

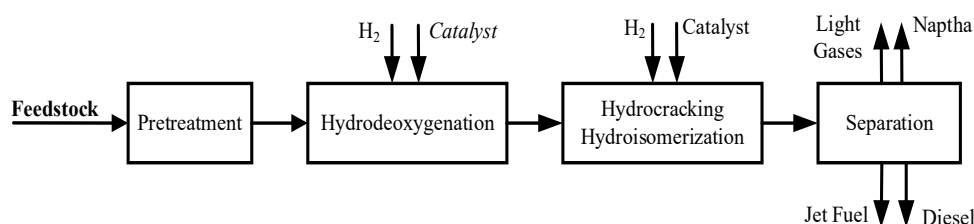
BAB II

SELEKSI DAN URAIAN PROSES

II.1 Macam-Macam Proses

Bioavtur dapat dibentuk melalui beberapa proses antara lain :

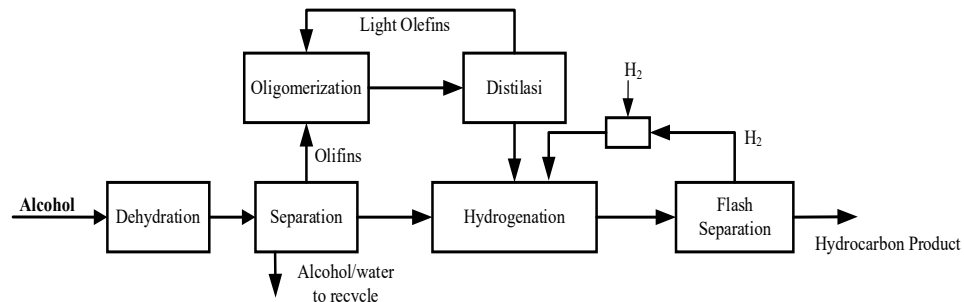
A. *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA)



Gambar II. 1 Sistem desain *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA)
(Monteiro et al. 2022)

Proses HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*) yang digunakan untuk konversi minyak nabati atau lemak hewani menjadi bahan bakar cair seperti diesel dan jet fuel dengan kualitas setara bahan bakar fosil. Proses dimulai dari penyimpanan minyak nabati yang kemudian di *pretreatment* sebelum dikirim ke reaktor *hydrotreating* bersama aliran hidrogen. Di dalam reaktor ini terjadi reaksi *hydrodeoxygenation* yang menghilangkan oksigen dari senyawa trigliserida, menghasilkan hidrokarbon jenuh dan air. *Effluent* dari reaktor didinginkan dan dialirkan ke unit isomerisasi untuk memperbaiki karakteristik produk sehingga sesuai spesifikasi bahan bakar. Produk hasil isomerisasi kemudian dipisahkan di kolom distilasi menjadi beberapa fraksi, seperti LPG, nafta, jet fuel, dan diesel. Sisa air limbah dari proses ini dialirkan ke unit pengolahan air limbah. Keunggulan utama dari bahan bakar HEFA adalah nilai cetane tinggi, serta kandungan aromatik dan sulfur yang rendah. (Pearlson, 2013). Proses HEFA menawarkan potensi proses produksi skala besar dalam jangka produksi singkat. Proses ini memiliki kompleksitas teknologi yang lebih rendah, harga jual minimum biofuel jet yang lebih rendah, dengan efisiensi energi yang lebih tinggi (Monteiro, 2022).

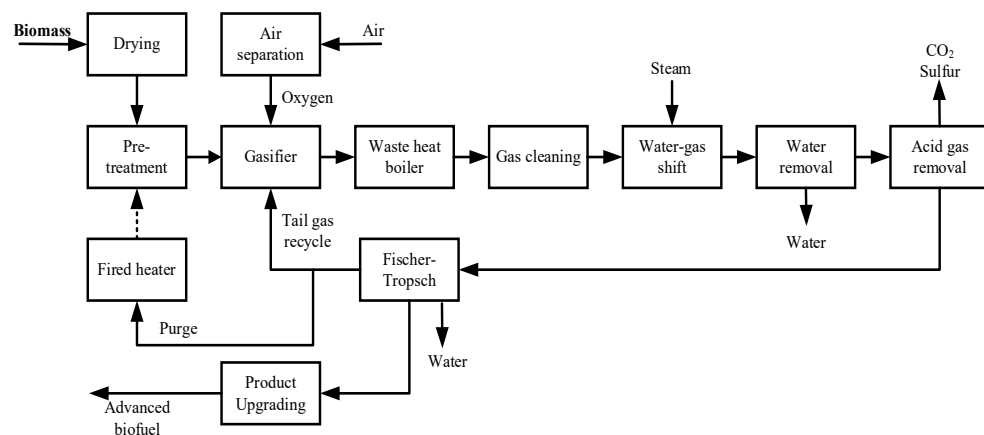
B. *Alcohol to Jet* (ATJ)



Gambar II. 2 Sistem desain *Alcohol to Jet* (Arcana, 2003)

Jumlah atom karbon dalam alkohol sangat memengaruhi hasil hidrokarbon yang terbentuk. Etanol menghasilkan distribusi hidrokarbon yang merata melalui dehidrasi dan oligomerisasi, sedangkan butanol membutuhkan proses yang lebih singkat karena rantai karbonnya lebih panjang. Hal ini berpotensi menyederhanakan proses dan menurunkan biaya produksi, sehingga bioavtur berbasis alkohol menjadi lebih kompetitif secara ekonomi (Peters, 2023). Pada pembuatan *Bioavtur*, proses ATJ merupakan salah satu sintesa *Bioavtur* berbasis selulosa dan gulan menggunakan proses fermentasi. Selulosa dan gula tersebut dikonversi menjadi grup alkohol (C1-C6) dengan bantuan mikrobia, *yeast*, atau bakteri pada suhu 30°C tekanan atmosfer selama 14 jam dengan *yield* 70% (Athifiyah, 2023).

C. *Biomass to Liquid* (BtL)



Gambar II. 3 Sistem desain *Biomass to Liquid* (Rytter, 2020)



Produksi Biomass-to-Liquid (BtL), yaitu bahan bakar sintetis dari biomassa melalui konversi termokimia menjadi gas sintesis (syngas), yang selanjutnya diolah menjadi biofuel. Proses utama BtL meliputi gasifikasi yang dilanjutkan dengan reaksi Fischer–Tropsch (FT) dan pirolisis. Proses Fischer–Tropsch digunakan untuk memproduksi *synfuel* dari biomassa yang telah digasifikasi. Reaksi FT dapat dilakukan pada suhu rendah (200–250 °C) untuk menghasilkan hidrokarbon rantai panjang atau suhu tinggi (320–375 °C) untuk rantai lebih pendek, bahkan dalam kondisi superkritis (250 °C, 65 bar) untuk menghasilkan kerosin dan diesel. Pada pirolisis, biomassa dipanaskan tanpa adanya oksigen untuk menghasilkan minyak pirolisis cair (bio-oil), yang dapat diubah menjadi bahan kimia dan bahan bakar melalui proses hydrotreating dan katalitik cracking (Ibarra, 2017).



Pra Rancangan Pabrik
Bioavtur dari *Palm Fatty Acid Distillate* Menggunakan Proses
Hydroprocessed Esters And Fatty Acid

II.2 Pemilihan Proses

Berdasarkan proses yang dilakukan terhadap proses pembentukan bioavtur, dapat dibuat perbandingan sebagai berikut :

Tabel II. 1 Pemilihan Proses

No	Parameter	Proses HEFA	Proses ATJ	Biomass to Liquid
1	Bahan Baku	Minyak nabati atau lemak hewani	Alkohol (selulosa dan gula)	Ligniselulosa (woody biomass)
2	Tahapan Utama	Hydrodeoksigenasi , Hydroisomerisasi & Hydrocracking	Dehidrasi alkohol, Oligomerisasi, Hidrogenasi	Gasifikasi, Cleaning syngass, Fischer Tropsch, Upgrading Fuel
3	Tekanan	40 atm	40 atm	40 atm
4	Suhu Operasi	400°C	200°C	250-350°C
5	Katalis	NiMo/ γ -Al ₂ O ₃	SAPO-34 Ni@Fe@H β	zeolit Pt/H-Beta, Pt/H-ZSM5, dan Pt/H-[BAI]MCM22
6	Konversi	98,7%	75,9%	2,4-8%
7	Sumber	(Sabarman, 2019)	(Mansy, 2025),	(Tomasek, 2016)

Berdasarkan data pada Tabel II.1, Metode *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA) dipilih karena memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan metode lainnya, yaitu:

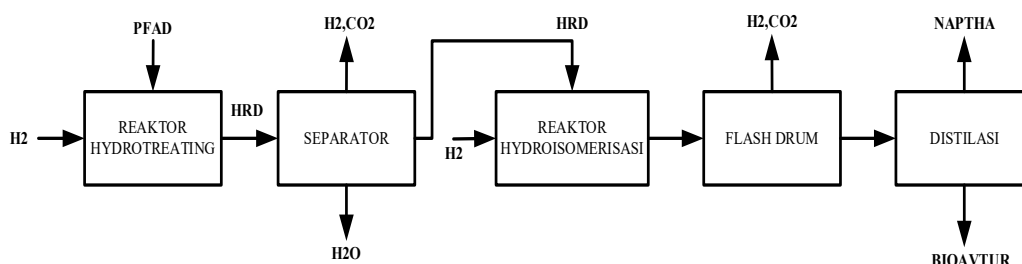
1. Memiliki kemampuan mengolah bahan baku yang mengandung *free fatty acids* (FFA) tinggi, sehingga sangat cocok digunakan untuk bahan baku seperti *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD).
2. Merupakan teknologi yang telah terbukti secara teknis dan komersial pada skala industri besar, ehingga memiliki tingkat keandalan dan kematangan teknologi yang lebih tinggi dibandingkan jalur produksi bioavtur lainnya.



3. Dapat memanfaatkan *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD) sebagai bahan baku yang tersedia melimpah sebagai produk samping dari proses pemurnian minyak sawit, sehingga tidak bersaing langsung dengan kebutuhan pangan.
4. Menggunakan katalis dari *Universal Oil Product* (UOP) yang telah teruji dalam proses pemurnian minyak dengan harga yang lebih ekonomis.
5. Mampu mencapai tingkat konversi yang tinggi dalam mengubah FFA menjadi hidrokarbon, yaitu sekitar 98,7% sehingga menghasilkan bioavtur dengan rendemen yang tinggi.

Minyak kelapa sawit secara umum mengandung trigliserida dan asam lemak bebas (FFA). Pada proses HEFA yang dikembangkan oleh Honeywell UOP, komponen-komponen tersebut direaksikan dengan hidrogen (H_2) melalui tahap hydrotreating untuk menghilangkan atom oksigen dan membentuk senyawa alkana rantai panjang. Selanjutnya, senyawa tersebut mengalami proses hydrocracking dan hydroisomerization untuk menghasilkan hidrokarbon dengan jumlah atom karbon yang berada pada rentang bahan bakar jet. Melalui proses katalitik ini, fraksi minyak berat dapat dipecah menjadi fraksi hidrokarbon yang lebih ringan dan memiliki nilai ekonomi lebih tinggi, sehingga menghasilkan bioavtur yang memenuhi spesifikasi bahan bakar penerbangan.

II.3 Uraian Proses



Gambar II. 4 Blok Diagram Alir Proses *Hydroprocess Ester and Fatty Acid*
(HEFA) (Makela 2021)

II.3.1 Tahap Penyiapan Bahan Baku

Tahap pertama diawali dengan penyiapan umpan *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD). PFAD dialirkan dari tangki penyimpanan menggunakan pompa sentrifugal menuju *cartridge filter* berukuran pori 10 μm tekanan 2 atm untuk memisahkan *impurities* yang masih terkandung dalam umpan. Setelah proses filtrasi, PFAD dipanaskan secara bertahap menggunakan *heater* hingga 350°C. Selanjutnya, PFAD dipompa menggunakan *high pressure pump* guna meningkatkan tekanannya dari 2 atm menjadi 50 atm sebelum masuk reaktor *hydrodeoksigenation*.

Tahap kedua merupakan penyiapan gas hidrogen sebagai reaktan. Hidrogen disimpan dalam bentuk *compressed gas* bertekanan 70 atm dan suhu 30°C. Aliran hidrogen kemudian dibuka menggunakan *shut-off valve*, selanjutnya dialirkan menuju *expander* untuk menurunkan tekanannya hingga 50 atm. Setelah itu, laju alir hidrogen diatur menggunakan *flow control valve* kemudian dipanaskan menggunakan *gas heater* hingga mencapai suhu 350°C. Hidrogen yang telah mencapai kondisi operasi tersebut kemudian dialirkan ke dalam reaktor *Hydrodeoksigenation*.

II.3.2 Tahap Reaksi

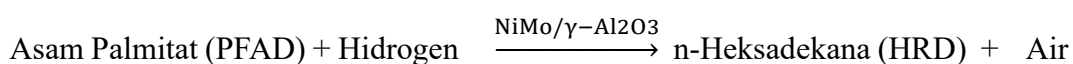
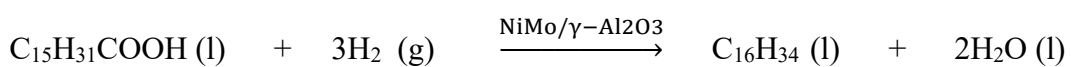
Secara bersamaan PFAD dan gas hidrogen diumpankan ke dalam reaktor *hydrodeoksigenation* tipe *trickle bed reactor* yang berisi katalis $\text{NiMo}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Pada reaktor ini, PFAD berada dalam fase cair, hidrogen dalam fase gas, dan katalis dalam fase padat sehingga terbentuk sistem kontak tiga fase yang memungkinkan reaksi berlangsung secara efektif. PFAD dan hidrogen diumpankan melalui bagian



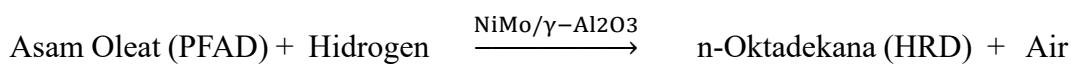
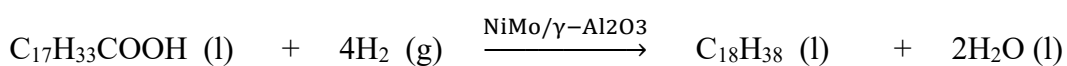
atas reaktor dan dialirkan secara *co-current downflow* melewati bed katalis. Selama melewati lapisan katalis tersebut, asam lemak yang terkandung dalam PFAD direaksikan dengan hidrogen melalui reaksi *Hydrodeoxygenation*. Pada reaksi tersebut, atom oksigen yang terdapat dalam molekul asam lemak dihilangkan dalam bentuk air (H₂O) sehingga dihasilkan hidrokarbon rantai panjang yang bersifat parafinik.

Reaksi *Hydrodeoksigenasi* :

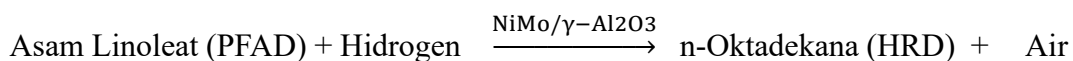
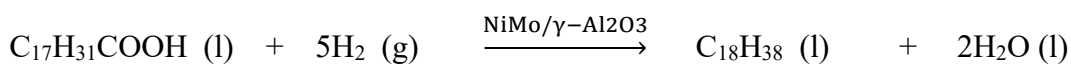
Mekanisme reaksi 1 (asam palmitat) :



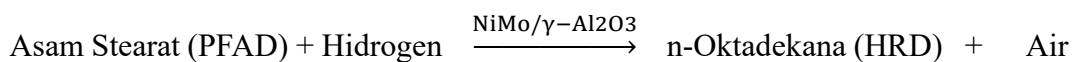
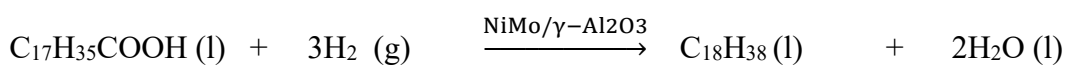
Mekanisme reaksi 2 (asam oleat) :



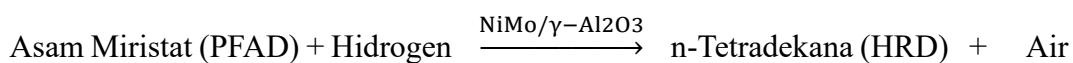
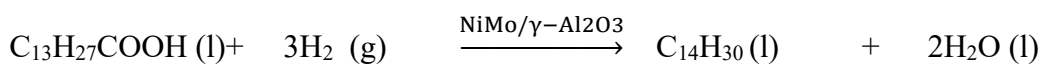
Mekanisme reaksi 3 (asam linoleat) :



Mekanisme reaksi 4 (asam stearat) :



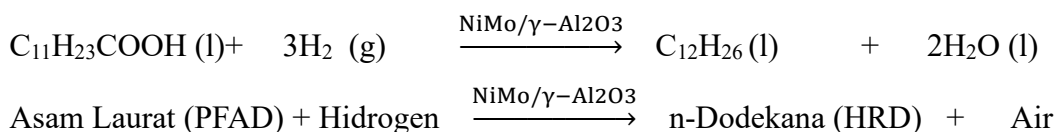
Mekanisme reaksi 5 (asam miristat) :





Pra Rancangan Pabrik
Bioavtur dari *Palm Fatty Acid Distillate* Menggunakan Proses
Hydroprocessed Esters And Fatty Acid

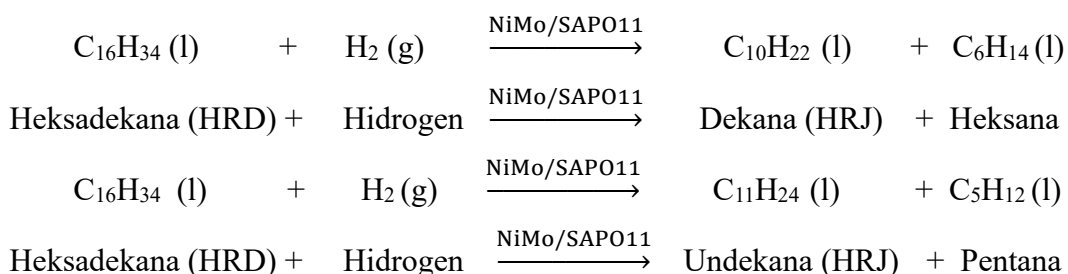
Mekanisme reaksi 6 (asam laurat) :



Reaksi berlangsung secara eksotermis selama satu jam. Produk keluar dari bagian bawah reaktor kemudian didinginkan menggunakan *heat exchanger* dan *cooler* hingga mencapai suhu 150°C. Pendinginan ini bertujuan untuk menurunkan viskositas fluida serta meningkatkan perbedaan densitas antar fase sehingga proses pemisahan menjadi lebih efektif. Setelah pendinginan, campuran fluida dialirkan ke *high-pressure three-phase* separator yang beroperasi pada suhu 150°C dan tekanan 30 atm. Di dalam separator, fluida terpisah menjadi tiga fase berdasarkan perbedaan densitas yakni fase gas yang terkumpul di bagian atas separator, *Hydro Renewable Diesel* (HRD) di bagian tengah, dan air di bagian bawah separator. Gas keluar melalui bagian atas reaktor untuk dijadikan bahan bakar pada boiler, minyak dialirkan ke reaktor *hydroisomerisasi/hydrocracking*, sementara air dialirkan menuju WWTP. Selanjutnya HRD dipompa menuju heater untuk dipanaskan hingga 310°C kemudian diumpankan menuju reaktor *hydrocracking* yang didalamnya terdapat katalis NiMo/SAPO-11. Secara bersamaan, gas hidrogen (H₂) dengan kemurnian 99% dengan tekanan 30 atm dialirkan dari tangki menuju reaktor dengan aliran 800 N-L H₂/L. Dalam tahap ini, alkana rantai panjang diubah menjadi bioavtur dengan *naphtha* sebagai produk sampingnya.

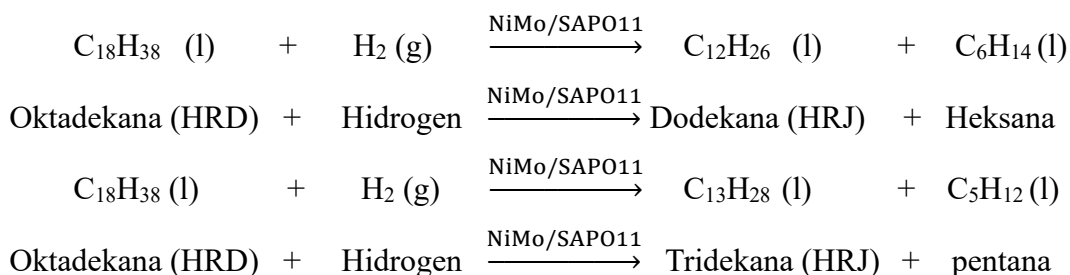
Reaksi *Hydroisomerisasi/Hydrocracking* :

Mekanisme 1:





Mekanisme 2:



II.3.3 Tahap Pemurnian Produk

Campuran antara gas dan cairan kemudian didinginkan lalu dipisahkan di flash drum pada suhu 30 °C dan tekanan 30 atm. Aliran bawah dari flash drum kemudian dialirkan ke *heater* untuk dipanaskan hingga 74 °C kemudian dialirkan menuju kolom distilasi yang beroperasi pada suhu 74 °C dan tekanan 1 atm untuk menjalani proses pemisahan sedangkan aliran atas (gas) dijadikan bahan bakar boiler. Di dalam kolom distilasi ini, dilakukan pemisahan komponen menjadi bioavtur dan *naphtha* dimana bioavtur menjadi produk bawah dan *naphtha* (pentana dan heksana) menjadi produk atas. Selanjutnya, kedua produk tersebut dipompa menuju *cooler* untuk didinginkan sebelum disimpan di tangki penyimpanan dengan kondisi suhu 30 °C dan tekanan 1 atm.