LAPORAN PENELITIAN

ANALISIS KONDISI OPERASI TERHADAP PROSES FLUIDISASI REAKTOR UNGGUN TERFLUIDAKAN PADA REAKSI POLIMERISASI ETILEN FASE GAS MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC* (CFD)



Disusun oleh:

Erik Widiansyah (3335180061)

Adhit Mardita Yando (3335180072)

JURUSAN TEKNIK KIMIA-FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA CILEGON BANTEN

2021

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan dibawah ini:

NAMA

: ERIK WIDIANSYAH

NIM

: 3335180061

JURUSAN

: TEKNIK KIMIA

JUDUL

: ANALISIS KONDISI OPERASI TERHADAP PROSES

FLUIDISASI REAKTOR UNGGUN TERFLUIDAKAN

PADA REAKSI POLIMERISASI ETILEN FASE GAS

MENGGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL

FLUID DYNAMIC (CFD)

Dengan ini menyatakan bahwa penelitian dengan judul tersebut di atas adalah benar karya saya sendiri dengan arahan dari pembimbing dan tidak ada duplikasi dengan karya orang lain kecuali yang telah disebutkan sumbernya.

Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam penelitian ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Cilegon, 09 Maret 2022



Erik Widiansyah

ABSTRAK

ANALISIS KONDISI OPERASI TERHADAP PROSES FLUIDISASI REAKTOR UNGGUN TERFLUIDAKAN PADA REAKSI POLIMERISASI ETILEN FASE GAS MENGGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)

Oleh:

Erik Widiansyah (3335180061) Adhit Mardita Yando (3335180072)

Fluidized bed reactor (FBR) merupakan salah satu reaktor yang memiliki karakterisitik yang menguntungkan untuk banyak industri dibandingkan fix bed reaktor. Salah satu metode yang digunakan untuk mempelajari FBR yaitu menggunakan metode computational fluid dynamic (CFD). CFD dapat mensimulasikan aliran fluida, perpindahan panas, perpindahan massa, aliran multifasa, reaksi kimia, interaksi fluida dengan struktur dan sistem akuistik dengan pemodelan komputer. Penelitian ini dilakukan untuk menginvestigasi efek dari perubahan kecepatan gas, tinggi unggun, ukuran partikel resin dan densitas gas terhadap perilaku fluidisasi guna menentukan kondisi fluidisasi yang optimal. Penelitian ini menggunakan software GAMBIT 2.4.6 sebagai media pembuatan geometri sedangkan software ANSYS FLUENT Student Version 12.0 digunakan untuk proses simulasi. Model persamaan untuk interaksi gas-solid yang digunakan ialah eularian-eularian sedangkan metode turbulen yang digulakan ialah $k-\epsilon$.

Kata Kunci: computational fluid dynamic dead zone, fluidisasi, fluidize bed reactor

ABSTRACT

ANALYSIS OF OPERATING CONDITIONS TOWARD FLUIDIZED BED REACTOR FLUIDIZATION PROCESS IN THE POLYMERIZATION OF ETHYLENE GAS PHASE USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) METHOD

By:

Erik Widiansyah (3335180061) Adhit Mardita Yando (3335180072)

Fluidized bed reactor (FBR) is one of the reactors that has favorable characteristics for many industries compared to fixed bed reactors. One of the methods used to study FBR is the computational fluid dynamic (CFD) method. CFD can simulate fluid flow, heat transfer, mass transfer, multiphase flow, chemical reactions, fluid interactions with structures and acoustic systems with computer modeling. This research was conducted to investigate the effect of changes in gas velocity, bed height, resin particle size and gas density on fluidization behavior in order to determine optimal fluidization conditions. This research used GAMBIT 2.4.6 for build geometri, thus simulation process used ANSYS FLUENT Student Version 12.0 The equation model for the gas-solid interaction used is eularianeularian, while the turbulent method used is $k - \varepsilon$.

Kata Kunci: computational fluid dynamic, dead zone, fluidize bed reactor, fluidization,

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan rasa syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala segala rahmat dan hidayah-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga laporan hasil penelitian dengan judul "Analisis Kondisi Operasi Terhadap Proses Fluidisasi Reaktor Unggun Terfluidakan Pada Reaksi Polimerisasi Etilen Fase Gas Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic (CFD)"dapat terselesaikan dengan baik.

Penyusunan laporan hasil penelitian ini merupakan tugas yang harus diselesaikan oleh mahasiswa Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa (UNTIRTA) yang merupakan salah satu bagian dari prasyarat kelulusan program kesarjanaan.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak- pihak yang telah membantu terselesainya laporan hasil penelitian, yaitu :

- 1. Bapak Jayanudin, S.T., M.Eng selaku ketua Jurusan Teknik Kimia FT. Untirta yang telah banyak memberikan motivasi dan dukungan.
- 2. Bapak Endang Suhendi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik.
- 3. Bapak Dr. Ing. Anton Irawan, S.T., M.T. dan Bapak Hafid Alwan, S.T., M.T.selaku Dosen Pembimbing
- 4. Ibu Dr. Rahmayetty S.T., M.T. selaku Koordinator Penelitian.
- 5. Kedua orang tua yang senantiasa memberikan doa dan dukungannya.
- 6. Serta semua pihak yang telah banyak memberikan dorongan positif kepada penulis baik langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa laporan hasil penelitian ini jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis selalu mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun dari segenap pembaca. Akhirnya, semoga laporan hasil penelitian ini dapat berguna dan bermanfaat terutama bagi pihak-pihak yang tertarik untuk mengkaji dan mengembangkannya.

Cilegon, 25 November 2021

Penulis

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KONDISI OPERASI TERHADAP PROSES FLUIDISASI REAKTOR UNGGUN TERFLUIDAKAN PADA REAKSI POLIMERISASI ETILEN FASE GAS MENGGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)

disusun oleh:

ERIK WIDIANSYAH 3335180062

ADHIT MARDITA Y. 3335190072

Telah Disetujui Oleh Dosen Pembimbing dan Telah dipertahankan di hadapan Dewan Penguji Pada Tanggal 03 Desember 2021

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ing. Anton Irawan, S.T., M.T.

NIP 1975100112008011007

Dosen Penguji II

Dosen Penguji I

Dr. Nuryoto, S.T., M.Eng.

NIP 197609152006041007

<u>Dr. Rudi Hartono, S.T., M.T.</u> NIP 196702062001121001

NIP 199012132019031011

Mengetahui, Ketua Jurusan Teknik Kimia

Di. Javanudin, S.T., M.Eng. NIP 197808112005011003

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR SIMBOL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Ruang Lingkup	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Teknologi Reaktor Fluidisasi	4
2.2 Tahapan Fluidisasi	5
2.3 Model Matematika	8
2.4 Kinetic of Granular Flow (KTGF)	9
2.5 Tegangan Tensor Fase Solid	11
2.6 Drag Model	12
2.7 Model Turbulen	13
2.8 Computational Fluid Dynamics (CFD)	14
2.9 Proses Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD)	15
BAB III METODE PENELITIAN	17
3.1 Tahapan Penelitian	17
3.1.1 Diagram Alir Penelitian	17
3.2 Prosedur Penelitian	18
3.2.1 Pre-processing	18
3.2.2 <i>Processing</i>	20

3.2.3 Post-Processing	24
3.3 Alat dan Bahan	25
3.3.1 Alat	25
3.4 Variabel Penelitian	25
3.5 Metode Pengumpulan dan Analisa Data	25
3.5.1 Ekstrak Data dari ANSYS FLUENT	25
3.5.2 Analisa Hasil Perhitungan	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Analisa Sensitivitas Mesh	26
4.2 Validasi Data Simulasi Terhadap Data Eksperimen	28
4.3 Pengaruh Kecepatan Gas Inlet Terhadap Fluidisasi	30
4.4 Pengaruh Tinggi Unggun Terhadap Fluidisasi	34
4.5 Pengaruh Diameter Partikel Terhadap Fluidisasi	36
4.6 Pengaruh Densitas Resin Terhadap Fluidisasi	38
4.7 Fenomena Dead Zone	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	44
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	48

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Variasi Bentuk dan Ukuran <i>Mesh</i>	19
Tabel 3.2	Batas Bidang	20
Tabel 3.3	Models dan Penggunaannya	21
Tabel 3.4	Gas Umpan	22
Tabel 3.5	Sifat Fisik Resin	22
Tabel 3.6	Kondisi Batas Reaktor Pada Kondisi Eksisting	23
Tabel 3.7	Data yang Dianalisa	24
Tabel 3.8	Variabel Berubah	25
Tabel 4.1	Variabel Ukuran dan Bentuk Mesh pada Analisa	
	Sensitivitas Mesh	26
Tabel 4.2	Perhitungan Mean Absolute Percent Error	29
Tabel 4.3	Range Nilai MAPE	30

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peristiwa	a dala Fluidisasi pada Berbagai Kecepatan Gas Inle	t 5
Gambar 2.2	Proses	<i>6</i>
Gambar 2.3 Pola Flu	idisasi	7
Gambar 2.4 Contoh l	Hasil Percobaan dengan Menggunakan CFD	15
Gambar 2.5 Flowcha	rt Proses Simulasi	15
Gambar 3.1 Diagram	Alir Penelitian	17
Gambar 3.2 Geometr	ri Fluidized Bed Reactor	18
Gambar 3.3 Batas Bi	dang	20
Gambar 3.4 Material		23

BABI

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fluidized bed reactor (FBR) merupakan salah satu reaktor yang memiliki karakterisitik yang menguntungkan untuk banyak industri dibandingkan fix bed reaktor^[1]. Kelebihannya yaitu pencampuran yang baik, temperatur kontrol yang baik, kemampuan bekerja pada tekanan yang tinggi dan mampu bekerja pada temperatur yang tinggi^[2]. Salah satu contohnya, FBR digunakan pada industri polietilen. Polietilen adalah salah satu produk turunan dari nafta yang proses pembuatannya banyak menggunakan reaktor jenis fluidized bed reactor (FBR), alasannya karena kontruksi yang simpel, pencampuran pada fase padat yang baik dan efektifitas pada transfer massa dan panas yang baik. Efisiensi pada rekasi, particle flow dan mixing merupakan hal penting pada

terdapatnya *dead spot* atau *dead zone*^[4]. Zona tersebut terkadang berada diatas *distributor plate*^[5]. Sebuah penelitian telah dilakukan menganalisis baik buruknya fluidisasi dan menitikberatkan pada pendistribusian gas-solid. Penelitian tersebut juga menganalisa pengaruh *gas velocity, solid bed properties* dan *pressure drop* terhadap terbentuknya *dead zone*^[6]. Peneliti lain juga melakukan penelitian terhadap *dead zone* dengan mem-variasikan *bed aspect ratio, gas velocity* dan karakteristik bahan^[48]. *Dead zone* berpengaruh

buruk pada reaktor, yakni akan menimbulkan kondisi yang terpusat sehingga distribusi temperatur, konsentrasi gas, serta parameter kondisi lainnya tidak merata, akan menyebabkan kerusakan *properties* pada produk (resin) dari FBR dan menghambat reaksi yang optimum^[49].

Pada era modern ini, sudah banyak juga penelitian yang dilakukan terhadap FBR. Salah satu metode yang digunakan untuk mempelajari fenomena pada FBR yaitu melalui metode computational fluid dynamic (CFD). CFD dapat mensimulasikan aliran fluida, perpindahan panas, perpindahan massa, aliran multifasa, reaksi kimia, interaksi fluida dengan struktur dan sistem akuistik dengan pemodelan komputer^[7]. Peneliti yang telah melakukan penelitian terhadap FBR dengan metode CFD yakni, mereka menggunakan 2D model Eularian dengan persamaan kinetic theory of granular flow (KTGF), penelitian tersebut membandingkan bed expansion, qualitative gas solid flow dan solid volume fraction profile dengan literature rancangan reaktor FBR, dihasilkan kesimpulan molde eularian dapat digunakan pada pemodelan FBR^[8]. Sebuah penelitian lain menggunakan 2D model Eulerian-eulerian pada CFD penelitian tersebut mengevaluasi distribusi solid, fenomena pada bubble, dan solid velocity vectors pada FBR dengan pengaduk dan tanpa pengaduk^[9]. Lun Dkk. menggunakan model 2D Eularian-eularian dengan persamaan kinetic theory of granular flow (KTGF) untuk mensimulasikan fenomena bubble didalam FBR, penelitian tersebut membandingkan nilai persamaan Darton bubble-size dan persamaan Davidson untuk bubble yang terisolasi^[10]. Peneliti lain juga mempelajari fenomena bubble pada FBR dengan 2D model Eulerian, penelitian tersebut melakukan validasi data terhadap data hasil eksperimen^[11].

Pada penelitian ini, akan digunakan metode CFD dengan geometri 2D, model Eulerian-eulerian untuk mendeskripsikan pengaruh kecepatan gas, tinggi unggun, ukuran partikel resin dan densitas gas terhadap perilaku fluidisasi pada FBR. Pada beberapa penelitian diatas, data literature digunakan sebagai validasi

1.2 Rumusan Masalah

Pada proses fluidisasi banyak fenomena yang menyebabkan proses fluidisasi tersebut menjadi buruk. Salah satunya fenomena *dead zone* yaitu daerah yang tidak terfluidisasi. *Dead zone* merupakan masalah yang umum ditemukan pada proses fluidisasi, *dead zone* menyebabkan kondisi operasi yang terpusat, merusak *properties* produk serta menghambat polimerisasi. Pendekatan yang dilakukan untuk menyelesaikan masalah tersebut dengan mencari kondisi terbaik pada FBR.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menginvestigasi efek dari perubahan kecepatan gas, tinggi unggun, ukuran partikel resin dan densitas gas terhadap perilaku fluidisasi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

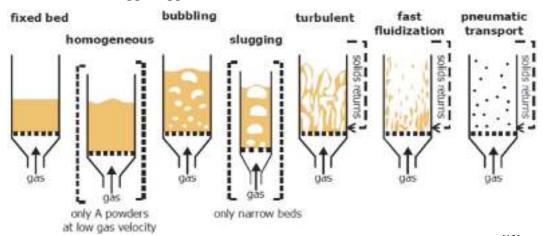
2.1 Tahapan Fluidisasi

Fluidisasi merupakan fenomena pengontkana padatan-fluida yang berubah dalam reaktor. Reaksi fluidisasi melalui reaktor tersebut disebut fluidized bed. Fluidized bed merupakan sebuah wadah berupa partikel padat yang di aliri fluida dari bawah. Fluidized bed sudah banyak di aplikasikan di berbagai jenis reaktor seperti dalam pengeringan, pembakaran, gasifikasi, pelapisan dan lain—lain. Keuntungan dalam proses fuidisasi sifat yang dapat di alirkan dari operasi zat padat dapat bersifat kontinyu, mampu mengangkat butiran partikel sampai mengapung dan luas permukaan kontak menjadi sangat besar sehingga oprasi sangat efektif, sirkulasi butiran—butiran padat fluidisasi memungkinkan perpindahan panas yang besar didalam reaktor, mampu dalam mengontrol temperatur. Persitiwa yang dapat terjadi pada proses fluidisasi antara lain:

- Peristiwa fixed bed yang terjadi ketika laju alir fluida kurang dari laju minimum yang dibutuhkan untuk proses awal fluidisasi. Pada kondisi ini partikel tetap diam.
- 2. Peristiwa minimum (*incipient fluidization*) yang terjadi ketika laju alir fluida mencapai laju alir minimum yang dibutuhkan untuk proses fluidisasi. Pada kondisi ini partikel- partikel padat mulai terekspansi.
- 3. Peristiwa *smooth or homogenously fluidization* terjadi ketika kecepatan dan distribusi aliran fluida merata, densitas dan distribusi partikel dalam unggun sama atau homogen sehingga ekspansi pada setiap partikel padatan seragam.
- 4. Peristiwa *bubbling fluidization* yang terjadi ketika gelembung-gelembung pada unggun terbentuk akibat densitas dan distribusi partikel tidak homogen.
- 5. Peristiwa *slugging fluidization* yang terjadi ketika gelembunggelembung besar yang mencapai lebar dari diameter kolom terbentuk

- pada partikel-partikel padat. Pada kondisi ini terjadi penorakan sehingga partikel-partikel padat seperti terangkat.
- 6. Peristiwa *chanelling fluidization* yang terjadi ketika dalam unggun partikel padatan terbentuk saluran-saluran seperti tabung vertikal.
- 7. Peristiwa *disperse fluidization* yang terjadi saat kecepatan alir fluida melampui kecepatan maksimum aliran fluida. Pada Peristiwa ini sebagian partikel akan terbawa aliran fluida (*carryover*).

Sifat dan fenomena fluidisasi tersebut sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor: laju alir fluida dan jenis fluida, diameter partikel dan bentuk partikel, jenis dan densitas partikel, porositas unggun, distribusi aliran, bentuk kolom, diameter kolom, dan tinggi unggun.



Gambar 2.1 Persitiwa dalam Fluidisasi pada Berbagai Kecepatan Gas Inlet^[12]

2.2 Teknologi Reaktor Fluidisasi

Proses polimerisasi fase gas menggunakan olefin yang pertama adalah BASF proses pada tahun 60-an, dengan kondisi 30 bar dan temperatur 100°C. Pada periode yang sama NOVOLEN® (BASF Akfiengesellschaft, Ludwighafen, DE) prosesnya telah berkembang menggunakan *stirred bed* reaktor pada fase gas, kondisi operasinya dibawah 20 bar dan temperatur 70 sampai 92°C, dan menggunakan *helical stirrer*^[13]. Sekarang, proses yang paling banyak digunakan adalah proses

Pada proses (Gambar 2.2), reaktor terdiri dari *fluidized-zone*, dimana reaksi terjadi di zona ini dan *disengagement-zone*, dimana

terbawanya partikel yang ringan karena aliran gas sebelum masuk ke *recycle*. Pada proses ini dibutuhkan sebuah *heat exchanger* untuk mendinginkan reaktor karena selalu dihasilkan panas dari reaksi. Berikut reaksi yang terjadi :

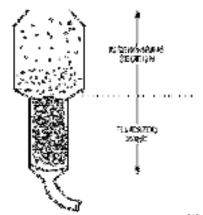
$$N (C_2H_4) \xrightarrow{Catalyst} [-CH_2 - CH_2 -]_n$$
 (1)

Reaksi ini berlangsung optimum pada tekanan 23-24 kgf/cm² dan temperatur 80-110°C bergantung jenis katalis yang digunakan^[14]. Pendinginan dilakukan terhadap gas yang di *recycle* untuk masuk kembali ke reaktor. Gas yang telah didinginkan tersebut dikompres dan dicampur dengan *fresh-gas* yang masuk sebagai *feedstream* kemudian bersama-sama masuk kembali ke reaktor. Katalis masuk ke reaktor melalu katalis *feeder*. Produk berupa resin keluar dari reaktor melalui *product discharge system*. Pada *disengangement-zone*, komposisi gas dianalisa menggunakan *chromatofraphy*^[13].

Proses yang terjadi didalam reaktor fluidized bed yaitu proses fluidisasi.

Proses fluidisasi memiliki kelebihan yaitu memiliki distribusi panas

yang baik dan seragam pada reaktor serta kemudahan dalam transport materialnya^[15]. fluidisasi terjadi ketika partikel kecil tersuspensi oleh aliran fluida yang mengarah keatas reaktor yang dapat dilihat pada Gambar 2.10. Aliran fluida (*velocity*) mampu membawa partikel kecil kearah atas namun tidak cukup besar untuk membawa partikel tersebut keluar dari reaktor. Partikel tersebut berputar-putar disekitaran *bed* dengan cepat, sehingga membuat pencampuran yang baik^[16]. Namun tipe fluidisasi tergantung pada kecepatan fluida, perbedaan kecepatan dapat menyebabkan tipe fluidisasi yang berbedabeda seperti yang tergambar pada Gambar 2.3. Fluidisasi juga di pengaruhi oleh *distributor plate* yang berada di inlet reaktor, *distributor plate* mempengaruhi pola aliran dan pressure drop yang berakibat pada *velocity* dan fluidisasi^[16].



Gambar 2.3 Pola Fluidisasi [1]

2.3 Model Matematika

1. Dasar Model Fluida

a. Persamaan Konservasi Massa

Keseimbangan massa untuk elemen fluida dapat dinyatakan sebagai laju kenaikkan massa dalam elemen fluida sama dengan laju netto aliran massa ke dalam elemen berbatas. Adapun bentuk matematis dapat ditulis sebagai,

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

Persamaan tersebut disebut sebagai persamaan kontinyuitas untuk fluida. Ruas kiri menyatakan laju netto massa dari elemen melewati batas dan dinyatakan sebagai faktor konveksi.

b. Persamaan Konservasi Momentum

Persamaan momentum merupakan persamaan differensial yang menghubungkan gaya-gaya yang bekerja pada *finite volume*, salah satunya adalah tekanan. Gaya yang lain terdiri dari dua jenis, yaitu gaya beban dan gaya permukaan. Gaya beban disebabkan oleh medan dari luar (grafitasi, magnet, elektromagentik) yang bekerja pada seluruh massa dalam unsur tersebut. Persamaan momentum dapat ditulis sebagai,

Pada arah x

$$\rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}\right)$$
(3)

Pada arah y

$$\rho\left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2}\right) \tag{4}$$

Pada arah z

$$\rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right)$$
(5)

Dari persamaan diatas dapat diketahui ada 3 gaya yang bekerja yang mempengaruhi gerakan fluida yaitu gaya akibat perbedaan tekanan, gaya akibat gravitasi dan gaya akibat gesekan.

2. Eulerian-Eulerian Dua Fasa

Model *hydrodynamic* menggunakan persamaan kesetimbangan massa dan kesetimbangan momentum pada berbagai fasa. Pada interaksi fasa tersebut di ekspresikan pada persamaan berikut^[17],

• Persamaan kontinyuitas

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g v_g) = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s v_s) = 0 \tag{7}$$

Persamaan Momentum

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g v_g) = -a_g \nabla p_g + \nabla \cdot \tau_g + K_{gs} (v_s - v_g) + \alpha_g \rho_g g \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s v_s) = -a_s \nabla p_s + \nabla \cdot \tau_s + K_{gs}(v_g - v_s) + \alpha_s \rho_s g \qquad (9)$$

• Tegangan tensor fase gas dan solid

$$\tau_g = a_g \mu_g (\nabla v_g + \nabla v_g^T) - \frac{2}{3} a_g \mu_g . (\nabla v_g) I$$
 (10)

$$\tau_s = a_s \mu_s (\nabla v_s + \nabla v_s^T + a_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3}\mu_s\right).(\nabla v_s)I$$
 (11)

Dimana μ_s adalah viskositas solid dan φ_s adalah bulk viskositas solid.

2.4 Kinetic of Granular Flow (KTGF)

Ketika gerakan partikel didominasi oleh interaksi tumbukan, konsep dari gas kinectic theory dapat digunakan untuk menentukan efektivitas tegangan pada fase solid dari partikel yang bergerak (kinetic contribution) dan partikel yang sedang bertumbukan (collisional contribution)^[18]. KTGF menyatakan bahwa aliran granular dan gas dianggap bergerak bersamaan. Hal tersebut memungkinkan untuk

menghasilkan *properties* dan interaksi yang baik pada sebuah molekul atau partikel dengan menggunakan KTGF. Hal itu menetapkan temperatur granular (θ) yang mewakili fluktuasi *velocity* partikel. Ekspresi untuk termperatur gas dan termperatur granular dinyatakan sebagai sepertiga dari kuadrat *velocity* rata-rata pergerakan acak partikel^[19].

$$\theta = \frac{1}{3}v_s^{\prime 2} \tag{12}$$

Dimana v's adalah fluktuasi kecepatan partikel.

Temperatur granular sebanding dengan energi granular. Persamaan energi granular harus terselesaikan terlebih dahulu untuk menghitung temperatur granular. Karena tegangan granular tergantung besarnya fluktuasi kecepatan partikel, kesetimbangan energi granular berhubungan dengan kecepatan partikel yang dibutuhkan untuk melengkapi persamaan kontinyuitas dan persamaan momentum untuk kedua fase. Berikut adalah persamaannya^[16],

$$\frac{2}{3} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \theta) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s v_s \theta) \right] = (-\nabla \rho_s I + \tau_s) : \nabla v_s + \nabla \cdot (k_s \nabla \theta) - \gamma_s + \varphi_{gs}$$
 (13)

Dimana persamaan pertama pada sisi kanan menyatakan turunan dari energi fluktuasi karena kesetimbangannya bergeser ke fase padat, untuk persamaan yang kedua di sisi kiri adalah difusi energi yang berfluktuasi sepanjang gradien θ , γ_s menyatakan menghilangnya dari ketidakelastisan partikel dan tumbukan partikel dan φ_{gs} perhitungan untuk menghilangnya atau dihasilkannya energi dari pembentukan granular dari kekuatan fluktuasi diberikan fluktuasi kecepatan partikel^[4].

Koefisien difusi untuk energi granular (k_s) , dinyatakan oleh Syamlal^[20],

$$k_s = \frac{15\rho_s d_s a_s \sqrt{\pi\theta}}{(41-33\eta)} \left[1 + \frac{12}{5} \eta^2 (4\eta - 3) a_s g_0 + \frac{16}{15\pi} (41 - 33\eta) \eta a_s g_0 \right]$$
(14)

Dimana,

$$\eta = \frac{1}{2}(1 + e_s) \tag{15}$$

hilangnya energi akibat tumbukan (γ_s) , diekspreikan oleh Lun et al. [21],

$$\gamma_S = \frac{12(1 - e_S^2)g_0}{d_S\sqrt{\pi}} \rho_S a_S^2 \theta^{1.5}$$
 (16)

$$\varphi_{gs} = -3K_{gs}\theta\tag{17}$$

Sebuah penelitian mengasumsikan bahwa energi granular merupakan *steady state* dan *unsteady state* dan mengabaikan proses konveksi dan difusi. Sehinggaa persamaan dapat disederhanakan sebagai ekspresi Algebraic,

$$0 = (-\nabla p_s I + \tau_s): \nabla v_s - \gamma_s \tag{18}$$

2.5 Tegangan Tensor Fase Solid

Hubungan utama untuk tegangan solid berdasarkan pada konsep *kinetic theory* yang berasal dari Lun et al.^[21]. Tekanan solid menunjukan gaya normal pada fase padat untuk partikel dan interaksi partikel, hal tersebut dapat dihitung melalui persamaan,

$$p_s = \rho_s a_s \ \theta + 2\theta \rho_s a_s^2 (1 + e_s) \tag{19}$$

Bulk viscosity untuk fase solid menyatakan resistensi partikel terhadap tekanan. Pernyataan tersebut dapat ditulis sebagai^[21],

$$\lambda_{s} = \frac{4}{3} \rho_{s} a_{s}^{2} d_{s} g_{0} (1 + e_{s}) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}}$$
 (20)

Dimana,

$$g_0 = \frac{1}{1 - \sqrt[3]{\frac{a_S}{a_{S,max'}}}} \tag{21}$$

Model mengenai *dynamic viscosity* pada fase solid dapat dikerjakan dengan menggunakan persamaan^[22],

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \tag{22}$$

dimana,

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \rho_s a_s \ d_s g_0 (1 + e_s) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}}$$
 (23)

$$\mu_{s,kin} = \frac{10d_s \rho_s \sqrt{\theta \pi}}{96a_s (1 + e_s)g_0} \left[1 + \frac{4}{5} (1 + e_s) a_s g_0 \right]^2$$
 (24)

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \sin\theta}{2\sqrt{I_{2D}}} \tag{25}$$

2.6 Drag Model

Persamaan Eulerian-Eulerian model merupakan persamaan yang menyelesaikan perpindahaan masa antara fase gas dan fase partikel^[9,15] dengan menurunkan persamaan K_{gs} . Model persamaan yang bisa digunakan pada proses fluidisasi adalah model Gidaspow dan Syamlal-O'Brien^[15].

1. Gidaspow Model

Gidaspow mengkombinasikan model Wen & Yu untuk fraksi volume gas diatas 0,8^[23] dengan Persamaan Ergun untuk friksi volume gas dibawah 0,8. Hasil dari kombinasi persamaan Wen & Yu dan Ergun yaitu,

$$K_{gs}^{Ergun} = 150 \frac{a_s^2 \mu_g}{a_g d_g^2} + 175 \frac{a_s \rho_g}{d_s} |v_s - v_g|, a_g < 0.8$$
 (26)

$$K_{gs}^{Wen-Yu} = \frac{3}{4} C_D \frac{a_s \ a_g \ \rho_g}{d_c} |v_s - v_g|, a_g^{-2.65}, a_g > 0.8$$
 (27)

dimana,

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{a_g R e_s} & \left[1 + 0.15 (a_g R e_s)^{0.687} \right], & Re_s < 1000 \\ 0.44 & Re_s > 1000 \end{cases}$$
(28)

$$Re_s = \frac{\rho_g d_s}{\mu_g} \left| v_s - v_g \right| \tag{29}$$

Untuk menyelesaikan model persamaan diskontinuitas, Gidaspow mempertimbangkan perubahan fungsi untuk transisi cepat dari fase tertentu ke fase lainnya^[24].

$$\varphi_{gs} = \frac{\tan^{-1}[150x1.75(0.2 - a_s)]}{\pi} + 0.5 \tag{30}$$

Karena itu, munculah model berikut,

$$K_{gs} = (1 - \varphi_{gs}) K_{gs}^{Ergun} + \varphi_{gs} K_{gs}^{Wen-Yu}$$
(31)

2. Syamlal – O'Brien

Persamaan yang digunakan pada Syamlal-O'Brien yaitu persamaan untuk menentukan terminal *velocity* untuk fase padat $(v_{r,s})$ didapat dari hubungan antara *velocity* dengan kekosongan (*voidage*) yang diusulkan oleh Garside dan Aldibouni,

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \frac{c_D}{v_{r,s}^2} \frac{\rho_g |v_s - v_g|}{d_s} a_s a_g$$
 (32)

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\frac{Re_s}{v_{r,s}}}}\right)^2 \tag{33}$$

Persamaan untuk hubungan $terminal\ velocity\ pada\ fase\ solid\ (v_{r,s})$ dari hubungan $velocity\ voidage\ dinyatakan\ oleh\ Harside\ dan\ Aldibouni\ dengan,$

$$v_{r,s} = 0.5(A - 0.06Re_s + \sqrt{(0.06Re_s)^2 + 0.12Re_s(2B - A) + A^2})$$
 (34)
Dimana,

$$A=\alpha_g^{4.14}$$

$$B = \begin{cases} a_g^{C1}, a_g \gg 0.85 \\ C_2 a_g^{1.28} a_g < 0.85 \\ C_1 = 2.65 \ dan \ C_2 = 0.8 \end{cases}$$

2.7 Model Turbulen

RNG k- ε model digunakan untuk menyelesaikan persamaan k dan ε . Model tersebut berdasarkan teori dispersion of discrete particel by homogeious turbulence^[25,26]. Persamaan ini lebih baik digunakan dengan menggunakan data

dari hasil eksperimen dari model fluidisasi^[26]. Untuk persamaan transportasi fase pada kondisi turbulen dengan parameter k dan ε disajikan pada persamaan berikut,

$$\frac{\partial}{\partial t} = (\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m v_m k) = \nabla \cdot (\alpha_k \mu_{t,m} \nabla k) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon$$
 (35)

$$\frac{\partial}{\partial t} = (\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m v_m \varepsilon) = \nabla \cdot \left(a_\varepsilon \mu_{t,m} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon \right)$$
(36)

dan untuk properties pencampuran yaitu,

$$\rho_m = a_a \rho_a + a_s \rho_s \tag{37}$$

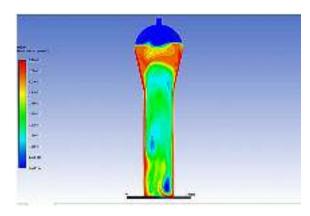
$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{38}$$

$$v_m = \frac{a_g \rho_g v_g + a_s \rho_s v_s}{a_g \rho_g + a_s \rho_s} \tag{39}$$

2.8 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) dapat diartikan suatu teknologi komputasi yang memungkinkan memproses dinamika dari benda-benda atau zatzat yang mengalir (fluida). Secara definisi CFD adalah ilmu yang mempelajari mempelajari cara memprediksi pola aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan- persamaan matematika atau model matematika. Pada dasarnya, persamaan-persamaan pada fluida dibangun dan dianalisa berdasarkan persamaan-persamaan diferensial parsial (Partial Differential Equation) yang mempresentasikan hukum-konservasi massa, momentum, dan energi^[27].

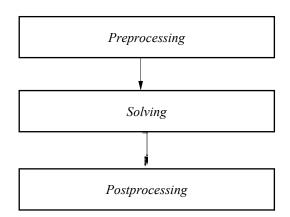
CFD dapat mensimulasikan aliran fluida, perpindahan panas, perpindahan massa, benda-benda bergerak, aliran multifasa, reaksi kimia, interaksi fluida dengan struktur, dan system akustik hanya dengan pemodelan komputer. CFD dapat membuat virtual prototype dari sebuah system atau alat yang ingin dianalisa dengan menerapkan kondisi sebenarnya seperti di lapangan (plant), CFD akan memberikan data-data, gambar-gambar, atau kurva-kurva yang menunjukan prediksi dari performasi keandalan sistem yang di desain. Hasil analisis CFD sering berupa berupa prediksi kualitatif meski terkadang kuantitatif^[27].



Gambar 2.4 Contoh hasil percobaan dengan menggunakan CFD

2.9 Proses Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD)

Terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan ketika melakukan simulasi *CFD* yaitu sebagai berikut:



Gambar 2.5 Flowchart Proses Simulasi CFD

a. Preprocessing

Preprocessing merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisis sebuah model CFD. Teknisnya adalah membuat model dalam paket CAD (Computer Aided Design), membuat mesh yang cocok/sesuai, kemudian menerapkan kondisi batasdan sifat-sifat^[27]. Pada tahap ini akan dilakukan beberapa cara yaitu:

b. Solving

Program inti untuk mencari CFD menghitung kondisi-kondisi yang diterapkan pada saat $Preprocessing^{[27]}$.

c. Postprocessing

Postprocessing adalah terakhir dalam analisis *CFD*, hal yang dilakukan pada langkah ini adalah mengorganisasi dan menginterpretasi data hasil simulasi *CFD* yang bias berupa gambar, kurva, dan animasi^[27].

BAB III

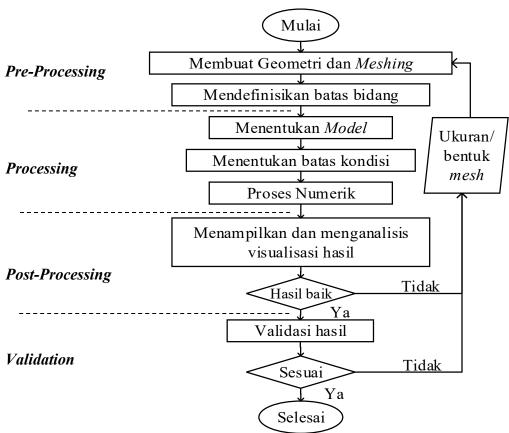
METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan yaitu membuat geometri, *meshing*, menentukan batas-batas dari geometri, memeriksa ukuran dan bentuk *mesh*, menentuan batas kondisi, penyelesaian numerik menggunakan metode CFD dan memvisualisasikan hasil dari perhitungan.

3.1.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari proses tahapan penelitian ditunjukan pada Gambar 3.1 berikut :



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Prosedur Penelitian

Secara umum proses simulasi CFD dibagi menjadi 3 tahap yaitu Pre-Processing, Processing, dan Post-Processing^[27].

3.2.1 Pre-Porcessing

Pre-Processing adalah tahap awal yang harus dilakukan sebelum melakukan simulasi pada penelitian ini. Pada tahap ini ada beberapa tahap yaitu membuatan geometri, meshing, mendefinisikan batas pada bidang geometri, serta mengecek hasil meshing.

a. Geometri

Tahap geometri adalah proses membuatan gambar reaktor *fludized bed* 2D. Geometri reactor dibuat menggunakan aplikasi *GAMBIT* 2.4.6. Rincian dari geometri reaktor disajikan pada Gambar 3.2.

Gambar 3.2 Geometri Fluidized Bed Reactor

b. Meshing

Meshing adalah membagi objek menjadi bagian-bagian yang lebih kecil. Ukuran mesh mempengaruhi hasil dari suatu simulasi, semakin kecil mesh maka semakin teliti hasil dari suatu simulasi. Pada penelitian ini

digunakan beberapa variasi mesh yang akan di analisa terlebih dahulu sebelum digunakan untuk simulsi proses, proses ini disebut analisa sensitivitas mesh. Analisa sensitivitas *Mesh* dilakukan dengan mencari ukuran mesh yang terbaik kemudian ukuran mesh tersebut digunakan untuk mencari bentuk *Mesh* terbaik yang nantinya akan digunakan pada proses simulasi. Berikut variasi mesh yang akan digunakan.

Tabel 3.1 Variasi Bentuk dan Ukuran Mesh

Variasi <i>Mesh</i>	
Variasi Ukuran	Variasi Bentuk
45 mm (103.051 node)	Trilateral
30 mm (85.422 node)	Trilateral-quadrilateral
25 mm (59.527 node)	Quadrilateral

c. Mendefinisikan Batas Bidang

Setelah melakukan *meshing* dilanjutkan dengan menentukan batas bidang, menentuan batas bidang di aplikasi GAMBIT 2.4.6 disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Batas Bidang

No	Bidang	Parameter
1	Inlet	Velocity inlet
2	Dinding Kiri	Adiabatik
3	Dinding Kanan	Adiabatik
4	Outlet	Pressure outlet

Gambar 3.3 Batas Bidang

3.2.2 Processing

Tahap ini adalah tahap paling penting dalam CFD, pada tahap ini menentukan *General, models, materials, cell zone condition, boundary condition, solution control, mesh interfaces, dynamic mesh,*

reference velue, solution methods, solution control, solution initialization, calculation activities, dan run calculation.

a. General

Simulasi ini menggunakan pengaturan *solver* berdasarkan tekanan (*Pressure-Based*). Pada *velocity formulation* menggunakan *absolute*, sedangkan untuk aliran dalam sistem menganggap *transient* serta untuk *gravity* menggunakan *standart gravity* yaitu **-9,81 m/s²** pada sumbu Y.

b. Models

Tahap ini bertujuan untuk menentukan persamaan-persamaan yang akan digunakan dalam perhitungan, untuk persamaan yang digunakan disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.3 *Models* dan Penggunaannya

No.	Deskripsi	Model
1	Characteristic Flow	Eulerian-Eulerian ^[20]
2	Turbulence	$k - \varepsilon (RNG)^{[20]}$
3	Solid Momentum Balance	$KTGF^{[20]}$
4	Granular Viscosity	Gidaspow ^[16]
5	Granular Bulk Viscosity	Lun et. al. [21]
6	Friction Viscosity	Schaeffer ^[21]
7	Granular Temperature	Algebraic ^[22]
8	Drag Law Model	Gidaspow ^[16]
9	Solid Pressure	Lun et. al. [21]
10	Radial Distribution	Lun et. al. [21]

c. Material

Material yang digunakan pada dinding reaktor yaitu *carbon steel*. Sedangkan untuk material fluida disajikan pada Tabel 3.3.

d. Kondisi Batas (Boundry condition)

Boundry condition merupakan kondisi batas setiap variabel yang diperlukan dalam perhitungan simulasi. Untuk batas-batas dari tiap variabel disajikan pada Tabel 3.4 - 3.5.

Tabel 3.6 Kondisi Batas Reaktor Pada Kondisi Eksisting

e. Solution Methods

Pada Solution Methode menggunakan scheme SIMPLE karena scheme ini memiliki keunggulan dalam menyelesaikan aliran transient dibandingkan scheme lainnya pada pressure-velocity coupling.

f. Monitors

Pada tahap ini digunakan untuk memantau konvergensi secara dinamis. Pada dasarnya konvergensi dapat ditentukan dengan merubah parameter pada residual, statistik, nilai gaya, dll.

g. Solution Initialization

Proses ini ditujukan untuk menentukan nilai awal dari variabel iterasi. Pada *Initialization methode* yang digunakan yaitu *hybrid initialization*.

h. Run Calculation

Pada proses ini akan dilakukan iterasi sampai tercapai konvergensi. Pada tahap ini ditentukan nilai *time step 0,01,* number of time step 100 dan max iteration/time step 20.

3.2.3 Post-Processing

Setelah proses iterasi mencapai konvergensi, selanjutnya adalah mengekstrak data-data hasil yang akan diambil dari hasil iterasi. Hasil dari perhitungan yang akan diambil disajikan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Data yang Dianalisa

No.	Data
1	Visual meshing beberapa variasi
2	Visual fraksi volume resin beberapa variasi
3	Visual Pola fluidisasi beberapa variasi
4	Data tekanan di titik tertentu
5	Data velocity di titik tertentu
6	Data fraksi volume resin di titik tertentu

3.3 Alat dan Bahan

Berikut ini merupakan alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian :

3.3.1 Alat

Satu perangkat komputer yang telah terinstal *Ansys Fluent Student Version* 12.0 dan Gambit 2.4.6 dengan spesifikasi prosesor i5 dengan kapasitas RAM 8 GB.

3.4 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini terdapat 2 variabel, yaitu variabel tetap dan variabel berubah. Variabel tetap dimensi reaktor dan komposisi gas umpan. Sementara variabel berubah tersaji pada tabel berikut.

Tabel 3.6 Variabel Berubah

3.5 Metode Pengumpulan dan Analisa Data

Metode pengumpulan dan analisis data yang digunakan pada penelitian ini meliputi :

3.5.1 Ekstrak Data dari ANSYS FLUENT

Ekstrak data dari aplikasi *Ansys Fluent Student Version* dilakukan dengan cara mengekstrak beberapa data ke excel. Data hasil ekstrak tersebut kemudian diolah menjadi grafik.

3.5.2 Analisa Hasil Perhitungan

Dari hasil grafik yang didapat dari tahap sebelumnya, data tersebut diamati dan dianalisa kemudian akan dibandingkan dengan beberapa literatur. Dari hasil perbandingan tersebut akan didiskusikan dengan dosen pembimbing dan kemudian akan ditarik kesimpulan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Sensitivitas Mesh

Pada sebuah simulasi proses diperlukan analisa sensitivitas *mesh*, analisa sensitivitas *mesh* yang dilakukan dengan berbagai variabel merupakan cara sederhana untuk menentukan respon dari suatu kualitas perhitungan^[27]. Ketika hasil simulasi variabel *mesh* sudah tidak lagi menunjukan perbedaan yang signifikan maka hasil simulasi analisa sensitivitas *mesh* dengan variabel terbaik dapat digunakan^[28]. Pada penelitian ini, analisa sensitivitas *mesh* dilakukan dengan mengubah ukuran dan bentuk *mesh*. Untuk variabel ukuran dan bentuk *mesh* disajikan dalam **Tabel 4.1**. Berdasarkan hasil variasi *mesh* tersebut diambil data tekanan yang dapat menggambarkan *mesh* yang akan digunakan pada simulasi.

Tabel 4.1 Variabel Ukuran dan Bentuk *Mesh* pada Analisa Sensitivitas *Mesh*

Pada **Gambar 4.1 (a)** dihasilkan bentuk grafik dengan jumlah node 103.051 dan 85.422 memiliki hasil yang cukup identik dibandingkan dengan grafik yang memiliki jumlah node 59.527. Semakin besar jumlah node yang digunakan akan berefek pada beban komputasi (kerja computer untuk melakukan simulasi) yang lebih besar , maka untuk meminimalisir beban komputasi digunakan ukuran *mesh* dengan jumlah 85.422 node agar simulasi berjalan lebih efektif. Pada **Gambar 4.1 (b)** dihasilkan tiga bentuk grafik dengan variasi bentuk, dapat dilihat dari ketiga grafik tersebut bahwa *Trilateral* dan *quadrilateral* memiliki kemiripan grafik. Dari kedua grafik tersebut dapat disimpulkan bentuk *mesh* yang digunakan adalah *quadrilateral* dengan jumlah node 85.422 dan ukuran *mesh* 30 mm karena memiliki beban komputasi yang

lebih ringan sehingga waktu proses yang dibutuhkan akan lebih cepat^[29]. Pada analisa mesh sensitivitas juga menerapkan metode *Courant Number* (N_c) yang bertujuan untuk mengevaluasi ketentuan *time step* dari simulasi transien untuk ukuran *mesh* dan aliran tertentu yang dinyatakan dengan :

$$N_c = v_g \frac{\Delta t}{\Delta y}....(40)$$

4.2 Validasi Data Simulasi Terhadap Data Eksperimen

Gambar 4.2 Validasi hasil simulasi terhadap data eksperimen

Pada simulasi ini dilakukan validasi hasil simulasi terhadap data eksperimen, berupa data tekanan sepanjang FBR. Data tekanan yang terukur pada FBR di 3 titik yaitu pada ketinggian 0,01 meter, 10 meter dan 10 meter

yang diukur dari dasar FBR. Pendekatan tekanan dapat diandalkan serta menguntungkan untuk verifikasi dan evaluasi pada sebuah model karena diketahui bahwa tekanan merupakan parameter penting dalam proses simulasi pada FBR [30].

Dengan membandingkan data tekanan dibeberapa titik maka didapat hasil grafik seperti yang disajikan pada **Gambar 4.2.** Terlihat bahwa perbandingan antara hasil simulasi dengan data eksperimen tidak jauh berbeda. Data tekanan antara simulasi dan eksperimen juga diuji dengan metode *Mean Absolute Percent Error (MAPE)* dengan persamaan :

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^{n} (A_t - F_t) \times 100}{n}.$$
(41)

Tabel 4.2 Perhitungan *Mean Absolute Percent Error*

MAPE merupakan hasil pengurangan antara nilai simulasil A_t dan eksperimen F_t yang telah di absolute-kan, kemudian di bagi dengan nilai simulasil, kemudian dilakukan penjumlahan terhadap hasil-hasil tersebut. Dan n merupakan jumlah data yang digunakan untuk perhitungan. MAPE memberikan petunjuk seberapa besar kesalahan pendekatan dibandingkan dengan nilai sebenarnya dari data tersebut. Semakin rendah nilai MAPE, kemampuan dari model pendekatan yang digunakan dapat dikatakan baik, MAPE memiliki range nilai yang dapat dijadikan bahan pengukuran mengenai kemampuan dari suatu model pendekatan, range nilai dapat dilihat pada tabel berikut.

Range MAPEArti< 10%</td>Kemampuan model proyeksi sangat baik10 - 20%Kemampuan model proyeksi Baik20 - 50%Kemampuan model proyeksi Layak>50%Kemampuan model proyeksi buruk

Tabel 4.3 *Range* Nilai *MAPE*

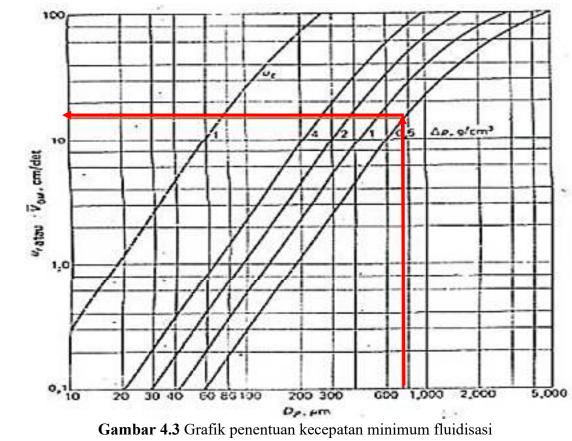
Berdasarkan perhitungan *MAPE* dengan mengolah data tekanan validasi hasil simulasi terhadap eksperimen dihasilkan nilai 4,4%. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi sangat baik.

4.3 Pengaruh Kecepatan Gas Inlet Terhadap Fluidisasi

Fluidisasi terjadi ketika kecepatan gas melebihi kecepatan minimum fluidisasi. Untuk menentukan kecepatan minimum fluidisasi didalam FBR mengacu pada **Gambar 4.3** dimana Δp didapat dari hasil perhitungan berdasarkan persamaan :

$$\Delta p = \frac{g}{g_c} (1 - \varepsilon) (\rho_p - \rho)...(42)$$

Dimana Δp merupakan $pressure\ drop$, ε ialah porositas = 0,45, ρ_p merupakan densitas partikel padat, ρ ialah densitas gas dan $\frac{g}{g_c}=1$ [45]. Dari persamaan tersebut didapatkan nilai Δp yaitu. Maka dari **Gambar 4.3** didapat nilai fluidisasi minimum $v_m=0$. Sedangkan kecepatan fluidisasi yang digunakan pada penelitian ini v (by data eksperimen).



KETERANGAN **LEGEND** Warna Merah menunjukan 22400 jumlah resin (fraksi volume) 5,670 01 yang ada di area tersebut semakin banyak 4,410-01 Warna Biru menunjukan 2 70411 jumlah resin (fraksi volume) yang ada di area tersebut 2,524-61 semakin sedikit 1 394 64 F.290 62 E-00e) 00

Tabel 4.4 Tabel Penjelasan Legend Volume Fraksi

Pada percobaan ini dilakukan dengan tiga variasi kecepatan inlet gas yang berbeda yang disimbolkan dengan V (**Gambar 4.4**) dimana variasi Inlet Gas Penyajian data berupa gambar *solid volume fraction* (fraksi volume pada fluida padat/resin) pada beberapa periode. Periode pengambilan data diuji pada detik ke- 5, 20, 40 60, 80 dan 100 untuk setiap variasi kecepatan gas inlet. Sedangkan parameter selain kecepatan gas inlet dibuat sama

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, pada hasil simulasi (a) terlihat sangat lambat dibandingkan dengan kedua variasi lainnya. Terlihat juga solid volume fraction masih banyak yang berwarna merah sampai detik ke 100 yang menunjukan belum terdistribusinya partikel resin secara merata. Sebuah penelitian mempelajari pengaruh distribusi partikel pada karakteristik fluidisasi yang menyimpulkan distribusi partikel dapat mempengaruhi hidrodinamika dan proses polimerisasi dalam proses fluidisasi. Tidak meratanya distribusi partikel akan mengurangi hasil polimerisasi^[39]. Sementara pada variasi keceptan gas (c) dengan kecepatan gas yang cukup besar, terlihat pada detik ke 40 partikel resin sudah *carryover* sehingga mengurangi solid

volume fraction didalam FBR. Ketika kecepatan gas melewati kecepatan minimum fluidisasi, unggun partikel akan meluas. Peningkatan kecepatan tersebut mengakibatkan perubahan pada susunan partikel. Dengan kecepatan gas yang lebih tinggi mengakibatkan unggun kehilangan identitasnya dan mengubah bentuk perluasan unggun. Partikel kemudian terekspansi ke puncak kolom diatas unggun sehingga membentuk permukaan unggun yang tinggi sampai keluar FBR. Fenomena tersebut disebut carryover. Fenomena carryover sebaiknya dihindari karena dapat menyebabkan penggumpalan atau pluging pada proses selanjutnya (didalam cooler shell and tube). Jika pluging terjadi maka akan mengurangi jumlah aliran gas dan mengurangi proses pertukaran panas gas. Sedangkan pada variasi kecepatan gas (b) terlihat distribsi resin cukup merata yang disajikan dengan warna hijau dan tidak mengalami carryover sampai detik ke 100.

Gambar 4.5 Distribusi fraksi volume resin dengan berbagai kecepatan gas inlet pada detik ke 100.

Gambar 4.5 menyajikan distribusi fraksi volume resin di tiap ketinggian didalam FBR dengan berbagai kecepatan gas inlet. Data fraksi volume resin diambil pada posisi tengah FBR sepanjang tinggi reaktor. Fraksi

volume resin cenderung lebih besar pada posisi bawah FBR. Sedangkan semakin tinggi posisi unggun resin maka semakin kecil pula fraksi volume resin. Namun pada kecepatan gas inlet fraksi volume resin pada bagian tengah FBR terlihat sangat besar yang berarti tidak meratanya distribusi resin didalam FBR. Hal tersebut bisa terjadi karena kurang besarnya kecepatan gas inlet sehingga waktu yg dibutuhkan untuk mendistribusikan resin secara merata cukup lama. Dari grafik tersebut juga memperlihatkan semakin besar kecepatan gas inlet maka semakin rendah fraksi volume disepanjang tinggi unggun resin didalam FBR.

4.4 Pengaruh Tinggi Unggun Terhadap Fluidisasi

Perbedaan ketinggian pada *initial bed resin* (unggun) berpengaruh pada penyebaran fluidisasi serta proses polimerisasi^[40]. Zhu dkk. mempelajari efek perubahan ketinggian inisial unggun terhadap konsentrasi partikel padat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan ketinggian bed statis menghasilkan peningkatan konsentrasi partikel padat terutama di wilayah tengah bed, sedangkan dinding daerah tidak mengalami perubahan yang berarti^[41]. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa ketinggian inisal unggun mempengaruhi kecepatan minimum fluidisasi. maka meningkatkan ketinggian bed akan meningkatkan kecepatan semburan^[41].

Gambar 4.6 Kontur dari fraksi volume resin pada berbagai variasi Tinggi Unggun

Gambar 4.7 Distribusi fraksi volume resin dengan berbagai tinggi unggun pada detik ke 100.

Pada percobaan ini dilakukan dengan tiga variasi tinggi bed/unggun yang berbeda yang disimbolkan dengan T (**Gambar 4.6**) dimana variasi tinggi unggun (a. Penyajian data berupa gambar *solid volume fraction* (fraksi volume pada fluida padat/resin) pada beberapa periode. Periode pengambilan data diuji pada detik ke-5, 20, 40 60, 80 dan 100 untuk setiap ukuran sedangkan parameter selain tinggi bed dibuat sama

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan (**Gambar 4.6**), hasil simulasi (**a**) memperlihatkan ketinggian distribusi resin lebih rendah dibandingkan kedua variasi tinggi bed yang lainnya. Perbedaan sangat terlihat pada detik ke 60. Terlihat juga distribusi unggun resin yang lambat dari waktu ke waktu hal tersebut terjadi karena semakin tinggi bed maka waktu terfluidisasi unggun semakin lambat^[41]. Sementara pada ketinggian bed (**c**) terlihat unggun resin lebih cepat terhamburkan dibandingkan dengan kedua variasi lainnya. Pada detik ke 40 variasi ini telah mengalami *carryover*. Hal tersebut terjadi karena semakin tinggi bed semakin cepat pula unggun resin terhamburkan keluar FBR^[41]. Sedangkan pada variasi ketinggian bed (**b**) tidak mengalami *carryover* ataupun *deadzone* sehingga dapat terjadinya proses fluidisasi.

Pada grafik fraksi volume resin (Gambar 4.7) terlihat fraksi volume resin cenderung lebih besar dibagian bawah FBR. Terlihat juga dari tiga ketinggian unggun berbeda menunjukan pola distribusi fraksi yang berbeda. Dsitribusi fraksi volume resin pada tinggi unggun paling rendah memiliki fraksi volume paling rendah, begitu juga pada tinggi unggun yang paling tinggi, memiliki fraksi volume resin rendah karena banyak resin yang telah ter-*carryover* sehingga berkurangnya fraksi volume resin. Namun pada tinggi unggun meter memiliki pola distribusi fraksi yang cenderung merata ditiap ketinggian.

4.5 Pengaruh Diameter Partikel Terhadap Fluidisasi

Menurut gidaspow *drag model*, *particle size* menunjukan faktor dominan yang mempengaruhi *drag force*. Sedangkan *drag force* mempengaruhi terjadinya fluidisasi^[32]. Begitupun menurut Yu Che dkk, ukuran resin merupakan faktor penting yang mempengaruhi proses penyebaran resin dan proses polimerisasi (pencampuran) di dalam FBR^[33]. Geldard dalam karya ilmiahnya mengklasifikasikan partikel menurut ukuran dimana hal tersebuat mempengaruhi proses fluidisasi.^[34].

Gambar 4.8 Kontur dari fraksi volume solid pada berbagai variasi diameter partikel

Gambar 4.9 Distribusi fraksi volume resin dengan berbagai ukuran partikel resin pada detik ke 100.

Pada percobaan ini dilakukan dengan tiga ukuran partikel berbeda yaitu P (gambar 4.8) diamana variasi diameter yaitu (a) micron (b) micron dan (c) micron. Penyajian data berupa gambar *solid volume fraction* (fluida padat) pada beberapa periode. Periode pengambilan data diuji pada detik ke-5, 20, 40 60, 80 dan 100 untuk setiap ukuran sedangkan parameter selain ukuran partikel dibuat sama

Dari hasil simulasi yang dilakukan, pada ukuran partikel (a) unggun resin terlalu cepat menyebar serta terjadinya *carry over* (terbawanya sebagian resin keluar FBR) pada proses berlangsungnya fluidisasi yaitu pada detik ke-60. Hal tersebut terjadi karena *particle size* yang lebih kecil dapat menyebabkan terlalu besarnya daya angkat *velocity* gas terhadap unggun resin yang berakibat tidak terjadinya fenomena refluidisasi^[35]. Sementara pada variasi ukuran (c) terlihat bahwa proses penyebaran resin berlangsung cukup lama dan berat, hal tersebut terjadi karena *particle size* yang lebih besar bisa menyebabkan terlalu kecilnya daya angkat oleh *velocity* gas terhadap unggun resin dalam membangun pola fluidasi sehingga ada kemungkinan partikel resin tidak sepenuhnya terfluidisasi^[35]. Semetara untuk ukuran partikel (b) dapat terangkatnya unggun resin serta tidak terjadi *carryover* sehingga fluidisasi dapat terjadi.

Grafik fraksi volume resin dengan tiga ukuran partikel berbeda ditunjukan pada Gambar 4.9. Dari ketiga grafik tersebut menunjukan fraksi volume resin cenderung terbesar berada dibagian bawah FBR. Namun dari ketiga grafik tersebut memiliki perbedaan yang terlihat. Pada grafik ukuran partikel terkecil cenderung memiliki fraksi volume yang paling rendah. Hal tersebut terjadi Karena telah terjadi fenomena terbawanya resin keluar FBR sehingga mengurangi fraksi volume resin didalam FBR. Sedangkan pada grafik fraksi volume dengan ukuran partikel cenderung sama.

4.6 Pengaruh Densitas Resin Terhadap Fluidisasi

Penelitian David Escudero dkk, menyimpulkan massa jenis (densitas) solid pada proses fluidisasi berbanding lurus dengan kecepatan minimum yang dibutuhkan untuk fluidisasi suatu unggun partikel^[36]. Kecepatan minimum fluidisasi adalah kecepatan superfisial fluida minimum dimana fluidisasi mulai terjadi^[37]. Kecepatan minimum ini menentukan terjadi atau tidaknya fluidisasi.

Gambar 4.10 Kontur dari fraksi volume solid pada berbagai variasi densitas resin

Gambar 4.11 Distribusi fraksi volume resin dengan berbagai densitas resin pada detik ke 100.

Pada percobaan ini dilakukan dengan tiga besaran densitas yang berbeda yang disimbolkan dengan ρ_r , **Gambar 4.10**. Dimana variasi densitas resin (a). Penyajian data berupa gambar *solid volume fraction* (fraksi volume pada fluida padat/resin) pada beberapa periode. Periode pengambilan data diuji pada detik ke- 5, 20, 40 60, 80 dan 100 untuk setiap ukuran. sedangkan parameter selain densitas resin dibuat sama. Dalam prosesnya densitas dapat berubah karena adanya faktor bertambah atau berkurangnya penggunaan

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, pada hasil simulasi densitas (a) terlihat pada detik ke-5 terlihat unggun resin terangkat lebih awal dibandingkan kedua variasi lainnya sehingga menyebabkan *carryover* pada detik ke-80. Hal tesebut terjadi karena semakin kecil densitas maka semakin kecil pula kecepatan minimum yang dibutuhkan untuk mengangkat unggun resin. Pada variasi ini juga terlihat ruang kosong dari detik awal sampai detik ke-100, ruang kosong tersebut merupakan *deadzone*. Sementara Pada hasil simulasi varias (c) pada detik ke-5 terlihat unggun resin terangkat paling lambat dibandingkan kedua variasi lainnya yang menyebabkan tidak meratanya distribusi partikel. Sebuah penelitian mempelajari pengaruh distribusi partikel pada karakteristik fluidisasi yang

menyimpulkan distribusi partikel dapat mempengaruhi hidrodinamika dan polimerisasi dalam proses fluidisasi. Tidak meratanya distribusi partikel akan mengurangi hasil reaksi polimerisasi berupa resin^[39]. Sedangkan pada varias **(b)** unggun resin dapat terangkat serta tidak terjadi *carryover* sampai detik ke-100 sehingga dapat terjadinya proses fluidisasi.

Grafik fraksi volume resin dengan tiga densitas resin berbeda ditunjukan pada **Gambar 4.11.** Grafik tersebut memperlihatkan fraksi volume resin cenderung berada di bagian bawah FBR. Pada grafik dengan densitas terendah memiliki kecenderungan fraksi volume resin lebih rendah dibandingkan kedua variasi densitas resin lainnya. Hal tersebut bias terjadi karena resin sudah terbawa keluar aliran reaktor bersama dengan gas sehingga fraksi volume resin berkurang. Sedangkan untuk grafik dengan densitas kg/cm³ memiliki fraksi volume resin yang mirip.

4.7 Fenomena *Dead Zone*

Dead Zone merupakan peristiwa terpusatnya putaran gas dan partikel pada disuatu titik tertentu. Hal tersebut akan menyebabkan panas reaksi terpusat dan terbentuknya penggumpalan. Penyumbatan pada sistem proses akan terjadi jika penggumpalan tersebut berlangsung secara terus-menerus^[38]. Pada proses fluidisasi, dead zone harus dihindarkan dengan mencari parameter kondisi terbaik. Berbagai variasi parameter kondisi yang berpengaruh terhadap proses fluidisasi telah dicoba pada simulasi diatas. Dari simulasi tersebut dapat diamati terjadinya deadzone di beberapa titik. Pengamatan deadzone dilakukan pada detik ke 80 sampai ke detik 100.

Gambar 4.12 Analisa Deadzone: (a) Pada kecepatan gas di detik ke 80 dan 100.

Gambar 4.12 menyajikan visualisasi dari bentuk dan ukuran *deadzone* yang terbentuk di suatu titik pada tiga variasi kecepatan gas inlet yang berbeda. *Deadzone* memiliki karakter berputar di titik tertentu. Alasan terjadinya *deadzone* karena beberapa parameter yang buruk. Salah satunya karena kecil besarnya kecepatan gas inlet. Pada kecepatan \ m/s terlihat banyak sekali *deadzone* serta selama 20 detik *deadzone* tidak berpindah posisi. Sedangkan pada kecepatan \ m/s *deadzone* tidak terlalu besar dan terjadi cukup singkat. Namun pada kecepatan gas inlet \ m/s masih banyak fraksi volume resin yang tidak terdistribusi secara merata. Sehingga kecepatan gas inlet yang paling baik yaitu \ m/s.

Gambar 4.13 Analisa Deadzone:

Analisa *deadzone* untuk variasi tinggi inisal unggun resin disajikan pada **Gambar 4.13**. Terlihat *deadzone* pada variasi tinggi unggun meter cukup besar dan berada dibeberapa titik. Begitupun pada variasi tinggi unggu meter. Sedangkan pada variasi tinggi unggun meter hanya memiliki satu titik *deadzone* dengan ukuran cukup kecil. Sehingga pada analisa *deadzone* dengan pengaruh tinggi unggun, variasi dengan tinggi meter merupakan variasi terbaik.

Gambar 4.14 Analisa Deadzone:

Gambar 4.14 menyajikan analisa *deadzone* dengan adanya pengaruh tiga ukuran partikel yang berbeda. Pada ukuran partakelμ terlihat banyak *deadzone*. *Deadzone* pada ukuran partikel μ juga terlihat namun sedikit berbeda, *deadzone* ini memiliki warna hijau yang menyatakan memiliki fraksi volume resin cukup tinggi yaitu sekitar . Sedangkan *deadzone* pada ukuran partikel μ memiliki *deadzone* warna biru, yang menyatakan fraksi volume resin sekitar <. Hal ini menyatakan bahwa ukuran partikel resin μ dapat meminimlisir *deadzone* lebih baik dibandingkan dengan kedua ukuran partikel lainnya.

Gambar 4.15 Analisa Deadzone : (a) Pada densitas resin =

Analisa *deadzone* pada tiga densiatas resin berbeda disajikan **Gambar 4.15.** Terlihat pada densitas kg/m³ banyak memiliki titik *deadzone* berukuran besar. Sedangkan pada densitas kg/m³ hanya memiliki satu *deadzone* berukuran kecil. Hal tersebut menyatakan bahwa pada densitas kg/m³ dapat meminimlisir *deadzone* lebih baik dibandingkan dengan variabel densitas lainnya.

4.8 Perbandingan Dengan Jurnal Lain

Tabel 4.5 Perbandingan Jurnal Lain

D 1' 0 T 1 1	T (D 1):
Penulis & Judul	Tentang Penelitian
Adhit M. & Erik W. Analisis Kondisi Operasi Terhadap Proses Fluidisasi Reaktor Unggun Terfluidakan Pada Reaksi Polimerisasi Etilen Fase Gas Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamic	Menganalisa pengaruh perubahan velocity gas inlet, tinggi inisial unggun, ukuran partikel resin dan densitas resin terhadap fenomena fluidisasi dan dead zone
Prieto, Javier S'anchez. Gas Maldistribution In Fluidized Beds. Thesis Doctoral	Menganalisa pengaruh gas velocity, solid bed properties dan pressure drop terhadap terbentuknya dead zone
Soria-Verdugo, A., Garc'ıa- Hernando, N., Almendros-I Ruiz- Rivas, U., Motion of a large object in a bubbling fluidized bed with a rotating distributor. Chemical Engineering	Melakukan penelitian terhadap dead zone dengan mem-variasikan bed aspect ratio, gas velocity dan karakteristik bahan
Parreno, Diego dan Amelio, Mario. 2015. A Preliminary Study of Hydrodynamics and Heat Transfer in a Bubbling Fluidized	Menggunakan 2D model Eularian dengan persamaan kinetic theory of granular flow (KTGF), penelitian tersebut membandingkan bed expansion,

Shi, D.P., Luo, Z.H., Guo, A.Y. Numerical Simulation of the Gas- Solid Flow in Fluidized-Bed Polymerization Reactors. Menggunakan 2D mode eulerian pada CFD per tersebut mengevaluasi solid, fenomena pada bu solid velocity vectors p	Bed containing Sand Particel	qualitative gas solid flow dan solid
Shi, D.P., Luo, Z.H., Guo, A.Y. Numerical Simulation of the Gas- Solid Flow in Fluidized-Bed Polymerization Reactors. Menggunakan 2D mode eulerian pada CFD per tersebut mengevaluasi solid, fenomena pada but solid velocity vectors per dengan pengaduk dan	using CFD	volume fraction profile dengan
Shi, D.P., Luo, Z.H., Guo, A.Y. Numerical Simulation of the Gas- Solid Flow in Fluidized-Bed Polymerization Reactors. Solid velocity vectors p dengan pengaduk dan		literature rancangan reaktor FBR
	Numerical Simulation of the Gas- Solid Flow in Fluidized-Bed	Menggunakan 2D model Eulerian- eulerian pada CFD penelitian tersebut mengevaluasi distribusi solid, fenomena pada <i>bubble</i> , dan solid velocity vectors pada FBR dengan pengaduk dan tanpa pengaduk

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, maka ditarik kesimpulan sebagai berikut.

- Jika kecepatan gas terlalu besar, maka resin akan mudah ter-carryover (terbawanya resin keluar reaktor dan mengganggu proses selanjutnya). Sedangkan jika keceptan gas terlalu kecil, maka akan sulit dicapai distribusi yang baik pada setiap bagian reaktor.
- 2. Jika terlalu tinggi inisial unggun resin, maka resin akan cepat ter-*carryover*. Sedangkan jika tinggi inisal unggun terlalu rendah maka pendistribusian resin kurang efisien karena resin yang terfluidisasi bisa lebih banyak lagi.
- 3. Jika diameter resin terlalu besar maka pendistribusian akan kurang baik, karena beratnya beban yang ditanggung oleh gas untuk mem-fluidisasikan resin terlalu besar. Sedangkan jika diameter resin terlalu kecil maka resin akan mudah terhamburkan sehingga terjadinya *carryover*.
- 4. Jika densitas resin terlalu besar maka akan terdapat bagian-bagian yang kurang terfluidisasi sehingga pendistribusian resin tidak merata. Sedangkan jika densitas resin terlalu kecil maka akan menyebabkan *carryover*.
- 5. Fluidisasi yang kurang baik (termasuk *Deadzone*) terbentuk karena pemilihan parameter yang kurang tepat, dengan penggunakan parameter yang telah diuji pada penelitian ini, didapatkan fluidisasi yang lebih baik daripada vairasi lainnya pada penelitian ini. berikut parameter terbaik yang didapat dari penelitian ini:
 - a. Kecepatan gas fluidisasi
 - b. Tinggi inisial unggun resin
 - c. Diameter partikel resin
 - d. Densitas resin

5.2 Saran

Adapun berikut ini merupakan saran yang dapat peniulis berikan guna memperbaiki kesalahan dan kekurangan dari hasil data penelitian ini.

- 1. Melakukan penelitian lebih lanjut dengan variasi yang berbeda
- 2. Melalukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan gambar 3D

DAFTAR PUSTAKA

- 1. Kunii, D. dan Levenspiel, O. 1991. *Fluidization Engineering*, 2nd. edn Newton: Butterworth-Heinemann.
- 2. Yang, W, C. 2003. *Handbook of Fluidization and Fluid Particel System*. Marcel Dekker, Inc : New York
- Khan, M.J.H., Hussain, M.A., Mansourpour, Z., Mostoufi, N., Ghasem, N.M., Abdullah, E.C. 2014. CFD simulation of fluidized bed reactors for polyolefin production – A review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 20: 3919-3946
- 4. Werther, J. 2012. *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry : Fluidized Bed Reactor*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA : Weinheim
- 5. Geldart, D. 1973. Types of Gas Fluidization. Powder Technol. 7: 285-292
- Prieto, Javier S'anchez. 2015. Gas Maldistribution In Fluidized Beds.
 Thesis Doctoral. Tidak dipubilkasikan. Departamento De Ingenier'Ia
 Termica Y De Fluido: Madrid
- 7. Tuakia, Firman. 2008. *Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*. Bandung : Informatika
- 8. Parreno, Diego dan Amelio, Mario. 2015. A Preliminary Study of Hydrodynamics and Heat Transfer in a Bubbling Fluidized Bed containing Sand Particel using CFD. Energy Procedia 81: 1041-1054
- 9. Shi, D.P., Luo, Z.H., Guo, A.Y. 2010. *Numerical Simulation of the Gas-Solid Flow in Fluidized-Bed Polymerization Reactors*. Ind. Eng. Chem. Res, 49: 4070-4079
- 10. Lu, H. L., Liu, W. T., Li, F., Zhao, G. B., He, Y. R. 2002. Eulerian Simulation Of Bubble Behaviour In A Two-Dimensional Gas-Solid Bubbling fluidized Bed. Int. J. Energy Res. 26: 1285
- 11. Busciglio, A., Vella, G., Micale, G., Rizzuti, L. 2009. Analysis of The Bubbling Behaviour of 2D Gas Solid fluidized Beds. Part II. Comparison Between Experiments and Numerical Simulations Via Digital Image Analysis Technique. Chem. Eng. J. 148: 145

- 12. Stepien, Laszek. 2015. *Fluidization*. Tidak dipublikasikan. AGH *University* : Stanislawa.
- 13. Reginato, A.S. 2001. *Modeling And Simulation of Liquid-Phase Polimerization Reactor of SHERIPOL Process*. Federal University of Rio Grande do Sul: Portuguese
- 14. R.O. Ebewele. 2000. *Polymer Science and Technology*. CRC Press LLC: New York,
- 15. McAuley, K.B., Xie, T., Hsu, J.C.C, dan Baon, D.W. 1994. *Gas Phase Ethylene polymerization: Production Process, Polymer Properties, And Reactor Modeling.* Ind. Eng. Chem. Res 33: 449 479.
- 16. Passos, Maria L., Barrozo, Marcos A.S. dan Mujumdar, Arun S. Fluidization Engineering Practice: Second Expanded Edition. Laval: Canada
- 17. Yu, Che., Zhou, Tian., Zhen, Liu., Rui, Zhang., Yuxin, Gao,. Enguang, Zou., Sihan, Wang dan Boping, Liu. 2014. *CFD Prediction of Scale-up Effect on the Hydrodynamic Behaviors of a Pilot-Plant Fluidized Bed Reactor and Preliminary Exploration of Its Application for Non-Pelletizing Polyethylene Process.* Powder Technology: 02-022.
- 18. Ding, D. Gidaspow J. 1990. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow. AlChE J. 36: 523-538.
- 19. C. Loha, H. Chattopadhyay, P.K. Chatterjee. 2012. *Assessment Of Drag Models In Simulating Bubbling Fluidized Bed Hydrodynamics*, Chem. Eng. Sci. 75: 400-407.
- B.G.M. van Wachem, J.C. Schouten, C.M. van den Bleek, R. Krishna, J.L. Sinclair. 2001. Comparative Analysis Of CFD Models Of Dense Gas—Solid Systems, AlChE J. 47:1035-1051.
- 21. M.A. Dehnavi, S. Shahhosseini, S.H. Hashemabadi, S.M. Ghafelebashi. 2010*CFD Simulation Of Hydrodynamics And Heat Transfer In Gas Phase Ethylene Polymerization Reactors*. Int. J. Heat Mass Transfer 37: 437-442.

- 22. M. Syamlal, W. Rogers, T.J. O'Brien. 1993. MFIX documentation: Theory guide, Technical Note, DOE/METC94/1004, NTIS/DE94000087. National Technical Information Service, springfield, VA.
- 23. Lun, C.K.K., Savage,S.B., Jeffrey, D.J., Chepurniy, N. 1984. Kinetic Theories For Granular Flow: Inelastic Particles In Couette Flow And Slightly Inelastic Particles In A General Flow Field. J. Fluid Mech 140: 223-256.
- 24. J. Sun, J. Wang, Y. Yang. 2012. CFD Investigation Of Particle Fluctuation Characteristics Of Bidisperse Mixture In A Gas-Solid Fluidized Bed, Chem. Eng. Sci., 82 () 285-298.
- 25. Wen, C.Y. dan Yu, Y.H.. 1966. *Mechanics of Fluidization*, Chem. Eng. Prog. S. Ser. : 62
- 26. D. Gidaspow, Multiphase Flow and Fluidization, Continuum and Kinetic Theory Descriptions with Application, Academic Press, INC., California, 1994.
- 27. Hinze, J.O. 1975. *Turbulence*. McGraw-Hill College: New York.
- 28. Hamidipour, Mohsen., Chen Jinwen. dan Larachi, Faical. 2012. CFD study on hydrodynamics in three-phase fluidized beds—Application of turbulence models and experimental validation. Chemical Engineering Science 78: 16 180
- 29. Zabolotnii, Elena., Morgenstern, Norbert R. dan Wilson, G. Ward. 2021.
 Mesh sensitivity in numerical models of strain-weakening systems.
 Computers and Geotechnics, Volume 136, 104253
- 30. Becker, R., Braack, 2000. Multigrid techniques for finite elements on locally refined meshes. Num. Linear Algebra Appl. 7, 363–379.
- 31. Hamidifard, S., Bahramian, A., & Rasteh, M. 2018. Mesh sensitivity analysis on hydrodynamics behavior of a fluidized bed containing silver oxide nanoparticle agglomerates: Transition from bubbling to slugging and turbulent flow regimes. Powder Technology, vol : 331, 28–40.
- 32. Yu Che, Zhou Tian, Zhen Liu, Rui Zhang, Yuxin Gao, Enguang Zou, Sihan Wang, Boping Liu. 2015. CFD Prediction of Scale-up Effect on the

- Hydrodynamic Behaviors of a PilotPlant Fluidized Bed Reactor and Preliminary Exploration of Its Application for Non-Pelletizing Polyethylene Process. Powder Technology, 00132-1.
- 33. Widayati, 2010, Fenomena dan kecepatan minimum (umf) fluidisasi, Eksergi, Vol 10, No.2, p. 42-46
- 34. Yu Che, Zhou Tian, Zhen Liu, Rui Zhang, Yuxin Gao, Enguang Zou, Sihan Wang, Boping Liu. 2015. CFD Prediction of Scale-up Effect on the Hydrodynamic Behaviors of a PilotPlant Fluidized Bed Reactor and Preliminary Exploration of Its Application for Non-Pelletizing Polyethylene Process. Powder Technology, 00132-1.
- 35. Christian, H., 2008. Modifikasi Sistem Burner. Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- 36. Effect of particle size on flow behavior in fluidized beds Ramesh Timsina, Rajan K. Thapa, Britt M. E. Moldestad & Marianne S. Eikeland Department of Process, Energy and Environmental Technology, University of South-Eastern Norway, Kjølnes Ring 56, 3901, Porsgrunn, Norway.
- 37. Janitha C. Bandara Marianne S. Eikeland Britt M. E. 2011. Analyzing the Effects of Particle Density, Size and Size Distribution for Minimum Fluidization Velocity with Eulerian-Lagrangian CFD Simulation Moldestad Faculty of Technology, Natural Sciences and Maritime Sciences, University College of Southeast Norway
- 38. Escudero, D., & J. Heindel, T. Bed Height and Partikel Density Effects on Fluidized bed Hydrodynamic. Chemical Engineering Science. 2011; 66: 3648-3655
- 39. Satrio, Agus M. Fluidisasi. Modul Operasi Laboratorium Teknik Kimia. Cilegon: Universitas Sultan Ageng. 2008.
- 40. Meenal Pore, Daniel J. Holland, Thusara C. Chandrasekera Andrew J. Sederman, John S. Dennis. 2013. Magnetic Resonance Studies of Dead-Zones in Gas-Solid Fluidised Beds. University of Cambridge, Department of Chemical Engineering & Biotechnology, Engineering Conferences International.

- 41. Krittin Korkerd, Chaiwat Soanuch, Pornpote Piumsomboon, and Benjapon Chalermsinsuwan. 2020. Effect of Particle Size Distributions on Minimum Fluidization Velocity with Varying Gas Temperature. International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 11, No. 11.
- 42. Satrio, Agus M. Fluidisasi. Modul Operasi Laboratorium Teknik Kimia. Cilegon: Universitas Sultan Ageng. 2008.
- 43. David Roberto Escudero. 2010. Bed height and material density effects on fluidized bed hydrodynamics. Iowa State University Ames, Iowa.
- 44. Yuni Astuti, Sukmawaty, Rahmat Sabani. 2015. Application Of Wen & Yu and Kunii Model to Determine Minimum Fluidization Velocity And Pressure Drop On Drying Corn Fluidized Bed Dryer. Program Studi Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pangan dan Agroindustri, Universitas Mataram.
- 45. Christian, H., 2008. Modifikasi Sistem Burner. Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- 46. A. Gobin, H. Neau, O. Simonin, J. Llinas, V. Reiling, J. Selo, Numerical simulations of a gas-phase polymerization reactor, in: Proceeding of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Wales, 2001.
- 47. Nyoman, I Suprapta Winaya. 2017. Teknik Fluidisasi. Universitas Udayana, Bali.
- 48. Soria-Verdugo, A., Garc´ıa-Hernando, N., Almendros-Ib'a˜nez, J.A., Ruiz-Rivas, U., 2011. Motion of a large object in a bubbling fluidized bed with a rotating distributor. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 50, 859-868.
- 49. Briens, C.L., Tyagi, A.K., Bergougnou, M.A., 1988. *Pressure drop through multiorifice gas distributors in fluidized bed columns*. Can. J. Chem. Eng. 66, 740-748.