

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Trimethylolpropane fatty acid triester (TFATE) merupakan salah satu jenis ester poliol yang Senyawa ini berkembang pesat sebagai bahan dasar pelumas hayati berkinerja tinggi yang berpotensi menggantikan pelumas berbasis minyak mineral konvensional (Thanahiranya *et al.*, 2025). Meningkatnya kesadaran global terhadap isu lingkungan, pengetatan regulasi terkait emisi dan biodegradabilitas, serta keterbatasan sumber daya fosil telah mendorong pengembangan pelumas yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. TFATE memiliki keunggulan sifat fisikokimia dan tribologi, antara lain indeks viskositas yang tinggi, titik tuang yang rendah, serta stabilitas oksidatif yang baik, sehingga menjadikannya sesuai untuk aplikasi yang menuntut kinerja tinggi pada sektor otomotif, hidrolik, dan industri.

Secara umum, TFATE diproduksi melalui proses transesterifikasi atau esterifikasi langsung dengan bantuan katalis kimia maupun enzimatis. Pemilihan jalur proses dan bahan baku, baik berupa minyak nabati yang dapat dimakan, tidak dapat dimakan, maupun minyak limbah, sangat memengaruhi kualitas produk, biaya produksi, dan tingkat keberlanjutan proses (Appiah *et al.*, 2022). Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan pelumas hayati yang mudah terurai secara biologis, bertoksistas rendah, dan memenuhi standar lingkungan yang ketat, perancangan pabrik kimia untuk produksi TFATE menjadi penting guna menjamin keberlanjutan pasokan, kelayakan ekonomi, serta dampak lingkungan yang minimal, khususnya di wilayah yang memiliki ketersediaan sumber daya minyak terbarukan yang melimpah.

1.2 Kapasitas Rancangan

Pabrik *trimethylolpropane fatty acid triester* (TFATE) atau pelumas ramah lingkungan ini diproyeksikan mulai didirikan pada tahun 2026 dan direncanakan beroperasi secara penuh pada tahun 2030. Penentuan kapasitas pabrik diharapkan mampu memberikan keuntungan secara ekonomis, sehingga pabrik dapat beroperasi secara berkelanjutan tanpa mengalami kerugian. Kapasitas produksi yang ditetapkan akan sangat mempengaruhi perhitungan teknis maupun ekonomis dalam perancangan pabrik.

1.2.1 Produksi TFATE dalam Negeri

Penentuan kapasitas produksi pabrik perlu mempertimbangkan kapasitas pabrik sejenis yang telah beroperasi agar diperoleh kapasitas yang layak secara teknis dan ekonomis. Hingga saat ini, belum terdapat pabrik di Indonesia yang memproduksi pelumas ramah lingkungan berbasis *trimethylolpropane fatty acid triester* (TFATE) dalam skala industri, sehingga kebutuhan pelumas ramah lingkungan dalam negeri masih sebagian dipenuhi melalui impor. Seiring meningkatnya kebutuhan pelumas ramah lingkungan pada sektor industri dan otomotif, pendirian pabrik TFATE dengan kapasitas yang memadai diharapkan mampu memenuhi kebutuhan pasar domestik sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap produk impor.

1.2.2 Ketersediaan Bahan Baku

Metil oleat merupakan salah satu produk turunan dari minyak kelapa sawit, yang secara kimia diperoleh melalui proses esterifikasi atau transesterifikasi asam oleat yang terkandung dalam minyak sawit. Indonesia merupakan negara penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia, sehingga secara potensi sumber daya, Indonesia memiliki keunggulan komparatif yang sangat kuat dalam pengembangan industri hilir berbasis sawit, termasuk industri pelumas ramah lingkungan (*biolubricant*). Berdasarkan Tabel 1.1 yang memuat nama perusahaan dan asal negara, dapat diketahui bahwa bahan baku utama yang dibutuhkan oleh perusahaan-perusahaan tersebut pada dasarnya bersumber dari Indonesia, khususnya minyak kelapa sawit. Namun demikian, untuk produk turunan spesifik seperti metil oleat, hingga saat ini belum tersedia produksi komersial yang memadai di dalam negeri, sehingga kebutuhan metil oleat masih harus dipenuhi melalui impor. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan industri hilir, di mana Indonesia sebagai produsen bahan baku primer belum sepenuhnya menguasai rantai nilai lanjutan (*downstream processing*).

Ketersediaan bahan baku merupakan salah satu pertimbangan utama dalam penentuan kapasitas produksi suatu pabrik. Pada pabrik pelumas ramah lingkungan berbasis *trimethylolpropane fatty acid triester* (TFATE), bahan baku utama yang dibutuhkan adalah *trimethylolpropane* (TMP) dan metil oleat, sedangkan bahan pendukung meliputi potassium karbonat sebagai katalis dan nitrogen sebagai gas *inert*. Keberlanjutan pasokan bahan baku sangat menentukan kelancaran proses produksi, baik dari sisi teknis maupun ekonomis. Saat ini, TMP dan metil oleat belum diproduksi secara luas di Indonesia sehingga masih harus diperoleh melalui impor. Sebaliknya, bahan pendukung seperti potassium karbonat dan

nitrogen telah tersedia dari produsen domestik. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun sebagian bahan baku masih bergantung pada impor, fondasi bahan baku utama secara hulu sesungguhnya berasal dari sumber daya domestik, yaitu minyak kelapa sawit.

Dengan mempertimbangkan aspek tersebut, pendirian pabrik biolubricant di Indonesia tetap dinilai layak dan strategis. Keunggulan utama Indonesia terletak pada ketersediaan bahan baku hulu yang melimpah, berkelanjutan, dan kompetitif secara biaya, yang menjadi dasar kuat untuk pengembangan industri hilir seperti produksi metil oleat di masa mendatang. Kehadiran pabrik biolubricant justru dapat berperan sebagai pemicu (*driving force*) bagi tumbuhnya industri antara (*intermediate industry*) metil oleat di dalam negeri. Oleh karena itu, kapasitas pabrik dirancang dengan mempertimbangkan kondisi pasokan bahan baku saat ini, sehingga tetap layak secara teknis dan ekonomis serta mampu menjamin kontinuitas produksi. Dalam jangka panjang, pengembangan industri *biolubricant* di Indonesia tidak hanya meningkatkan nilai tambah kelapa sawit, tetapi juga mendukung kebijakan hilirisasi industri nasional, mengurangi ketergantungan impor produk kimia bernilai tinggi, serta memperkuat posisi Indonesia dalam rantai pasok global pelumas ramah lingkungan.

Tabel 1. 1 Data Impor Lubrikan (*Trade Map*, 2024)

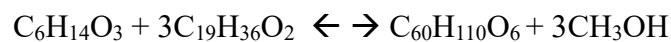
Negara	Volume Impor (Ton)
China	52.702
German	83.359
Kanada	54.502
Meksiko	53.082

Berdasarkan data *Trade Map* untuk produk *lubricating*, beberapa negara menunjukkan tingkat impor lubrikan yang tinggi. Tingginya volume impor pada negara-negara tersebut mencerminkan besarnya kebutuhan pelumas untuk mendukung aktivitas industri seperti manufaktur, otomotif, energi, serta peralatan mekanik. Ketergantungan terhadap impor menunjukkan bahwa pasar pelumas di negara-negara tersebut masih memiliki ruang permintaan yang signifikan, sehingga membuka peluang bagi produk alternatif untuk memasuki pasar global.

Seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap isu keberlanjutan dan pengurangan dampak lingkungan, pengembangan *biolubricant* menjadi salah satu solusi yang sangat

berpotensi untuk menggantikan pelumas beebasis minyak bumi. *Biolubricant* berbahan dasar metil oleat memiliki keunggulan berupa biodegradabilitas yang tinggi, toksisitas yang lebih rendah, serta jejak karbon yang lebih kecil dibandingkan dengan pelumas berbasis minyak bumi. Dengan karakteristik tersebut, *biolubricant* tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan performa pelumasan pada berbagai aplikasi industri tetapi juga memberikan nilai tambah dari aspek keberlanjutan. Oleh karena itu, tingginya konsumsi dan impor lubrikan di negara-negara seperti China, German, Kanada, dan Meksiko menunjukkan potensi pasar yang besar bagi pengembangan dan penetrasi produk *biolubricant* sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Untuk menentukan kebutuhan bahan baku pembuatan *trimethylolpropane fatty acid triester* dapat dilakukan dengan perhitungan stoikiometri, dimana kapasitas produksi yang akan digunakan sebesar 118.000 ton/tahun. Sehingga kebutuhan *trimethylolpropane* (TMP) dan *methyl oleate* dihitung sebagai berikut:



Keterangan:

- $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_3$: *Trimethylolpropane* (TMP)
- $\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$: Metil Oleat
- $\text{C}_{60}\text{H}_{110}\text{O}_6$: *Trimethylolpropane fatty acid triester* (TFATE)
- CH_3OH : Metanol (produk samping)

Berat Molekul (BM)

- TFATE ($\text{C}_{60}\text{H}_{110}\text{O}_6$) = 927,5 g/mol
- TMP ($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_3$) = 134,17 g/mol
- Metil Oleat ($\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$) = 296,49 g/mol
- Metanol (CH_3OH) = 32,04 g/mol

Mol *Trimethylolpropane fatty acid triester* (TFATE)

$$\begin{aligned}\text{Mol TFATE} &= \frac{118.000.000.000 \text{ gram/tahun}}{927,5 \text{ gram/mol}} \\ &= 127.223.719.68 \text{ mol/tahun}\end{aligned}$$

Kebutuhan *Trimethylolpropane* (TMP)

$$\begin{aligned}
 \text{Massa TMP} &= \frac{\text{Koeff TMP}}{\text{Koeff TFATE}} \times \text{BM TMP} \times \text{Mol TFATE} \\
 &= \frac{1}{1} \times 134,17 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \times 134,17 \times \frac{127.223.719.68 \text{ mol}}{\text{tahun}} \\
 &= 17.069.606.469.00 \text{ gr/tahun} \\
 &= 17.069.606.47 \text{ kg/tahun}
 \end{aligned}$$

Kebutuhan Metil Oleat

$$\begin{aligned}
 \text{Massa Metil Oleat} &= \frac{\text{Koeff Metil Oleat}}{\text{Koeff TFATE}} \times \text{BM Metil Oleat} \times \text{Mol TFATE} \\
 &= \frac{3}{1} \times 296,49 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \times 127.223.719.68 \frac{\text{mol}}{\text{tahun}} \\
 &= 113.161.681.940,70 \text{ gr/tahun} \\
 &= 113.161.681.94 \text{ kg/tahun}
 \end{aligned}$$

Massa Metanol (Produk samping)

$$\begin{aligned}
 \text{Massa Metanol} &= \frac{\text{Koeff CH}_3\text{OH}}{\text{Koeff TFATE}} \times \text{BM CH}_3\text{OH} \times \text{Mol TFATE} \\
 &= \frac{3}{1} \times 32,04 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \times 127.223.719.68 \frac{\text{mol}}{\text{tahun}} \\
 &= 12.228.743.935.31 \text{ gr/tahun} \\
 &= 12.228.743.31 \text{ kg/tahun}
 \end{aligned}$$

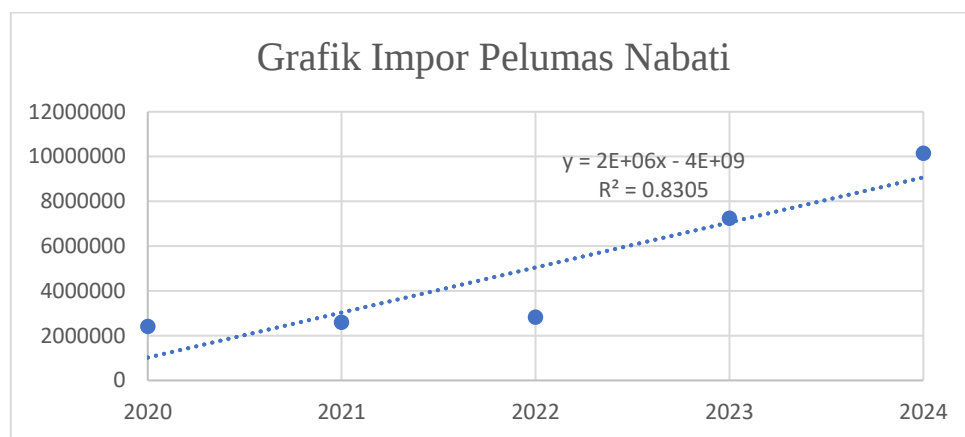
1.2.3 Kebutuhan TFATE dalam Negeri

Kapasitas produksi pabrik pelumas ramah lingkungan berbasis *trimethylolpropane fatty acid triester* (TFAT) dapat diperkirakan dengan melihat kebutuhan biolubricant dalam negeri. Data kebutuhan pelumas ramah lingkungan bukan dari minyak bumi di Indonesia dapat ditinjau berdasarkan data impor yang dipublikasikan oleh Badan Pusat Statistik (BPS). Hingga saat ini, Indonesia belum memiliki pabrik yang secara khusus memproduksi pelumas ramah lingkungan TFAT dalam skala industri, sehingga tidak terdapat data ekspor produk tersebut. Berdasarkan data yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik, kebutuhan pelumas dan *base oil* berbasis ester di Indonesia cenderung mengalami peningkatan setiap tahunnya.

Tabel 1. 2 Jumlah Impor Pelumas Ramah Lingkungan bukan dari Minyak Bumi
(Badan Pusat Statistik, 2025).

Tahun	Jumlah impor (ton/tahun)
2020	2,411.34
2021	2,597.56
2022	2,822.16
2023	7,245.09
2024	10,150.01

1.2.4 Perkiraan Kebutuhan TFATE



Gambar 1. 1 Jumlah Impor Pelumas Nabati

Berdasarkan grafik impor diatas, dapat dilihat bahwa kebutuhannya cenderung meningkat setiap tahun. Berdasarkan grafik impor diatas memiliki nilai $R^2 < 0,9$ sehingga untuk memprediksi kapasitas pabrik yang akan didirikan tidak dapat menggunakan metode linier. Maka metode untuk menentukan kapasitas pabrik yang akan didirikan pada tahun 2028 menggunakan metode *discounted* dengan rumus sebagai berikut.

$$m = P(1 + i)^n$$

Dimana :

m = Jumlah produk pada tahun-tahun mendatang (ton/tahun)

P = Data besarnya impor tahun 2024 (ton/tahun)

i = Rata-rata kenaikan impor tiap tahun (%)

$n = \text{Selisih tahun (tahun proyeksi} - 2024)$

Setelah perhitungan didapatkan, selanjutnya kapasitas produksi dihitung menggunakan neraca massa peluang kapasitas dengan rumus sebagai berikut.

$$M1 + M2 + M3 = M4 + M5$$

$$M3 = (M4 + M5) - (M1 + M2)$$

Dimana:

$M1 = \text{nilai impor pada tahun 2030}$

$M2 = \text{nilai produksi pabrik lama}$

$M3 = \text{nilai produksi pabrik baru pada tahun 2030}$

$M4 = \text{nilai ekspor pada tahun 2030}$

$M5 = \text{konsumsi dalam negeri tahun 2030}$

Perhitungan kapasitas produksi dapat dilihat seperti berikut.

a. Perkiraan nilai impor tahun 2030 ($M5$)

$$M_{2030} = 10,150,01 (1 + 0,532963128)^6$$

$$M_{2030} = 10,150,01 (1,532963128)^6$$

$$M_{2030} = 10,150,01 (5,522386968)$$

$$M_{2030} = 117763.6369$$

b. Perkiraan nilai ekspor tahun 2030 ($M4$)

$$M_{2030} = P(1 + i)^n$$

$$M_{2030} = 0$$

c. Peluang kapasitas berdasarkan data ekspor dan impor 2030

$$M2 = 0$$

$$M3 = (M4 + M5) - (M1 + M2)$$

$$M3 = (0 + 117763.6369) - (0 + 0)$$

$$M3 = 117763.6369$$

Dari perhitungan angka kapasitas produksi didapatkan peluang dari kapasitas produksi tahun 2030 adalah 117763.6369 ton/tahun. Namun, dengan mempertimbangkan bahwa belum adanya pabrik TFATE yang telah berdiri di Indonesia, dan dengan mempertimbangkan peraturan pemerintah dalam UU RI nomor 5 tahun 1999, BAB IV, bagian pertama monopoli, Pasal 17, ayat (1) c yang berisi ‘satu pelaku usaha atau satu kelompok pelaku usaha menguasai lebih dari 50% (lima puluh persen) pangsa pasar satu jenis barang atau jasa tertentu’ maka 50% dari produksi rencananya akan di ekspor ke berbagai wilayah di bagian dunia untuk memenuhi kebutuhan pelumas nabati, jadi pada tahun 2030 kapasitas pabrik adalah sebagai berikut:

$$M_{2030} = 117763.6369$$

Maka pabrik TFATE yang akan didirikan di Indonesia pada tahun 2030 memiliki kapasitas sebesar 118.000 ton/tahun.

Dikarenakan pabrik *biolubricant* belum banyak berdiri, maka digunakan data pabrik *lubricant* yang sudah beroperasi. Tabel 1.3 merupakan kapasitas produksi pabrik *lubricant*.

Tabel 1. 3 Perusahaan yang Memproduksi *Lubricant*

Perusahaan	Kapasitas (Liter/Tahun)
PT Pertamina Lubricant	535.000.000
Shell	1.000.000.0000
TotalEnergies	350.000
Petronas	300.000.000
BP PLC (Castrol)	80.000

(Sumber: *Fuel and Lubes, Machinery Lubrications*)

Pabrik yang memproduksi *lubricant* dengan kapasitas kecil adalah 80.000 Liter/Tahun pada TotalEnergies. Dapat disimpulkan bahwa pabrik *biolubricant* yang akan didirikan dapat menguntungkan karena berproduksi pada kapasitas 118.000 ton/tahun.

1.3 Penentuan Lokasi Pabrik

Untuk menentukan lokasi pabrik, maka perlu diketahui beberapa hal seperti sifat proses produksi sodium methyllate, salah satunya yaitu menentukan apakah pabrik termasuk dalam kategori weight loss atau weight gain. Berdasarkan sifat proses menurut Teori Alfred Webber dapat dibagi menjadi dua yaitu weight gain dan weight loss.

- *Weight Loss*

Pabrik jenis *weight loss* merupakan pabrik dimana bobot produknya lebih ringan dibanding dengan bahan bakunya. Untuk pabrik jenis *weight loss*, letak pabrik sebaiknya dekat dengan bahan baku untuk meminimalisir besarnya biaya transportasi pengiriman bahan baku baku.

- *Weight Gain*

Pabrik jenis *weight gain* merupakan kebalikan dari teori *weight loss*, dimana pabrik dengan jenis *weight gain* merupakan pabrik dengan bobot produknya lebih besar dibanding dengan bahan bakunya. Pabrik jenis *weight gain* cenderung ditempatkan di daerah pemasaran industri yang biasanya tidak mengalami kesulitan dalam penggunaan bahan baku atau mudah diperoleh di daerah sekitarnya.

Berdasarkan teori penentuan lokasi industri, proses produksi *trimethylolpropane fatty acid triester* (TFATE) termasuk ke dalam proses *weight gain*, karena massa produk yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan massa masing-masing bahan baku penyusunnya. Pada proses ini, trimethylolpropane (TMP) bereaksi dengan methyl oleate membentuk ester kompleks dengan berat molekul tinggi.

Berat molekul masing-masing senyawa adalah sebagai berikut:

- Berat molekul trimethylolpropane (TMP) : 134,17 g/mol
- Berat molekul methyl oleate : 296,49 g/mol
- Berat molekul TFATE : 927,5 g/mol

Berdasarkan data tersebut, dapat diketahui bahwa berat molekul produk TFATE jauh lebih besar dibandingkan berat molekul bahan baku awalnya. Oleh karena itu, pabrik ini dengan proses *weight gain* lebih tepat didirikan dekat dengan daerah pemasaran dan pusat distribusi, sehingga biaya transportasi produk akhir yang bernilai tinggi dapat diminimalkan dan distribusi ke konsumen menjadi lebih efisien.

Lokasi pabrik ditentukan berdasarkan pada beberapa faktor antara lain kedekatan pasar, infrastruktur industri, logistik, regulasi, tenaga kerja, stabilitas, bahan baku serta kemungkinan adanya perluasan wilayah pabrik. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, maka pabrik *trimethylolpropane fatty acid triester* (TFATE) akan didirikan di Cilegon, Provinsi Banten. Berdasarkan peta wilayah tersebut, terdapat lahan kosong yang direncanakan akan digunakan sebagai lokasi pendirian, yang disajikan pada Gambar 1.2.



Gambar 1. 2 Lokasi Pemilihan Pabrik di Banten

(Sumber: *Google Maps*)

1.3.1 Bahan baku

Bahan baku utama yang digunakan dalam produksi *trimethylolpropane* (TMP), *Methyl Oleate* (Metil Oleat), *potassium carbonate* dan N_2 . *Trimethylolpropane* (TMP) akan didapatkan dari Wuxi Vland Biotech Co., Ltd, Jiangsu, China dan akan diantarkan dengan kapal tanker. Metil Oleat akan didapatkan dari Ningbo Dongbo New Energy Co., Ltd., Zhejiang, China dan akan diantarkan dengan kapal tanker. *Potassium carbonate* akan didapatkan dari CV. Nijuu Indonesia Cemerlang, Tangerang, Indonesia. Sedangkan Nitrogen akan diproduksi sendiri pada unit nitrogen di utilitas pabrik. Pabrik *trimethylolpropane fatty acid triester* (TFATE) atau bisa disebut juga pelumas yang biodegradable direncanakan dibangun di Cilegon, Provinsi Banten, yang berada di sepanjang jalur pesisir Selat Sunda dan berdekatan langsung dengan Pelabuhan Ciwandan. Lokasi ini memiliki akses laut internasional yang strategis serta terhubung langsung dengan jalur pelayaran utama, sehingga mempermudah proses impor bahan baku dan distribusi produk ke pasar domestik maupun ekspor antarwilayah dan antarnegara. Selain itu, keterhubungan dengan jaringan jalan tol Jakarta–Merak mendukung efisiensi transportasi darat dan kontinuitas rantai pasok industri.

1.3.2 Sarana dan Transportasi

Dalam menunjang kelancaran pengangkutan bahan baku, produk, dan bahan pendukung lainnya, lokasi pabrik perlu berada di wilayah yang mudah diakses oleh kendaraan berat serta didukung sarana transportasi yang memadai. Kota Cilegon, Provinsi Banten merupakan lokasi yang strategis karena memiliki akses langsung ke Jalan Tol Tangerang–Merak melalui Gerbang Tol Cilegon Barat, sehingga memudahkan distribusi darat. Selain itu, kawasan ini berdekatan dengan Pelabuhan Krakatau International Port (KIP), Pelabuhan Ciwandan dan Pelabuhan Merak yang mendukung kegiatan logistik dan ekspor-impor melalui jalur laut. Dukungan jalan arteri nasional Jakarta–Merak serta ketersediaan jaringan telekomunikasi dan utilitas industri menjadikan kawasan ini sangat menunjang kelancaran operasional pabrik.

1.3.3 Tenaga Kerja

Penentuan lokasi pabrik juga perlu mempertimbangkan ketersediaan dan potensi tenaga kerja di wilayah sekitar. Berdasarkan hasil Proyeksi Penduduk Kabupaten/Kota Provinsi Banten Tahun 2020–2035, jumlah penduduk Kota Cilegon pada tahun 2024 mencapai 455,62 ribu jiwa, yang terdiri atas 230,79 ribu jiwa laki-laki dan 224,83 ribu jiwa perempuan, dengan rasio jenis kelamin sebesar 103. Struktur penduduk Kota Cilegon didominasi oleh penduduk usia produktif (15–64 tahun) sebesar 68,67 %, sedangkan sisanya 31,33 % merupakan penduduk usia non-produktif, menunjukkan bahwa Kota Cilegon masih berada pada periode bonus demografi. Kondisi ini menjadi potensi strategis bagi pengembangan industri karena tersedianya tenaga kerja dalam jumlah besar.

Lebih lanjut, jumlah penduduk usia kerja di Kota Cilegon mencapai 335,68 ribu orang, dengan angkatan kerja sebanyak 204,18 ribu orang, yang terdiri atas 191,76 ribu orang bekerja dan 12,42 ribu orang pengangguran terbuka. Data tersebut menunjukkan masih tersedianya tenaga kerja yang dapat diserap oleh industri baru. Dengan karakteristik tersebut, pembangunan pabrik di Kota Cilegon, Provinsi Banten dinilai mampu memenuhi kebutuhan tenaga kerja operasional sekaligus berkontribusi terhadap penyerapan tenaga kerja lokal (BPS, 2025).

1.3.4 Karakteristik Lokasi

Karakteristik lokasi meliputi kondisi iklim, musim, serta potensi bencana alam. Kota Cilegon, Provinsi Banten memiliki iklim tropis yang relatif stabil dan telah berkembang sebagai kawasan industri dengan sistem perencanaan serta infrastruktur yang memadai.

Dengan penerapan standar perancangan dan mitigasi yang sesuai, kawasan ini dinilai layak untuk pembangunan dan operasional pabrik.

1.3.5 Kebijakan Pemerintah

Pendirian pabrik juga perlu memperhatikan kebijakan pengembangan industri yang berkaitan dengan pemerataan kesempatan kerja, peningkatan kesejahteraan masyarakat, dan pemerataan hasil pembangunan. Dalam RPJMD Kota Cilegon 2021–2026, dinyatakan bahwa peruntukan lahan untuk kawasan industri di beberapa kecamatan merupakan bagian dari strategi pembangunan daerah untuk mendukung pertumbuhan ekonomi dan serapan tenaga kerja. Kawasan peruntukan industri tersebut direncanakan sebagai ruang ekonomi produktif yang terintegrasi dengan pengembangan infrastruktur, sumber daya manusia, dan penyerapan tenaga kerja lokal melalui kegiatan industri besar, menengah, dan kecil. Keberadaan industri di Cilegon dipandang sebagai alat untuk memperluas kesempatan kerja sekaligus meningkatkan kesejahteraan masyarakat setempat sesuai dengan arah kebijakan pengembangan industri di daerah ini (RPJMD, 2026).

1.3.6 Perluasan Pabrik

Pemilihan lokasi pabrik dilakukan dengan mempertimbangkan aspek ketersediaan bahan baku, utilitas, transportasi, pemasaran, sumber daya manusia, regulasi, serta risiko operasional. Mengingat bahan baku utama bersifat impor dan produk memiliki nilai ekonomi tinggi, maka lokasi pabrik harus berada di kawasan industri dengan infrastruktur logistik dan utilitas yang memadai.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, terdapat tiga alternatif lokasi yang dinilai paling strategis dan realistis secara teknis maupun akademik, yaitu:

1. Cilegon, Provinsi Banten
2. Gresik, Provinsi Jawa Timur
3. Dumai, Provinsi Riau

Tabel 1. 4 Parameter dan Bobot Khusus *Weight Gain Industry*

Prioritas	Parameter	Alasan Teknik	Bobot
1	Kedekatan pasar	Produk bernilai tinggi dan sensitif distribusi	25
2	Infrastruktur industri	<i>Utilities</i> dan <i>reliability</i>	20
3	Logistik dan pelabuhan	Produk cair, ekspor	15
4	Regulasi dan kawasan industri	Izin dan keberlanjutan	15
5	Tenaga kerja	Skill operasi	10
6	Stabilitas dan risiko	<i>Availability plant</i>	10
7	Bahan baku	Bisa dikirim, <i>cost</i> relatif kecil	5

Tabel 1. 5 Penilaian *Weight Gain*

Parameter	Bobot	Cilegon	Total	Gresik	Total	Dumai	Total
Kedekatan pasar	25	9×25	225	8×25	200	6×25	150
Infrastruktur industri	20	9×20	180	8×20	160	7×20	140
Logistik dan pelabuhan	15	9×15	135	8×15	120	7×15	105
Regulasi dan kawasan industri	15	9×15	135	8×15	120	6×15	90
Tenaga kerja	10	8×10	80	7×10	70	6×10	60
Stabilitas dan risiko	10	7×10	70	8×10	80	6×10	60
Bahan baku	5	7×10	35	7×5	35	9×5	45
Total			860		785		650

Keterangan:

1 – 2 sangat buruk

3 – 4 kurang

5 – 6 cukup

7 – 8 baik

9 – 10 sangat baik

Setelah meninjau hasil penilaian pada Tabel 1.3, maka lokasi yang dipilih untuk pembangunan pabrik *trimethylolpropane fatty acid triester* (TFATE) adalah Cilegon,

Provinsi Banten. Hal ini disebabkan oleh kedekatan Cilegon dengan pusat pasar utama di Pulau Jawa, khususnya kawasan industri dan konsumen akhir, sehingga biaya dan risiko distribusi produk dapat diminimalkan. Selain itu, ketersediaan infrastruktur industri yang lengkap, akses langsung ke pelabuhan internasional, serta utilitas pendukung yang memadai menjadikan Cilegon unggul pada parameter utama pabrik *weight gain*, di mana orientasi lokasi lebih ditentukan oleh efisiensi distribusi produk dibandingkan kedekatan bahan baku. Oleh karena itu, pemilihan Cilegon sebagai lokasi pabrik dinilai paling menguntungkan secara teknis, ekonomis, dan operasional.

Untuk memperkuat dasar pemilihan lokasi pabrik *trimethylolpropane fatty acid triester* (TFATE) di Krakatau *Industrial Estate* Cilegon (KIEC), Cilegon, Provinsi Banten, dilakukan analisis SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, dan Threats*) dimana dapat dilihat pada tabel berikut.

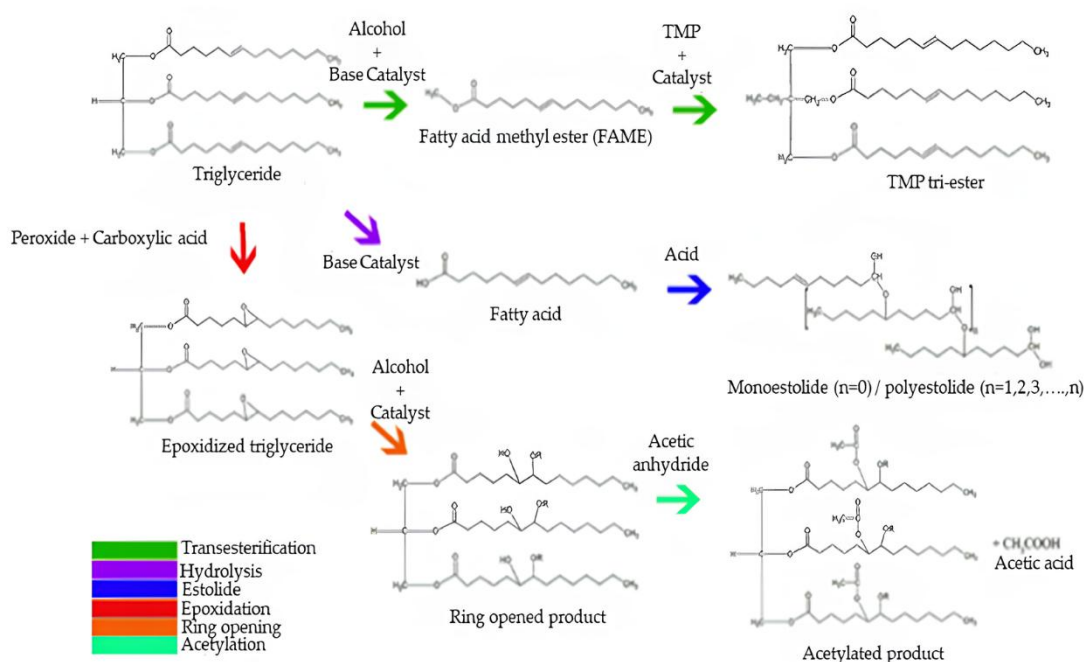
Tabel 1. 6 Analisis SWOT Pemilihan Lokasi Pabrik

Strengths	Weaknesses
• Lokasi dekat Pelabuhan dan jalur pelayaran Selat Sunda sehingga mendukung impor bahan baku dan ekspor produk • Akses langsung ke Jalan Tol Jakarta–Merak yang memudahkan distribusi • Ketersediaan utilitas industri (air dan listrik) yang stabil untuk industri kimia skala besar • Tersedia tenaga kerja dengan pengalaman di industri kimia, petrokimia, dan manufaktur	• Biaya lahan dan utilitas relatif lebih tinggi dibandingkan kawasan industri di luar Pulau Jawa • Kepadatan kawasan industri dapat meningkatkan persaingan penggunaan utilitas • Keterbatasan ruang di beberapa area industri lama untuk ekspansi jangka panjang
Opportunities	Threats
• Peningkatan kebutuhan pelumas ramah lingkungan seiring perkembangan industri dan regulasi lingkungan • Peluang ekspor biolubricant ke pasar regional dan internasional melalui pelabuhan terdekat • Dukungan pemerintah terhadap pengembangan industri kimia dan produk berbasis energi terbarukan	• Fluktuasi harga dan pasokan bahan baku impor akibat kondisi pasar global • Regulasi lingkungan yang semakin ketat terhadap industri kimia • Persaingan dengan industri kimia besar lain yang berada di kawasan Cilegon

1.4 Tinjauan Proses

1.4.1 Macam-macam Proses Pembuatan *Trimethylolpropane fatty acid triester* (TFATE)

Trimethylolpropane fatty acid ester merupakan salah satu jenis *biolubricant* yang memiliki karakteristik fisikokimia unggul, seperti indeks viskositas yang tinggi, titik nyala yang baik, ketahanan terhadap gesekan, serta sifat biodegradabilitas yang ramah lingkungan. Biolubricant ini umumnya dikembangkan dengan memanfaatkan bahan baku berupa minyak nabati yang berasal dari tumbuhan. Pembentukan *trimethylolpropane fatty acid ester* dilakukan melalui berbagai proses kimia, di antaranya esterifikasi atau transesterifikasi, serta dapat dikombinasikan dengan proses lain seperti hidrogenasi, epoksidasi dan branching, pembentukan estolida asam lemak, maupun penambahan zat aditif untuk meningkatkan kinerjanya (Cecilia *et al.*, 2020).



Gambar 1. 3 Macam- Macam Reaksi pada Pembuatan Biolubricant Cecilia *et al.*, 2020)

1.3.1 Esterifikasi/Transesterifikasi

Menurut Cecilia (2020), *biolubricant* memiliki struktur kimia yang mudah dimodifikasi, khususnya pada gugus ester yang terdapat dalam molekul triasilgliserida. Modifikasi tersebut umumnya dilakukan melalui reaksi transesterifikasi dan esterifikasi. Pada reaksi transesterifikasi, gugus gliserol pada triasilgliserida digantikan oleh alkohol dengan rantai karbon panjang dan bercabang, sehingga terbentuk ester baru dengan sifat pelumasan yang lebih baik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.4. Sementara itu, reaksi esterifikasi melibatkan asam lemak bebas yang berasal dari minyak alami yang bereaksi dengan

$$\begin{array}{c} \text{O}-\text{H} \\ | \\ \text{R}-\text{C}=\text{O} \end{array} + \text{R}^1\text{OH} \rightleftharpoons \begin{array}{c} \text{O}-\text{R}^1 \\ | \\ \text{R}-\text{C}=\text{O} \end{array} + \text{HOH}$$
$$\begin{array}{c} \text{R} \\ \parallel \\ \text{O}=\text{C}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{O}-\text{C}(=\text{O})\text{R})-\text{CH}_2-\text{O}-\text{C}(=\text{O})\text{R} \\ \parallel \\ \text{O} \\ \text{R} \end{array} + 3\text{R}^1\text{OH} \rightleftharpoons \begin{array}{c} \text{OH} \\ | \\ \text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2 \\ | \\ \text{OH} \end{array} + \begin{array}{c} \text{O}-\text{R}^1 \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}=\text{O} \end{array}$$

Reaksi esterifikasi dan transesterifikasi umumnya dilakukan menggunakan katalis asam homogen, seperti HCl, H₂SO₄, atau asam *p*-toluensulfonat, yang mampu menghasilkan konversi tinggi, namun memiliki kelemahan berupa kesulitan pemisahan produk, sifat korosif, serta dampak lingkungan. Oleh karena itu, katalis padat dikembangkan sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan. Katalis basa padat, seperti CaO, diketahui efektif dalam reaksi transesterifikasi dan mampu mencapai konversi tinggi, meskipun memerlukan suhu reaksi yang relatif tinggi serta tahapan regenerasi katalis. Selain itu, katalis asam padat, seperti resin penukar kation, zeolit, dan berbagai oksida logam (Al₂O₃, ZrO₂, TiO₂, WO₃, Nb₂O₅, Ta₂O₅), juga banyak digunakan, dengan aktivitas katalitik yang dapat ditingkatkan melalui proses sulfatasi. Secara umum, baik reaksi esterifikasi maupun transesterifikasi memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, yang dijelaskan pada Tabel 1.7.

Tabel 1. 7 Kelebihan dan Kekurangan Reaksi Esterifikasi dan Transesterifikasi
(Khan *et al.*, 2021; Mahajan, 2024).

Jenis Reaksi	Kelebihan	Kekurangan
Transesterifikasi	- Laju reaksi cepat - Kondisi operasi ringan - Konversi dan selektivitas tinggi terhadap ester	- Sensitif terhadap air dan asam lemak bebas - Membutuhkan banyak alkohol - Tidak cocok untuk bahan yang memiliki asam lemak bebas yang tinggi jika tanpa <i>pretreatment</i>
Esterifikasi	- Cocok untuk bahan baku dengan asam lemak bebas yang tinggi - Tidak membentuk sabun - Cocok untuk <i>pretreatment</i> sebelum proses transesterifikasi	- Laju reaksi relatif lama - Membutuhkan katalis asam - Suhu dan waktu reaksi lebih tinggi

Reaksi esterifikasi dan transesterifikasi memiliki beberapa keterbatasan, terutama yang berkaitan dengan proses pemisahan produk serta tingginya sifat korosif pada sistem reaksi. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pengembangan katalis padat dilakukan sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan dalam proses esterifikasi dan transesterifikasi. Reaksi ini dapat berlangsung menggunakan katalis basa padat, seperti kalsium oksida (CaO), yang mampu menghasilkan konversi tinggi pada proses transesterifikasi. Namun demikian, penggunaan katalis ini umumnya memerlukan suhu reaksi yang relatif tinggi untuk mengaktifkan katalis, serta tahapan regenerasi setelah pemakaian. Sebagai alternatif, katalis asam padat, termasuk resin penukar kation, zeolit, maupun berbagai jenis oksida logam seperti Al₂O₃, ZrO₂, TiO₂, WO₃, Nb₂O₅, dan Ta₂O₅, dapat digunakan dalam reaksi tersebut. Aktivitas katalitik katalis asam padat ini dapat ditingkatkan melalui proses sulfasi

(Cecilia *et al.*, 2020). Selain itu, katalis alkali homogen, seperti kalium hidroksida, natrium metoksida, dan kalsium metoksida, juga banyak digunakan dalam reaksi transesterifikasi karena mampu menekan atau mencegah terjadinya reaksi saponifikasi, khususnya pada kondisi suhu reaksi yang lebih rendah (Salaheldeen *et al.*, 2021).

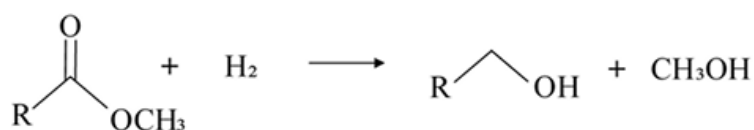
Salah satu biolubricant yang berpotensi dikembangkan melalui reaksi transesterifikasi antara metil oleat (MO) dan trimetilolpropana (TMP) adalah trimetilolpropana fatty acid triester (TFATE). Proses sintesis TFATE umumnya dilakukan di dalam reaktor tangki alir berpengaduk dengan perbandingan molar MO terhadap TMP sebesar 4:1, menggunakan katalis basa kalium karbonat (K_2CO_3) sebanyak 1,5% berat. Penghilangan alkohol hasil samping dilakukan dengan mengalirkan gas nitrogen (N_2) melalui mekanisme *leaching* atau *stripping*. Reaksi dijalankan pada kondisi kecepatan pengadukan 400 rpm, laju alir gas N_2 sebesar 1000 mL/menit, dan suhu operasi 120 °C, sehingga mampu menghasilkan selektivitas produk hingga 95,6%. Biolubricant TFATE yang dihasilkan menunjukkan kinerja yang baik, ditinjau dari stabilitas termal, sifat reologi, serta ketahanan terhadap gesekan (Xie *et al.*, 2022).

Penelitian sebelumnya juga melaporkan sintesis TFATE menggunakan bahan baku minyak jelantah (*waste cooking oil*) dengan katalis kalium hidroksida (KOH), yang menghasilkan rendemen TFATE sebesar 85,7% pada suhu reaksi 128 °C dan tekanan 200 Pa. Pada studi tersebut, kondisi vakum diterapkan untuk menghilangkan metanol sebagai produk samping sekaligus menggeser kesetimbangan reaksi ke arah pembentukan produk. Namun, penerapan vakum memerlukan konsumsi energi yang relatif tinggi, terutama untuk mempertahankan tekanan rendah selama proses kondensasi dan daur ulang metanol. Sebagai alternatif, metode gas *stripping* dikembangkan untuk menggantikan operasi vakum, dengan tujuan menghilangkan komponen bertitik didih rendah dari campuran cair. Pendekatan ini dinilai lebih efisien secara energi dan ekonomi dalam pemisahan metanol dari sistem reaksi (Wang *et al.*, 2014).

1.3.2 Hidrogenasi

Hidrogenasi minyak nabati merupakan suatu proses kimia yang melibatkan penambahan hidrogen pada ikatan rangkap karbon–karbon dalam molekul trigliserida penyusun minyak, reaksi dapat dilihat pada Gambar 1.6. Proses ini umumnya dilakukan pada rentang suhu 150–225 °C dan tekanan 69–413 kPa dengan menggunakan katalis nikel (Ni). Meskipun katalis Ni banyak digunakan, keberadaan residu nikel dalam produk

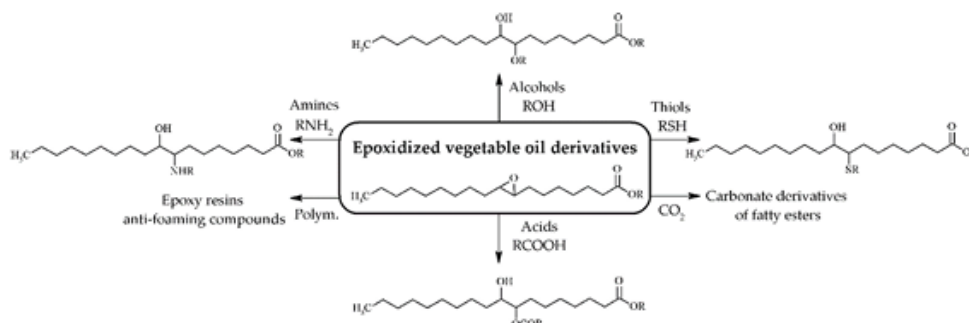
minyak menimbulkan kekhawatiran terkait potensi toksisitas. Di sisi lain, katalis logam mulia jarang diaplikasikan secara luas karena biaya yang relatif tinggi. Namun demikian, aktivitas katalitik yang tinggi pada konsentrasi kecil serta potensi penggunaan ulang dapat mengurangi dampak biaya operasional secara keseluruhan. Secara umum, hidrogenasi memberikan keuntungan berupa penurunan tingkat ketidakjenuhan dan peningkatan stabilitas oksidatif minyak tetapi proses ini juga memiliki keterbatasan, antara lain terjadinya reaksi isomerisasi yang menghasilkan asam lemak *cis* dan *trans* serta kebutuhan suhu reaksi yang relatif tinggi (Cecilia *et al.*, 2020).



Gambar 1. 6 Reaksi Hidrogenisasi (Cecilia *et al.*, 2020)

1.3.3 Epoksidasi

Stabilitas termo-oksidatif dan sifat fisikokimia biolubricant dapat ditingkatkan melalui modifikasi struktur molekul, khususnya pada ikatan rangkap karbon–karbon (C=C). Salah satu metode yang umum digunakan adalah epoksidasi, yaitu reaksi yang mengubah gugus alkena menjadi gugus epoksida seperti pada Gambar 1.7. Proses ini mampu meningkatkan stabilitas oksidatif, sifat pelumasan, dan adsorpsi biolubricant, serta dapat dilakukan pada suhu reaksi yang relatif rendah. Namun, produk hasil epoksidasi cenderung memiliki kelemahan berupa peningkatan titik tuang (*pour point*) dan penurunan indeks viskositas, sehingga kurang optimal untuk aplikasi pada rentang suhu yang luas. Oleh karena itu, senyawa hasil epoksidasi umumnya memerlukan modifikasi lanjutan untuk memperbaiki sifat fisikokimianya agar sesuai sebagai biolubricant (Cecilia *et al.*, 2020).



Gambar 1. 7 Reaksi Epoksidasi (Cecilia *et al.*, 2020)

Untuk memudahkan penentuan metode, kondisi dari semua proses yang didapatkan dari literatur akan dilampirkan pada Tabel 1.8.

Tabel 1. 8 Perbandingan Metode Pembuatan Biolubricant (Cecilia *et al.*, 2020)

Proses	Esterifikasi/Transesterifikasi	Hidrogenasi	Epoksidasi
Bahan Baku	Metil oleat & Trimetilolpropana	<i>Crude Palm Oil</i>	<i>Waste Cooking Oil</i>
Produk	Biolubricant	<i>Hydrogenated Crude Palm Oil</i>	<i>Methyl Ester Epoxide Waste Cooking Oil Methyl Ester</i>
Rasio Bahan Baku	4: 1	-	-
Katalis	K ₂ CO ₃	Al ₂ O ₃	H ₂ SO ₄
Suhu	120°C	120°C	60°C
Tekanan	1 bar	2 bar	1 atm
Waktu reaksi/tinggal	4 jam	30 Menit	6 Jam
Reaktor	CSTR	Batch	Batch
Sifat Reaksi	Moderat, relative mudah dikontrol	Eksotermis, resiko <i>hot spot</i>	Eksotermis, potensi <i>runway reaction</i>
Konversi Reaksi	70%	95%	60,67%
Selektivitas	95.6%	-	-
Kelebihan	Stabilitas termal baik, bahan baku mudah didapat, biaya operasi lebih rendah	Tingkat ketidakjenuhan rendah, stabilitas oksidasi baik	Stabilitas termo oksidatif baik, suhu reaksi rendah
Kekurangan	Konversi reaksi rendah	Harga katalis mahal, terjadi reaksi isomerisasi	Terdapat tahap penetasan H ₂ O ₂ kurang aman

Berdasarkan perbandingan metode pembuatan biolubricant pada Tabel 1.6, terdapat tiga alternatif proses yaitu esterifikasi/transesterifikasi, hidrogenasi, dan epoksidasi. Masing-masing metode memiliki keunggulan dan keterbatasan dari segi kondisi operasi, tingkat konversi, keamanan proses, serta potensi penerapan dalam skala industri.

Proses hidrogenasi memang menunjukkan konversi reaksi yang tinggi (95%) dan menghasilkan produk dengan stabilitas oksidasi yang baik akibat rendahnya tingkat ketidakjenuhan. Namun, metode ini memiliki beberapa kendala signifikan apabila diterapkan pada skala industri. Reaksi hidrogenasi memerlukan suplai gas hidrogen murni yang bersifat sangat mudah terbakar dan eksplosif. Penggunaan hidrogen pada tekanan operasi sekitar 2 bar atau lebih membutuhkan sistem penyimpanan dan distribusi gas bertekanan tinggi yang aman, termasuk kompresor, pressure vessel khusus, serta sistem deteksi kebocoran gas. Hal ini meningkatkan kompleksitas desain pabrik dan biaya investasi awal (*capital expenditure*).

Selain itu, reaksi hidrogenasi bersifat eksotermis sehingga memerlukan sistem pengendalian temperatur yang ketat untuk mencegah *hot spot* pada katalis. Jika tidak dikontrol dengan baik, dapat terjadi deaktivasi katalis atau reaksi samping seperti isomerisasi dan over-hydrogenation yang menurunkan kualitas produk. Katalis yang digunakan (misalnya berbasis logam dengan penyangga Al_2O_3) relatif mahal dan sensitif terhadap pengotor dalam bahan baku, sehingga diperlukan tahap pretreatment yang lebih ketat. Regenerasi katalis juga menambah biaya operasional dan kompleksitas proses.

Dari sisi selektivitas produk, hidrogenasi tidak secara langsung menghasilkan struktur ester bercabang yang dibutuhkan untuk sifat pelumas unggul, melainkan hanya mengurangi derajat ketidakjenuhan. Dengan demikian, untuk menghasilkan biolubricant dengan karakteristik viskositas dan stabilitas termal yang sesuai, masih diperlukan tahap proses lanjutan. Hal ini membuat jalur hidrogenasi kurang efisien apabila tujuan utamanya adalah produksi biolubricant berbasis ester.

Sementara itu, proses epoksidasi memiliki keunggulan berupa suhu operasi yang relatif rendah (60°C) dan stabilitas termo-oksidatif produk yang baik. Akan tetapi, proses ini melibatkan penggunaan hidrogen peroksida (H_2O_2) yang harus diteteskan secara terkendali. Tahap penambahan H_2O_2 ini meningkatkan risiko keselamatan karena bersifat reaktif dan berpotensi menyebabkan reaksi eksotermis yang tidak terkendali hingga risiko peledakan. Risiko tersebut menjadi pertimbangan serius apabila proses akan diterapkan pada skala pabrik.

dengan kapasitas besar, karena memerlukan sistem pengamanan tambahan yang kompleks dan biaya investasi yang lebih tinggi.

Dibandingkan kedua proses tersebut, reaksi esterifikasi/transesterifikasi memiliki beberapa keunggulan yang lebih sesuai untuk implementasi industri. Proses ini menggunakan kondisi operasi yang relatif moderat (120°C dan tekanan atmosfer), tidak memerlukan gas bertekanan tinggi, serta memiliki risiko keselamatan yang lebih rendah dibandingkan epoksidasi. Selain itu, bahan baku seperti metil oleat dan trimetilolpropana relatif mudah diperoleh, serta katalis K_2CO_3 tergolong lebih ekonomis. Dari sisi produk, biolubricant yang dihasilkan memiliki stabilitas termal, sifat reologi, dan ketahanan gesek yang baik, yang merupakan parameter penting dalam aplikasi pelumas.

Meskipun konversi reaksi (70%) lebih rendah dibandingkan hidrogenasi, nilai selektivitas yang tinggi (95,6%) menunjukkan bahwa pembentukan produk utama lebih dominan sehingga meminimalkan produk samping dan mempermudah tahap pemurnian. Selain itu, proses ini lebih sederhana dari segi tahapan reaksi dan tidak memerlukan penanganan bahan oksidator kuat seperti pada epoksidasi.

Setelah mempertimbangkan berbagai aspek teknis dan operasional, proses esterifikasi/transesterifikasi dipilih sebagai metode yang paling rasional untuk produksi biolubricant berbasis trimethylolpropane fatty acid triester (TFATE). Pemilihan metode ini juga didukung oleh beberapa penelitian terdahulu yang telah melaporkan sintesis TFATE dari metil oleat dan trimetilolpropana pada skala laboratorium. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut dilakukan menggunakan sistem operasi reaktor batch, yang umumnya digunakan untuk keperluan penelitian dan pengujian kinetika reaksi.

Dalam perancangan pabrik kimia skala industri, penggunaan sistem batch memiliki beberapa keterbatasan, antara lain kapasitas produksi yang relatif terbatas, kebutuhan waktu operasi yang tidak kontinyu, serta efisiensi produksi yang lebih rendah dibandingkan sistem kontinyu. Oleh karena itu, pada prarancangan pabrik ini proses reaksi yang pada penelitian sebelumnya dilakukan dalam reaktor batch diadaptasi menjadi sistem operasi kontinyu menggunakan *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR). Pemilihan reaktor CSTR didasarkan pada karakteristik reaksi yang berlangsung dalam fase cair dengan kebutuhan pengadukan yang baik

1.4.2 Kegunaan Produk

Biolubricant berfungsi sebagai pelumas untuk mengurangi gesekan, keausan, dan panas yang timbul pada sistem mekanik, sekaligus meningkatkan efisiensi dan umur pakai peralatan. Produk ini dapat digunakan pada berbagai aplikasi, seperti mesin dan komponen otomotif, sistem hidrolik, roda gigi, bantalan, kompresor, serta proses pemesinan logam. Selain itu, biolubricant banyak diaplikasikan pada sektor industri, pertanian, kehutanan, dan kelautan, terutama pada area yang sensitif terhadap lingkungan. Keunggulan utama biolubricant dibandingkan pelumas berbasis minyak mineral adalah sifatnya yang mudah terurai secara biologis, bertoksisitas rendah, dan ramah lingkungan, sehingga mampu meminimalkan risiko pencemaran akibat kebocoran atau pembuangan. Dengan kinerja pelumasan yang baik dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan yang semakin ketat, biolubricant menjadi alternatif berkelanjutan yang potensial untuk menggantikan pelumas konvensional dalam berbagai aplikasi industri.