

## BAB II

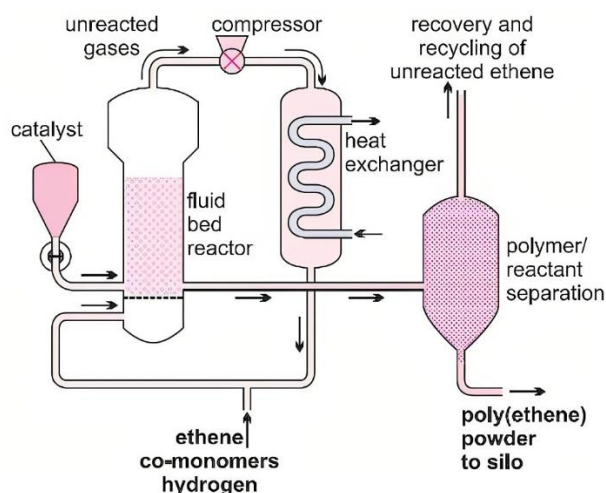
### URAIAN PROSES

#### II.1. Macam-Macam Proses

Terdapat beberapa metode atau proses yang dapat digunakan dalam produksi MLLDPE (*Metallocene Linear Low-Density Polyethylene*). Beberapa di antaranya meliputi polimerisasi menggunakan fase gas, fase liquid, dan fase slurry.

##### II.1.1 Fase gas

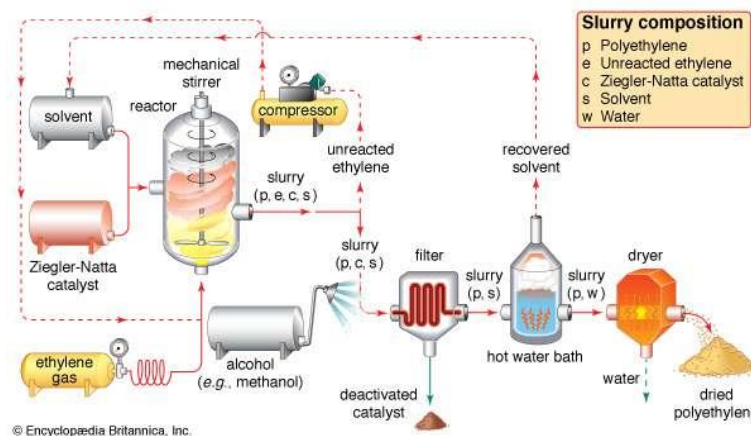
Proses fase gas untuk produksi MLLDPE (*Metallocene Linear Low-Density Polyethylene*) dan LLDPE (*Linear Low-Density Polyethylene*) dilakukan menggunakan *fluidized bed reactor* yang beroperasi pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan proses polimerisasi lainnya. Suhu dalam reaktor fase gas berkisar antara 80°C hingga 100°C dengan tekanan operasi sekitar 7 bar hingga 20 bar, tergantung pada jenis monomer, katalis, dan kondisi reaksi yang digunakan. Pada suhu yang lebih rendah pada proses fase gas dapat menghasilkan polimer dengan karakteristik tertentu, seperti kekuatan mekanik yang tinggi dan elastisitas yang baik dengan tetap menjaga efisiensi energi. Proses ini juga berjalan pada tekanan yang relatif rendah, yang membuatnya lebih hemat biaya dan lebih mudah dikendalikan dibandingkan dengan metode lain yang membutuhkan tekanan dan suhu lebih tinggi.



Gambar II. 1 Proses polimerisasi dengan fase Gas

### II.1.2 Fase liquid

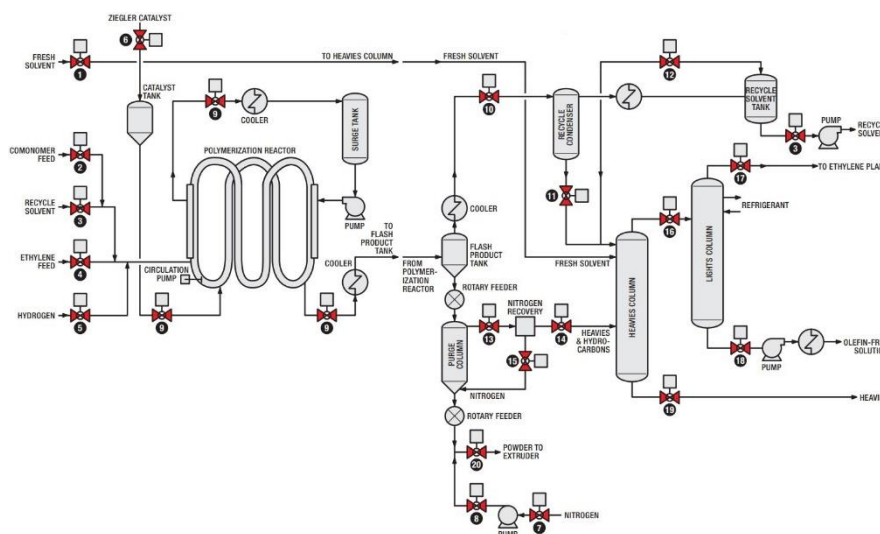
Proses pembentukan MLLDPE (*Metallocene Linear Low-Density Polyethylene*) dalam fase cair, atau *solution phase*, dilakukan dengan polimerisasi monomer (etilena) yang dilarutkan dalam pelarut organik (heksana di bawah suhu dan tekanan tinggi. Proses ini dimulai dengan pencampuran monomer dan pelarut dalam reaktor, diikuti dengan penambahan katalis metallocene. Reaksi polimerisasi dilakukan pada suhu antara 130°C hingga 270°C dengan tekanan 20 hingga 30 bar, yang memungkinkan monomer untuk berpolimerisasi menjadi rantai panjang. Selama reaksi, katalis metallocene memberikan kontrol presisi terhadap polimer yang dihasilkan, menghasilkan produk dengan distribusi berat molekul yang sempit dan sifat mekanik yang sangat baik. Setelah reaksi selesai, polimer dipisahkan dari pelarut dan dapat dikristalisasi atau diendapkan, sementara pelarut dipulihkan melalui distilasi untuk digunakan kembali dalam siklus produksi berikutnya. Keunggulan dari proses *solution phase* adalah kemampuan untuk menghasilkan polimer dengan sifat mekanik yang unggul, transparansi tinggi, dan daya tahan terhadap suhu tinggi, yang menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi film dan kemasan fleksibel. Selain itu, kontrol yang lebih baik terhadap distribusi berat molekul menghasilkan produk dengan kekuatan tarik tinggi dan fleksibilitas. Namun, proses ini juga memiliki keterbatasan, butuh proses pemisahan dan pemurnian tambahan untuk memisahkan pelarut dari polimer, biaya produksi yang lebih tinggi karena penggunaan pelarut mahal dan kebutuhan untuk pemulihan pelarut serta konsumsi energi yang lebih tinggi daripada proses fase gas dan slurry.



Gambar II. 2 Proses Polimerisasi fase Liquid

### II.1.3 Fase slurry

Proses pembentukan MLLDPE (*Metallocene Linear Low-Density Polyethylene*) dalam fase slurry merupakan metode polimerisasi di mana menggunakan media reaksi dengan monomer (etilena) dalam bentuk cair sehingga membentuk suspensi partikel polimer dalam cairan. Proses ini dilakukan dalam menggunakan reactor *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) dan Slurry Loop yang memiliki desain khusus untuk memastikan pencampuran yang merata antara monomer, katalis, dan pelarut. Kondisi operasi untuk proses slurry-phase meliputi suhu sekitar 85°C hingga 110°C dan tekanan 3 hingga 5 bar yang cukup untuk menjaga monomer dalam fase cair dan memungkinkan reaksi polimerisasi yang efisien. Keunggulan utama dari proses *slurry phase* adalah kemampuan pengendalian yang lebih baik terhadap distribusi berat molekul polimer secara fleksibel, selain itu juga menghasilkan kemurnian yang lebih tinggi dari pada proses fase cair



Gambar II. 3 Proses Polimerisasi fase slurry

## II.2. Pemilihan Proses

Berikut adalah perbandingan antara ketiga proses pembentukan *Metallocene Linear Low-Density Polyethylene*, yaitu proses fase gas, proses fase cair, dan proses fase slurry. Setiap proses memiliki kelebihan tersendiri yang bergantung pada aplikasi dan tujuan produksi sehingga agar lebih jelas, berikut



## PRA RENCANA PABRIK

Pabrik *Metallocene Linier Low-Density Polyethylene* (MLLDPE) dengan proses Polimerisasi Fase Gas”

adalah tabel yang membandingkan kelebihan dan kondisi operasi dari masing-masing proses.

Tabel II. 1 Seleksi Proses Pada Produksi Produk *Metallocene Linear Low-Density Polyethylene* (MLLDPE)

Parameter	Fase Gas	Fase Cair	Fase Slurry
Reaktor	<i>Fluidized Bed Reactor (FBR)</i>	<i>Stirred Tank Reactor (STR)</i>	<i>Stirred Tank Reactor (STR)</i>
Media Reaksi	Gas (tanpa pelarut)	Pelarut hidrokarbon (seperti hexane)	Slurry (monomer dalam medium cair)
Temperatur	80 – 100°C	130 – 270°C	90 – 95°C
Tekanan	7 bar-20 bar	20 bar-30 bar	20 bar-28 bar
Katalis	Metallocene atau Ziegler-Natta	Metallocene atau Ziegler-Natta	Ziegler-Natta
Komonomer	1-butena, 1-hexena, 1-oktena	1-butena, 1-hexena, 1-oktena	1-butena, 1-hexena
Produk Akhir	Bubuk atau butiran polietilena	Solusi polimer yang harus dipisahkan	Bubuk atau butiran polietilena

Tabel II. 2 Kelebihan dan Kekurangan Pada Proses Produksi *Metallocene Linear Low-Density Polyethylene* (MLLDPE)

Proses	Kelebihan	Kekurangan
Fase gas	Biaya operasi rendah dan sangat efisien karena bisa menghasilkan LLDPE, HDPE, MLLDPE dalam satu reaktor, rendah konsumsi energi, serta tidak perlu pelarut atau medium tambahan	Kurang mampu dalam mengontrol distribusi berat molekul sehingga produk kurang fleksibel dibandingkan fase cair dan slurry
Fase cair	Kontrol yang lebih baik terhadap struktur polimer dan distribusi	Biaya operasional yang mahal dikarenakan konsumsi energi yang



## PRA RENCANA PABRIK

Pabrik *Metallocene Linier Low-Density Polyethylene* (MLLDPE) dengan proses Polimerisasi Fase Gas”

	berat molekul, menghasilkan produk yang sangat fleksibel	lebih besar serta perlu adanya pemisahan dan pemurnian terhadap pelarut yang digunakan
Fase slurry	Pengendalian distribusi berat molekul yang lebih fleksibel pada polimer dibandingkan dengan proses fase gas.	Biaya operasional mahal karena perlu konsumsi energi besar serta diperlukan adanya pemisahan dari slurry yang digunakan terhadap produk polimer
	Kecepatan produksi cukup tinggi dengan kemurnian produk tinggi serta dampak lingkungan yang lebih bersih dibandingkan fase cair	

### II.3. Deskripsi Proses

#### 1. Persiapan etilen

Gas etilen dengan kondisi konsentrasi 99,95% disimpan pada tangki penyimpanan pada kondisi suhu 30°C dengan tekanan 13 atm. lalu akan dialirkan menuju static mixer sehingga dapat bercampur dengan 1-butene.

#### 2. Persiapan 1-butane

1-butane dalam kondisi cair 99% disimpan dalam tangka penyimpanan dengan kondisi suhu 30°C dengan tekanan 5 atm akan dialirkan menuju reaktor melewati static mixer sebagai reaktan pada proses polimerisasi.

#### 3. Persiapan Hidrogen

Gas hydrogen disimpan dalam tangki penyimpanan dengan kondisi suhu 30°C dengan tekanan 20 atm. Kemudian akan dialirkan ke reaktor sebagai agen terminator pemutus rantai cabang polimer.

#### 4. Tahap reaksi polimerisasi

Proses polimerisasi *Metallocene Linear Low-Density Polyethylene* (MLLDPE) dalam reaktor fluidized bed dimulai dengan pengumpanan gas monomer, seperti etilena, dan komonomer (1-butena) ke dalam reaktor. Gas ini diumpankan melalui sistem yang terkontrol untuk memastikan fluidisasi



## PRA RENCANA PABRIK

Pabrik *Metallocene Linier Low-Density Polyethylene* (MLLDPE) dengan proses Polimerisasi Fase Gas”

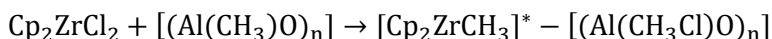
partikel katalis secara optimal. Kondisi operasi dijaga pada suhu 85°C dan tekanan 12 atm. Partikel katalis metallocene, yang dilengkapi co-catalyst seperti aluminoksisana, terfluidisasi oleh aliran gas, memungkinkan kontak yang maksimal antara monomer dan katalis, sekaligus memastikan perpindahan panas dan massa yang efisien.

Reaksi polimerisasi terjadi di permukaan katalis, di mana etilena dan komonomer bergabung membentuk rantai polimer MLLDPE. Katalis metallocene memberikan kontrol yang presisi terhadap distribusi berat molekul dan struktur polimer, menghasilkan produk dengan sifat mekanik unggul. Tekanan parsial monomer diatur untuk mengoptimalkan laju reaksi, dengan suhu reaktor yang stabil untuk menjaga aktivitas katalis. Efisiensi konversi reaksi dapat mencapai hingga 90%. Setelah polimerisasi selesai, produk MLLDPE diambil dari reaktor dalam bentuk butiran resin, kemudian dipisahkan. Gas yang tidak bereaksi didaur ulang ke dalam sistem untuk meningkatkan efisiensi proses.

Berikut merupakan reaksi polimerisasi yang terjadi pada pembentukan *metallocene linier low density polyethylene*.

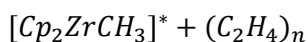
### a. Reaksi Aktivasi Katalis

Tahap pertama dalam proses polimerisasi adalah pembentukan pusat aktif pada katalis. Katalis Metallocene diaktivasi oleh ko-katalis seperti metilaluminoksisana (MAO). Menghasilkan kompleks yang mampu mengikat monomer etilena. Reaksi ini adalah :



### b. Inisiasi

Pada tahap ini, Monomer etilena bereaksi dengan pusat aktif pada katalis, membentuk rantai polimer linier. Proses ini adalah inti dari polimerisasi. Dimana monomer bergabung secara bertahap untuk memperpanjang rantai polimer. Reaksi ini dapat ditulis sebagai :



(Meiru,2022)



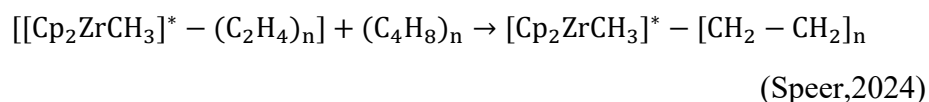
## PRA RENCANA PABRIK

Pabrik *Metallocene Linier Low-Density Polyethylene* (MLLDPE) dengan proses Polimerisasi Fase Gas”

---

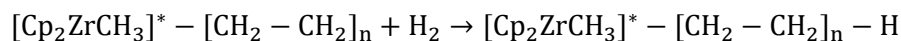
### c. Reaksi Propagasi

Kopolimerisasi Adalah tahap dimana komonomer 1-butene dimasukan kedalam reaksi, menciptakan cabang – cabang pada rantai utama polimer. Cabang ini memberikan karakteristik unik pada MLLDPE, seperti fleksibilitas dan ketahanan sobek yang lebih baik. Reaksi dapat Digambar sebagai :



### d. Terminasi

Reaksi polimerisasi diakhiri dengan terminasi untuk menghentikan pertumbuhan rantai polimer. Hidrogen ( $\text{H}_2$ ) sering digunakan untuk mengontrol panjang rantai polimer dengan memutus interaksi katalis dan rantai polimer, Reaksi ini adalah :



## 5. Tahap Pemisahan dan Pemurnian produk

Tahap pemisahan dan pemurnian produk dalam proses polimerisasi *Metallocene Linear Low-Density Polyethylene* (MLLDPE) menggunakan reaktor fluidized bed merupakan langkah penting untuk memastikan kualitas dan kemurnian produk akhir. Produk polimer yang terbentuk dipisahkan dari campuran gas reaksi menggunakan sistem pemisahan gas-padat, seperti cyclon, yang memisahkan butiran resin polimer dari gas yang tidak bereaksi. Gas sisa, termasuk monomer dan komonomer yang tidak bereaksi, didaur ulang melalui proses pendinginan dan kompresi sebelum dimasukkan kembali ke reaktor, sehingga meningkatkan efisiensi bahan baku.

Resin yang sudah terpisahkan dari gas hidrokarbon akan masuk kedalam ekstruder sebelum dilanjutkan dalam proses *peletting*. Pada proses *peletting* resin akan masuk kedalam ekstruder dan akan dipanaskan hingga temperature lelehnya mencapai  $130^\circ\text{C}$ . setelah dipanaskan resin akan leleh menjadi molten melalui die hole dan dilanjutkan dengan proses pencetakan untuk menjadi pellet. Kemudian resin yang sudah dicetak masih dalam



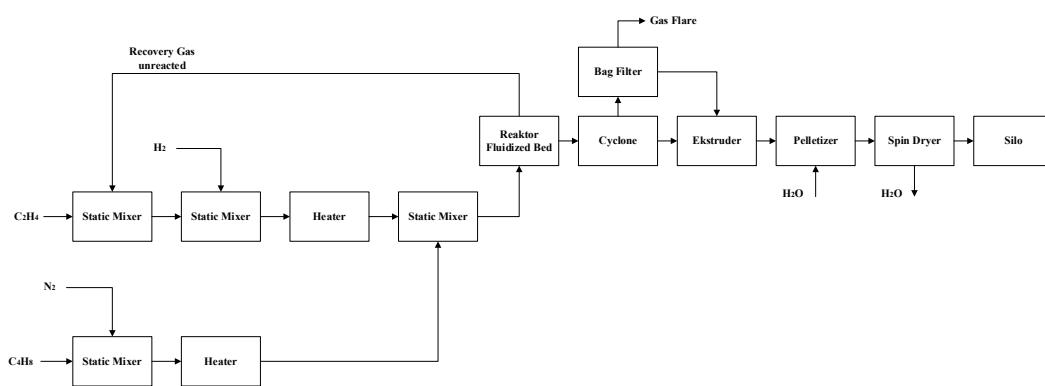


## PRA RENCANA PABRIK

Pabrik *Metallocene Linier Low-Density Polyethylene* (MLLDPE) dengan proses Polimerisasi Fase Gas”

keadaan panas di kontakkan dengan cooling water yang berfungsi untuk menurunkan suhu pellet menjadi 30°C. Selanjutnya, pelet-pelet yang telah didinginkan akan melewati spin dryer untuk memisahkan pelet-pelet yang mungkin menggumpal sekaligus memisahkan kandungan *moizture* yang masih tersisa, kemudian pellet yang telah dipisahkan dikirim ke silo untuk ditampung sebelum menuju ke proses *packaging*.

### II.4. Diagram Alir



Gambar II. 4 Diagram Alir Proses