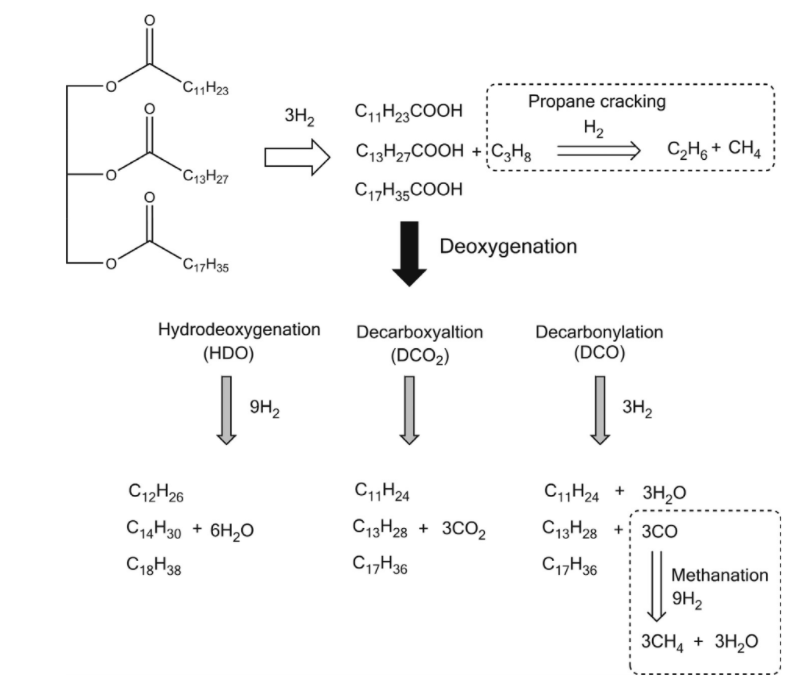


##### Skema reaksi hidrodeoksigenasi *refined rapeseed oil* (Bejblova dan Kubic, 2010)

Diagram, schematic

Description automatically generated

##### Skema reaksi hidrodeoksigenasi tripalmitin dan tristearin (Yenumala dkk., 2017)



##### Skema reaksi deoksigenasi minyak PKO (Itthibenchapong dkk., 2017)

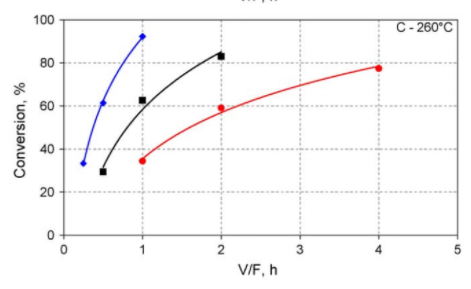
## Katalis

Dalam melaksanakan reaksi, katalis merupakan komponen penting untuk mengoptimisasi distribusi produk dan selektvitas produk (Anuar Sharuddin dkk., 2016). Dalam percobaan ini, diperlukan katalis untuk reaksi hidrodeoksigenasi.

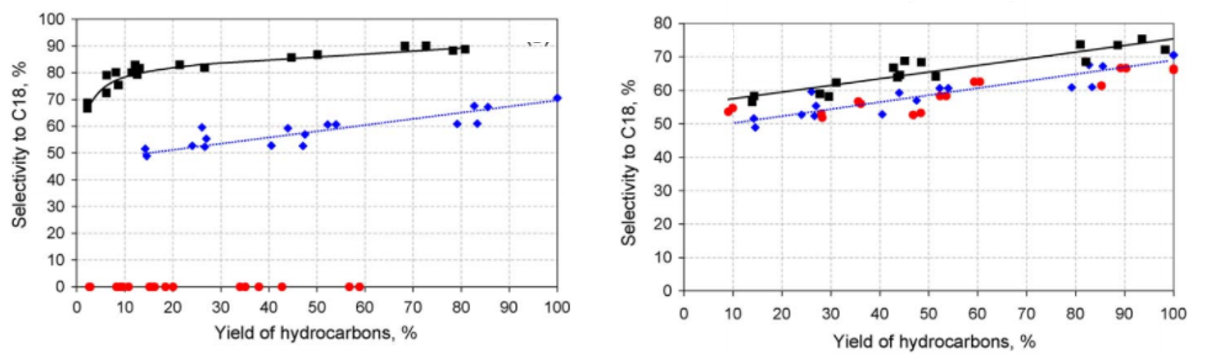
Aktifitas hidrogenasi dari logam pada golongan VIII B meningkat seiring peningkatan nomor atom. Sehingga aktivitas hidrogenasi pada logam golongan VIII B periode 3 Ni>Co. Sedangkan untuk aktivitas hidrogenasi pada periode yang lebih tinggi akan lebih tinggi (Pt>Pd>Ni). Oleh karena itu, logam platinum, palladium maupun Nikel sering digunakan sebagai katalis dalam proses HDO. Selain itu, logam golongan VIB seperti molibdenum (Mo) juga terbukti efektif dalam proses *hydrotreating.* Katalis berbasis logam platinum dan palladium lebih jarang digunakan karena harganya yang mahal karena termasuk logam mulia. Sementara logam nikel lebih melimpah dan murah dibanding Pt serta Pd.

Katalis yang umum digunakan untuk reaksi HDO adalah katalis logam mulia, logam sulfida ataupun logam dengan support. CoMo/Al2O3 dan NiMo/Al2O3 disulfidasi adalah katalis yang banyak digunakan untuk HDO. Namun penggunaan katalis disulfidasi akan membentuk kontaminan sulfur dan reduksi katalis pada reaktan yang kandungan sulfurnya rendah (Mohammad dkk., 2013). Reaksi HDO untuk minyak nabati bersifat eksotermik sehingga akan ada peningkatan temperatur. Peningkatan temperatur dapat menyebabkan katalis terdeaktivasi (Ancheyta, 2016). Selain peningkatan temperatur, tekanan parsial uap air yang terbentuk dari hasil reaksi HDO asam lemak dalam reaktor dapat mengurangi akivitas katalis hingga 1/3 dari aktivitas katalis baru (Laurent dan Delmon, 1994). Deaktivasi parsial katalis selama reaksi HDO dapat terjadi karena adanya penutupan pori oleh deposit karbon (Jeništová dkk., 2017).

Katalis Ni, Mo, dan NiMo berpenyangga alumina merupakan katalis yang banyak diteliti untuk reaksi deoksigenasi saat ini. Katalis yang tidak berpenyangga memberikan rasio hidrokarbon rantai genap/ganjil yang lebih rendah dibanding katalis berpenyangga seperti Al2O3 (Zhang dkk., 2014). Kubicka dan Kaluza (2010) telah menguji kinerja katalis Ni, Mo dan NiMo dengan umpan refined rapeseed oil, diperoleh urutan katalis yang memberikan konversi tinggi ke rendah adalah NiMo>Mo>Ni. Katalis Mo memiliki waktu tinggal 2 kali lipat dan 4 kali lipat untuk Ni untuk memberikan konversi yang sama dengan NiMo seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Katalis Ni memberikan selektivitas yang sangat tinggi pada n-heptadekana, sementara Katalis Mo memberikan selektivitas yang tinggi pada n-oktadekana. Hal ini menunjukkan bahwa katalis Ni lebih menyukai rute DCO2 sedangkan katalis Mo lebih menyukai rute HDO, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7 (a). Sementara itu, katalis NiMo memberikan selektivitas cukup baik terhadap n-oktadekana. Rasio Ni pada katalis NiMo juga akan memengaruhi kinerja katalis. Pada rasio Ni/(Ni+Mo) lebih rendah (seperti 0,2), memberikan selektivitas n-oktadekana yang lebih tinggi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7 (b) (Kubic dan Kaluza, 2010). Menurut Burimsitthigul dkk (2021), konversi, produk n-alkana dan *yield* C18 mencapai nilai maksimum pada rasio Ni/(Ni+Mo) = 0,2, pada rasio yang lebih rendah atau lebih tinggi nilai *yield* C18 akan berkurang.



##### Konversi TG pada katalis NiMo dengan Ni/Ni+Mo = 0,3 (biru), Mo (hitam), dan Ni (merah). T = 260 oC, P = 3,5 MPa (Kubic dan Kaluza, 2010).



1. (b)

##### Selektivitas n-oktadekana (HDO) terhadap yield hidrokarbon pada katalis NiMO dengan (a) Ni/Ni+Mo = 0,3 (biru), 0 (hitam), dan 1 (merah). T = 260 – 280 oC, P = 3,5 MPa, V/F = 0,25 – 4 h ; (b) Ni/Ni+Mo = 0,2 (hitam), 0,3 (biru), dan 0,4 (merah). T = 260 –280 oC, P = 3,5 MPa, V/F = 0,25 – 1 h (Kubic dan Kaluza, 2010).

Katalis HDO yang sudah komersial adalah NiMo dan CoMo terbukti efektif untuk *hydrotreatment* bio-oil (Balagurumurthy dkk., 2015). Namun katalis CoMo menghasilkan produk olefin yang disebabkan oleh aktivitas hidrogenasi yang lebih rendah dibanding NiMo. Selain itu, telah diteliti juga katalis berbasis tungsten (NiW). Namun katalis NiW lebih menyukai jalur DCO2 dan DCO dibanding HDO (Toba dkk., 2011).

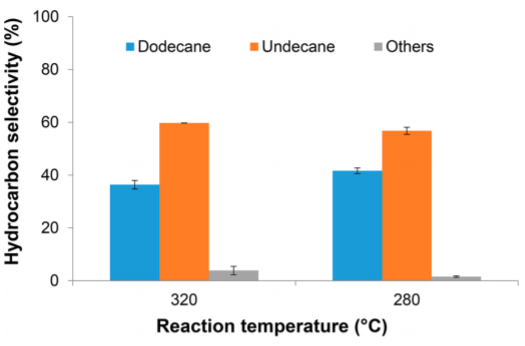
## Efek Kondisi Operasi

Dalam melaksanakan reaksi, kondisi operasi akan memberikan dampak terhadap kinerja proses hidrodeoksigenasi, seperti selektivitas dan konversi minyak nabati (Khan dkk., 2019). Kondisi operasi yang berpengaruh terhadap kinerja proses HDO adalah temperatur, tekanan, dan waktu tinggal.

### Efek Temperatur

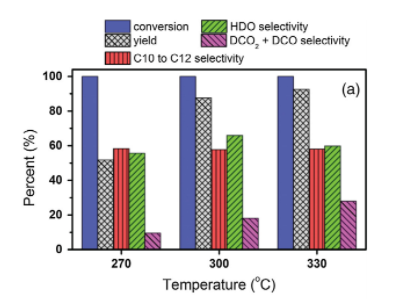
Temperatur merupakan salah satu parameter yang dapat mempengaruhi kinerja proses HDO trigliserida seperti konversi, distribusi produk, dan selektivitas produk. Temperatur juga akan berdampak terhadap laju deaktivasi katalis yang akan mempengaruhi efisiensi proses HDO minyak nabati (Khan dkk., 2019).

Yang dan Carreon (2017) melaksanakan reaksi HDO asam laurat pada temperatur 280 dan 320 oC menggunakan katalis Pt/ZIF-67 Membrane/Zeolite 5A. Ditemukan pada temperatur yang lebih tinggi (320 oC), perolehan produk hasil *cracking* akan meningkat sehingga perolehan produk yang diinginkan akan menurun. Ditemukan juga bahwa dengan meningkatnya temperatur dari 280 oC ke 320 oC, selektivitas produk n-dodekana akan menurun akibat proses deoksigenasi akan cenderung memilih jalur reaksi DCO atau DCO2 yang menghasilkan senyawa n-undekana seperti pada Gambar 2.8.



##### Efek temperatur terhadap deoksigenasi asam laurat pada tekanan hidrogen 20 bar dan waktu reaksi 2 jam (Yang dan Carreon, 2017).

Temuan ini juga didukung oleh penelitian oleh Brandão dkk (2020) yang melaksanakan reaksi HDO asam laurat pada rentang temperatur 280-400 oC menggunakan katalis NiMo-Al2O3. Pada waktu tinggal yang sama, reaksi dengan temperatur tinggi (400 oC) memiliki nilai konversi yang paling tinggi. Walaupun konversinya tinggi, perolehan alkana pada rentang yang diinginkan menurun akibat meningkatnya perolehan produk *cracking*. Pada temperatur tinggi, selektvitias n-dodekana juga menurun karena hal yang sama dimana reaksi deoksigenasi akan cenderung memilih jalur reaksi DCO atau DCO2 yang akan menghasilkan n-undekana. Selain itu, Itthibenchapong dkk (2017) menemukan bahwa pada temperatur tinggi, deoksigenasi minyak nabati akan memilih jalur reaksi DCO dan DCO2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



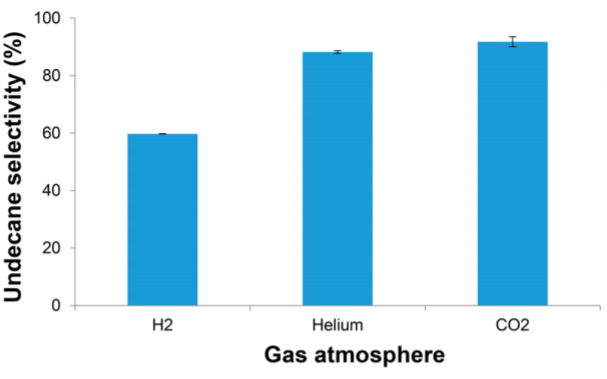
##### Efek temperatur terhadap deoksigenasi PKO pada tekanan hidrogen 50 bar dan LHSV 1 jam­-1 pada produk cair (Itthibenchapong dkk., 2017).

Berdasarkan temuan-temuan diatas, dapat disimpulkan bahwa temperatur akan berdampak signifikan terhadap konversi, jalur reaksi dan selektivitas produk. Ditemukan dengan meningkatnya temperatur, konversi akan meningkat namun bersamaan dengan meningkatnya perolehan produk *cracking*. Selain itu, pada temperatur tinggi reaksi deoksigenasi cenderung terjadi melalui jalur reaksi DCO dan DCO2 daripada jalur reaksi HDO yang akan berdampak terhadap selektivitas produk yang diinginkan.

### Efek Tekanan

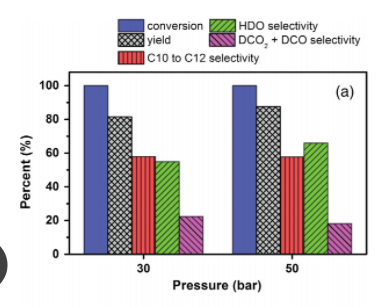
Tekanan merupakan salah satu parameter yang dapat mempengaruhi proses deoksigenasi terutama pada jalur reaksi yang akan terpilih selama proses DO trigliserida. Dalam proses deoksigenasi minyak nabati, dapat digunakan gas H2 murni atau kombinasi H2 dengan gas inert seperti Ar, N2, He, dll. Perbandingan gas yang digunakan dapat mempengaruhi properti *cold flow* produk hidrokarbon, yang merupakan parameter penting dalam spesfikasi avtur. Juga ditemukan bahwa reaksi HDO yang dilakukan menggunakan atmosfer inert seperti N2, He, dan Ar akan mengarah ke terjadinya *cracking*, sebaliknya untuk reaksi HDO menggunakan H2 sebagai gas pereaksinya (Khan dkk., 2019).

Yang dan Carreon (2017) melaksanakan reaksi HDO asam laurat menggunakan katalis NiMo-Al2O3 dan variasi gas pereaksi berupa hidrogen (*reducing*), helium (inert), dan CO2 (oksidan). Ditemukan bahwa pada reaksi HDO yang menggunakan gas helium dan CO2­, selektivitas senyawa n-undekana mencapai nilai berturut-turut sekitar 89% dan 94% yang menunjukkan reaksi deoksigenasi terjadi melalui mekanisme DCO atau DCO2. Sedangkan reaksi menggunakan gas H2 memiliki selektivitas n-undekana yang lebih rendah, sekitar 60%, dan selektivitas n-dodekana meningkat menjadi 30% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi deoksigenasi yang dilakukan menggunakan gas pereaksi H2 akan lebih memilih jalur reaksi HDO daripada menggunakan gas pereaksi inert atau oksidan seperti He dan CO2.



##### Efek atmosfer gas terhadap deoksigenasi asam laurat pada suhu 320 oC, waktu reaksi 2 jam, dan tekanan 20 bar (Yang dan Carreon, 2017).

Berdasarkan percobaan yang dilakukan oleh Kimura dkk. (2013) mengenai hidrokonversi minyak kelapa menggunakan katalis NiMo/-Al2O3 pada rentang tekanan hidrogen 4-8 bar. Ditemukan bahwa pada tekanan hidrogen yang lebih rendah, proses deoksigenasi akan lebih banyak menghasilkan hidrokarbon rantai ganjil akibat terjadinya reaksi melalui mekanisme DCO2. Sedangkan, pada tekanan hidrogen yang lebih tinggi, perolehan produk hidrokarbon rantai genap akan meningkat. Hal ini juga didukung oleh hasil penelitian Itthibenchapong dkk (2017), semakin tinggi tekanan hidrogen maka semakin besar selektivitas HDO seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.11. Namun, di sisi lain, semakin tinggi tekanan hidrogen maka metanasi gas CO menjadi metana juga akan semakin meningkat karena reaksi metanasi lebih disukai pada tekanan hidrogen yang tinggi (Itthibenchapong dkk., 2017).



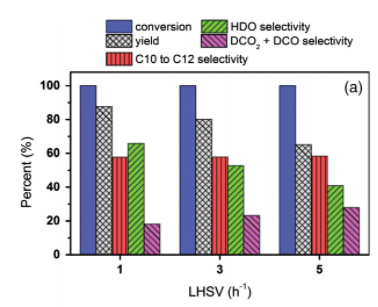
##### Efek tekanan hidrogen terhadap deoksigenasi PKO pada suhu 300 oC LHSV 1 jam-1 pada produk cair (Itthibenchapong dkk., 2017).

Dari temuan-temuan ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan hidrogen sebagai gas atmosfer pereaksi akan meningkatkan selektivitas produk hidrokarbon rantai genap. Selain itu, dengan meningkatnya tekanan parsial hidrogen, selektivitas produk hidrokarbon rantai genap akan meningkat.

### Efek Waktu Tinggal

Waktu tinggal dapat berarti perbandingan antara laju alir massa umpan terhadap massa katalis dalam sistem atau perbandingan antara laju alir volumetrik umpan terhadap volume reaktor. Waktu tinggal biasanya dikorelasikan dengan kecepatan ruang atau *space velocity* (SV) yang merupakan proprosional invers dari waktu tinggal (h-1). *Liquid Hourly Space Velocity* (LHSV) menunjukkan perbandingan laju alir volumetrik umpan terhadap volume reaktor dan *Weight Hourly Space Velocity* (WHSV) menunjukkan perbandingan laju alir massa umpan terhadap massa katalis yang digunakan.

Itthibenchapong dkk. (2017) melaksanakan reaksi deoksigenasi minyak inti kelapa sawit menggunakan katalis Ni-MoS2/-Al2O3 dan menemukan dengan nilai LHSV yang tinggi, reaksi deoksigenasi akan lebih memilih jalur reaksi DCO dan DCO2 daripada jalur reaksi HDO seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.12. Sehingga, selektivitas produk hidrokarbon rantai genapnya lebih rendah. Juga perlu diperhatikan bahwa pada LHSV tinggi dan temperatur tinggi, reaksi akan menghasilkan gas CO yang akan mendorong jalur reaksi DCO2.



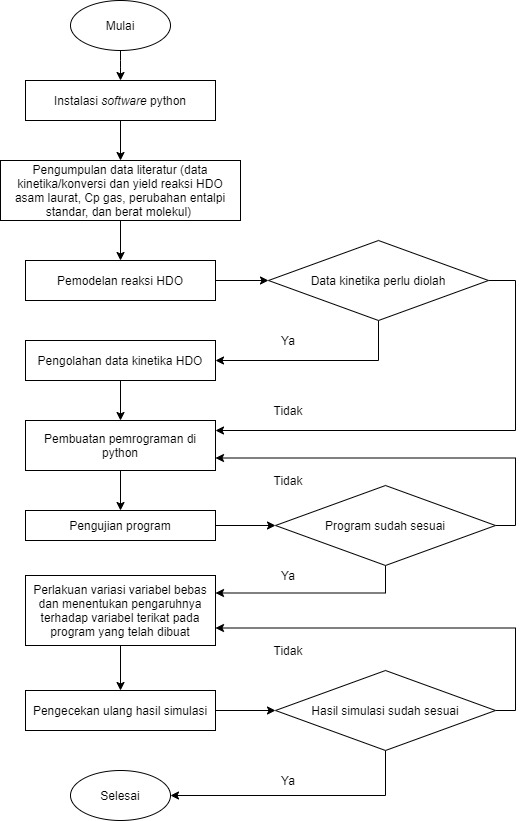
##### Efek LHSV terhadap deoksigenasi PKO pada suhu 300 oC dan tekanan hidrogen 50 bar pada produk cair (Itthibenchapong dkk., 2017).

Selain itu, Anand dkk. (2016) melakukan proses deoksigenasi minyak jarak dengan katalis *mesoporous* silika pada temperatur 340-420 oC. Ditemukan pada temperatur 420 oC, terjadi peningkatan perolehan produk *cracking* dari 6% menjadi 35% ketika kecepatan ruang diturunkan dari 12 jam-1 menjadi 0,5 jam-1. Peristiwa yang serupa juga terjadi pada proses deoksigenasi minyak kedelai, bunga matahari, dan *waste cooking oil*. *Cracking* akan semakin meningkat dengan meningkatnya temperatur dan waktu tinggal. Sehingga, waktu tinggal perlu dioptimasi untuk mendapatkan konversi dan perolehan senyawa hidrokarbon yang optimal.

# METODOLOGI PENELITIAN

## Tahapan Penelitian

Penelitian ini terbagi atas tahapan studi literatur, pengumpulan data, pengolahan data dan permodelan, serta simulasi. Permodelan reactor diawali dengan instalasi *software* python pada laptop/PC. Selanjutnya dilakukan studi literatur mengenai produksi bioavtur, mekanisme dan kinetika reaksi HDO. Setelah semua data literatur dikumpulkan, model reaksi HDO dibuat berdasarkan literatur yang ada. Jika pada literatur terdapat mekanisme dan data kinetika maka data tersebut dapat langsung dipakai untuk simulasi. Jika pada literatur hanya terdapat hasil reaksi seperti konversi, konsentrasi awal dan akhir, selektivitas ataupun *yield*, maka data tersebut diolah terlebih dahulu untuk memperoleh data kinetik berupa konstanta laju reaksi dan/atau energi aktivasi serta konstanta Arrhenius yang akan digunakan dalam pembuatan program. Program diuji dengan kesesesuaian terhadap hasil data kinetik yang diperoleh. Jika belum sesuai, maka program diedit dan disusun ulang. Jika sudah sesuai maka dapat dilanjutkan dengan melakukan simulasi dan mengubah variabel bebas sesuai dengan variasi yang telah ditentukan. Selanjutnya dilakukan pengecekan hasil simulasi untuk memastikan apakah terdapat hasil yang tidak sesuai dengan teori, jika sudah sesuai maka tahapan penelitian sudah selesai. Diagram alir tahapan penelitian disajikan pada Gambar 3.1.



##### Diagram alir penelitian

## Dasar Pemodelan

Proses deoksigenasi asam laurat melibatkan reaksi paralel yang melibatkan proses hidrodeoksigenasi, dekarboksilasi dan dekarbonilasi serta senyawa asam laurat, undekana, dodekana, hidrogen, karbondioksida, dan air. Simulasi ini didasarkan pada data perolehan reaksi HDO asam laurat menjadi alkana C11 dan C12 menggunakan katalis NiMo/Al2O3 (4,5%-berat Ni 19,3%-berat Mo) pada kondisi operasi temperatur 280-340 oC, tekanan H2 30 bar, rasio H2/umpan = 300-v/v, dan waktu reaksi 1-6 jam. Data mentah berupa indeks keasaman pada berbagai kondisi operasi disajikan pada Tabel 3.1. Data mentah berupa yield undekana, dodekana dan produk *cracking* disajikan pada Tabel 3.2.

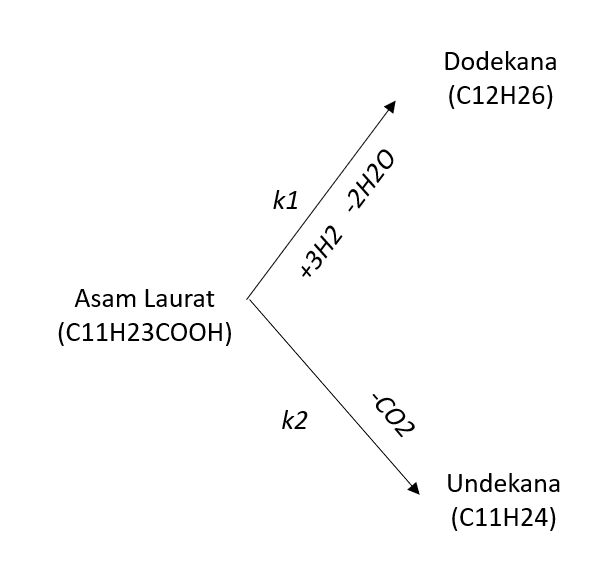
###### Data indeks keasaman pada berbagai kondisi operasi (Brandão dkk., 2020)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| No | Perlakuan | Indeks Keasaman |
| 1 | Asam Laurat | 280,8 |
| 2 | 400 oC, 1 jam | 0,3 |
| 3 | 340 oC, 1 jam | 17,8 |
| 4 | 340 oC, 3 jam | 0,3 |
| 5 | 280 oC, 3 jam | 19,0 |
| 6 | 280 oC, 6 jam | 0,3 |

###### Data yield undekana, dodekana dan produk *cracking* pada berbagai kondisi operasi (Brandão dkk., 2020)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| No | Perlakuan | Yield C12 (%) | Yield C11 (%) | Yield <C11 (%) |
| 1 | 400 oC, 1 jam | 26,9 | 53,6 | 17,8 |
| 2 | 340 oC, 3 jam | 35,2 | 61,5 | 2,4 |
| 3 | 280 oC, 6 jam | 41,8 | 54,4 | 2,7 |

Karena data produk hasil DCO dan DCO2 tidak diberikan pada sumber jurnal yang digunakan, maka diasumsikan mekanisme reaksi HDO asam laurat hanya terdiri atas reaksi HDO dan reaksi DCO2. Selain itu, pada hasil distribusi produk dengan FTIR hanya menunjukkan senyawa alkana, maka diasumsikan mekanisme yang terjadi konversi asam laurat langsung ke dodekana melalaui rute HDO dan ke undekana melalui rute DCO2, dengan tidak memperhitungkan senyawa intermediet yang mungkin terbentuk seperti *fatty alcohol*, *fatty esther* dan lain lain. Selain itu, produk *cracking* yang dihasilkan pada temperatur 280 – 340 C tidak signifikan jumlahnya, sehingga dalam memodelkan mekanisme reaksi tidak meninjau terbentuknya produk *cracking*. Mekanisme reaksi HDO asam laurat tertera pada Gambar 3.2



##### Mekanisme reaksi HDO asam laurat

Persamaan laju reaksi, neraca massa di sepanjang reaktor, dan neraca energi di sepanjang reaktor pada reaksi HDO asam laurat di dalam reaktor pipa adiabatik ideal dapat dilihat pada Lampiran B.

## Prosedur Kerja

Simulasi konseptual reaktor produksi bioavtur ini terdiri dari tahapan studi literatur, pengumpulan data, pengolahan data dan permodelan, serta simulasi reaktor yang dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python, dan diakhiri dengan pemaparan hasil.

### Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Studi literatur dilakukan untuk melengkapi data sebagai dasar simulasi reaktor. Simulasi HDO asam laurat dilakukan dengan hasil studi literatur yang memberikan data konversi terhadap waktu reaksi dan perolehan senyawa di akhir reaksi. Data konversi dan *yield* akan digunakan untuk mendapatkan parameter kinetika reaksi. Selain data kinetika reaksi, diperlukan juga data, panas reaksi dan kapasitas panas senyawa.

### Permodelan dan Pengolahan Data Kinetika Reaksi HDO

Model reaksi HDO diperoleh dari literatur jika dapat diperoleh langsung dari literaturnya. Jika model reaksi tidak ada, akan dibuat model reaksi sebagai dasar permodelan simulasi. Jika data kinetika reaksi HDO yang diperoleh dari penelitian sebelumnya sudah lengkap dengan konstanta laju reaksi dan/atau konstanta Arrhenius dan energi aktivasi, maka data kinetika tersebut sudah siap untuk digunakan pada simulasi reaktor PFR dengan kondisi reaksi dan mekanisme reaksi yang sesuai dengan data tersebut. Jika data kinetika masih berupa %*yield*, %konversi, %selektivitas atau konsentrasi awal dan akhir pada waktu dan/atau suhu yang berbeda, maka data harus diolah dahulu agar menemukan konstanta laju reaksi maupun energi aktivasi dan konstanta Arrhenius. Data yang didapat dari artikel ilmiah karangan Brandão dkk. (2020) meliputi nilai %konversi dan %*yield* pada rentang temperatur 280-400 oC dan tekanan 30 bar. Sehingga harus diolah untuk mendapatkan orde reaksi, konstanta Arhenius dan energi aktivasi.

Pengolahan data dimulai dengan mencari orde reaksi. Dalam menentukan orde reaksi, diasumsikan gas hidrogen tidak berpengaruh terhadap laju reaksi. Penentuan orde reaksi dapat dilakukan dengan cara tabulasi konstanta laju reaksi pada berbagai orde reaksi. Orde reaksi didapat ketika nilai konstanta laju reaksi antara data pada temperatur yang sama memiliki nilai yang hampir sama. Orde laju reaksi diperkirakan tidak akan jauh dari 1 sesuai dengan mekanisme dan kinetika HDO asam lemak/TG yang sudah ada.Setelah itu, nilai konstanta laju reaksi rata rata dapat dihitung. Selanjutnya, nilai energi aktivasi dan konstanta Arrhenius dihitung dengan cara mengalurkan nilai ln(k) terhadap 1/T, lalu diregresikan secara linear sehingga diperoleh Persamaan 3.1

(3.1)

Lalu nilai energi aktivasi dapat dihitung dengan Persamaan 3.2

(3.2)

Dimana R adalah konstanta gas ideal (J/mol.K), dan Ea adalah energi aktivasi (J/mol)

Selanjutnya konstanta Arrhenius dihitung dengan Persamaan 3.3

(3.3)

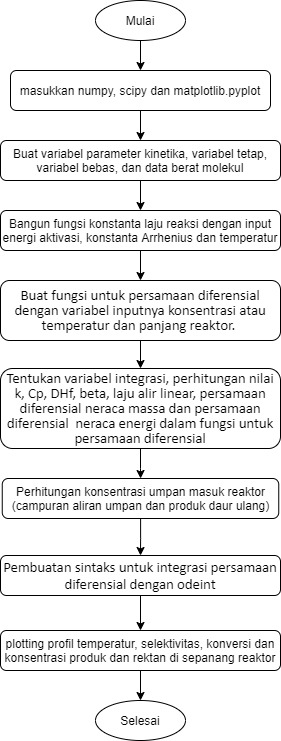
Setelah semua data yang diperlukan terkumpul, data tersebut kemudian digunakan untuk melakukan simulasi reaktor HDO pada program Python berdasarkan persamaan neraca massa dan energi reaktor seperti pada Persamaan 3.4 dan 3.5.

(3.4)

(3.5)

### Simulasi Reaktor

Simulasi reaktor reaksi HDO Asam Laurat dilakukan mengikuti langkah kerja yang disajikan pada Gambar 3.3. Algoritma sekaligus *script* program Python yang digunakan dalam simulasi reaktor disajikan dalam Tabel A.1 pada Lampiran A.



##### Diagram alir prosedur simulasi reaktor pada python

## Variasi Percobaan

Dalam simulasi yang dilakukan terdapat 3 jenis variabel, yaitu variabel kontrol, variabel bebas dan variabel terikat. Variabel kontrol adalah variabel yang dibuat tetap selama proses simulasi. Variabel kontrol berguna untuk mendapatkan hubungan variabel bebas terhadap variabel terikat. Variabel bebas adalah variabel yang dibuat berbeda untuk setiap percobaan. Variabel terikat adalah variabel yang nilainya berubah jika nilai variabel bebas diubah.

### Variabel Kontrol

Variabel kontrol pada simulasi reaksi HDO disajikan pada Tabel 3.3

###### Variabel kontrol pada simulasi reaksi HDO di PFR

|  |  |
| --- | --- |
| **Variabel kontrol** | **Variasi** |
| Katalis | NiMo/Al2O3 disulfidasi, Ni = 4,5%-berat, Mo = 19,3%-berat |
| Dimensi reaktor | Panjang 3 m, Volume 6 m3, Diameter 1,6 m |
| Tekanan | 30 bar |
| Perbandingan H2/umpan asam laurat | 300 v/v (Nm3 H2/m3 asam laurat) |

### Variabel Terikat

Variabel terikat yang ditinjau pada simulasi reaksi HDO pada PFR adalah selektivitas, konversi, dan temperatur. Konversi adalah seberapa besar asam laurat bereaksi selama proses HDO yang dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.6. Selektivitas adalah seberapa besar produk yang diinginkan dihasilkan dari reaksi terhadap total mol produk yang dihasilkan dari reaksi tersebut yang dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.7.

(3.6)

(3.7)

### Variabel Bebas

Variasi yang dilakukan pada simulasi reaksi HDO adalah :

1. Temperatur umpan masuk reaktor 280 oC, 300 oC, 320 oC, dan 340 oC.
2. Fraksi massa umpan asam laurat (5, 20, 40, 60, 80 %-wt)
3. LHSV (1, 1/3, dan 1/6 jam-1)

## Jadwal Kerja

Rencana jadwal kerja penelitian yang akan dilakukan tertera pada Tabel 3.4

###### Rencana jadwal kerja penelitian

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Kegiatan | Waktu (minggu) | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Instalasi *software* python |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Pengumpulan data |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Pengolahan data dan pemodelan |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Mempelajari python |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Pembuatan program pada python |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Pengujian program dan model |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Perlakuan variasi variabel bebas pada simulasi |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Pengecekan ulang hasil simulasi & modifikasi program |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Pembuatan laporan |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

# HASIL DAN PEMBAHASAN

## Model Reaksi

### Data Fisik dan Kimia

Data literatur yang dibutuhkan adalah data perubahan entalpi pembentukan, kapasitas panas dan berat molekul masing masing senyawa seperti yang disajikan pada Tabel 4.1, 4.2, dan 4.3.

###### Data fisik dan kimia senyawa kimia organik

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Senyawa | Cp liq | | | |  | | |
|  | | | |  | | |
| A | B | C | D | A | B | C |
| Asam laurat | 50,80 | 2,258 | -4,966 x10-3 | 4,377 x10-6 | -582,24 | -0,2311 | 1,255 x10-4 |
| n-Dodekana | 84,49 | 2,036 | -5,098 x10-3 | 5,218 x10-6 | -225,66 | -0,2598 | 1,382 x10-4 |
| n-Undekana | 94,17 | 1,781 | -4,630 x 0-3 | 4,968 x10-6 | -208,56 | -0,2469 | 1,320 x10-4 |

###### Data fisik dan kimia senyawa anorganik

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Senyawa | Cpig / R | | |  |
|  | | | J/mol |
| A | B | C |  |
| Hidrogen | 3,249 | 0,422 x 10-3 | 0,083 x 105 | 0 |
| Air | 3,470 | 1,45 x 10-3 | 0,121 x105 | -241.818 |
| CO2 | 5,457 | 1,045 x 10-3 | -1,157 x 105 | -393.509 |

###### Data berat molekul senyawa

| Senyawa | Rumus Molekul | MW (kg/kmol) |
| --- | --- | --- |
| Asam laurat | CH3(CH2)10COOH | 200,321 |
| n-Dodekana | C12H26 | 184,322 |
| n-Undekana | C11H24 | 170,295 |
| Hidrogen | H2 | 2,00 |
| Air | H2O | 18,015 |
| Karbon dioksida | CO2 | 44,01 |

### Model Reaksi dan Asumsi yang Digunakan

Chart

Description automatically generated with medium confidence

##### Model reaksi HDO

Asumsi yang digunakan:

1. Pengaruh hidrogen terhadap laju reaksi tidak ada karena hidrogen yang digunakan berlebih
2. Dalam reaksi tidak hanya terjadi HDO namun juga terjadi DCO2 yang saling bersaingan.
3. Dalam reaksi deoksigenasi asam laurat dapat terjadi *cracking*, namun nilainya sangat kecil sehingga **dapat diabaikan**.

### Penentuan Parameter Kinetika Reaksi HDO

Penentuan parameter kinetika reaksi HDO dilakukan menggunakan data reaksi dari percobaan Brandão dkk. (2020) yang menyajikan data konversi dan *yield* reaksi HDO asam laurat seperti pada Tabel 4.4 dan 4.5.

###### Nilai indeks keasaman masing masing kondisi

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| No | Perlakuan | Indeks Keasaman |
| 1 | Asam laurat | 280,8 |
| 2 | 400 oC, 1 h | 0,3 |
| 3 | 340 oC, 1 h | 17,8 |
| 4 | 3 h | 0,3 |
| 5 | 280 oC, 3 h | 19,0 |
| 6 | 6 h | 0,3 |

###### Data *yield* dodekana dan undekana pada masing masing kondisi

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| No | Perlakuan | Yield C12 (%) | Yield C11 (%) | Yield <C11 (%) |
| 1 | 400 oC, 1 jam | 26,9 | 53,6 | 17,8 |
| 2 | 340 oC, 3 jam | 35,2 | 61,5 | 2,4 |
| 3 | 280 oC, 6 jam | 41,8 | 54,4 | 2,7 |

Nilai indeks keasaman awal dan akhir pada Tabel 4.4 dapat digunakan untuk menghitung konversi reaksi menggunakan Persamaan 4.1 untuk mendapatkan data konversi reaksi pada Tabel 4.6.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.1) |

###### Nilai indeks keasaman masing masing kondisi dan konversinya

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| No | Perlakuan | Indeks Keasaman | Konversi |
| 1 | Asam Laurat | 280,8 |  |
| 2 | 400 oC, 1 h | 0,3 | 0,9989 |
| 3 | 340 oC, 1 h | 17,8 | 0,9366 |
| 4 | 3 h | 0,3 | 0,9989 |
| 5 | 280 oC, 3 h | 19,0 | 0,9323 |
| 6 | 6 h | 0,3 | 0,9989 |

Kemudian, nilai konversi digunakan untuk mendapatkan konstanta laju reaksi. Perhitungan nilai konstanta laju reaksi dilakukan menggunakan Persamaan 4.2.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.2) |

Metode tabulasi digunakan untuk menentukan orde dan konstanta laju reaksi yang disajikan pada Tabel 4.7.

###### Penentuan orde dan konstanta laju reaksi menggunakan metode tabulasi

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| T (oC) | t (jam) | K (M0,5jam-1) | K (jam-1) | K (M-1jam-1) |
| 280 | 3 | 1,035 | 0,898 | 1,044 |
| 280 | 6 | 0,676 | 1,140 | 35,417 |
| Nilai k rata rata (T = 280 oC) | | 0,856 | 1,019 | 18,230 |
| 340 | 1 | 3,139 | 2,758 | 3,358 |
| 340 | 3 | 1,353 | 2,281 | 70,833 |
| Nilai k rata rata (T = 340 oC) | | 2,246 | 2,519 | 37,096 |

Dari hasil metode tabulasi, diperoleh orde reaksi bernilai satu dengan konstanta laju reaksi total (K) pada temperatur 280 oC dan 340 oC berturut-turut sebesar 1,019 jam-1dan 2,519 jam-1. Persamaan laju reaksi yang digunakan sebagai basis neraca massa reaktor disajikan pada Persamaan 4.3 hingga 4.8.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.3) |
|  |  | (4.4) |
|  |  | (4.5) |
|  |  | (4.6) |
|  |  | (4.7) |
|  |  | (4.8) |

Keterangan subskrip:

LA = Asam Laurat

DD = Dodekana

UD = Undekana

H2 = Hidrogen

CO2 = Karbon dioksida

H2O = Air

Selanjutnya, akan dilakukan *curve fitting* untuk mendapatkan parameter konstanta Arrhenius (A) dan energi aktivasi (Ea). Pada suhu 280 dan 340 oC, yield <C11 sangat kecil yaitu <3%, namun pada suhu 400 oC, yield <C11 cukup tinggi yaitu mencapai 17,8%. Yield <C11 terjadinya *cracking*. Model reaksi yang dibuat diasumsikan tidak terjadi *cracking* sehingga data kinetika yang diambil hanya pada suhu 280 dan 340 oC. Nilai k1 dan k2 ditentukan menggunakan Persamaan 4.10 dan 4.11 dan disajikan pada Tabel 4.8.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.9) |
|  |  | (4.10) |
|  |  | (4.11) |

###### Data konstanta laju reaksi

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| T (C) | Yield C12 (%) | Yield C11 (%) | K (jam-1) | k1 (jam-1) | k2 (jam-1) |
| 340 | 35,2 | 61,5 | 2,519 | 0,915 | 1,604 |
| 280 | 41,8 | 54,4 | 1,019 | 0,443 | 0,576 |

Konstanta laju reaksi memiliki persamaan yang melibatkan konstanta Arrhenius dan enegi aktivasi seperti pada Persamaan 4.12 dan 4.13.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.12) |
|  |  | (4.13) |

Dengan Ea adalah energi aktivasi (J/mol), A0 adalah konstanta Arrhenius (s-1), dan R adalah konstanta gas ideal (R = 8,314 J/mol K). Dengan mengalurkan nilai ln (k) pada sumbu-y terhadap 1/T pada sumbu-x dan melakukan regresi linear, diperoleh Persamaan 4.14.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.14) |

dimana

Sehingga, nilai konstanta Arrhenius dan energi aktivasi dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.15 dan 4.16. Menggunakan data pada Tabel 4.9, dilakukan *curve fitting* untuk mendapatkan nilai parameter kinetika reaksi seperti pada Gambar 4.2 dan 4.3.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.15) |
|  |  | (4.16) |

###### Nilai konstanta Arrhenius dan energi aktivasi reaksi utama dan samping

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| T (C) | k1 | | k2 | |
| ln(k1) | 1/T x 103 | ln(k2) | 1/T x 103 |
| 340 | -8,28 | 1,63 | -7,72 | 1,63 |
| 280 | -9,00 | 1,81 | -8,74 | 1,81 |

##### Kurva regresi ln (k1) terhadap 1/T

##### Kurva regresi ln (k2) terhadap 1/T

Sehingga, nilai konstanta Arrhenius dan energi aktivasi untuk reaksi utama dan samping disajikan pada Tabel 4.10. Selanjutnya, dilakukan validasi parameter kinetika reaksi hasil permodelan terhadap hasil reaksi berdasarkan literatur yang digunakan. Model kinetika hasil pengolahan disajikan pada Tabel 4.11.

###### Parameter kinetika reaksi HDO asam laurat

| Parameter kinetika | | Satuan | Nilai |
| --- | --- | --- | --- |
| k1 | A1 | s-1 | 0,0268 |
| Ea1 | J/mol | 24.242 |
| k2 | A2 | s-1 | 0,708 |
| Ea2 | J/mol | 38.077 |

###### Model reaksi hasil pengolahan data

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| No | Persamaan Reaksi | Model kinetika | A  (s-1) | Ea  (J/mol) |
| 1 |  |  | 0,0268 | 24242 |
| 2 |  |  | 0,708 | 38077 |

Model kinetika reaksi ini akan diuji terhadap data konversi dan selektivitas literatur. Karena data literatur yang digunakan adalah reaktor *batch* dengan kondisi isotermal, maka pengujian model reaksi dilangsungkan pada reaktor yang sama. Model reaksi yang digunakan sesuai Persamaan 4.17.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.17) |

Perbandingan data konversi asam laurat dan selektivitas HDO dari literatur dengan hasil permodelan reaksi yang dibuat disajikan pada Tabel 4.12.

###### Perbandingan data konversi asam laurat dan selektivitas HDO pada literatur dengan data pemodelan kinetika reaksi

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| No | Perlakuan | Konversi asam laurat (%) | | | Selektivitas HDO (%) | | |
| Data literatur | Pemodelan kinetika | %Error | Data literatur | Pemodelan kinetika | %Error |
| 1 | 340 C | 99,89 | 99,89 | 0,0 | 36,40 | 36,37 | 0,1 |
| 2 | 280 C | 99,89 | 99,89 | 0,0 | 43,45 | 43,42 | 0.1 |

Karena *error* pada konversi asam laurat dan selektivitas HDO di bawah 5%, model kinetika reaksi dinilai dapat digunakan pada rentang operasi yang telah ditetapkan, yaitu temperatur 280 hingga 320 oC dan LHSV 1/6 hingga 1 jam-1.

### Neraca Massa dan Energi Permodelan Reaktor

Persamaan neraca massa PFR adiabatik disajikan pada Persamaan 4.18 hingga 4.23.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.18) |
|  |  | (4.19) |
|  |  | (4.20) |
|  |  | (4.21) |
|  |  | (4.22) |
|  |  | (4.23) |

Persamaan neraca energi PFR adiabatik disajikan pada Persamaan 4.24.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4.24) |

Keterangan :

= Massa jenis senyawa di reaktor (kg/m3)

= Kapasitas panas (J/kg K)

u = Laju alir linear fluida dalam reaktor (m/s)

T0 = Temperatur umpan masuk reaktor (K)

T = Temperatur reaktor pada posisi z (K)

P0 = Tekanan umpan masuk reaktor (Pa)

P = Tekanan reaktor pada posisi z (Pa)

= Perubahan entalpi reaksi i (J/mol)

ri = Laju reaksi i (mol/L.s)

U = Koefisien transfer panas overall (W/m2K)

A = Luas area penukar panas (m2)

Tw = Temperatur di dinding (K)

## Evaluasi Pengaruh Kondisi Operasi terhadap Reaksi HDO

Menggunakan model reaktor yang telah disusun, dilakukan simulasi reaktor untuk menentukan pengaruh kondisi operasi terhadap reaksi HDO. Kondisi operasi yang dievaluasi adalah fraksi massa asam laurat dalam umpan, temperatur masuk umpan, dan kecepatan ruang.

### Pengaruh Fraksi Massa Asam Laurat dalam Umpan

Pengaruh fraksi massa LA dalam umpan terhadap reaksi HDO dilakukan pada kondisi operasi LHSV 1 jam-1 dan temperatur umpan 573 K. Hasil analisis pengaruh fraksi massa LA terhadap temperatur reaksi disajikan pada Gambar 4.4.

##### Profil temperatur di sepanjang reaktor pada berbagai variasi fraksi massa LA umpan pada temperatur umpan 573 K dan LHSV 1 jam-1

Dari Gambar 4.4, dapat dlilihat bahwa dengan meningkatnya fraksi massa LA dalam umpan, semakin besar pula kenaikan temperatur di sepanjang reaktor. Temperatur reaktor mencapai 996 K pada umpan reaktor berupa LA murni. Temperatur reaksi bisa sangat tinggi karena reaksi HDO asam laurat merupakan reaksi yang bersifat sangat eksotermik sehingga konsentrasi LA umpan yang tinggi akan menyebabkan peningkatan temperatur yang tinggi juga. Berdasarkan simulasi, umpan dengan fraksi massa LA sebesar 30% merupakan konsentrasi LA maksimum yang diperbolehkan dalam umpan apabila mengikuti batas desain temperatur reaktor *hydrotreating,* yaitu 400 oC atau 673 K (Pertamina RU IV Cilacap 1997). Pengaruh fraksi massa LA umpan terhadap konversi umpan disajikan pada Gambar 4.5.

##### Profil konversi LA pada berbagai variasi fraksi massa LA umpan pada temperatur umpan 573 K dan LHSV 1 jam-1

Dari Gambar 4.5, dapat dilihat bahwa peningkatan fraksi massa LA umpan akan diikuti dengan meningkatnya konversi reaksi. Hal ini terjadi karena laju reaksi memiliki order reaksi positif sehingga konsentrasi umpan yang lebih tinggi akan meningkatkan laju reaksi yang berakhir dengan peningkatan konversi. Selanjutnya, disajikan pengaruh fraksi massa LA umpan terhadap selektvitas HDO disajikan pada Gambar 4.6.

##### Profil selektivitas HDO pada berbagai variasi fraksi massa LA umpan pada temperatur umpan 573 K dan LHSV 1 jam-1

Dari Gambar 4.6, dapat dilihat bahwa peningkatan fraksi massa LA umpan akan diikuti dengan menurunnya selektivitas HDO. Selekivitas HDO menurun dari 40,3% pada fraksi massa LA umpan 5% menjadi 34,5% pada fraksi massa LA umpan 40%. Hal ini menunjukkan pada kondisi operasi yang dipilih, nilai konstanta laju reaksi DCO lebih besar daripada HDO sehingga dengan meningkatnya konsentrasi LA umpan, selektivitas HDO akan semakin menurun. Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 4.5 dan 4.6, dapat ditentukan konsentrasi umpan yang menghasilkan jumlah produk dodekana terbanyak menggunakan nilai fraksi massa LA umpan, konversi, dan selektivitas HDO. Konsentrasi umpan yang menghasilkan jumlah produk dodekana terbanyak tanpa melewati batas desain reaktor adalah umpan dengan fraksi massa LA sebesar 30% karena jumlah LA di umpan lebih banyak, konversi LA yang lebih tinggi, dan selektivitasnya tidak jauh di bawah fraksi LA umpan yang lebih rendah.

### Pengaruh Temperatur Umpan

Berikutnya akan dievaluasi pengaruh temperatur inlet reaktor terhadap konversi LA dan selektivitas HDO pada kondisi operasi fraksi massa LA umpan 30% dan LHSV = 1 jam-1. Hasil evaluasi disajikan pada Gambar 4.7 dan 4.8.

(a)

(b)

##### Profil (a) konversi LA dan (b) selektivitas HDO pada berbagai variasi fraksi massa LA umpan pada fraksi massa LA umpan 30% dan LHSV 1 jam-1

Dari Gambar 4.7, dapat dilihat bahwa pada rentang temperatur inlet 280 – 340 oC serta fraksi massa LA umpan dan LHSV yang sama, konversi paling tinggi terjadi pada temperatur 340 oC. Hal ini terjadi karena peningkatan temperatur akan meningkatan konstanta laju reaksi sehingga konversi LA meningkat. Namun, temperatur tinggi menghasilkan selektivitas HDO yang lebih rendah karena temperatur tinggi lebih menyukai jalur reaksi DCO yang menghasilkan undekana, bukan HDO yang menghasilkan dodekana. Tren hasil simulasi sesuai dengan hasil eksperimen oleh Itthibenchapong (2017) yang menunjukkan peningkatan temperatur akan diikuti oleh peningkatan konversi LA dan penurunan selektivitas HDO. Selanjutnya, dilakukan analisis total produk dodekana yang dihasilkan terhadap perubahan temperatur inlet dengan basis kondisi operasi fraksi massa umpan 30%, temperatur inlet 310 oC, dan LHSV 1 jam-1 yang disajikan pada Gambar 4.8.

##### Kurva sensitivitas total produk dodekana terhadap temperatur inlet

Dari Gambar 4.8, dapat dilihat bahwa temperatur inlet 300 oC menghasilkan jumlah produk dodekana yang paling optimal pada rentang 280 – 340 oC. Karena pada kasus ini fraksi massa LA umpan dibuat tetap, total produk dodekana hanya dipengaruhi oleh konversi LA dan selektivitas HDO.

### Pengaruh Kecepatan Ruang

Berikutnya akan dievaluasi pengaruh kecepatan ruang reaktor (LHSV) terhadap temperatur di reaktor, konversi LA, dan selektivitas HDO pada kondisi operasi fraksi massa LA umpan 30% dan temperatur inlet 300 oC. Hasil evaluasi disajikan pada Gambar 4.9 dan 4.10.

(a)

(b)

(c)

##### Profil (a) temperatur, (b) konversi LA, dan (c) selektivitas HDO pada berbagai variasi fraksi massa LA umpan pada fraksi massa LA umpan 30% dan LHSV 1 jam-1

Dari Gambar 4.9, dapat dilihat bahwa pada rentang LHSV 1/6 hingga 1 jam-1 serta fraksi massa LA umpan dan temperatur inlet yang sama, LHSV yang makin rendah mengakibatkan temperatur reaktor yang makin tinggi. Hal ini terjadi karena pada LHSV yang rendah, nilai konversi lebih tinggi sehingga reaksi menghasilkan panas yang lebih banyak. LHSV sebesar 2/3 adalah batas minimal agar temperatur keluaran tidak melebihi batas desain 673 K. Konversi menurun seiring dengan meningkatnya LHSV karena LHSV yang tinggi menandakan waktu tinggal yang lebih singkat sehingga reaksi belum punya kesempatan untuk melaksanakan reaksi secara sempurna (konversi 100%). Selain itu, selektivitas HDO meningkat seiring dengan meningkatnya LHSV. Selanjutnya, dilakukan analisis total produk dodekana yang dihasilkan terhadap perubahan LHSV dengan basis kondisi operasi fraksi massa umpan 30%, temperatur inlet 300 oC, dan LHSV 1/2 jam-1 yang disajikan pada Gambar 4.10.

##### Kurva sensitivitas total produk dodekana terhadap temperatur inlet

Dari Gambar 4.10, dapat dilihat bahwa temperatur LHSV 1/2 jam-1 menghasilkan jumlah produk dodekana yang paling optimal pada rentang 1/6 – 1 jam-1 tanpa melewati temperatur batas desain reaktor. Karena pada kasus ini fraksi massa LA umpan dibuat tetap, total produk dodekana hanya dipengaruhi oleh konversi LA dan selektivitas HDO.

# KESIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut.

* + - 1. Reaktor PFR adiabatik untuk menjalankan reaksi HDO asam laurat berhasil disimulasikan menggunakan *software* Python seperti yang disajikan pada Lampiran A.
      2. Fraksi massa asam laurat maksimal yang dapat diumpankan ke dalam reaktor adalah 30% sebelum temperature reaktor melebihi batas desain reaktor *hydrotreating* Pertamina RU IV Cilacap.
      3. Temperatur umpan untuk melaksanakan reaksi HDO yang optimal adalah 300 oC.
      4. Kecepatan ruang untuk melaksanakan reaksi HDO yang optimal adalah ½ jam-1.

# DAFTAR PUSTAKA

Adi, A. C., Lasnawatin, F., Prananto, A. B., Suzanti, V. M., Anutomo, I. G., Anggreani, D., Yusuf, M., Ambarsari, L., dan Yuanningrat, H. (2020): *Handbook of Energy & Economics Statistics of Indonesia 2019*, Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia.

Anand, M., Farooqui, S. A., Kumar, R., Joshi, R., Kumar, R., Sibi, M. G., Singh, H., dan Sinha, A. K. (2016): Kinetics, thermodynamics and mechanisms for hydroprocessing of renewable oils, *Applied Catalysis A: General*, **516**, 144–152. https://doi.org/10.1016/j.apcata.2016.02.027

Ancheyta, J. (2016): Deactivation of Heavy Oil Hydroprocessing Catalysts. John Wiley and Sons, Hoboken. https://doi.org/10.1002/9781118769638

Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., dan Aroua, M. K. (2016): A review on pyrolysis of plastic wastes, *Energy Conversion and Management*, **115**, 308–326. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037

Ayodele, O. B., Farouk, H. U., Mohammed, J., Uemura, Y., dan Daud, W. M. A. W. (2015): Hydrodeoxygenation of oleic acid into n- and iso-paraffin biofuel using zeolite supported fluoro-oxalate modified molybdenum catalyst : Kinetics study, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **000**(2014), 1–11. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.12.014

Balagurumurthy, B., Singh, R., dan Bhaskar, T. (2015): *Catalysts for Thermochemical Conversion of Biomass*, *Recent Advances in Thermo-chemical Conversion of Biomass*, Elsevier B.V., 109–132. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63289-0.00004-1

Bejblova, M., dan Kubic, D. (2010): Conversion of Vegetable Oils into Hydrocarbons over CoMo / MCM-41 Catalysts, 168–178. https://doi.org/10.1007/s11244-009-9421-z

Brandão, R. D., Júnior, A. M. D. F., Oliveira, S. C., Suarez, P. A. Z., dan Prauchner, M. J. (2020): The conversion of coconut oil into hydrocarbons within the chain length range of jet fuel, *Biomass Conversion and Biorefinery*. https://doi.org/10.1007/s13399-020-01046-9

Burimsitthigul, T., Yoosuk, B., Ngamcharussrivichai, C., dan Prasassarakich, P. (2021): Hydrocarbon biofuel from hydrotreating of palm oil over unsupported Ni e Mo sul fi de catalysts, *Renewable Energy*, **163**, 1648–1659. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.044

Doliente, S. S., Narayan, A., Tapia, J. F. D., Samsatli, N. J., Zhao, Y., dan Samsatli, S. (2020): Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components, *Frontiers in Energy Research*, **8**(July), 1–38. https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00110

Galadima, A., dan Muraza, O. (2015): Catalytic upgrading of vegetable oils into jet fuels range hydrocarbons using heterogeneous catalysts: A review, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **29**, 12–23. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.030

Goodger, E., dan Vere, R. (1985): *Aviation Fuels Technology*, Macmillan Publishers Ltd, Hampshire and London.

Hachemi, I., dan Murzin, D. Y. (2017): Kinetic Modeling of Fatty Acid Methyl Esters and Triglycerides Hydrodeoxygenation over Nickel and Palladium Catalysts, *Chemical Engineering Journal*. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.153

Itthibenchapong, V., Srifa, A., Kaewmeesri, R., Kidkhunthod, P., dan Faungnawakij, K. (2017): Deoxygenation of palm kernel oil to jet fuel-like hydrocarbons using Ni-MoS2/γ-Al2O3catalysts, *Energy Conversion and Management*, **134**, 188–196. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.034

Jȩczmionek, Ł., dan Porzycka-Semczuk, K. (2014): Hydrodeoxygenation, decarboxylation and decarbonylation reactions while co-processing vegetable oils over a NiMo hydrotreatment catalyst. Part I: Thermal effects - Theoretical considerations, *Fuel*, **131**, 1–5. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.055

Jeništová, K., Hachemi, I., Mäki-arvela, P., Kumar, N., Peurla, M., Čapek, L., Wärnå, J., dan Murzin, D. Y. (2017): Hydrodeoxygenation of stearic acid and tall oil fatty acids over Ni-alumina catalysts: influence of reaction parameters and kinetic modelling, *Chemical Engineering Journal*. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.117

Khan, S., Ng, A., Lup, K., Qureshi, K. M., Abnisa, F., Mohd, W., Wan, A., Fazly, M., dan Patah, A. (2019): Journal of Analytical and Applied Pyrolysis A review on deoxygenation of triglycerides for jet fuel range hydrocarbons, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **140**(January), 1–24. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.03.005

Kimura, T., Imai, H., Li, X., Sakashita, K., Asaoka, S., dan Al-Khattaf, S. S. (2013): Hydroconversion of triglycerides to hydrocarbons over Mo-Ni/γ-Al 2O3 catalyst under low hydrogen pressure, *Catalysis Letters*, **143**(11), 1175–1181. https://doi.org/10.1007/s10562-013-1047-x

Kubic, D., dan Kaluza, L. (2010): Deoxygenation of vegetable oils over sulfided Ni , Mo and NiMo catalysts, *Applied Catalysis A : General*, **372**, 199–208. https://doi.org/10.1016/j.apcata.2009.10.034

Kumar, P., Yenumala, S. R., Maity, S. K., dan Shee, D. (2014): Kinetics of hydrodeoxygenation of stearic acid using supported nickel catalysts: Effects of supports, *Applied Catalysis A: General*, **471**, 28–38. https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.11.021

Laurent, E., dan Delmon, B. (1994): Deactivation of a Sulfided NiMo/γ-Al2O3 during the Hydrodeoxygenation of Bio-Oils: Influence of a High Water Pressure, *Studies in Surface Science and Catalysis*, **88**(C), 459–466. https://doi.org/10.1016/S0167-2991(08)62773-1

Mancini, A., Imperlini, E., Nigro, E., Montagnese, C., Daniele, A., Orrù, S., dan Buono, P. (2015): Biological and nutritional properties of palm oil and palmitic acid: Effects on health, *Molecules*, **20**(9), 17339–17361. https://doi.org/10.3390/molecules200917339

Mohammad, M., Kandaramath, T., Yaakob, Z., dan Chandra, Y. (2013): Overview on the production of paraffin based-biofuels via catalytic hydrodeoxygenation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **22**(X), 121–132. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.026

Nelson, E. S., dan Reddy, D. R. (2017): *Sustainable Energy Developments*, Taylor & Francis Group, London, 365.

Noriega, A. K., Tirado, A., Méndez, C., Marroquín, G., dan Ancheyta, J. (2020): Chinese Journal of Chemical Engineering Hydrodeoxygenation of vegetable oil in batch reactor : Experimental considerations, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **28**(6), 1670–1683. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.12.022

Orsavova, J., Misurcova, L., Ambrozova, J. V., dan Vicha, R. (2015): Fatty Acids Composition of Vegetable Oils and Its Contribution to Dietary Energy Intake and Dependence of Cardiovascular Mortality on Dietary Intake of Fatty Acids, *International Journal of Molecular Sciences*, (16), 12871–12890. https://doi.org/10.3390/ijms160612871

Sabarman, J. S., Legowo, E. H., Widiputri, D. I., dan Siregar, A. R. (2019): Bioavtur Synthesis from Palm Fatty Acid Distillate through Hydrotreating and Hydrocracking Processes, *Indonesian Journal of Energy*, **2**(2), 99–110. https://doi.org/10.33116/ije.v2i2.40

Sequiño, A. C., dan Magallon-Avenido, J. (2015): The World’s Leader in the Palm Oil Industry: Indonesia, *IAMURE International Journal of Ecology and Conservation*, **13**(1). https://doi.org/10.7718/ijec.v13i1.1074

Sharma, R. K., Anand, M., Rana, B. S., Kumar, R., Farooqui, S. A., Sibi, M. G., dan Sinha, A. K. (2012): Jatropha-oil conversion to liquid hydrocarbon fuels using mesoporous titanosilicate supported sulfide catalysts, *Catalysis Today*, **198**(1), 314–320. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.05.036

Sotelo-Boyas, R., Trejo-Zarraga, F., dan Jesus Hernandez-Loyo, F. de (2012): Hydroconversion of Triglycerides into Green Liquid Fuels, *Hydrogenation*. https://doi.org/10.5772/48710

Subagjo, S., dan Ulfah, M. (2013): Kinetika Hidrodesulfurisasi Dibenzothiophene (Hds Dbt) Menggunakan Katalis NiMo/γ-Al2O3, *Reaktor*, **14**(4). https://doi.org/10.14710/reaktor.14.4.314-323

Susanto, B. H., Alimin, A. A., dan Reza, Y. F. (2020): BioavTur hydroprocessing conversion study from vegetable oil, *AIP Conference Proceedings*, **2230**(May). https://doi.org/10.1063/5.0002639

Toba, M., Abe, Y., Kuramochi, H., Osako, M., Mochizuki, T., dan Yoshimura, Y. (2011): Hydrodeoxygenation of waste vegetable oil over sulfide catalysts, *Catalysis Today*, **164**(1), 533–537. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.11.049

Wang, W.-C., Tao, L., Markham, J., Zhang, Y., Tan, E., Batan, L., Biddy, M., Wang, W.-C., Tao, L., Zhang, Y., Tan, E., Warner, E., dan Biddy, M. (2016): Review of Biojet Fuel Conversion Technologies. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-5100-66291., diperoleh melalui situs internet: https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66291.pdf, (July), 98.

Wang, W. C., dan Tao, L. (2016): Bio-jet fuel conversion technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **53**, 801–822. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.016

Yang, L., dan Carreon, M. A. (2017): Deoxygenation of Palmitic and Lauric Acids over Pt/ZIF-67 Membrane/Zeolite 5A Bead Catalysts, *ACS Applied Materials and Interfaces*, **9**(37), 31993–32000. https://doi.org/10.1021/acsami.7b11638

Yenumala, S. R., Maity, S. K., dan Shee, D. (2016): Reaction mechanism and kinetic modeling for the hydrodeoxygenation of triglycerides over alumina supported nickel catalyst, *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, **120**(1), 109–128. https://doi.org/10.1007/s11144-016-1098-2

Zhang, H., Lin, H., Wang, W., Zheng, Y., dan Hu, P. (2014): Applied Catalysis B : Environmental Hydroprocessing of waste cooking oil over a dispersed nano catalyst : Kinetics study and temperature effect, *“Applied Catalysis B, Environmental,”* **150**–**151**, 238–248. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.12.006

# DAFTAR SIMBOL

A : konstanta Arrhenius (s-1)

C : konsentrasi (mol/L)

Ea : energi aktivasi (J/mol)

k : konstanta kesetimbangan (h-1)

p : tekanan parsial (Pa)

R : tetapan gas ideal (J/mol K)

S : selektivitas (%)

T : temperatur (K)

X : konversi (%)

Subskrip

LA : asam laurat

HDO : hidrodeoksigenasi

Algoritma Python untuk Simulasi HDO pada Reaktor Pipa Adiabatik Ideal

Penjelasan algoritma simulasi pada python

|  |  |
| --- | --- |
| Langkah Kerja | Baris kode dalam python |
| Masukkan scipy, numpy, dan matplotlib.pyplot |  |
| Buat variabel parameter kinetika, variabel tetap, variabel bebas, dan data berat molekul |  |
| Buat fungsi konstanta laju reaksi (fungsi temperatur dari Ea dan konstanta Arrhenius) |  |
| Buat fungsi dengan variabel inputnya konsentrasi atau temperatur dan panjang reaktor. Didalam fungsinya terdapat penentuan variabel integrasi, perhitungan nilai k, Cp, , , laju alir linear, persamaan diferensial neraca massa dan persamaan diferensial neraca energi |  |
| Perhitungan konsentrasi umpan masuk reaktor (campuran aliran umpan dan produk |  |
| Pembuatan sintaks untuk integrasi persamaan diferensial dengan odeint |  |
| Plotting profil temperatur, selektivitas, konversi, dan konsentrasi reaktan dan produk di sepanjang reaktor |  |

Rumus-Rumus untuk Simulasi HDO Asam Laurat

**B.1 Persamaan Laju Reaksi**

Dengan asumsi orde reaksi 1, maka laju reaksi menjadi seperti pada Persamaan B.1 – B.6.

(B.1)

(B.2)

(B.3)

(B.4)

(B.5)

(B.6)

**B.2 Persamaan Neraca Massa di dalam Reaktor Pipa Adiabatik Ideal**

Dengan asumsi orde reaksi 1, maka persamaan neraca massa reaktor pipa adiabatik ideal seperti pada Persamaan B.7 – B.12.

(B.7)

(B.8)

(B.9)

(B.10)

(B.11)

(B.12)

**B.3 Persamaan Neraca Energi di dalam Reaktor Pipa Adiabatik Ideal**

Persamaan neraca energi reaktor pipa adiabatik ideal:

(B.13)

Nilai massa jenis () dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan B.14.

(B.14)

Nilai konsentrasi total di dalam reaktor dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan B.15.

(B.15)

Nilai kalor jenis dihitung dengan menggunakan Persamaan B.16.

(B.16)

Keterangan :

= Massa jenis campuran senyawa di reaktor (kg/m3)

= Kapasitas panas (J/kg K)

u = Laju alir linear fluida dalam reaktor (m/s)

T0 = Temperatur umpan masuk reaktor (K)

T = Temperatur reaktor pada posisi z (K)

P0 = Tekanan umpan masuk reaktor (Pa)

P = Tekanan reaktor pada posisi z (Pa)

= Perubahan entalpi reaksi i (J/mol)

ri = Laju reaksi i (mol/L.s)

Keterangan subskrip

LA = Asam Laurat

DD = Dodekana

UD = Undekana

H2 = Hidrogen

CO2 = Karbon dioksida

H2O = Air