



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 141584

**STUDI PENGARUH VARIASI KETEBALAN  
LAPISAN *BURDEN* MATERIAL PADA  
PENGOLAHAN BIJIH NIKEL LATERIT DI *MINI  
BLAST FURNACE* TERHADAP FENOMENA  
TRANSFER MOMENTUM MENGGUNAKAN  
*FINITE VOLUME METHOD***

RAHMANIA AGUSTIN ASWIN  
NRP. 2713 100 132

Dosen Pembimbing  
Sungging Pintowantoro, Ph.D  
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017





TUGAS AKHIR - TL 141584

**STUDI PENGARUH VARIASI KETEBALAN  
LAPISAN *BURDEN MATERIAL* PADA  
PENGOLAHAN BIJIH NIKEL LATERIT DI *MINI  
BLAST FURNACE* TERHADAP FENOMENA  
TRANSFER MOMENTUM MENGGUNAKAN  
*FINITE VOLUME METHOD***

RAHMANIA AGUSTIN ASWIN  
NRP. 2713 100 132

Dosen Pembimbing  
Sungging Pintowantoro, Ph.D  
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



FINAL PROJECT - TL141584

**STUDY OF THE EFFECT OF VARIATION OF  
BURDEN LAYER THICKNESS IN NICKEL  
LATERITE EXTRACTION IN MINI BLAST  
FURNACE TOWARD MOMENTUM  
TRANSFER PHENOMENON USING FINITE  
VOLUME METHOD**

RAHMANIA AGUSTIN ASWIN  
NRP. 2713 100 132

Advisor  
Sungging Pintowantoro, Ph.D  
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D

DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**STUDI PENGARUH VARIASI KETEBALAN LAPISAN  
BURDEN MATERIAL PADA PENGOLAHAN BIJIH NIKEL  
LATERIT DI MINI BLAST FURNACE TERHADAP  
FENOMENA TRANSFER MOMENTUM  
MENGUNAKAN *FINITE VOLUME METHOD***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Metalurgi Ekstraksi  
Program Studi S-1 Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :  
**RAHMANIA AGUSTIN ASWIN**  
NRP. 2713 100 132

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Sunggung Pintowantoro, Ph.D..... (Pembimbing I)

Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D..... (Pembimbing II)



*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

**STUDI PENGARUH VARIASI KETEBALAN LAPISAN  
BURDEN MATERIAL PADA PENGOLAHAN BIJIH NIKEL  
LATERIT DI *MINI BLAST FURNACE* TERHADAP  
FENOMENA TRANSFER MOMENTUM  
MENGUNAKAN *FINITE VOLUME METHOD***

**Nama Mahasiswa** : **Rahmania Agustin Aswin**  
**NRP** : **2713100132**  
**Departemen** : **Teknik Material dan Metalurgi**  
**Dosen Pembimbing** : **Sungging Pintowantoro, Ph.D**  
**Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D**

**Abstrak**

Pengolahan bijih nikel laterit yang menggunakan *mini blast furnace* (MBF), dengan produk akhir *nickel pig iron* (NPI), adalah proses bertemperatur tinggi yang melibatkan susunan bergantian dari material umpan. Perbedaan profil susunan, yang salah satunya berupa ketebalan lapisan material, berpengaruh pada proses di dalam MBF. Pada penelitian ini, studi pengaruh variasi ketebalan lapisan dilakukan untuk mengetahui dampaknya terhadap transfer momentum di dalam MBF, yang berujung pada produktivitas reaktor. Penelitian dilakukan menggunakan *computational fluid dynamic* (CFD) berbasis kontrol volum. MBF Departemen Teknik Material dan Metalurgi (*working volume* 61 m<sup>3</sup>, kapasitas 250 ton laterit per hari) digunakan sebagai model. Terdapat dua jenis simulasi yaitu simulasi satu lapis dan simulasi MBF penuh. Simulasi satu lapis menunjukkan hubungan variasi ketebalan, kecepatan aliran gas, dan *pressure drop*. Simulasi MBF penuh menggambarkan dampak perubahan transfer momentum terhadap keseluruhan proses ekstraksi, dianalisa melalui literatur. Semakin tebal lapisan material, nilai kecepatan gas cenderung tetap, namun aliran gas semakin terhambat sehingga *pressure drop* meningkat. Lapisan material yang tipis harus didampingi porositas memadai untuk *pressure drop* yang

ideal. Berdasarkan literatur, penggunaan lapisan tipis paling tepat karena *pressure drop* bernilai minimum sehingga produktivitas MBF bernilai maksimum, dengan nilai ketebalan 17 cm untuk batubara, 20 cm untuk laterit, dan 12 cm untuk dolomit.

**Kata kunci:** *layer thickness*, kecepatan gas, *pressure drop*, produktivitas *furnace*, transfer momentum

**STUDY OF THE EFFECT OF VARIATION OF BURDEN  
LAYER THICKNESS IN NICKEL LATERITE  
EXTRACTION IN MINI BLAST FURNACE TOWARD  
MOMENTUM TRANSFER PHENOMENON USING  
FINITE VOLUME METHOD**

**Student Name** : **Rahmania Agustin Aswin**  
**Student ID** : **2713100132**  
**Department** : **Materials and Metallurgical Eng.**  
**Advisor** : **Sungging Pintowantoro, Ph.D**  
**Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D**

**Abstract**

Nickel laterite extraction using mini blast furnace (MBF) produce nickel pig iron (NPI) as the final product, so it undergoes high temperature processing and also involves stacks of burden material creating alternating layered burden. Different profile of the stacks, thickness of layer for example, affects the whole process. In this research, a study about the effect the thickness variation is done regarding its influence toward momentum transfer inside MBF, thus indicating its productivity. Computational fluid dynamic (CFD) based on finite volume method is used. MBF owned by Department of Materials and Metallurgical Engineering (working volume of 61 m<sup>3</sup>, 250 tons of laterite per day) is used as main model. There are two types of simulation: single layer and multilayer simulation. The former shows relation among layer thickness, gas velocity field, and pressure drop. The latter predicts the influence of difference of the relation toward momentum transfer inside the reactor, analyzed based on literature. It is known that the thicker the layer, gas velocity tends to be constant, but its resistance along the bed increases, leading to higher pressure drop. Thinner layer must be accompanied with proper value of porosity for ideal pressure drop. Based on literature, thinner layer fits the best for

productivity because of it produces low pressure drop. Thus the best value of thickness for the MBF is 17 cm for coal, 20 cm for laterite, and 12 cm for dolomite.

**Keyword: layer thickness, gas velocity, pressure drop, furnace productivity, momentum transfer**

## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW. Syukur penulis ucapkan atas selesainya matakuliah Tugas Akhir sebagai kewajiban mahasiswa Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Judul dari tugas akhir penulis adalah “**Studi Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan *Burden Material* pada Pengolahan Bijih Nikel Laterit di *Mini Blast Furnace* terhadap Transfer Momentum menggunakan *Finite Volume Method*”**. Penulis ingin berterima kasih juga kepada pihak-pihak yang telah membantu penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari masih banyak dalam tugas akhir ini yang bisa menjadi ruang diskusi dan pengembangan untuk kedepannya. Saran dan kritik yang membangun dari pembaca sangat terbuka untuk diberikan. Penulis berharap juga tugas akhir ini tidak hanya berhenti sampai di sini dan menjadi manfaat ke depan bagi para pembacanya.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xvii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Tujuan Penelitian .....	4
1.5. Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Pengolahan Bijih Nikel Laterit.....	5
2.2. <i>Mini Blast Furnace</i> .....	7
2.3. Lapisan Material dan Medan Aliran Gas .....	9
2.4. Dinamika Fluida di <i>Blast Furnace</i> .....	15
2.5. <i>Computational Fluid Dynamic</i> .....	18
2.6. <i>Finite Volume Method</i> .....	25
2.7. Permodelan CFD <i>Blast Furnace</i> .....	27
2.8. Penelitian Sebelumnya .....	29
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1. Diagram Alir Penelitian .....	33
3.2. Prosedur Penelitian.....	33
3.3. Peralatan Penelitian.....	34
3.4. Geometri dan <i>Grid System</i> .....	38
3.4.1. Geometri <i>Single Layer</i> .....	39
3.4.2. Geometri <i>Multilayer</i> .....	40
3.4.3. <i>Boundary Condition</i> dan <i>Grid System</i> .....	41
3.5. Pengaturan Solver .....	45
3.5.1. <i>Model Setup</i> .....	45

3.5.2. <i>Solution Method</i> .....	52
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1. Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan <i>Burden Material</i> terhadap Kecepatan Gas .....	55
4.1.1. Vektor Kecepatan <i>Layer</i> Batubara .....	55
4.1.2. Vektor Kecepatan <i>Layer</i> Laterit .....	57
4.1.3. Vektor Kecepatan <i>Layer</i> Dolomit .....	57
4.1.4. Perbandingan Vektor Kecepatan Antar Jenis Lapisan .....	59
4.2. Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan <i>Burden Material</i> terhadap <i>Pressure Drop</i> .....	64
4.3. Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan <i>Burden Material</i> terhadap Proses dalam MBF.....	67
4.3.1. Distribusi Tekanan pada <i>Tuyere Level</i> .....	69
4.3.2. Distribusi Tekanan pada <i>Shaft</i> .....	73
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1. Kesimpulan .....	79
5.2. Saran.....	79
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>81</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>85</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	<b>101</b>
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	<b>103</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b> Metode Pengolahan Bijih Nikel Laterit .....	6
<b>Gambar 2.2.</b> Zona-zona pada <i>Blast Furnace</i> .....	7
<b>Gambar 2.3.</b> Ukuran <i>Blast Furnace</i> .....	9
<b>Gambar 2.4.</b> <i>Layer Ore</i> dan Kokas .....	10
<b>Gambar 2.5.</b> Pengaruh Ketebalan <i>Layer Ore</i> terhadap Laju Reduksi dan Laju Leleh.....	11
<b>Gambar 2.6.</b> Profil Distribusi Material Umpan.....	12
<b>Gambar 2.7.</b> Rasio <i>Ore</i> dan Kokas Fungsi Radial .....	13
<b>Gambar 2.8.</b> Profil <i>V-Shaped</i> .....	14
<b>Gambar 2.9.</b> <i>Gas Flow</i> melalui <i>Layer</i> .....	15
<b>Gambar 2.10.</b> Kode-kode CFD .....	19
<b>Gambar 2.11</b> Skema Perbandingan.....	21
<b>Gambar 2.12.</b> Jenis <i>Mesh</i> .....	24
<b>Gambar 2.13.</b> Kontrol Volum untuk Objek 2D .....	26
<b>Gambar 3.1.</b> Diagram Alir Penelitian .....	37
<b>Gambar 3.2.</b> Geometri MBF 2D .....	38
<b>Gambar 3.3.</b> Geometri MBF 2D <i>Single Layer</i> .....	39
<b>Gambar 3.4.</b> Geometri MBF 2D Penuh .....	40
<b>Gambar 3.5.</b> <i>Global Grid System</i> dan <i>Boundary Condition</i> .....	42
<b>Gambar 3.6.</b> <i>Grid System</i> untuk <i>Single Layer</i> .....	43
<b>Gambar 3.7.</b> <i>Grid System</i> untuk <i>Multilayer</i> .....	44
<b>Gambar 4.1.</b> Distribusi Vektor Kecepatan <i>Layer</i> Batubara .....	56
<b>Gambar 4.2.</b> Distribusi Vektor Kecepatan <i>Layer</i> Laterit.....	58
<b>Gambar 4.3.</b> Distribusi Vektor Kecepatan <i>Layer</i> Dolomit .....	60
<b>Gambar 4.4.</b> Perbandingan Kecepatan Tiap <i>Layer</i> .....	63
<b>Gambar 4.5.</b> <i>Pressure Drop</i> Variasi Ketebalan <i>Single Layer</i> ....	64
<b>Gambar 4.6.</b> Hubungan Porositas, Kecepatan Gas, dan <i>Pressure Drop</i> untuk Ketebalan Lapisan 1x.....	66
<b>Gambar 4.7.</b> Distribusi Tekanan <i>Layer</i> Batubara .....	68
<b>Gambar 4.8.</b> Distribusi Tekanan <i>Layer</i> Laterit .....	70
<b>Gambar 4.9.</b> Distribusi Tekanan <i>Layer</i> Dolomit.....	72
<b>Gambar 4.10.</b> Distribusi Tekanan MBF <i>Multilayer</i> .....	74
<b>Gambar 4.11.</b> Distribusi Tekanan <i>Tuyere Level</i> .....	75

<b>Gambar 4.12.</b> <i>Pressure Drop</i> pada <i>Tuyere Level</i> .....	75
<b>Gambar 4.13.</b> Grafik <i>Pressure Drop</i> .....	76
<b>Gambar 4.14.</b> Perbesaran Grafik <i>Pressure Drop</i> .....	78

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Penelitian Sebelumnya.....	29
<b>Tabel 3.1.</b> <i>Model dan Solution Setup</i> .....	53
<b>Tabel 3.2.</b> Komponen dan Properti Fasa.....	54

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Bijih nikel laterit adalah sumber utama dari logam nikel. Terdapat 3 jenis metode dalam pengolahan bijih nikel laterit yaitu pirometalurgi yang menggunakan *furnace*, hidrometalurgi yang menggunakan pelarut, dan gabungan dari pirometalurgi dan hidrometalurgi (Yildirim, et al., 2013). Proses pirometalurgi bijih nikel laterit secara konvensional diawali dengan kalsinasi bijih di *rotary kiln*. Kemudian, bersama sumber karbon seperti batubara atau kokas, proses berlanjut ke *smelting* menggunakan *electric arc furnace* dengan temperatur kerja 1600°C untuk menghasilkan feronikel berkualitas tinggi (Dalvi, et al., 2004). Proses yang relatif baru secara industri dikembangkan oleh China menggunakan *mini blast furnace* (MBF) yang menghasilkan ferronikel kualitas rendah, diistilahkan sebagai *nickel pig iron* (NPI). MBF adalah *blast furnace* dengan *working volume* yang lebih kecil (~300 m<sup>3</sup>). Laterit dengan kadar Fe tinggi yang telah mengalami proses aglomerasi, bersama dengan batubara atau kokas dan flux, mengalami proses *smelting* dengan temperatur kerja yang bisa serendah 700°C. Proses ini diamati lebih bertahan sesuai kondisi pasar (von Kruger, et al., 2010).

Aglomerat, batubara atau kokas, dan flux disusun berlapis secara bergantian membentuk profil *alternating layered burden*. Tiap lapisan untuk masing-masing jenis *burden*, susunan antar partikelnya menyisakan celah-celah kosong. Persebarannya berperan sebagai jalur untuk aliran gas panas kaya oksigen yang diinjeksi ke dalam MBF, agar dapat membakar hidrokarbon dan menghasilkan gas yang mereduksi ikatan oksigen yang terdapat di *ore* (Geerdes, et al., 2009). Namun, karena tiap jenis *burden* memiliki ciri khas dalam diameter dan bentuk partikel, celah yang terbentuk tiap lapisan mengalami perbedaan yang kemudian, membentuk jalur yang berubah-ubah untuk aliran gas. Jalur yang terbentuk dari celah tersebut dinamakan porositas dan



perubahannya menggambarkan resistansi, diistilahkan sebagai permeabilitas. Otomatis, untuk memperkecil resistansi, perubahan porositas dari satu lapisan ke lapisan lainnya dijaga sekecil mungkin, menuju nilai homogen. Membentuk lapisan dengan porositas yang cukup besar untuk membentuk jalur aliran gas yang lancar juga dibutuhkan. Karena, dengan memperkecil resistansi, disipasi energi atau energi yang terbuang dari gas sebagai hasil usahanya tetap mengalir meski terdapat susunan hambatan di sepanjang ketinggian MBF akan berkurang. Disipasi energi tersebut terjadi karena adanya transfer momentum antara aliran gas dengan material padat dari *burden*. Transfer momentum merupakan salah satu indikator evaluasi makro penentuan efektif atau tidaknya sebuah *blast furnace*, dan dinyatakan dengan istilah *pressure drop* (Biswas, 1981). Besar atau kecilnya nilai *pressure drop* berpengaruh besar pada penggunaan oksigen di gas panas yang berujung pada produktivitas reaktor (Geerdes, et al., 2009).

Porositas sebagai faktor utama yang berpengaruh pada *pressure drop* ditentukan oleh dua hal yaitu properti fisik dan mekanik material umpan dan struktur atau susunan partikel. Properti fisik dan mekanik material berupa bentuk partikel, ukuran partikel, densitas partikel, dan kekuatan mekanik partikel terhadap abrasi dan pembebanan (Biswas, 1981). Struktur atau susunan partikel berupa *particle size range* dan profil *burden*. Porositas homogen didapatkan dengan mengecilkan selisih ukuran partikel penyusun *burden material*. Hal tersebut dapat dicapai melalui *crushing* atau *grinding*, dengan asumsi kekuatan mekanik partikel dapat menjaga fisik partikelnya. Porositas homogen meminimumkan nilai *pressure drop* (Biswas, 1981). Profil *burden* dihasilkan sesuai *charging system* yang digunakan, sehingga berhubungan dengan teknologi tambahan. Berdasarkan penelitian sebelumnya (Natsui, et al., 2015), perubahan struktur partikel mengubah nilai *pressure drop*, yang diasosiasikan dengan perubahan nilai porositas yang disebabkan oleh perubahan ketebalan lapisan *burden material*. Sehingga penambahan ketebalan lapisan berdampak pada peningkatan *pressure drop*.



---

Fenomena transfer yaitu transfer momentum, panas, dan massa atau spesies adalah kondisi dalam *blast furnace*. Sehingga seiring berkembangnya teknologi, penggunaan simulasi komputer yang menghasilkan data non-empiris semakin marak digunakan untuk mempelajari kondisi dalam tersebut karena usaha yang digunakan tidak sebesar jika dibandingkan dengan terjun langsung ke lapangan untuk mendapatkan data empiris. Cabang simulasi komputer yang menjelaskan fenomena transfer akibat dinamika fluida dinamakan *computational fluid dynamics* (CFD). Terdapat banyak perangkat lunak pengolah CFD dari segi bahasa pemrograman dan *numerical solver* yang digunakan. Bahasa yang digunakan dapat berupa FORTRAN atau C. Terdapat tiga kode *numerical solver* dan salah satunya berbasis kontrol volum, disebut *finite volume method* (FVM). FVM lebih sering digunakan karena integrasi langsung secara blok volume dinilai lebih mudah untuk memahami algoritma numerik dari prinsip konservasi fenomena transfer (Patel, 2010; Ferziger & Peric, 2002).

Pada tugas akhir ini, dilakukan studi pengaruh variasi ketebalan lapisan *burden material* pada pengolahan bijih nikel laterit di MBF menggunakan FVM. Variabel ketebalan yang digunakan dihitung berdasarkan perhitungan neraca massa. MBF yang digunakan sebagai model simulasi adalah milik Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS, dengan *working volume* 61 m<sup>3</sup> dan kapasitas 250 ton *ore* per hari. Jenis material umpan untuk MBF tersebut adalah *nickel ore* laterit, batubara, fluks dolomit. Pengaruh variasi ketebalan diteliti dampaknya terhadap komponen penting transfer momentum, serta dianalisa pengaruhnya pada proses MBF.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang diajukan dalam pemodelan ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah pengaruh variasi ketebalan lapisan material umpan terhadap kecepatan aliran gas?



2. Bagaimanakah pengaruh variasi ketebalan lapisan material umpan terhadap *pressure drop*?
3. Berapakah ketebalan lapisan yang optimal dari variasi tersebut dari segi transfer momentum?

### **1.3 Batasan Masalah**

Berikut adalah asumsi dan batasan yang digunakan untuk menyederhanakan kalkulasi:

1. Keadaan *steady state*
2. Struktur *layer* diatur sebagai *porous media* sebelum *softening* dan diasumsikan *fixed bed*
3. Proses dianggap terjadi dalam keadaan isothermal, isotropik, dan tidak terjadi transfer spesies kimia

### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari pemodelan ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa pengaruh variasi ketebalan lapisan material umpan terhadap kecepatan aliran gas.
2. Menganalisa pengaruh variasi ketebalan lapisan material umpan terhadap *pressure drop*.
3. Menganalisa ketebalan lapisan yang optimal untuk proses dari segi transfer momentum.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Pengetahuan mengenai dampak variasi ketebalan terhadap transfer momentum dalam produksi NPI dapat memberikan input untuk optimasi proses MBF ke depannya, baik secara praktikal maupun untuk studi lebih lanjut.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pengolahan Bijih Nikel Laterit

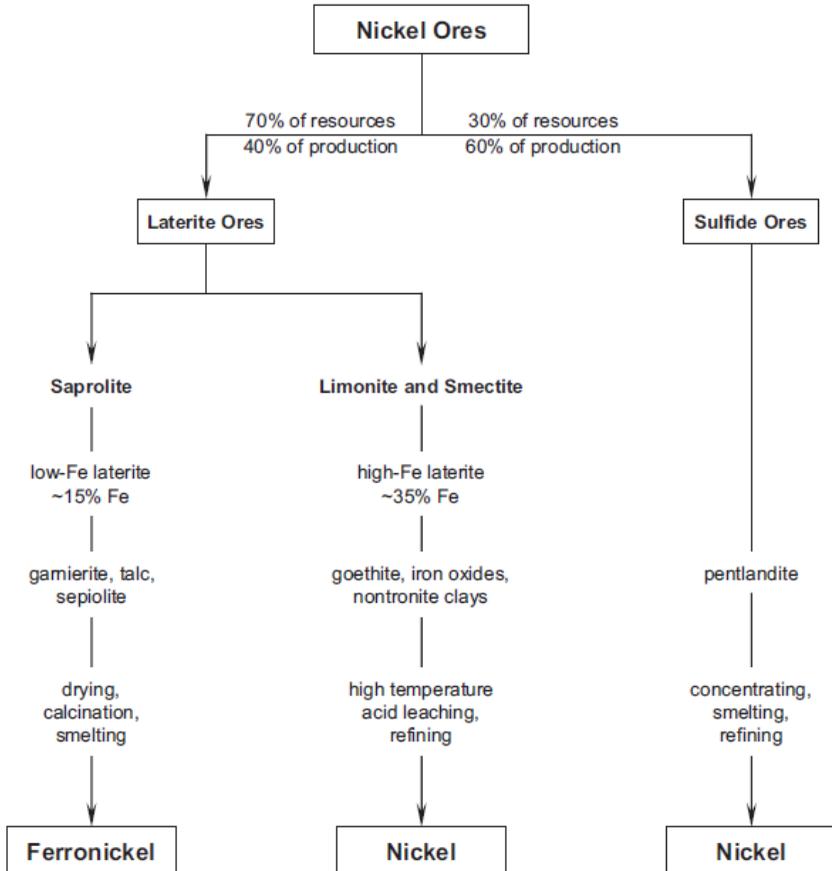
Laterit ditemukan paling banyak di daerah tropis seperti Indonesia, Filipina, dan Kuba, dan ditambang untuk mendapatkan nikel dan kobalt. Laterit banyak terdapat di permukaan tanah dan hanya ditambang apabila kadar nikelnya melebihi 1.3%. menggunakan metode *surface-mining*.

Gambar 2.1 menunjukkan pengolahan bijih nikel laterit. Ada dua cara utama untuk memproses laterit: *smelting* untuk menghasilkan feronikel, dan *leaching* dan *refining* untuk menghasilkan nikel murni. Cara yang tepat dilakukan berdasarkan tipe *ore*-nya. Untuk *ore* jenis limonit dan smectice dengan kandungan Fe yang cukup tinggi, melalui *smelting* adalah pilihan yang mahal sehingga dibandingkan dengan *leaching* dan *refining*. Begitupula dengan *ore* saprolit yang mengandung MgO cukup banyak, *smelting* merupakan pilihan yang lebih tepat dibanding *leaching* dan *refining*. Sebelum *ore* diproses melalui salah satu alternatif proses tersebut, proses *upgrading* diaplikasikan untuk mereduksi jumlah *ore* yang tidak dibutuhkan. *Ore* yang terlalu keras seperti batu dihancurkan melalui proses *crushing*, *grinding*, dan *screening*. Sehingga, *ore* yang masuk ke proses adalah yang kandungan nikelnya benar-benar menguntungkan.

Ada satu alternatif lain yang dapat digunakan untuk memproses laterit, yaitu menggunakan *blast furnace*. Hasilnya adalah *Nickel Pig Iron* (NPI), sebuah paduan feronikel dengan Ni yang lebih rendah. NPI dimanfaatkan sebagai bahan dasar manufaktur *stainless steel* dan baja paduan berkualitas tinggi (kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan korosi atau cuaca, dan sifat mampu las yang baik, bahkan mampu memberikan sifat kriogenik atau ketahanan untuk menghadapi temperatur sangat rendah). NPI dihasilkan dari laterit sinter yang dileburkan di dalam *blast furnace* dengan *working volume* berkisar 80 – 220 m<sup>3</sup>. Selain laterit sinter, dimasukkan juga kokas sebagai reduktor dan bahan bakar dan



kapur sebagai *flux*. Teknologi produksi NPI menggunakan *blast furnace* ini pertama kali dilakukan oleh China secara komersil pada tahun 2006 (Nurjaman, et al., 2016).

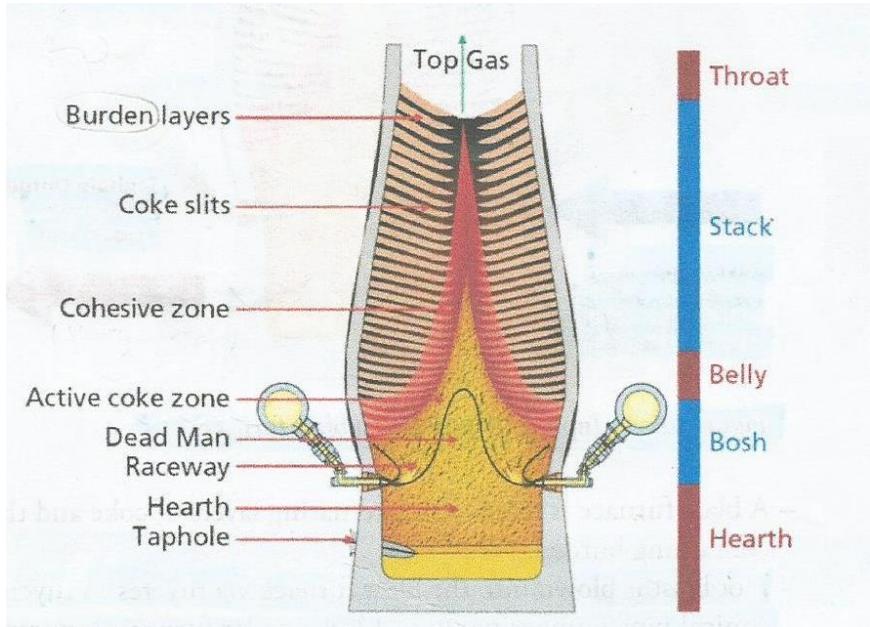


**Gambar 2.1** Metode Pengolahan Bijih Nikel Laterit  
(Crundwell, 2011)



## 2.2 *Mini Blast Furnace*

*Mini Blast Furnace* (MBF) memiliki konsep kerja yang sama dengan *Blast Furnace*. Hanya saja, kapasitas *working volume*-nya lebih kecil yaitu maksimum 350 m<sup>3</sup>. Umumnya *blast furnace* memiliki bentuk yang khas, hampir mirip kerucut. Bagian-bagian penting dalam *blast furnace* ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



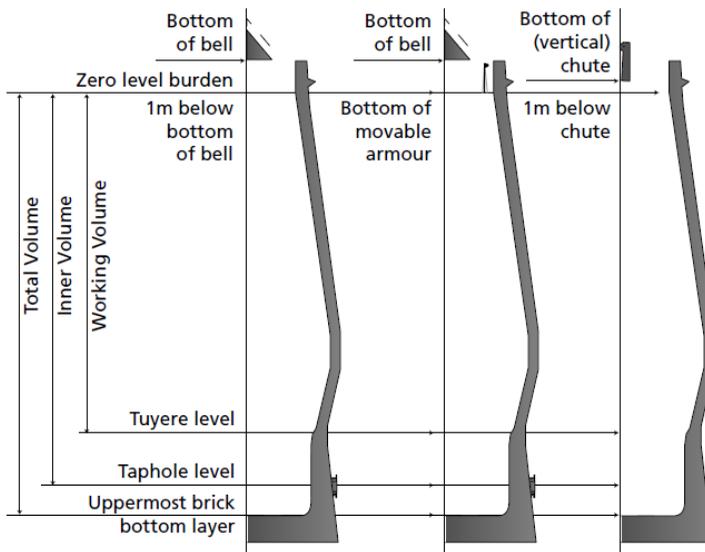
**Gambar 2.2** Zona-zona pada *Blast Furnace*  
(Gerdes, et al., 2009)

- *Throat* : Bagian permukaan *burden*
- *Stack* : *Ore* dipanaskan dan proses reduksi dimulai
- *Belly* : Bagian yang sejajar dengan *bosh*
- *Bosh* : Bagian di mana proses reduksi telah selesai dan *ore* meleleh
- *Hearth* : *Molten metal* dikumpulkan untuk selanjutnya dikeluarkan melalui *taphole*



Bagian-bagian penting tersebut apabila digeneralisasikan berdasarkan jenis reaksi yang dominan terjadi, maka dapat dibagi menjadi 3 zona yaitu zona bawah, zona tengah, dan zona atas. (A.K Biswas, 1981). Zona bawah atau *melting zone* merupakan zona terjadinya proses *melting* dengan temperatur yang mencapai temperatur leleh. Zona ini terbentang mulai dari tuyere hingga 3-5 meter di atasnya. Selain itu, di zona ini juga terdapat *raceaway* di mana terjadi reaksi pembakaran (reaksi *combustion*) secara aktif. Zona tengah atau *thermal reserved zone* merupakan zona terjadinya interaksi antara *solid* dan gas karena temperatur keduanya hampir sama yaitu sekitar 800 hingga 1000 derajat Celcius. Zona ini mengisi 50%-60% volume total *blast furnace*. Di zona ini terjadi reaksi *indirect reduction* oleh gas reduktor. Zona atas atau *preheating zone* merupakan zona reaksi disosiasi dan dekomposisi akibat pemanasan. Temperatur maksimal dari zona ini adalah 800 derajat Celcius. Material umpan dimasukkan ke dalam *blast furnace* mengisi tungku dari akhir bagian *throat* hingga awal sebelum masuk bagian *hearth*, yaitu bagian *stack*, *belly*, dan *bosh*. Ketiga bagian ini, bersamaan dengan *throat*, disebut dengan *shaft*.

Gambar 2.3 menunjukkan ukuran *blast furnace*. Ukuran *blast furnace* dinyatakan dalam diameter *hearth* atau *inner volume* atau *working volume*. *Working volume* adalah volum tungku yang tersedia untuk proses reduksi, yaitu ruang yang terbentuk antara *tuyere level* hingga puncak susunan *burden material*.



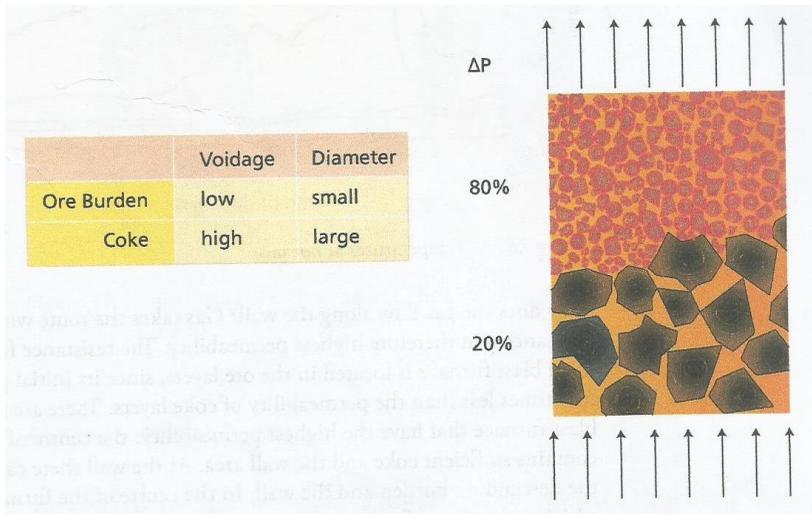
**Gambar 2.3** Ukuran *Blast Furnace*  
(Geerdes, et al., 2009)

### 2.3 Lapisan Material dan Medan Aliran Gas

Gambar 2.4 menunjukkan susunan partikel membentuk *layer*, sebagai contoh adalah kokas dan *ore*. Dalam proses memasukkan material ke dalam sebuah *blast furnace* melalui *charging system*, dihasilkan profil susunan bergantian antara *ore* dan kokas dengan massa tertentu membentuk lapisan *ore* dan lapisan kokas. Masing-masing lapisan material memiliki ketebalan tertentu. Di setiap lapisan, susunan material umpun tidaklah padat, melainkan terdapat rongga-rongga kosong antar partikel material. Rongga-rongga kosong yang hanya bisa dilewati gas panas ini disebut dengan porositas, yang menentukan sifat penting lapisan material yaitu permeabilitas terhadap gas (*voidage*). Sifat material yang berbeda menghasilkan sifat lapisan yang berbeda. Lapisan kokas dengan ukuran partikel kasar bersifat sangat permeabel



terhadap gas. Lapisan *ore* dengan ukuran partikel lebih halus memiliki resistansi tinggi terhadap yang gas dan menjadi impermeabel saat meleleh.



**Gambar 2.4** Layer Ore dan Kokas  
(Geerdes, et al., 2009)

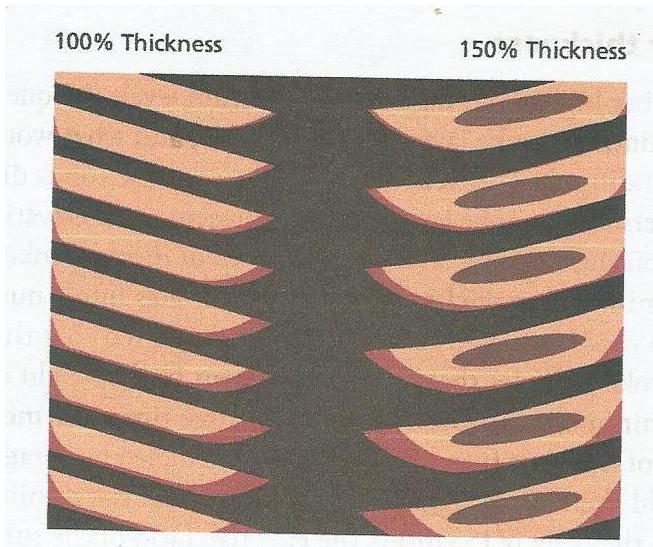
Gas masuk melalui tuyere dengan laju  $6000 - 8000 \text{ m}^3/\text{min}$  sehingga gas dengan kecepatan berkisar  $2 - 20 \text{ m/s}$  atau lebih (bergantung pada porositas dan diameter partikel material penyusun) bergerak ke atas melalui lapisan-lapisan material. Secara teori, ketebalan minimum lapisan kokas dinyatakan dalam jumlah partikel kokas. Untuk permeabilitas gas yang baik, ketebalan minimum lapisan kokas adalah tiga kalinya rata-rata ukuran kokas yang dimasukkan ke bagian *belly*. Dengan permeabilitas yang baik, gas panas yang dihasilkan di raceaway didistribusikan melalui lapisan kokas menuju lapisan *ore*. Di lapisan ini, 80% resistansi gas terjadi. Selama resistansi terjadi, gas dan *ore* mengalami kontak dan difusi sehingga proses reduksi



terjadi dan logam cair dihasilkan. Oleh karena itu, proses kontak ini sangat penting dan untuk mengoptimalkannya lapisan *ore* harus sangat permeabel. Permeabilitas lapisan *ore* dipengaruhi jumlah partikel halus. Jumlah partikel halus dipengaruhi oleh:

- Efisiensi *screening*
- Degradasi fisik saat transportasi dan *charging*
- Profil distribusi material umpan
- Degradasi material saat temperatur rendah

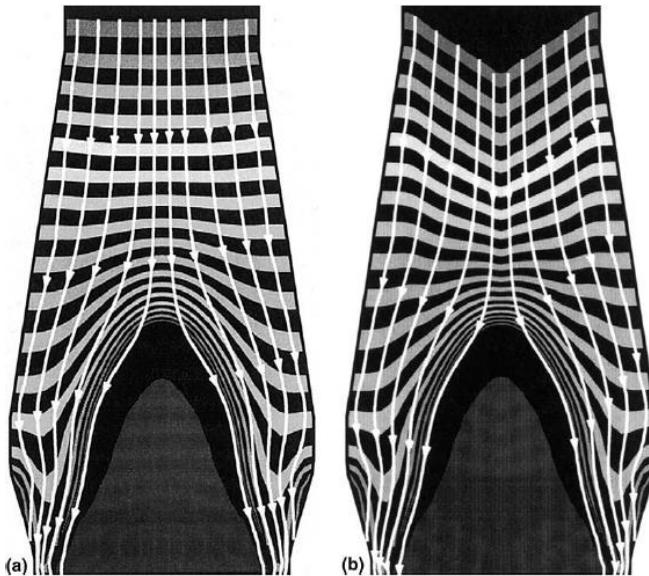
Bagian *blast furnace* di mana proses reduksi terjadi disebut *granular zone*, sedangkan di mana dihasilkannya logam cair disebut *cohesive zone*. Dua zona ini menjadi pertimbangan utama dalam menentukan ketebalan lapisan *ore*. Lapisan yang terlalu tebal menghambat laju reduksi di *granular zone* dan laju leleh di *cohesive zone*. Gambar 2.5 adalah ilustrasinya.



**Gambar 2.5** Pengaruh Ketebalan *Layer Ore* Terhadap Laju Reduksi dan Laju Leleh (Geerdes, et al., 2009)



Profil distribusi material umpan adalah salah satu poin yang mempengaruhi permeabilitas lapisan. Ada dua jenis profil distribusi yang dihasilkan *charging system* yaitu profil *uniform* dan profil *V-Shaped*. Secara makro digambarkan oleh Gambar 2.6.

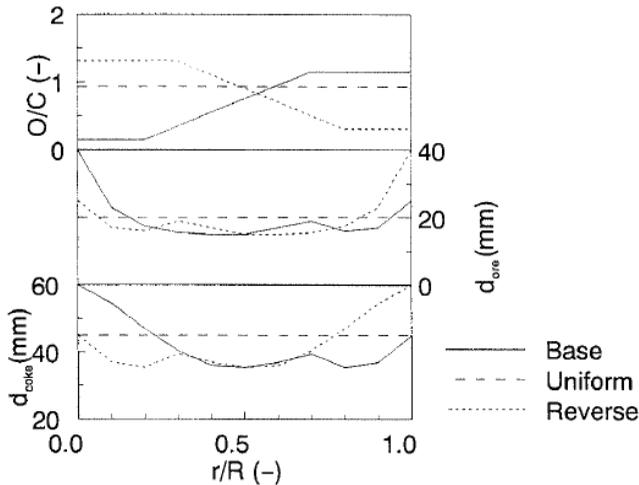


**Gambar 2.6** Profil Distribusi Material Umpan

(a) *Profil Uniform*. (b) *Profil V-Shaped*

(Zhang, et al., 2002)

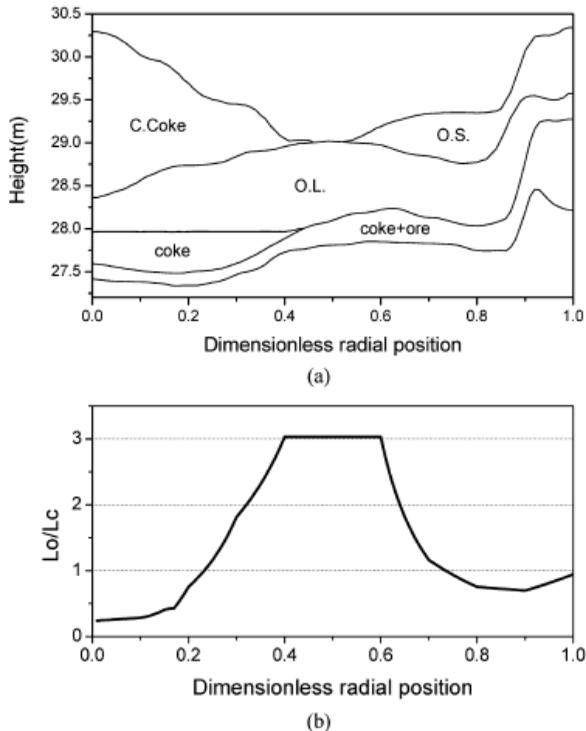
Perbedaan kedua profil terletak di rasio jumlah kokas terhadap *ore* sebagai fungsi radius *blast furnace*. Dari Gambar 2.7, profil *uniform* digambarkan dengan garis datar tebal putus-putus. Jumlah kokas dan *ore* memiliki rasio 1:1 di sepanjang radius *blast furnace*. Diameter partikel yang digunakan juga memiliki keseragaman.



**Gambar 2.7** Rasio *Ore* dan *Kokas* Fungsi Radial  
(Zhang, et al., 2002)

Gambar 2.8 adalah profil *V-Shaped* di mana rasio jumlah kokas dan *ore* sebagai fungsi radial tidaklah sama. Jumlah kokas lebih banyak ditengah dan ada sebagian kecil yang dicampur dengan *ore*. Tipe *ore* yang digunakan bermacam-macam mulai dari bongkahan hingga partikel halus (5-10 mm). Profil ini adalah profil umum yang digunakan pada blast furnace ukuran besar.

Kedua jenis profil disusun sesuai dengan permeabilitas terhadap gas yang merupakan kriteria dasar lapisan material. Medan aliran gas yang dihasilkan profil *uniform* lebih homogen. Medan aliran gas profil *V-Shaped* beragam karena susunan kokas dan *ore* yang berpola. Sejumlah besar kokas di tengah dan sejumlah kecil kokas di dinding yang sudah bercampur dengan ore diharapkan membentuk medan gas yang stabil dari bagian tengah *furnace* hingga dinding.

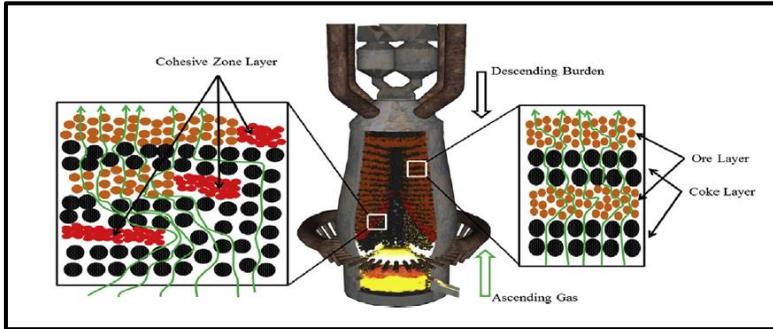


**Gambar 2.8** Profil *V-Shaped*  
(Yang, et al., 2010)

Gambar 2.9 menunjukkan aliran gas melalui *layer* kokas dan *ore*. Lapisan-lapisan material dari kedua jenis profil tersebut bertahan hingga tercapainya temperatur *softening* dan *melting* sebagai hasil reduksi ore menjadi logam cair. Logam cair mengalir ke dasar tungku bersamaan dengan gas panas yang secara kontinu dialirkan ke atas. Inilah yang diistilahkan sebagai *counter current flow*. Ketika hal tersebut terjadi, medan aliran gas berubah drastis terutama di zona *softening* dan *melting*. Perubahan di zona ini



berpengaruh terhadap bagaimana gas mengalir di zona di atasnya, yaitu lapisan-lapisan sisa yang masih berupa fasa *solid*.



Gambar 2.9 Gas Flow melalui Layer  
(Fu, et al., 2014)

#### 2.4 Dinamika Fluida di Blast Furnace

Studi penting yang harus dilakukan berkaitan pemahaman mengenai *blast furnace* adalah dari segi dinamika fluida, transfer panas dan massa, dan kinetika reaksi. Dinamika fluida *blast furnace* adalah studi mengenai aliran mekanik gas yang mengalami resistansi saat mengalir normal terhadap gravitasi.

*Blast furnace* dengan susunan lapisan material adalah gambaran kompleks dari tabung padat (*packed column*). Gas yang mengalir di dalamnya mengalami resistansi di sepanjang ketinggian tabung sehingga kehilangan sejumlah energi. Energi yang hilang ini dinamakan sebagai *pressure drop*. Indikator ini penting dalam evaluasi proses *blast furnace* secara makro. *Pressure drop* di dalam *blast furnace* terjadi karena 2 hal yaitu *viscous loss* atau *permeability loss* dan *kinetic loss* atau *inertial loss*. Energi yang hilang selama aliran gas masih laminar adalah *viscous* atau *permeability loss*. Besarannya sebanding terhadap kenaikan kecepatan gas. Energi yang hilang ketika aliran gas menjadi turbulen disebut *kinetic* atau *inertial loss*. Besarannya sebanding dengan hasil kali densitas gas dan kuadrat kecepatan



gas. Aliran laminar atau turbulen ditentukan oleh bilangan Reynold gas. Untuk menyatakan *pressure loss* secara umum dan melingkupi bilangan Reynold yang beragam, digunakan persamaan Ergun seperti berikut ini (Biswas, 1981).

$$\frac{\Delta P}{H} = \psi \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho}{d} \cdot v^2 \quad (2.1)$$

$$\psi = 1.75 + \frac{150}{Re'} \quad (2.2)$$

$$Re' = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu (1 - \varepsilon)} \quad (2.3)$$

dengan:

- $\Delta P$  : *pressure loss*
- $H$  : ketinggian *blast furnace*
- $\psi$  : *friction factor*
- $\varepsilon$  : porositas lapisan material umpan
- $\rho$  : densitas gas
- $d$  : diameter rerata partikel
- $v$  : kecepatan gas dalam tabung kosong (*superficial gas velocity*)
- $\mu$  : viskositas gas

Terdapat perbedaan sifat material di tiap lapisan sehingga untuk *alternating layered burden*, persamaan di atas diterapkan untuk masing-masing lapisan. Penjumlahan *pressure loss* tiap material menjadi nilai *pressure drop* total dalam *blast furnace*.

*Pressure drop* di dalam *blast furnace* diharapkan serendah mungkin sehingga dihasilkan medan aliran gas yang seragam dan tanpa hambatan. Sesuai dengan persamaan tersebut, kedua tujuan tadi dapat dicapai dengan (Geerdes, et al., 2009):

- Memperbesar nilai porositas atau menghomogenkannya



- Meningkatkan tekanan rata-rata di tabung
- Memperbesar diameter partikel
- Menurunkan densitas gas
- Menurunkan kecepatan gas

Dalam pengoperasian *blast furnace*, diketahui bahwa *viscous loss* berkontribusi hanya sebesar 2% terhadap *pressure loss* total. Dengan pertimbangan operasional tersebut, Ergun menyederhanakan persamaan di atas dari persamaan umum diferensialnya menjadi (Ergun, 1953):

$$\frac{dP}{dL} = 4.67 \times 10^{-3} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho}{d} \cdot v^2 \quad (2.4)$$

Persamaan tersebut menyatakan pentingnya pengukuran densitas gas, porositas, dan kecepatan gas naik terhadap *pressure drop*. Faktor-faktor yang mempengaruhi indikator-indikator tersebut adalah temperatur gas, komposisi gas, tekanan statis di puncak *blast furnace*, dan luasan aktif *blast furnace* yang dilewati gas. Dengan analisa numerik dari faktor-faktor tersebut, integrasi persamaan diferensial di atas dapat dilakukan dan didapatkan persamaan baru yang menyatakan hubungan *pressure loss* dengan temperatur, kecepatan gas, porositas, dan diameter partikel, sehingga persamaan tersebut lebih mendekati keadaan *blast furnace* yang sebenarnya (Ergun, 1953).

$$\Delta P = \sqrt{P_e^2 + 5.9 \times 10^{-6} \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \cdot \left( \frac{t + 460}{520} \right) \cdot \left( \frac{Q_o}{A_o} \right)^2 \cdot \frac{H}{d}} - P_e \quad (2.5)$$

dengan:

$P_e$  : Tekanan absolut puncak *furnace*

$t$  : Temperatur rata-rata gas dalam Fahrenheit



$Q_o$  : *blast rate*

$A_o$  : Luasan aktif *blast furnace*

Nilai *pressure drop* yang dihasilkan dapat digunakan untuk mengetahui tekanan yang dibutuhkan untuk injeksi *hot blast*, di mana nilainya adalah penjumlahan *pressure drop* dengan tekanan statis puncak *furnace*.

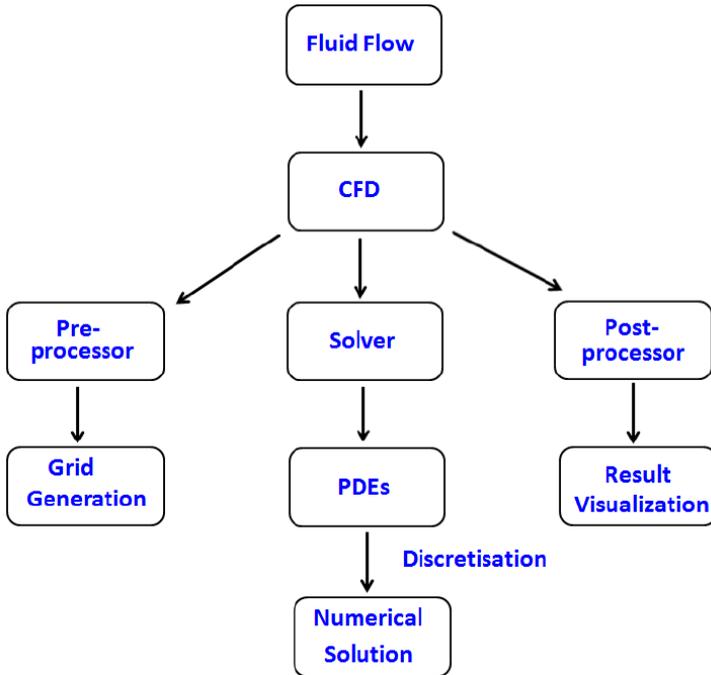
## 2.5 *Computational Fluid Dynamic*

Dinamika fluida adalah ilmu yang mempelajari pergerakan fluida. Terdapat tiga jenis metode pembelajarannya yaitu eksperimental, teoretis, dan numerik. *Computational fluid dynamics* (CFD) adalah metode numerik dalam mempelajari aliran fluida beserta fenomena transfer yang terjadi dengan bantuan simulasi berbasis komputer. Dengan bantuan tersebut, algoritma tertentu digunakan untuk memecahkan masalah fluida dengan mengubah permasalahan fluida dalam bentuk umum menjadi permasalahan yang dapat diselesaikan. Proses pengubahan tersebut disebut sebagai *discretization*. Untuk kemudahan akses algoritma dengan manusia sebagai pengguna, kode-kode CFD dikemas dalam perangkat lunak yang sudah banyak komersil di pasaran. Kode-kode tersebut dikelompokkan menjadi 3 fungsi seperti yang dideskripsikan Gambar 2.10.

- *Pre-processor*

Fungsi ini adalah *platform* untuk memasukkan data-data permasalahan fluida yang ingin dipecahkan. Data-data yang dimaksud adalah:

- *Computational domain*, yaitu geometri objek yang mengalami kalkulasi
- *Spatial discretization* untuk menghasilkan *grid system* atau *mesh*, yaitu geometri objek yang dibagi-bagi menjadi sejumlah sub-domain.
- Properti fluida secara fisika dan kimia
- *Boundary condition*



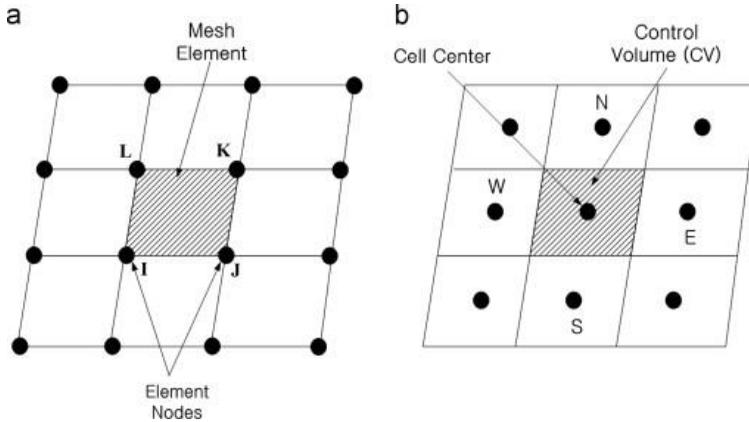
**Gambar 2.10** Kode-kode CFD  
(Patel, 2010)

- *Solver*  
*Solver* memecahkan permasalahan fluida dengan menyelesaikan persamaan-persamaan umum. Persamaan umum tersebut adalah persamaan konservasi berbentuk *partial differential equation* (PDE) yang sulit diselesaikan komputer. Oleh karena itu, persamaan-persamaan tersebut mengalami *equation discretization* yaitu mengubah PDE menjadi sistem aljabar dengan sejumlah variabel yang tidak diketahui nilainya (*unknown variables*). Terdapat 3 metode numerik untuk *equation discretization* yaitu:



- *Finite Difference Method* (FDM)  
FDM menggunakan nodal pada *grid system* sebagai domain komputasi. PDE diselesaikan menggunakan Deret Taylor sehingga dihasilkan satu sistem persamaan aljabar beserta *unknown variables*-nya di tiap-tiap titik.
- *Finite Element Method* (FEM)  
*Grid system* pada FEM dinyatakan sebagai kumpulan elemen-elemen kecil, dan nodal yang tersebar di dalamnya dijadikan domain komputasi. PDE diselesaikan menggunakan interpolasi dan integrasi, dengan menggunakan metode *weighted residual* untuk meminimalisir kesalahan kalkulasi. Hasilnya adalah satu sistem persamaan aljabar beserta *unknown variables*-nya di setiap elemen.
- *Finite Volume Method* (FVM)  
Hampir sama dengan FEM, namun *grid system* dinyatakan sebagai *control volume*. Terdapat 1 *node* yang terletak di pusat *control volume* sebagai domain komputasi utama. PDE diselesaikan dengan integrasi langsung secara volumetrik dari masing-masing *control volume* sehingga dihasilkan satu sistem persamaan aljabar beserta *unknown variables*-nya untuk setiap *control volume*.

Metode yang dianggap mirip adalah FEM dan FVM. Namun melalui uraian sebelumnya, tetap kedua metode tersebut berbeda. Untuk lebih jelas dalam melihat perbedaan antara FEM dan FVM, dapat dilihat pada Gambar 2.11 berikut ini.



**Gambar 2.11** Skema Perbandingan (a) FEM dan (b) FVM  
(Jeong & Seong, 2014)

Dari ketiga jenis metode tersebut, FVM lebih umum digunakan untuk CFD. Integrasi langsung menjadikan kalkulasi lebih mudah dan efisien. Integrasi secara volumetrik dianggap lebih mudah untuk memahami algoritma numerik dari prinsip hukum konservasi.

Selain *equation discretization*, *solver* menyediakan *platform* untuk *temporal discretization*. Platform tersebut memungkinkan penyelesaian PDE sebagai fungsi rentang waktu. Terdapat dua jenis rentang waktu yaitu *transient* atau *time-dependent* dan *steady-state*. Terdapat dua jenis *temporal discretization* yaitu *explicit* dan *implicit*. Perbedaannya terletak di jangkauan rentang waktu yang masuk dalam kalkulasi. Metode *explicit* menggunakan rentang waktu yang lebih pendek sehingga diskretisasi waktu menjadi lebih banyak. Sebaliknya, metode *implicit* menggunakan rentang waktu yang lebih panjang dan diskretisasi waktu yang lebih sedikit. Semakin banyak diskretisasi waktu, semakin lama proses penyelesaian PDE, namun semakin akurat hasil kalkulasinya.



- *Post-processor*  
Fungsi ini memvisualisasikan hasil kalkulasi dalam bentuk grafik, plot, kontur, animasi, atau vektor.

Persamaan umum yang diselesaikan CFD adalah persamaan konservasi (hukum kekekalan). Persamaan tersebut adalah prinsip dasar hukum fisika yang terdiri dari:

- Konservasi massa (persamaan kontinuitas)
- Konservasi momentum (hukum kedua Newton)
- Konservasi energi

Untuk CFD berbasis FVM, persamaan konservasi massa dan konservasi momentum adalah persamaan yang selalu diselesaikan bagaimanapun kondisi fluida-nya. Persamaan konservasi energi dan persamaan yang berkaitan dengan fenomena fisis tertentu hanya diselesaikan apabila ada perintah tambahan. Berikut adalah bentuk umum persamaan konservasi massa dan momentum dinyatakan dalam bentuk vektor (Ferziger & Peric, 2002; Patel, 2010).

$$\frac{d\rho}{dt} + (\nabla\rho v) = S_m \quad (2.6)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g + F \quad (2.7)$$

dengan:

$v$  : vektor kecepatan

$S_m$  : source term untuk perintah tambahan

$p$  : tekanan statis

$\tau$  : tensor, sesuai hukum viskositas Newton

$g$  : gaya gravitasi

$F$  : gaya eksternal yang bekerja pada fluida sesuai

dengan perintah tambahan



Persamaan-persamaan tersebut berlaku valid untuk fluida *compressible* maupun *incompressible* selama fluida termasuk kategori Fluida Newtonian. Gaya tensor adalah transfer momentum yang disebabkan viskositas, dinyatakan secara umum melalui persamaan Navier-Stokes berikut ini (Ferziger & Peric, 2002; Patel, 2010).

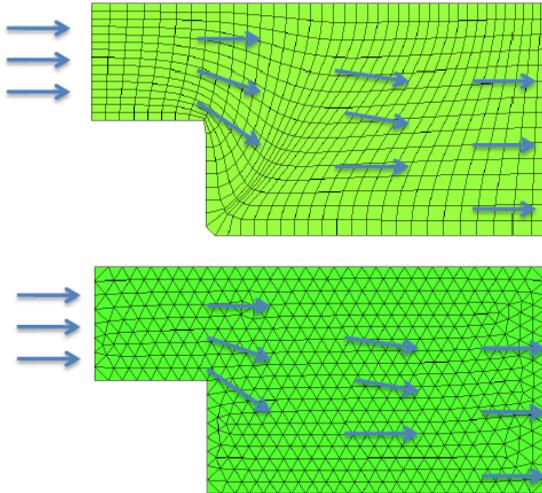
$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dv_y} \quad (2.7)$$

dengan:

$\mu$  : viskositas fluida  
 $v_x$  dan  $v_y$  : kecepatan di koordinat Cartesian

Persamaan Navier-Stokes diturunkan dari aliran laminar fluida di antara 2 bidang datar dengan salah satu bidang bergerak dengan kecepatan tertentu. Namun begitu, persamaan tersebut menjelaskan dinamika fluida baik laminar maupun turbulen.

Untuk menjelaskan fenomena fisis lainnya yang terkait, CFD memiliki algoritma tertentu untuk memasukkan perintah tambahan. Dengan begitu, persamaan umum konservasi menyesuaikan diri dengan situasi permasalahan dan jika diperlukan persamaan tambahan juga ikut diselesaikan. Sebagai contoh, apabila fluida bukan terdiri dari fasa tunggal melainkan multi-fasa, algoritma CFD mengenai aliran multi-fasa harus diperintahkan untuk bekerja.



**Gambar 2.12** Jenis Mesh  
*Structured mesh* (atas) dan *Unstructured mesh* (bawah)  
(LearnCAX, 2015)

Lokasi pada tempat diselesaikannya persamaan-persamaan tersebut disebut *numerical grid* atau *mesh*. Karena, di dalam mesh terdapat sejumlah nodal di mana *unknown variables* hasil *equation discretization* disimpan. Untuk mendapatkan *grid system*, sebuah objek dengan geometri tertentu harus mengalami *spatial discretization*. Terdapat tiga tipe umum *grid system* yaitu *structured mesh*, *multi-block structured mesh*, dan *unstructured mesh*. Gambar 2.11 menunjukkan contoh *structured* dan *unstructured mesh*.

*Structured mesh* disebut juga sebagai *Cartesian mesh*. *Grid system* dibangun berdasarkan koordinat Cartesian sehingga menghasilkan *mesh* dengan bentuk yang teratur. Penggunaan *structured mesh* terbatas hanya untuk geometri sederhana. *Multi-block structured mesh* mengatasi kekurangan tersebut dengan



menciptakan tingkatan domain komputasi yaitu tingkat kasar (*coarse*) dan tingkat halus (*fine*). Dengan begitu, *structured grid* yang dihasilkan tetap memiliki bentuk yang teratur. Skema tingkatan domain komputasi tersebut menjadikan *multi-block structured mesh* lebih sulit dibangun. Oleh karena itu, kebanyakan objek dengan geometri kompleks memiliki *unstructured mesh*. Bentuknya tidak teratur karena *mesh* dibangun bukan berdasarkan koordinat melainkan berdasarkan bentuk objek.

Semua jenis meshing dapat digunakan untuk FDM, FEM, dan FVM namun masing-masing memiliki keunggulan untuk satu jenis *solver*. Contohnya, FVM lebih banyak menggunakan *structured grid* karena dapat mencegah *false diffusion* dalam kalkulasi sehingga memprediksi arah aliran fluida dengan akurat.

## 2.6 *Finite Volume Method*

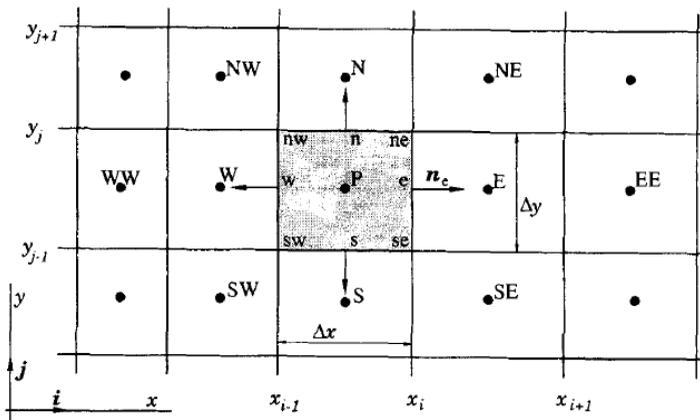
Ciri khas dari *Finite Volume Method* (FVM) adalah digunakannya integrasi persamaan konservasi secara langsung. Persamaan integrasi tersebut diselesaikan di tiap-tiap domain komputasi yang disebut *control volume* (CV). Nodal sebagai pusat kalkulasi terletak di tengah masing-masing CV sehingga mampu merepresentasikan nilai yang tersebar di dalam sel hingga ke *boundary condition*-nya. Dengan begitu, akan didapatkan persamaan integrasi konservasi global yang mewakili seluruh objek yang dimodelkan.

Gambar 2.12 adalah ilustrasi CV untuk objek 2D pada koordinat Cartesian. Satu kotak melambangkan satu CV, disebut juga dengan *cell*. Garis-garis yang membatasi antar *cell* disebut *face*. Titik hitam yang tersebar di tengah masing-masing CV adalah nodal pusat kalkulasi. Arah mata angin yang diwakili huruf kecil melambangkan nodal di titik tengah *face* di *cell* yang diarsir.

Persamaan integrasi di masing-masing nodal CV kemudian diaproksimasi untuk mendapatkan sistem aljabar dengan *unknown variable*-nya. Terdapat dua cara aproksimasi yaitu *Surface Integral* (aproksimasi di tiap *face* dalam 1 *cell* sebagai fungsi *node* CV) dan *Volume Integral* (aproksimasi dilakukan



dalam 1 *cell*). Setelah dihasilkan sistem aljabar, *unknown variables* yang tersimpan di tiap-tiap *node* diselesaikan untuk mendapatkan data numerik. Penyelesaian tersebut membutuhkan data-data yang tidak dimiliki *nodal CV*, namun dimiliki *nodal face*, sehingga untuk mendapatkannya dilakukanlah interpolasi. Terdapat beberapa skema umum yang digunakan untuk interpolasi yaitu *Upwind Interpolation* (UDS), *Linear Interpolation* (CDS), *Quadratic Upwind Interpolation* (QUICK), dan *Higher Order Scheme*. Semuanya adalah metode matematis dengan ketentuan orde bilangan tertentu agar hasil kalkulasi akurat. UDS akurat mulai dari orde 1, namun memiliki kecenderungan error apabila mesh terlalu kasar. CDS menggunakan persamaan linear dua titik sehingga mulai akurat dari orde 2. QUICK menggunakan tiga titik untuk interpolasi menggunakan persamaan hiperbola sehingga mulai akurat dari orde 3. *Higher Order Scheme* baru akurat mulai dari orde 3 atau lebih. Skema dipilih dalam kalkulasi sesuai dengan kondisi fisis untuk mendapatkan error yang kecil tanpa membebani proses komputasi.



**Gambar 2.13** *Control Volume* untuk objek 2D  
(Ferziger & Peric, 2002)



*Unknown variable* yang pasti tersimpan di nodal CV adalah tekanan yang didapat dari persamaan konservasi momentum. Komponennya, yaitu kecepatan, dapat disimpan di nodal CV atau nodal *face*. Hal tersebut dapat diatur dengan memilih penggunaan *staggered arrangement* atau *co-located arrangement*. Kecepatan disimpan di nodal *face* apabila menggunakan *staggered arrangement*. Hal tersebut mengurangi proses interpolasi namun memiliki beban komputasi yang tinggi untuk menyelesaikan persamaan tekanan dan kecepatan secara bersamaan. Kecepatan disimpan di nodal CV bersama dengan tekanan apabila menggunakan *co-located arrangement*. Hal tersebut menuntut jumlah interpolasi yang lebih banyak namun beban komputasi menjadi lebih ringan karena semua variabel memiliki lokasi yang sama. CFD saat ini lebih umum menggunakan *co-located arrangement*.

## 2.7 Permodelan CFD Blast Furnace

CFD untuk blast furnace dikondisikan sebagai aliran multi-fasa. Fasa-fasa umum secara umum terdiri dari gas, solid, dan liquid.

- Fasa gas

Gas adalah fasa yang dominan mengalir di dalam *blast furnace* mulai dari awal operasi hingga *metal tapping*. Sesuai dengan persamaan umum transfer momentum, komponen gas berupa kecepatan aliran dan viskositas berpengaruh terhadap distribusi tekanan di dalam *blast furnace*. Kedua variabel tersebut bernilai tidak konstan sesuai dengan kondisi operasi, sehingga menghasilkan perubahan tekanan atau *pressure drop*. Persamaan Ergun dan Navier-Stokes yang sebelumnya telah dijelaskan dapat mendeskripsikan fenomena ini dengan baik, dan sudah valid secara eksperimental.

- Fasa solid

Secara umum, ada dua metode CFD untuk aliran fasa solid: pendekatan diskrit dan pendekatan kontinu. Pendekatan diskrit, atau umum disebut sebagai *Discrete Element*



*Approach*, mendeskripsikan *solid flow* sebagai kumpulan partikel-partikel tunggal yang bergerak. Sehingga, data yang dihasilkan mendetail namun metode ini memiliki aplikasi yang terbatas karena perhitungan yang tidak efisien. Pendekatan kontinum mendeskripsikan *solid flow* sama seperti *gas flow*, yaitu dalam wujud kontinum.

Pendekatan kontinum untuk *solid flow* dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu dengan *mixed burden* dan dengan *layered burden*. Kedua jenis ditentukan oleh permodelan tambahan berupa permodelan distribusi *burden* (*burden structure prediction model*). Permodelan tambahan ini berada di luar ruang lingkup CFD karena memiliki algoritma khusus namun penggunaannya menjadikan CFD semakin mendekati kondisi *blast furnace* sesungguhnya. Kedua jenis dapat menggunakan prinsip mekanika benda padat atau mekanika fluida dalam perhitungan *solid flow*.

Kalkulasi aliran fasa solid menggunakan mekanika benda padat dilakukan oleh sejumlah peneliti dan hasilnya hanya mampu menghasilkan prediksi memuaskan untuk medan tegangan, tapi tidak untuk medan kecepatan. Kalkulasi menggunakan mekanika fluida terdiri dari empat jenis yaitu *plug flow*, *potential flow*, *kinematic flow*, dan *viscous flow*. Masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. *Plug flow* dan *potential flow* memiliki formulasi sederhana namun masih terlalu sederhana untuk prediksi yang memuaskan. *Kinematic flow* dapat mengatasi kekurangan itu, namun hanya pada sistem dengan geometri sederhana dan *kinematic flow* tidak dapat menunjukkan perbedaan medan kecepatan di *cohesive zone* dan *granular zone*. *Viscous flow* dapat mengatasi kekurangan-kekurangan sebelumnya, namun dengan catatan pengguna harus mengetahui terlebih dahulu profil *cohesive* dan *granular zone* sebelum melakukan perhitungan untuk menentukan *boundary condition* di kedua zona tersebut.



- Fasa *liquid*

Aliran fasa cair yang dimodelkan berupa logam cair hasil reduksi dan *slag*. Ada beberapa model yang digunakan untuk kalkulasi *liquid flow* yaitu *potential flow*, model probabilitas, model probabilitas-kontinuitas, *tube network dynamic model*, dan *force balance model*. Metode yang paling banyak digunakan adalah *force balance model* karena kalkulasi yang efisien serta mampu merepresentasikan fenomena fisis terkait aliran fluida melalui *packed bed*. Apabila dipasangkan dengan *stochastic model*, aliran *liquid* yang menyebar di antara *packed bed* juga dapat dihitung.

## 2.8 Penelitian Sebelumnya

Berikut adalah penelitian terdahulu mengenai CFD untuk *blast furnace*.

**Tabel 2.1** Penelitian Sebelumnya

Peneliti	Tahun	Deskripsi
Natsui et al (Jepang)	2015	Simulasi <i>gas-solid flow</i> pada <i>ironmaking blast furnace</i> dengan variabel susunan partikel (berlapis dan heliks). Fasa kontinum dimodelkan menggunakan FVM. Susunan material dan <i>solid flow</i> dikalkulasi menggunakan metode DEM
Yang et al (Korea)	2009	Simulasi numerik <i>gas-solid phase</i> , distribusi temperatur, dan <i>pressure drop</i> pada <i>blast furnace</i> . Fasa <i>solid</i> dikalkulasi menggunakan <i>potential flow</i> untuk mendapatkan profil material berlapis di seluruh <i>blast furnace</i> . Fasa <i>solid</i> dan gas dimodelkan sebagai kontinum menggunakan FVM



Adema et al (Belanda)	2009	Simulasi <i>gas-solid phase</i> pada <i>ironmaking blast furnace</i> . Fasa gas dianggap kontinum dimodelkan dengan FVM. Susunan material dan <i>solid flow</i> dikalkulasi menggunakan DEM
Fu et al (Amerika)	2014	Simulasi numerik reaksi reduksi besi di <i>blast furnace shaft</i> dengan pendekatan kontinum menggunakan FVM. Memperkenalkan persamaan baru untuk menunjukkan profil lapisan material
Yang et al (Jepang)	2010	Simulasi numerik <i>gas-solid phase</i> dalam <i>blast furnace</i> dengan profil lapisan material. Gas dan <i>solid</i> dimodelkan secara kontinum menggunakan FVM. <i>Solid</i> dikalkulasi menggunakan <i>potential flow</i> untuk mendapatkan profil lapisan material di seluruh <i>blast furnace</i>
Dong et al (Australia)	2009	Simulasi multi-fasa di <i>blast furnace</i> dengan menghitung 4 fasa: gas, solid, fine, liquid. Semuanya dimodelkan secara kontinum. Material di dalam <i>blast furnace</i> dianggap campuran homogen. <i>Solid flow</i> dikalkulasi menggunakan <i>viscous flow</i> dan prediksi <i>cohesive zone</i> yang dihasilkan digambarkan dengan struktur balok



Dong et al (Australia)	2010	Simulasi multi-fasa di <i>blast furnace</i> dengan menghitung 3 fasa: gas, <i>solid</i> , <i>liquid</i> . Semuanya dimodelkan secara kontinum menggunakan FVM. Profil lapisan material didapatkan dari algoritma <i>burden prediction model</i> namun hanya untuk <i>cohesive zone</i> dan alirannya dikalkulasi menggunakan <i>viscous model</i> . Di bagian <i>blast furnace</i> lainnya material umpam dianggap campuran homogen
Zhou et al (China)	2016	Simulasi distribusi temperatur di <i>blast furnace</i> dengan membandingkan struktur berlapis dan tidak. Struktur lapisan material dihitung dengan algoritma <i>burden prediction model</i> . Fasa <i>solid</i> dan gas dimodelkan sebagai kontinum menggunakan FVM
Austin et al (Jepang)	1997	Model matematis 4 fasa di dalam <i>blast furnace</i> : gas, <i>solid</i> , <i>liquid</i> , <i>powder</i> . Semua dimodelkan secara kontinum berbasis FVM. <i>Cohesive zone</i> diprediksi terlebih dahulu kemudian nilainya menjadi <i>boundary condition</i> . Profil lapisan material digambarkan hanya di permukaan <i>blast furnace</i>



*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Diagram Alir Penelitian**

Gambar 3.1 menunjukkan diagram alir penelitian yang dikelompokkan dalam 5 kelompok prosedur penelitian.

#### **3.2 Prosedur Penelitian**

Penelitian dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

- **Pengumpulan data**  
Data yang dikumpulkan adalah sifat fisik material umpan berupa densitas dan viskositas. Densitas didapatkan melalui eksperimen sesuai hukum Archimedes. Viskositas didapatkan dari literatur. Selain data sifat fisik, data operasional MBF dikumpulkan: geometri MBF, kapasitas material umpan MBF per satuan waktu, dan ukuran partikel material umpan yang masuk. Dari data operasional tersebut, perhitungan neraca massa dilakukan untuk mengetahui ketebalan lapisan material dan properti gas *blast furnace* yaitu densitas, viskositas, dan *blast rate*.
- **Pre-processing**  
Hanya setengah bagian dari total geometri MBF yang digambar secara simetris dalam 2D. Perlakuan *face split* diberikan untuk menggambarkan lapisan-lapisan material di dalamnya. Pemberian *boundary condition* diberikan sesuai geometri. Setelah itu, *grid system* dihasilkan. Dengan keadaan tersebut, dihasilkan objek simulasi yang menggambarkan aliran gas (diwakili *grid system*) melalui lapisan material di dalam *blast furnace* (diwakili hasil *face split*).
- **Problem solving**  
*Grid system* diinput ke perangkat lunak CFD berbasis FVM. Sejumlah pengaturan dilakukan berdasarkan batasan masalah dan data yang dikumpulkan dan



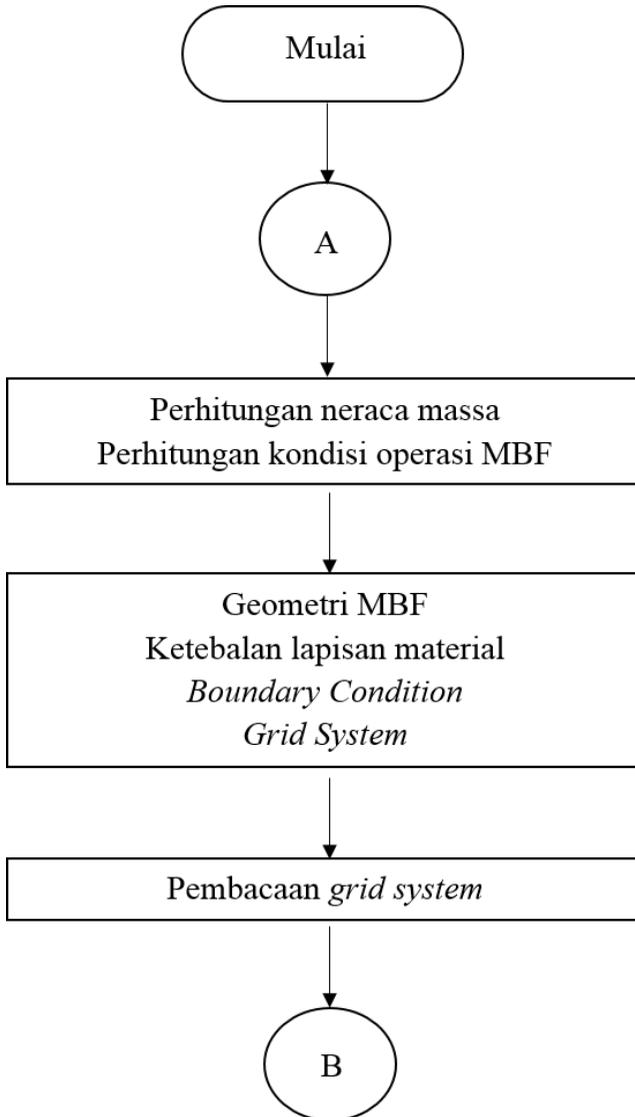
kemudian inialisasi perhitungan dilakukan. Kalkulasi iterasi dilakukan hingga data yang dihasilkan konvergen.

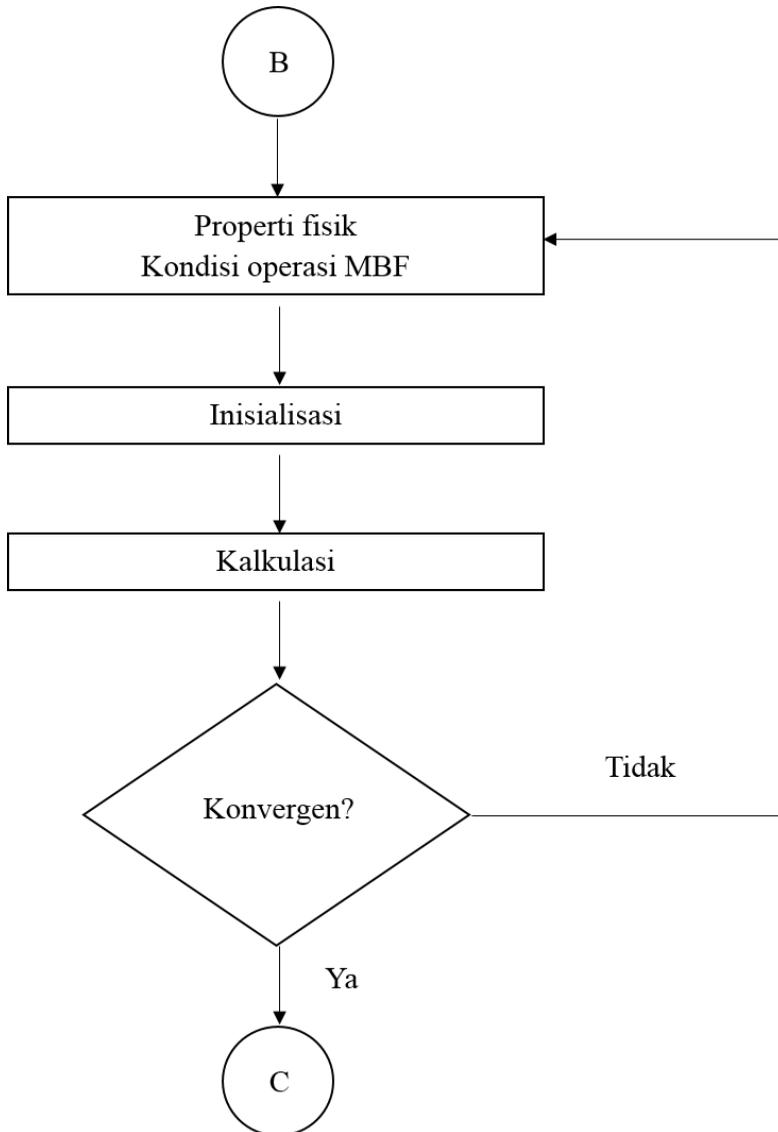
- *Post-processing*  
Data yang dihasilkan berupa kecepatan dan *pressure drop*. Hasil divisualisasikan melalui kontur dan vektor. Apabila data hasil kalkulasi sudah valid sesuai penelitian sebelumnya dan teori dan tidak memiliki *error* yang besar dibanding perhitungan manual, data tersebut dapat diterima dan digunakan.
- Pengolahan data  
Dari pengolahan data kecepatan dan *pressure drop*, dapat diketahui pengaruh variasi ketebalan sehingga dapat ditarik kesimpulan ketebalan mana yang paling optimal untuk kebaikan proses MBF, dilihat dari sudut pandang transfer momentum.

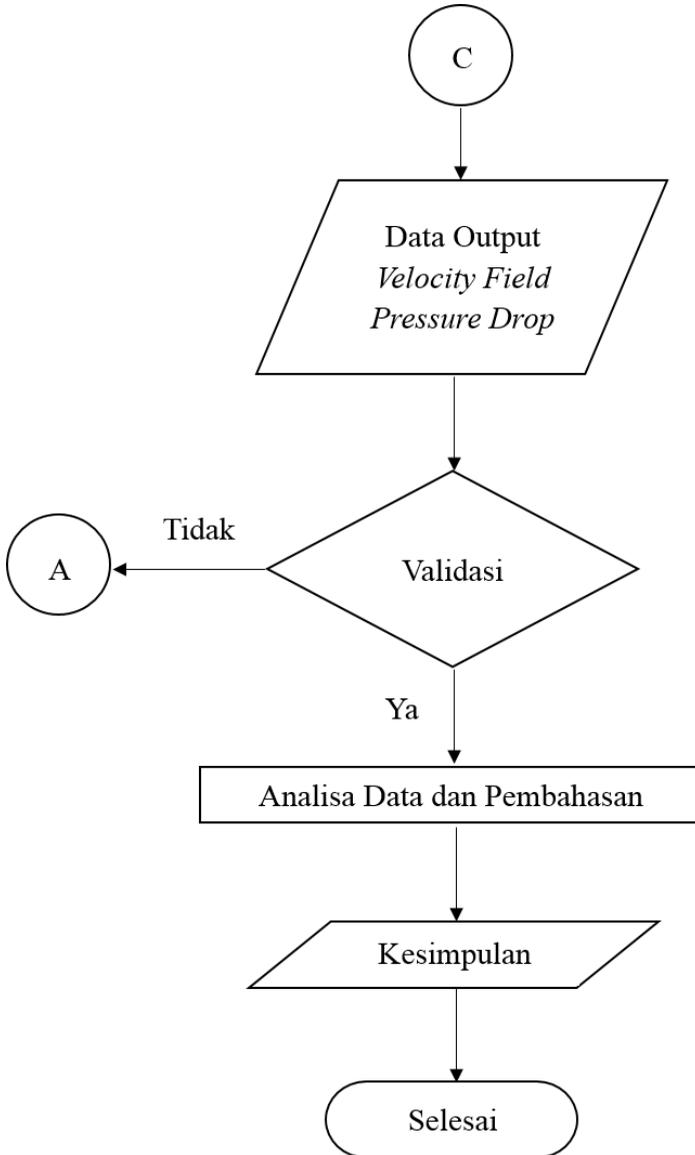
### 3.3 Peralatan Penelitian

Penelitian menggunakan *software* ANSYS *Student Package* versi 16, dengan komponen yang digunakan adalah:

- **ANSYS DesignModeler dan ANSYS Meshing**  
Keduanya adalah perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD) yang digunakan untuk menggambarkan geometri MBF secara simetris beserta lapisan materialnya dalam 2D dan membangun *grid system* beserta *boundary condition*-nya. *Grid system* dibangun berdasarkan aliran fluida, sehingga dilakukan setelah pemberian *boundary condition*. Untuk memasukkan faktor ketebalan lapisan material dalam kalkulasi, *grid system* dihasilkan sesuai dengan bentuk lapisan.
- **ANSYS Fluent**  
ANSYS Fluent digunakan sebagai *solver* CFD berbasis *Finite Volume Method* (FVM). Sejumlah pengaturan dan input data dilakukan sebelum memulai kalkulasi. Perangkat lunak ini berjalan dalam bahasa C.







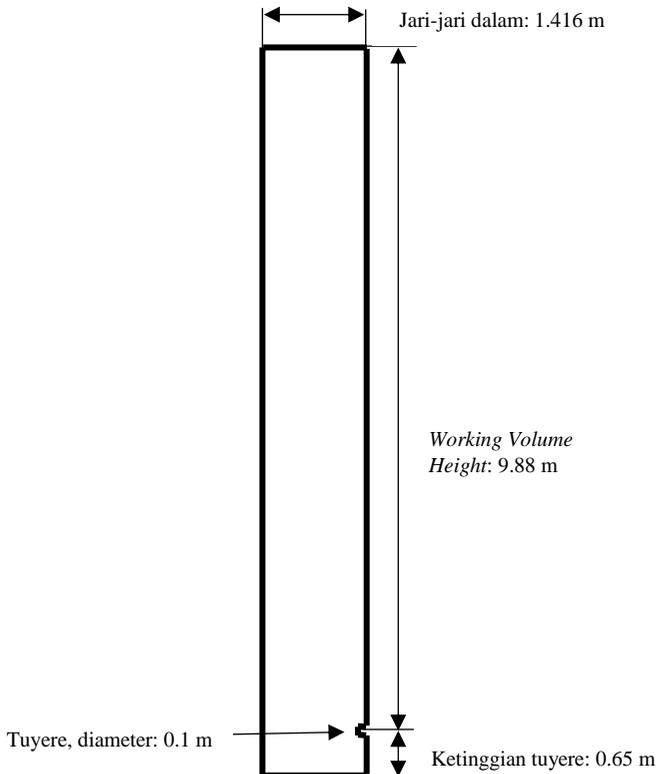
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



### 3.4 Geometri dan *Grid System*

Karena keakurasian data yang dihasilkan antara simulasi 1 tabung dan  $\frac{1}{2}$  tabung secara 2D adalah hampir serupa, MBF yang diteliti bergeometri 2D setengah bagian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2, dengan spesifikasi lengkap sebagai berikut.

- Diameter dalam : 2.832 m
- *Working volume height* : 9.88 m dari level tuyere
- Diameter tuyere : 0.1 m
- Jumlah tuyere : 10 buah
- Tinggi tuyere : 0.65 m dari dasar MBF

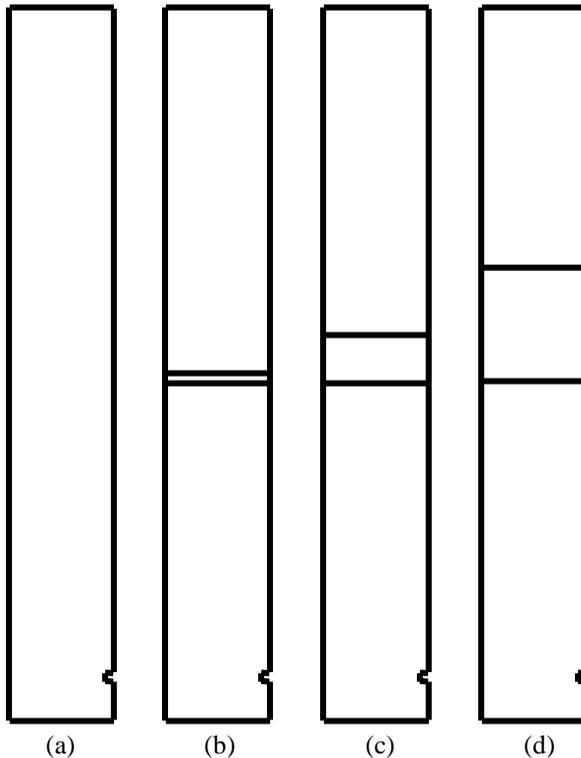


**Gambar 3.2** Geometri MBF 2D



### 3.4.1 Geometri *Single Layer*

Simulasi 1 lapisan dilakukan untuk memperlihatkan kondisi MBF dengan 2 jenis daerah yaitu region tanpa material (tabung kosong) dan region dengan *packed bed* (*porous medium*). Geometri MBF dengan 1 lapis dan 1 jenis lapisan ditunjukkan Gambar 3.3. Ketiga jenis variabel ketebalan tersebut (batubara:laterit:dolomit dalam cm) adalah 1x (17:20:12) , 4x (68:80:48), dan 10x (170:200:120), dan sudah dihitung agar memenuhi neraca massa MBF dan perbedaan ketebalan yang signifikan akan menunjukkan perbedaan data yang lebih jelas.



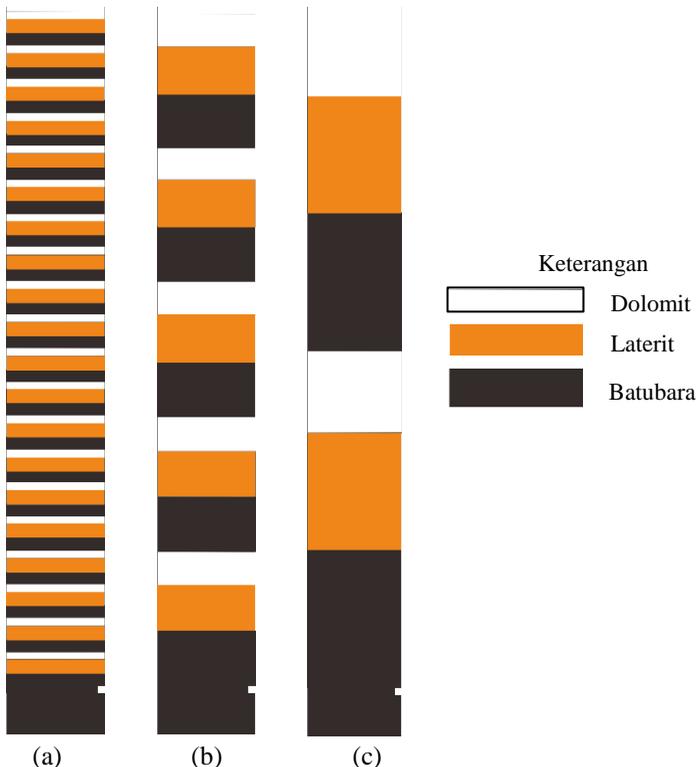
**Gambar 3.3** Geometri MBF 2D *Single Layer*  
(a) Tabung Kosong, (b) 1x, (c) 4x, (d) 10x



### 3.4.2 Geometri *Multilayer*

MBF diasumsikan memiliki profil lapisan material *uniform*. Dari gambar sebelumnya, geometri MBF diberi perlakuan *face split* sehingga tampak garis-garis berwarna abu-abu yang membentuk luasan persegi panjang untuk menggambarkan profil tersebut. Setiap luasan dapat diatur sesuai dengan sifat material penyusun lapisannya (fase solid).

Gambar 3.4 menunjukkan geometri untuk simulasi MBF penuh dengan variasi ketebalan yang sama dengan yang digunakan pada simulasi *single layer*.



**Gambar 3.4** Geometri MBF 2D Penuh  
(a) 17:20:12, (b) 68:80:48, (c) 170:200:120

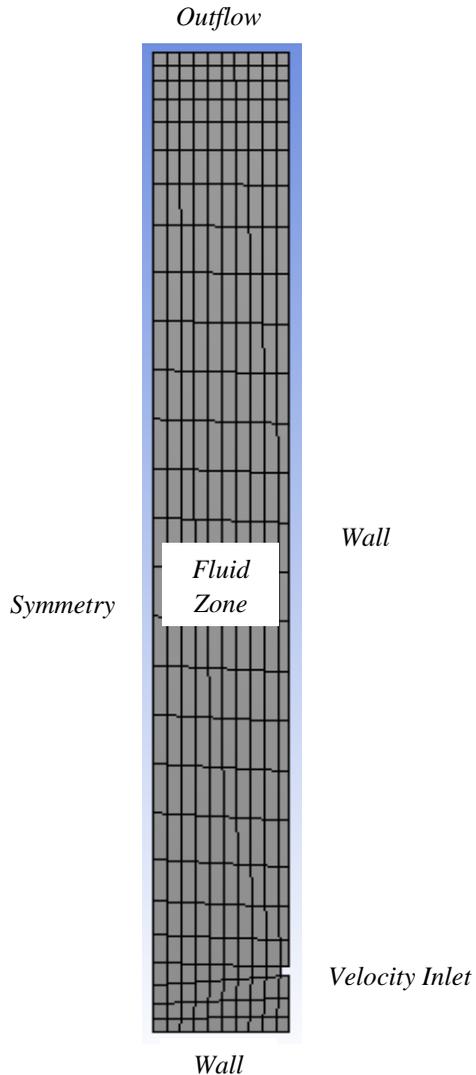


### 3.4.3 *Boundary Condition dan Grid System*

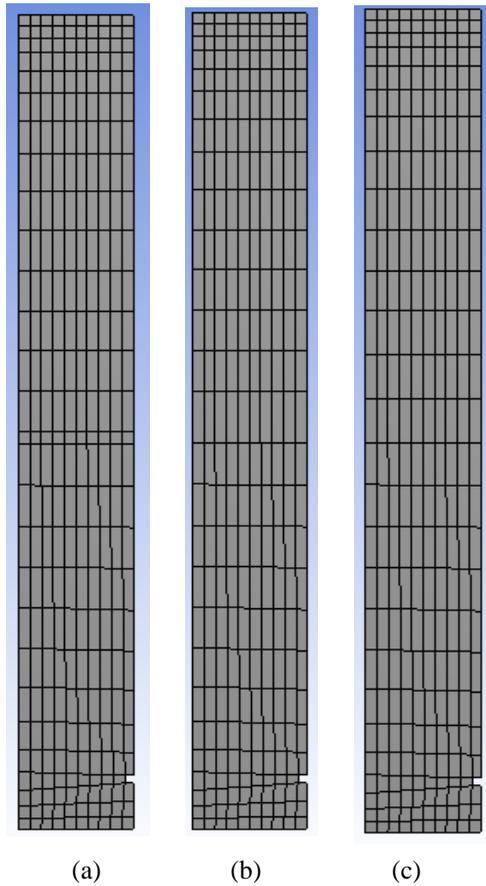
*Grid system* diatur sebagai zona fluida sehingga diberi perintah penyelesaian semua persamaan konservasi dan perintah tambahan. *Grid system* yang dihasilkan adalah hasil penyesuaian dengan prediksi pergerakan fase gas yang melewati susunan material solid. *Boundary condition* dan pembagian zona fluida diatur sebagai berikut:

- *Symmetry* : Semua input dan fungsi bernilai nol secara otomatis
- *Wall* : *No-slip condition* untuk fase gas dan solid
- *Velocity inlet* : Fase gas masuk dengan kecepatan yang sudah diketahui
- *Outflow* : Fase gas keluar secara bebas tanpa pengaturan apapun
- *Fluid 1* : Fase solid (material batubara)
- *Fluid 2* : Fase solid (material laterit)
- *Fluid 3* : Fase solid (material dolomit)
- *Fluid 4* : Fase gas

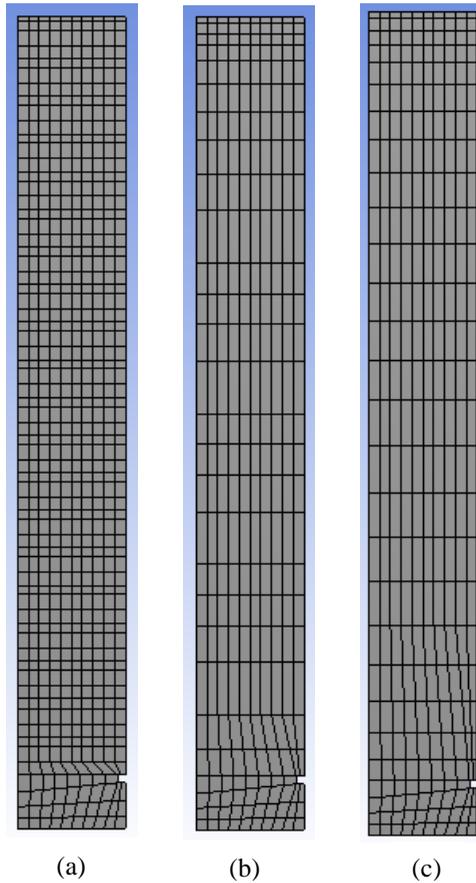
*Mesh* yang digunakan adalah *structured mesh* yang umum digunakan untuk menangkap prediksi pergerakan fluida. Semua domain komputasi bernilai sama yaitu MBF dengan *working volume* 61 m<sup>3</sup> berukuran 9.88 × 1.416 m. *Hot blast* sebagai fase gas masuk ke dalam *blast furnace* melalui *velocity inlet* dan bergerak ke atas melewati fase solid dalam wujud susunan lapisan material. Untuk simulasi *multilayer*, profil *uniform* dianggap sudah ada di dalam MBF. Dengan asumsi penelitian dilakukan sebelum terjadi proses *softening* dan *melting*, tidak ada kalkulasi *solid flow* sehingga fase solid tidak bergerak (*fixed bed*) dan *grid system* secara otomatis dibangun berdasarkan bentuk lapisan. Fase gas mengalir tanpa mengalami reaksi kimia dan keluar dengan tekanan sama dengan tekanan atmosfer. Gambar 3.5 menggambarkan *boundary condition* dan *grid system*, dengan menggunakan contoh geometri tabung kosong.



**Gambar 3.5** *Global Grid System dan Boundary Condition*



**Gambar 3.6** *Grid System* untuk *Single Layer*  
(a) 1x, (b) 4x, (c) 10x



**Gambar 3.7** *Grid System* untuk *Multilayer*  
(a) 17:20:12, (b) 68:80:48, (c) 170:200:120



### 3.5 Pengaturan Solver

#### 3.5.1 Model Setup

*Blast furnace gas* dikategorikan sebagai Fluida Newtonian yang *incompressible*. Oleh karena itu, penyelesaian masalah secara *pressure-based* melakukan kalkulasi dengan lebih akurat. Untuk menyederhanakan kalkulasi, hanya setengah bagian MBF yang disimulasikan secara *symmetry* dan *steady state*. Efek gravitasi masuk dalam perhitungan dengan nilai 9.81 arah sumbu y negatif.

Material yang digunakan untuk simulasi adalah gas, batubara, laterit, dan dolomit. Komposisi gas diasumsikan terdiri dari *volatile matter*, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>. Densitas gas dihitung menggunakan persamaan gas ideal untuk *incompressible flow*. Viskositas gas diambil dari literatur. Densitas material solid dihitung berdasarkan hukum Archimedes dan diasumsikan konstan. Viskositas material solid juga dianggap konstan dengan nilai yang diambil dari literatur. Diameter partikel dianggap homogen di masing-masing susunan lapisan dan bernilai konstan.

Aliran multi-fasa di dalam MBF yang berupa fasa solid dan gas dimodelkan menggunakan *Eulerian Multiphase*. Fasa gas di atur sebagai fluida penuh, sedangkan fasa solid diatur sebagai fluida *granular* dan *packed bed*. Sehingga simulasi dilakukan dengan perintah interaksi multifasa antara gas dan solid. Persamaan konservasi (ANSYS Inc., 2013) diselesaikan untuk masing-masing fasa dengan formula sebagai berikut:

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left| \frac{d}{dt} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right| \quad (3.1)$$



$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}(\alpha_l \rho_l v_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l v_l v_l) &= -\alpha_l \nabla p + \nabla \tau_l + \alpha_l \rho_l g \\
 &+ (F_l + F_{lift,l} + F_{wl,l} + F_{vm,l} \\
 &+ F_{td,l}) \\
 &+ \sum_{l=1}^N (K_{ls} (v_l - v_s) + \dot{m}_{ls} v_{ls} \\
 &- \dot{m}_{sl} v_{sl})
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}(\alpha_s \rho_s v_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s v_s v_s) &= -\alpha_s \nabla p + \nabla \tau_s + \alpha_s \rho_s g \\
 &+ (F_s + F_{lift,s} + F_{wl,s} + F_{vm,s} \\
 &+ F_{td,s}) \\
 &+ \sum_{l=1}^N (K_{ls} (v_l - v_s) + \dot{m}_{ls} v_{ls} \\
 &- \dot{m}_{sl} v_{sl})
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Persamaan 3.1 adalah persamaan kontinuitas. Persamaan 3.2 dan 3.3 adalah persamaan momentum untuk tiap-tiap fasa yang diturunkan dari persamaan umum. Dengan:

- $l$  : fasa fluida
- $s$  : fasa solid
- $K_{ls}$  : *interaction force* antara fasa fluid dan solid
- $\dot{m}_{ls}$  dan  $\dot{m}_{sl}$  : transfer massa antara fasa fluid dan solid
- $v_l$  dan  $v_s$  : kecepatan fasa tunggal fluid dan solid
- $v_{ls}$  dan  $v_{sl}$  : kecepatan antara fasa fluid dan solid
- $F_{lift}$  : Gaya angkat



---

$F_{wl}$	: Gaya dinding
$F_{vm}$	: Gaya <i>virtual mass</i>
$F_{td}$	: Gaya turbulen

Semua persamaan diselesaikan secara *implicit* karena keadaan *steady state*. *Interaction force* ( $K_{Is}$ ) atau *drag force* antara fase fluid dan solid mengikuti persamaan Gidaspow untuk fraksi volume fluida kurang dari 0.8. Dibandingkan dengan persamaan lain, Gidaspow lebih tepat diaplikasikan untuk model yang berhubungan dengan aliran gas melalui material padat. Persamaan tersebut mengikuti persamaan Ergun untuk aliran dalam tabung padat isi seperti berikut (ANSYS Inc., 2013):

$$K_{sl} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_l) \mu_l}{\alpha_l d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_l |v_s - v_l|}{d_s} \quad (3.4)$$

Dengan:

$\alpha_s$ dan $\alpha_l$	: fraksi volume solid dan fluid
$\mu_l$	: viskositas fluid
$\rho_l$	: densitas fluid
$v_s$ dan $v_l$	: kecepatan solid dan fluid
$d_s$	: diameter partikel solid

Untuk mensimulasikan aliran turbulen di dalam MBF, digunakan *standard k-ε turbulence model*. Model ini menggunakan 2 persamaan yang berbeda sekaligus, yaitu persamaan energi kinetik (k) dan persamaan disipasi energi (ε), untuk menyelesaikan permasalahan turbulensi. Dengan menggunakan model ini, aliran gas panas di dalam MBF dianggap turbulen sepenuhnya dan terpisah dari aliran solid. Berikut adalah persamaan k-ε yang diselesaikan (ANSYS Inc., 2013).



$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m v_m k) \\ = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_{k,m} \\ - \rho_m \epsilon + \Pi_{k,m} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_m \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_m v_m \epsilon) \\ = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] \\ + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_{k,m} - C_{2\epsilon} \rho_m \epsilon) + \Pi_{\epsilon_m} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\rho_m = \sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \quad (3.7)$$

$$\mu_m = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu_i \quad (3.8)$$

$$v_m = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i v_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i} \quad (3.9)$$

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.10)$$

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} [\nabla v_m + (\nabla v_m)^T] : \nabla v_m \quad (3.11)$$

$$\mu_{t,i} = \frac{\rho_i}{\rho_m} \mu_{t,m} \quad (3.12)$$

Dengan:

- $\alpha_i$  : fraksi volume fasa solid atau fluid
- $\rho_m$  : densitas campuran fasa solid dan fluid
- $\rho_i$  : densitas fasa solid atau fluid
- $v_m$  : kecepatan campuran fasa solid dan fluid
- $v_i$  : kecepatan fasa solid atau fluid
- $\mu_m$  : viskositas campuran fasa solid dan fluid
- $\mu_{t,m}$  : *turbulent viscosity* campuran fasa solid dan fluid



- $\mu_{t,i}$  : *turbulent viscosity* fasa solid atau fluid  
 $\sigma_k$  dan  $\sigma_\varepsilon$  : bilangan Prandtl  
 $G_{k,m}$  : *turbulent kinetic energy*  
 $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$  : konstanta persamaan  
 $\Pi_{k_m}$  dan  $\Pi_{\varepsilon_m}$  : *Source term* untuk perintah tambahan

Lapisan material dengan fase solid diatur sebagai *porous media*. Pengaturan ini mensimulasikan resistansi fluida secara empiris melalui formulasi tambahan ke dalam persamaan momentum berupa *momentum sink*. Sehingga, ada tambahan persamaan di persamaan momentum (ANSYS Inc., 2013):

$$S_i = -\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \quad (3.12)$$

Dengan:

- $S_i$  : *momentum sink*  
 $\frac{1}{\alpha}$  : koefisien *viscous loss*  
 $C_2$  : koefisien *inertial loss*  
 $i$  : arah sumbu Cartesian

Untuk kasus 2D, persamaan tersebut dijabarkan menjadi (ANSYS Inc., 2013):

$$\Delta p_x = -\sum_{j=1}^2 \frac{\mu}{\alpha_{xj}} v_j \Delta n_x + \sum_{j=1}^2 C_{2,xj} \Delta n_x \frac{1}{2} \rho |v| v_j \quad (3.13)$$

$$\Delta p_y = -\sum_{j=1}^2 \frac{\mu}{\alpha_{yj}} v_j \Delta n_y + \sum_{j=1}^2 C_{2,yj} \Delta n_y \frac{1}{2} \rho |v| v_j \quad (3.14)$$

Dengan:

- $\Delta p_x$  dan  $\Delta p_y$  : perubahan tekanan (*pressure drop*) pada sumbu x dan y  
 $v_j$  : komponen kecepatan sumbu x dan y



$\Delta n_x$  dan  $\Delta n_y$  : ketebalan *porous media* arah sumbu x  
dan y

Ketebalan lapisan material pada persamaan tersebut diformulasikan sebagai ketebalan *porous media* arah sumbu y. Halangan pada tiap lapisan material yang menyebabkan timbulnya resistansi terhadap gas ada secara persamaan namun tidak diperlihatkan secara fisik. Untuk dapat lebih memprediksi vektor kecepatan gas dengan akurat,  $v_j$  diformulasikan sebagai *physical velocity*. Berbeda dengan formulasi lainnya, formulasi tersebut memasukkan aspek halangan, yang dinyatakan sebagai porositas lapisan, atau disebut juga sebagai *void fraction*, dalam menyelesaikan semua persamaan konservasi. Porositas lapisan dianggap isotropik. Berikut adalah penurunan persamaan (ANSYS Inc., 2013) kontinuitas dan momentum untuk aliran multi-fasa dengan *porous media* yang memasukkan porositas ke dalam perhitungan. Porositas dilambangkan dengan  $\gamma$ . Untuk menghindari misinterpretasi simbol, *viscous loss* di persamaan ini dilambangkan dengan  $K$ .

$$\left[ \frac{d}{dt} (\gamma \alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\gamma \alpha_q \rho_q v_q) \right. \\ \left. = \gamma \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + \gamma S_q \right] \quad (3.15)$$



$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\gamma\alpha_q\rho_q v_q) + \nabla \cdot (\gamma\alpha_q\rho_q v_q v_q) \\ = -\gamma\alpha_q\nabla p + \nabla\gamma\tau_q + \gamma\alpha_q\rho_q g \\ + \gamma(F_q + F_{lift,q} + F_{vm,q}) \\ + \gamma \sum_{p=1}^N (R_{pq} + \dot{m}_{pq}v_{pq} - \dot{m}_{qp}v_{qp}) \\ - \alpha_q \frac{\gamma^2\mu}{K_q} v_q + \frac{\gamma^3 C_{2,q}}{2} \rho_q |v_q|v_q \end{aligned} \quad (3.16)$$

Pengaturan nilai porositas dan material penyusun berbeda sesuai lapisannya. Merujuk pada persamaan pada Bab II, *viscous loss* dan *inertial loss* pada MBF mengikuti persamaan Ergun yang sudah dikonfigurasi menjadi (ANSYS Inc., 2013):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu}{d^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot v^2 + \frac{1.75\rho}{d} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} v^2 \quad (3.17)$$

Sehingga nilai *viscous loss* yang dimasukkan adalah:

$$\alpha = \frac{d^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (3.18)$$

Dan *inertial loss* yang dimasukkan adalah:

$$C_2 = \frac{3.5}{d} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (3.19)$$

Dengan porositas lapisan dilambangkan sebagai  $\varepsilon$  dan L adalah kedalaman lapisan dihitung dari permukaan MBF. *Pressure drop* dalam MBF didefinisikan sebagai selisih antara tekanan di dasar MBF dengan tekanan di permukaan MBF.



Gas masuk melalui *velocity inlet* dengan kecepatan yang dihitung berdasarkan neraca massa. Gas mengalir melalui lapisan material tanpa mengalami reaksi kimia dan keluar dari *blast furnace* dengan *top pressure* bernilai 1 atm.

### 3.5.2 Solution Method

ANSYS Fluent menggunakan *co-located grid* sehingga semua besaran skalar (tekanan, porositas) dan vektor kecepatan disimpan di nodal *control volume (CV)*. *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations* atau SIMPLE adalah algoritma umum dibanding algoritma lain yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan aliran multi-fasa. Algoritma tersebut menyelesaikan permasalahan vektor kecepatan dan *pressure drop* secara terpisah. Namun begitu, nilai keduanya dijaga untuk tidak mengalami “pemisahan” saat kalkulasi. Sehingga digunakan interpolasi momentum-kontinuitas yang prosesnya menyerupai *staggered grid* yaitu Rhie-Chow.

Meski semua besaran skalar tersimpan di nodal CV, nilai-nilai tertentu dibutuhkan untuk menyelesaikan persamaan besaran skalar dan hanya bisa diperoleh melalui interpolasi antara nodal CV dengan nodal di *mesh faces*. *Grid system* yang sebelumnya sudah diatur menjadikan aliran *hot blast* sebagai fluida sejalur dengan *mesh faces*. Interpolasi momentum dilakukan secara *second-order accuracy* memperkecil eror perhitungan dan mencegah *numerical diffusion*. Pengaturan otomatis *least square based* digunakan untuk menghitung perubahan nilai skalar di tiap-tiap nodal CV. Pengaturan ini menghasilkan gradien yang akurat dengan beban komputasi yang tidak besar dibanding pengaturan lainnya.

Untuk menghasilkan bilangan residual sekecil mungkin di tiap iterasi, dibutuhkan *under-relaxation factor* yang mengontrol perubahan nilai *unknown variables*. Faktor untuk *pressure*, *body force*, dan momentum didapatkan secara iterasi untuk menjamin akurasi nilai kecepatan dan *pressure drop* saat kalkulasi berakhir dengan konvergen. Konvergensi ditentukan oleh residual yang



rendah dan tetap stabil dan kestabilan nilai pada *convergence monitor*.

Sebelum memulai kalkulasi, inisialisasi dibutuhkan sebagai prediksi awal medan aliran dan distribusi tekanan. Faktor kecepatan masuk *hot blast* menjadi hal yang penting di penelitian ini sehingga inisialisasi dilakukan secara standar dimulai dari nilai-nilai di *velocity inlet*. Setelah itu, kalkulasi secara iterasi hingga konvergen dilakukan dengan jumlah iterasi minimum 100 kali. Tabel 3.1 dan 3.2 merangkum semua pengaturan *solver*.

**Tabel 3.1** Model dan Solution Setup

Pengaturan	Perintah
Tipe simulasi	<i>Steady state 2D</i>
Kondisi <i>solver</i>	<i>Double precision, pressure-based, implicit, symmetry, gravity on</i>
<i>Multiphase model</i>	<i>Single Layer : Eulerian 2-phase, implicit</i>
	<i>Multilayer : Eulerian 4-phase, implicit</i>
<i>Turbulence model</i>	<i>k-epsilon mixture model</i>
<i>Cell zone condition</i>	<i>Porous media, physical velocity formulation</i>
<i>Pressure-velocity coupling</i>	<i>Phase Coupled SIMPLE</i>
<i>Gradient</i>	<i>Least square cell based</i>
<i>Momentum</i>	<i>2<sup>nd</sup> order upwind</i>
<i>Volume fraction</i>	<i>1<sup>st</sup> order upwind</i>
<i>Turbulent kinetic energy</i>	<i>1<sup>st</sup> order upwind</i>
<i>Turbulent dissipation rate</i>	<i>1<sup>st</sup> order upwind</i>
Kondisi <i>outlet</i>	<i>Outflow, top pressure 1 atm</i>



Pengaturan	Perintah
Kondisi <i>inlet</i>	<i>Velocity inlet</i>
Kondisi <i>wall</i>	<i>Full no-slip condition</i>

**Tabel 3.2** Komponen dan Properti Fasa

Fase	Komponen	Properti
Gas	H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , <i>volatile matter</i>	$\rho = \textit{ideal gas}$ $\mu = 5\text{e-}05 \text{ kg/m.s}$ kecepatan masuk = 148 m/s
Solid	Batubara	$\rho = 1420 \text{ kg/m}^3$ $\mu = 0.5 \text{ kg/m s}$ $d_p = 7 \text{ cm}$ porositas lapisan = 0.49
	Laterit	$\rho = 1966 \text{ kg/m}^3$ $\mu = 0.5 \text{ kg/m s}$ $d_p = 6 \text{ cm}$ porositas lapisan = 0.55
	Dolomit	$\rho = 1645 \text{ kg/m}^3$ $\mu = 0.5 \text{ kg/m s}$ $d_p = 5 \text{ cm}$ porositas lapisan = 0.44

Berikut adalah detail dari material udara batubara, laterit, dan dolomit yang dimasukkan ke dalam MBF. Kapasitas material masuk per hari adalah 170 ton batubara, 250 ton laterit, dan 160 ton dolomit. Batubara sebagai sumber karbon yang digunakan berjenis sub-bituminous. Dolomit digunakan untuk mengikat senyawa-senyawa tak penting pada laterit dan dibuang menjadi *slag*. Laterit yang digunakan berasal dari kelas saprolit. *Yielding* untuk menghasilkan nikel pada MBF yang diteliti bernilai 70%. Komposisi udara yang masuk ke dalam MBF dianggap terdiri dari 23.2% oksigen dan sisanya berupa nitrogen.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

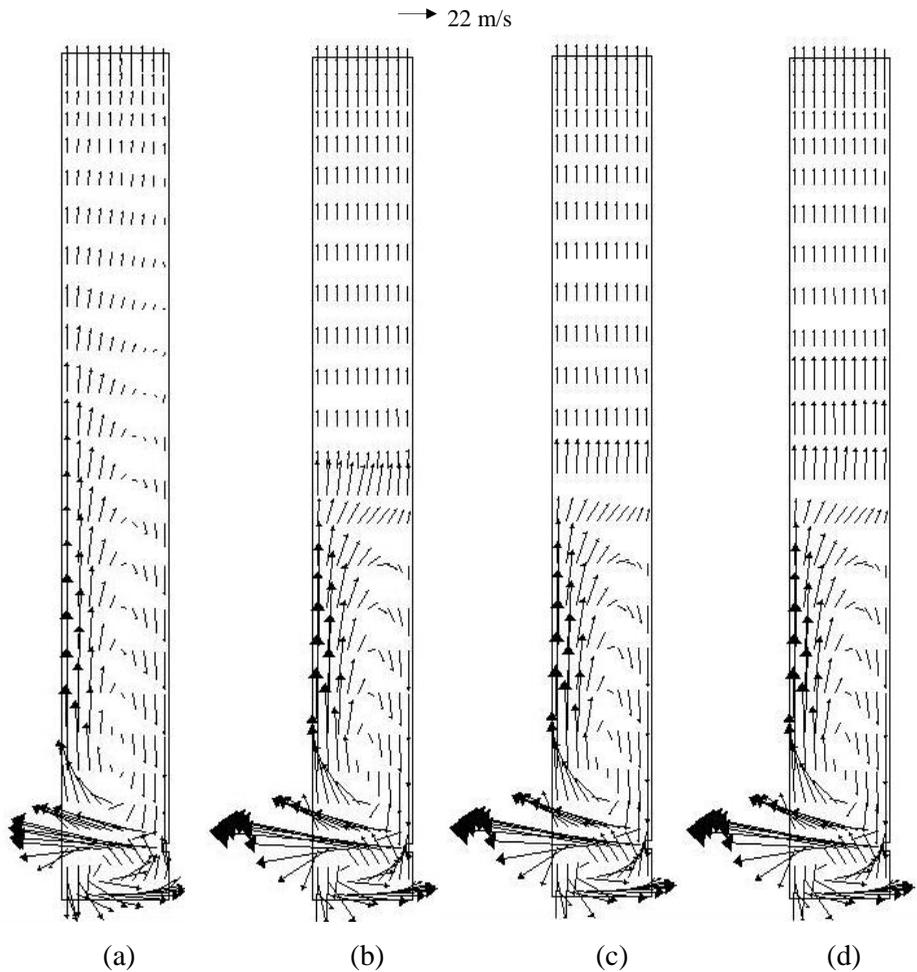
Hasil simulasi yang sudah *mesh-independent*, yaitu hasil dengan *numerical error* yang sangat kecil hingga dapat diabaikan, dan yang sudah diverifikasi dibahas pada bab ini. Analisa general pengaruh variasi ketebalan terhadap transfer momentum (kecepatan gas dan *pressure drop*) dilakukan menggunakan data simulasi *single layer*. Analisa dampaknya terhadap proses dalam MBF dilakukan menggunakan data simulasi *multilayer*.

#### **4.1 Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan *Burden Material* terhadap Kecepatan Gas**

##### **4.1.1 Vektor Kecepatan *Layer Batubara***

Gambar 4.1 menunjukkan vektor aliran gas disepanjang ketinggian MBF dengan menempatkan variasi ketebalan satu lapisan batubara di bagian tengahnya. Pada ketebalan nol atau tabung kosong, vektor gas turbulen dan tidak teratur di keseluruhan MBF. Pada ketebalan 1x hingga 10x, penempatan lapisan batubara di tengah mengubah vektor menjadi lebih *fully developed* dan tersebar merata pada jalur yang teratur.

Besaran vektor kecepatan gas yang melewati lapisan material tidak berubah signifikan seiring bertambahnya ketebalan. Namun arahnya dapat diamati memiliki perilaku yang ikut bervariasi. Pada ketebalan 17 cm (1x), vektor pada lapisan material digambar 1 lapis dengan ujungnya rapat dengan pangkal vektor ruang kosong setelahnya. Pada ketebalan 68 cm (4x), vektor masih ditunjukkan dalam 1 lapis, namun ujungnya berjarak lebih renggang. Pada ketebalan 170 cm (10x), vektor lapisan ditunjukkan lebih dari 1 lapis, dalam hal ini 3 lapis, dengan ujungnya yang juga berjarak lebih renggang dengan vektor kecepatan ruang kosong setelahnya.



**Gambar 4.1** Distribusi Vektor Kecepatan *Layer* Batubara  
(a) Tabung Kosong, (b) 17 cm, (c) 68 cm, (d) 170 cm



#### 4.1.2 Vektor Kecepatan *Layer Laterit*

Gambar 4.2 menunjukkan vektor aliran gas disepanjang ketinggian MBF dengan menempatkan variasi ketebalan satu lapisan laterit di bagian tengahnya. Pada ketebalan nol atau tabung kosong, vektor gas turbulen dan tidak teratur di keseluruhan MBF. Pada ketebalan 1x hingga 10x, penempatan lapisan laterit di tengah mengubah vektor menjadi lebih *fully developed* dan tersebar merata pada jalur yang teratur.

Besaran vektor kecepatan gas yang melewati lapisan material tidak berubah signifikan seiring bertambahnya ketebalan, dan nilainya lebih rendah dibanding kecepatan di *layer* batubara. Namun arahnya dapat diamati memiliki perilaku yang ikut bervariasi. Pada ketebalan 20 cm (1x), vektor pada lapisan material digambar 1 lapis dengan ujungnya rapat dengan pangkal vektor ruang kosong setelahnya, namun tidak serapat vektor pada layer batubara untuk perbandingan ketebalan yang sama. Pada ketebalan 80 cm (4x), vektor sudah ditunjukkan dalam lebih dari 1 lapis dengan ujungnya berjarak lebih renggang lagi. Pada ketebalan 200 cm (10x), vektor lapisan tetap ditunjukkan lebih dari 1 lapis, dalam hal ini 4 lapis, dengan ujungnya yang juga berjarak lebih renggang dengan vektor kecepatan ruang kosong setelahnya.

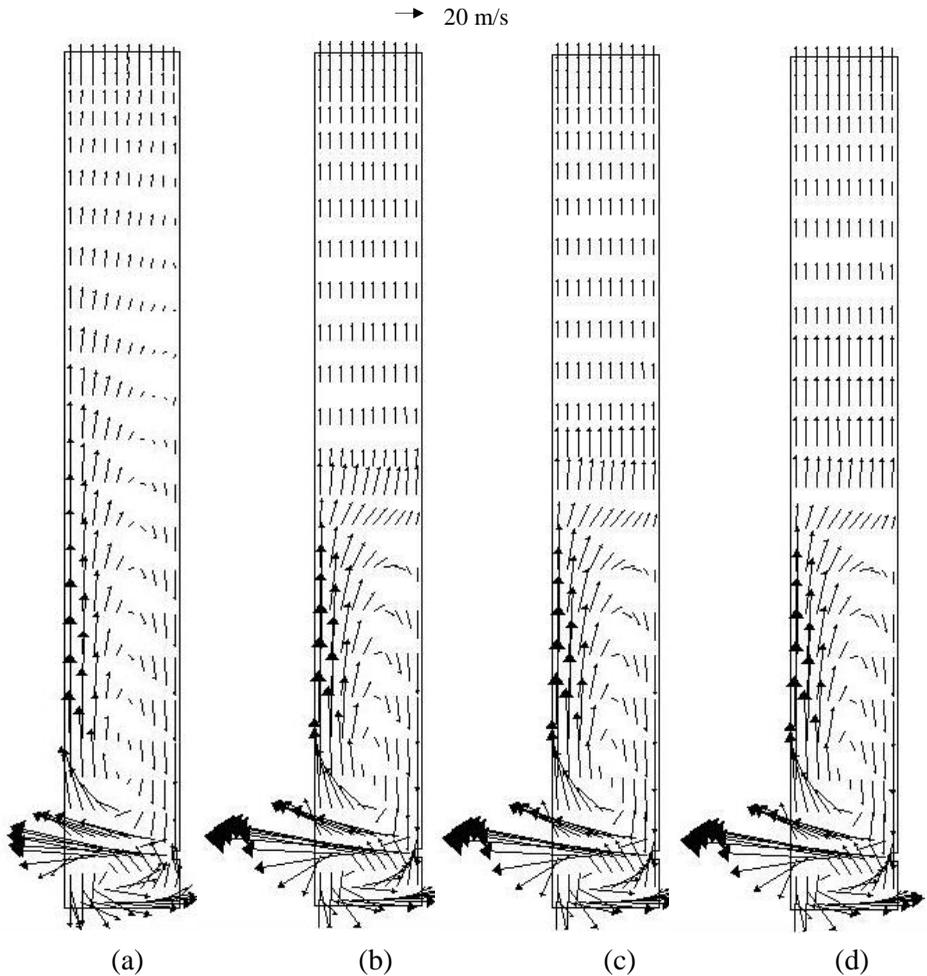
#### 4.1.3 Vektor Kecepatan *Layer Dolomit*

Gambar 4.3 menunjukkan vektor aliran gas disepanjang ketinggian MBF dengan menempatkan variasi ketebalan satu lapisan dolomit di bagian tengahnya. Pada ketebalan nol atau tabung kosong, vektor gas turbulen dan tidak teratur di keseluruhan MBF. Pada ketebalan 1x hingga 10x, penempatan lapisan dolomit di tengah mengubah vektor menjadi lebih *fully developed* dan tersebar merata pada jalur yang teratur.

Besaran vektor kecepatan gas yang melewati lapisan material tidak berubah signifikan seiring bertambahnya ketebalan dan bernilai maksimum di *layer* ini dibandingkan dengan jenis *layer* yang lain. Arahnya dapat diamati kembali memiliki perilaku yang ikut bervariasi. Di ketebalan 12 cm (1x), vektor pada lapisan



material digambar 1 lapis dengan ujungnya bertaut dengan pangkal vektor ruang kosong setelahnya. Di ketebalan 48 cm (4x), vektor masih ditunjukkan dalam 1 lapis, ujungnya masih rapat namun



**Gambar 4.2** Distribusi Vektor Kecepatan *Layer* Laterit  
(a) Tabung kosong, (b) 20 cm, (c) 80 cm, (d) 200 cm

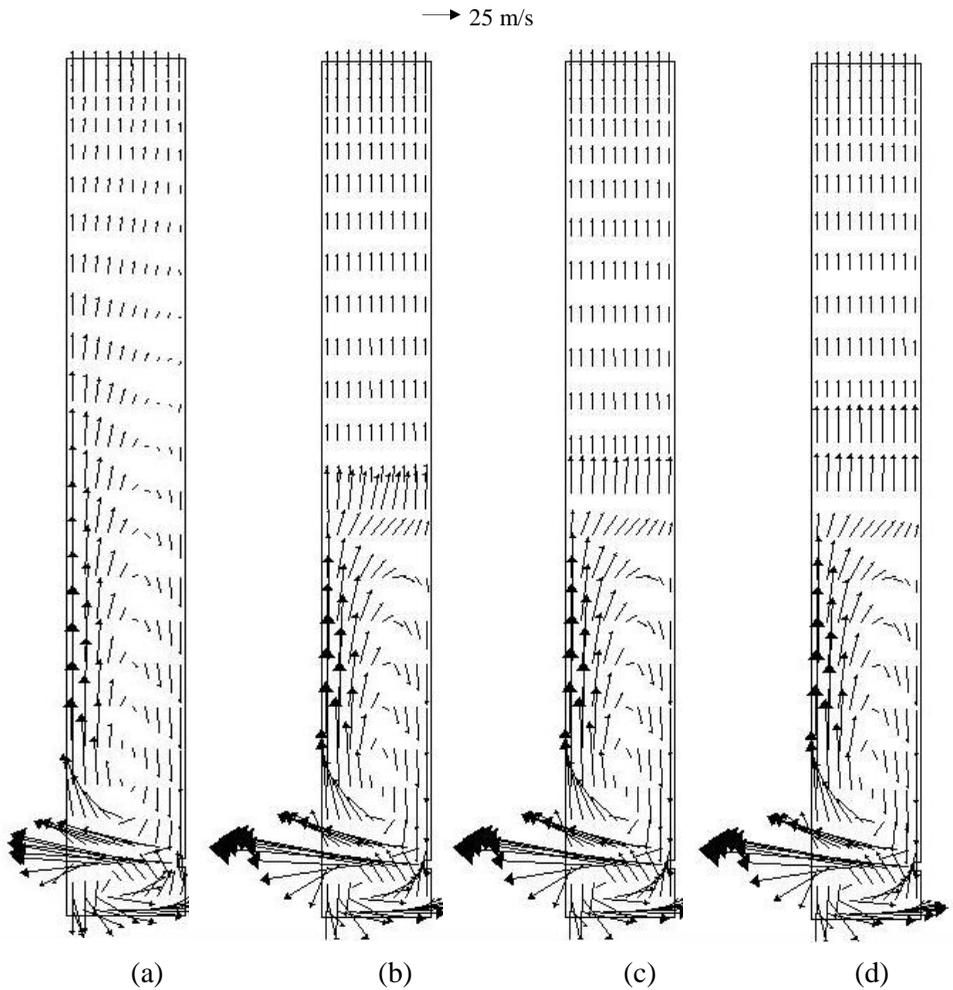


berjarak lebih renggang. Pada ketebalan 120 cm (10x), vektor lapisan ditunjukkan lebih dari 1 lapis, dalam hal ini 2 lapis, dengan ujungnya yang juga berjarak lebih renggang dengan vektor kecepatan ruang kosong setelahnya.

#### 4.1.4 Perbandingan Vektor Kecepatan Antar Jenis Lapisan

Jika dibandingkan, perilaku vektor untuk semua jenis lapisan dinyatakan sebagai berikut: vektor berperilaku turbulen pada daerah tanpa material (tabung kosong), mengalami transisi ketika tepat kontak dengan lapisan material, kemudian bergerak lebih teratur pada daerah dengan material tersebut dan setelahnya. Kecepatan tertinggi terdapat di daerah turbulen (tuyere), menurun sedikit saat naik, bertambah saat melewati lapisan material, dan bernilai minimum seiring mengalir keluar MBF. Kecepatan gas di lapisan material bernilai berbeda sesuai jenis lapisan yang dilewati. Semakin tebal lapisan material, semakin dapat terlihat vektor kecepatan pada tiap lapisan, ditandai dengan jarak tautan antara vektor kecepatan di lapisan material dengan daerah setelahnya yang semakin renggang dan visualisasi vektor yang bisa lebih dari 1 lapis.

Perubahan pola vektor kecepatan dari turbulen dan tidak merata menjadi *fully developed* dan teratur jelas merupakan dampak adanya lapisan material di dalam tabung. Pola tersebut mengikuti penggunaan model *porous medium* dalam pengaturan lapisan material. Model tersebut mengikuti pendekatan sebagai berikut.



**Gambar 4.3** Distribusi Vektor Kecepatan *Layer Dolomit*  
(a) Tabung Kosong, (b) 12 cm, (c) 48 cm, (d) 120 cm



Susunan material padat, terutama yang tersusun atas benda padat berbentuk bola, akan menyisakan ruang udara antarpartikel sehingga secara kesatuan susunan tersebut dinamakan *porous medium of packed bed of spheres*. Tak jarang juga ditemukan *porous medium* yang bentuk partikelnya bukan bola sempurna atau ukuran partikelnya tersebar tidak merata, namun susunannya masih menyisakan ruang udara. Rongga tersebut yang mengizinkan fluida, baik gas maupun *liquid*, mengalir melalui *packed bed*. Karena kemungkinan-kemungkinan yang sebelumnya disebutkan, dapat dipastikan menganalisa aliran yang terjadi akan sulit karena permasalahannya kompleks. Sehingga, untuk mampu memodelkan jenis aliran itu secara matematis, harus ada proses simplifikasi. Proses tersebut dilakukan dengan cara menyederhanakan geometri, yaitu mengubah rongga udara menjadi bentuk yang paling mendekati yaitu sekumpulan lorong atau tabung dengan ukurannya masing-masing (*hypothetical tube with non-uniform geometry*). Dengan demikian, dapat diasumsikan bahwa fluida mengalir secara *fully developed* seakan-akan fluida bergerak melalui pipa lurus. Pendekatan ini berujung pada penggunaan radius hidraulik atau diistilahkan sebagai *equivalent diameter*, yang dinyatakan dengan *void fraction* atau porositas dan diameter partikel penyusun (Bird, et al., 1960; Middleman, 1998).

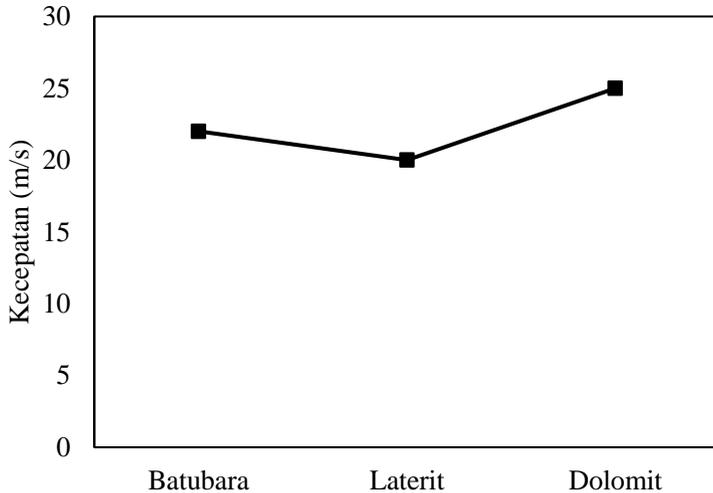
Pendekatan aliran lurus dalam pipa juga menuntun pada penggunaan *friction factor* untuk menjelaskan pergerakan fluida yang berinteraksi dengan pipa. Sehingga muncul istilah *interstitial velocity* dan kecepatan gas pada tabung kosong atau *superficial velocity*. Nilai kecepatan yang kedua ditentukan oleh debit masuk fluida ke dalam pipa sehingga mudah untuk diukur. Tidak demikian dengan *interstitial velocity* yang nilainya lebih tinggi dibanding *superficial velocity*, karena kecepataannya bergantung pada *void fraction* daerah pipa di mana fluida itu mengalir. Karena, dalam satu pipa panjang akan mungkin mendapatkan daerah yang berbeda-beda porositasnya. Sehingga untuk perhitungan *friction*



*factor*, digunakan *superficial velocity* karena secara praktikal di lapangan kecepatan jenis itulah yang paling mudah dikontrol. Namun begitu, fenomena fisis yang terjadi adalah *interstitial velocity* dengan model aliran turbulen, sehingga *friction factor* yang digunakan harus ditambahkan konstanta lain yang mampu menggambarkan aliran tersebut agar persamaan matematis semakin mendekati realita lapangan. Konstanta tersebut tidak bisa didapatkan dengan analisa dimensional seperti yang telah dilakukan untuk mendapatkan *void fraction*, diameter partikel, dan *superficial* dan *interstitial velocity*, melainkan dengan eksperimen. Konstanta tambahan tersebut berhubungan dengan *Reynold Number* yang menggambarkan fluida turbulen, yang nilainya bisa melebihi 1000 (Middleman, 1998).

Semua penjelasan di atas, yang apabila dirangkum menjelaskan tentang *void fraction*, diameter partikel, *superficial* dan *interstitial velocity*, *friction factor* dan konstanta tambahan untuk fluida turbulen, adalah asal-muasal persamaan Ergun, persamaan yang dipakai sebagai rujukan analisa transfer momentum pada berbagai jenis *packed bed of spheres* atau *porous medium*, termasuk di dalam *blast furnace* seperti yang dibahas sekarang ini.

Hal lain yang penting diamati adalah nilai kecepatan interstitial yang berbeda tiap jenis lapisan dan semakin jelasnya vektor yang dapat dilihat pada tiap lapisan material seiring bertambahnya ketebalan. Nilai kecepatan interstitial yang berbeda menunjukkan pengaruh jenis lapisan dengan porositas berbeda terhadap kelancaran aliran gas (Kon, et al., 2013). Seperti yang ditunjukkan Gambar 4.4, kecepatan gas bernilai maksimum di *layer* fluks yang porositasnya paling rendah dan minimum di *layer* laterit yang porositasnya paling tinggi. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya (Haddadi, et al., 2016; Kon, et al., 2013).



**Gambar 4.4** Perbandingan Kecepatan Tiap *Layer*

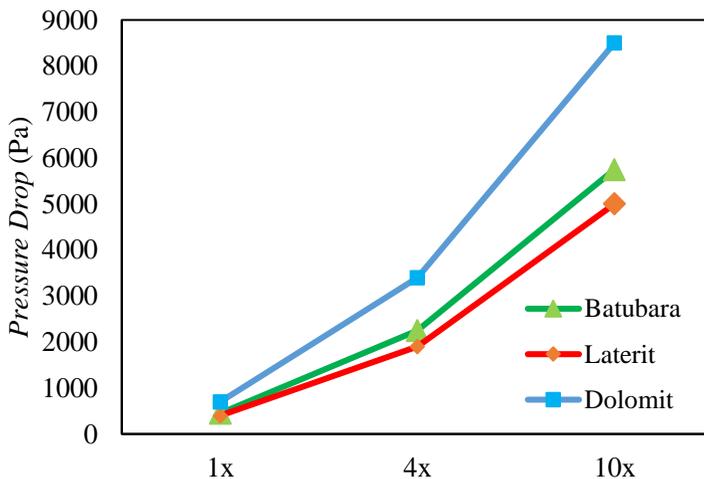
Vektor yang semakin jelas terlihat menunjukkan aliran gas yang terkonsentrasi di *burden layer*, yang artinya gas semakin mengalami resistansi. Atau dengan kata lain, vektor tersebut menunjukkan luasan daerah yang porositasnya kurang dari 1 atau lebih rendah dari tabung kosong, yang artinya terdapat penambahan jumlah bagian MBF yang resistansinya terhadap gas meninggi (Mousa, et al., 2011). Sehingga, semakin tebal lapisan, dapat dianalisa akan terjadi kenaikan *pressure drop* yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

Berdasarkan uraian-uraian penjelasan di atas, ketebalan lapisan yang paling baik dilihat dari segi kecepatan gas adalah ketebalan asli (1x). Karena dengan kecepatan gas yang tidak bertambah tinggi atau rendah, vektor gas bergerak lebih lancar berpindah antar lapisan dengan resistansi rendah.



## 4.2 Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan *Burden Material* terhadap *Pressure Drop*

Semua data tekanan hasil simulasi adalah nilai tekanan *gauge* (ANSYS Inc, 2013). Gambar 4.7 menunjukkan kontur tekanan di dalam MBF kosong dan MBF dengan *single layer* batubara. Dari gradasi warna, *pressure drop* MBF dengan satu lapisan lebih tinggi dari tabung kosong. Ketebalan 17 cm memiliki nilai *pressure drop* lebih kecil dibanding ketebalan 68 cm, yang nilai *pressure drop*-nya lebih kecil dibanding ketebalan 170 cm. Begitu pula dengan kontur yang ditunjukkan Gambar 4.8 dan Gambar 4.9. *Pressure drop* tabung kosong lebih rendah dibanding MBF *single layer*, dan nilai *pressure drop* lapisan laterit atau dolomit dengan ketebalan 1x (17:20:12) lebih rendah dari ketebalan 4x (68:80:48) yang lebih rendah dari ketebalan 10x (170:200:120). Dari pola kontur dapat diamati juga persebaran tekanan variasi ketebalan untuk setiap jenis lapisan nyaris sama.



**Gambar 4.5** *Pressure Drop* Variasi Ketebalan *Single Layer*



Gambar 4.5 memperjelas perubahan *pressure drop*, dengan data yang diambil di titik sebelum dan setelah lapisan material (di  $x = 0.685$  m dan dari  $y = 4.5$  m hingga  $y = 7.5$  m). Sesuai dengan data kontur, penambahan *pressure drop* dari variasi ketebalan untuk setiap jenis lapisan hampir serupa. Tekanan pada MBF dengan batubara 68 cm bernilai 5 kalinya tekanan MBF batubara 17 cm. Begitu pula dengan laterit 80 cm terhadap 20 cm dan dolomit 48 cm terhadap 12 cm. Tekanan pada MBF dengan batubara 170 cm bernilai mendekati 13 kalinya tekanan 17 cm, begitu pula pada laterit 200 cm terhadap 20 cm dan dolomit 120 cm terhadap 12 cm. Berkaitan dengan penjelasan sebelumnya, kedua hal tersebut disebabkan perbedaan resistansi gas terhadap tiap ketebalan dan tiap jenis material. Dan dari tabel tersebut, semakin jelas bahwa penambahan ketebalan lapisan material jenis apapun berdampak pada peningkatan *pressure drop*. Berikut adalah penjelasannya.

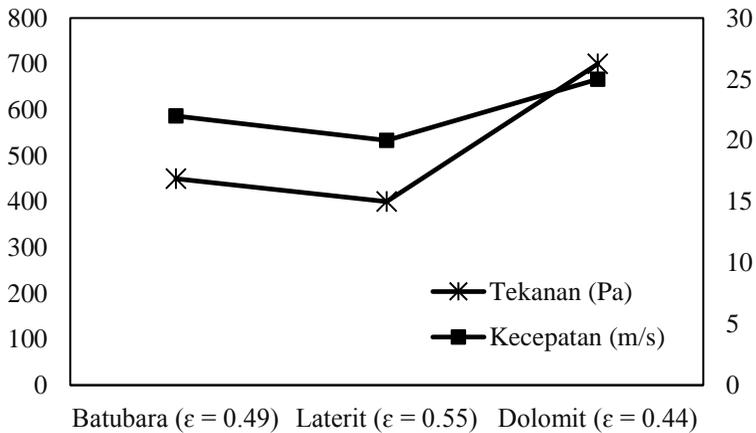
Meningkatnya *pressure drop* seiring bertambahnya ketebalan dapat dijelaskan sebagai berikut. Untuk tiap jenis lapisan *burden material*, seperti yang dibahas pada pengaruh terhadap kecepatan di subbab sebelumnya, meningkatnya ketebalan berdampak pada terkonsentrasinya aliran gas di daerah dengan porositas rendah. Artinya aliran gas tidak lancar berpindah dari 1 *layer* ke lapisan yang lain. Karena resistansi yang dihadapi gas semakin bertambah itulah, *pressure drop* meningkat. Sehingga akan lebih baik menggunakan lapisan yang tipis.

Jika langsung disimpulkan demikian, maka seharusnya lapisan dolomit yang ketebalannya paling minimum memiliki *pressure drop* yang minimum juga. Namun hal tersebut berkebalikan dari data kontur dan grafik 4.5. Sehingga selain selain ketebalan yang tipis, ada faktor penentu lain yang harus ikut



dipertimbangkan. Faktor tersebut adalah porositas, yang menunjukkan permeabilitas suatu susunan material terhadap gas.

Lapisan tipis dolomit memiliki porositas paling rendah yang artinya permeabilitasnya minimum, sehingga resistansi gas semakin tinggi. Vektor kecepatan juga menunjukkan kecepatan interstitial pada lapisan dolomit bernilai paling tinggi di antara yang lain. Semua poin tersebut sesuai dengan persamaan Ergun, di mana semakin kecil porositas, kecepatan interstitial semakin tinggi, dan berujung pada semakin meningkatnya *pressure drop*. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 4.6 yang memperlihatkan hubungan kecepatan gas terhadap *pressure drop* untuk variasi jenis *burden* dengan 1 nilai ketebalan dengan 17 cm untuk batubara, 20 cm untuk laterit, dan 12 cm untuk dolomit.



**Gambar 4.6** Hubungan Porositas, Kecepatan Gas, dan *Pressure Drop* untuk Ketebalan Lapisan 1x



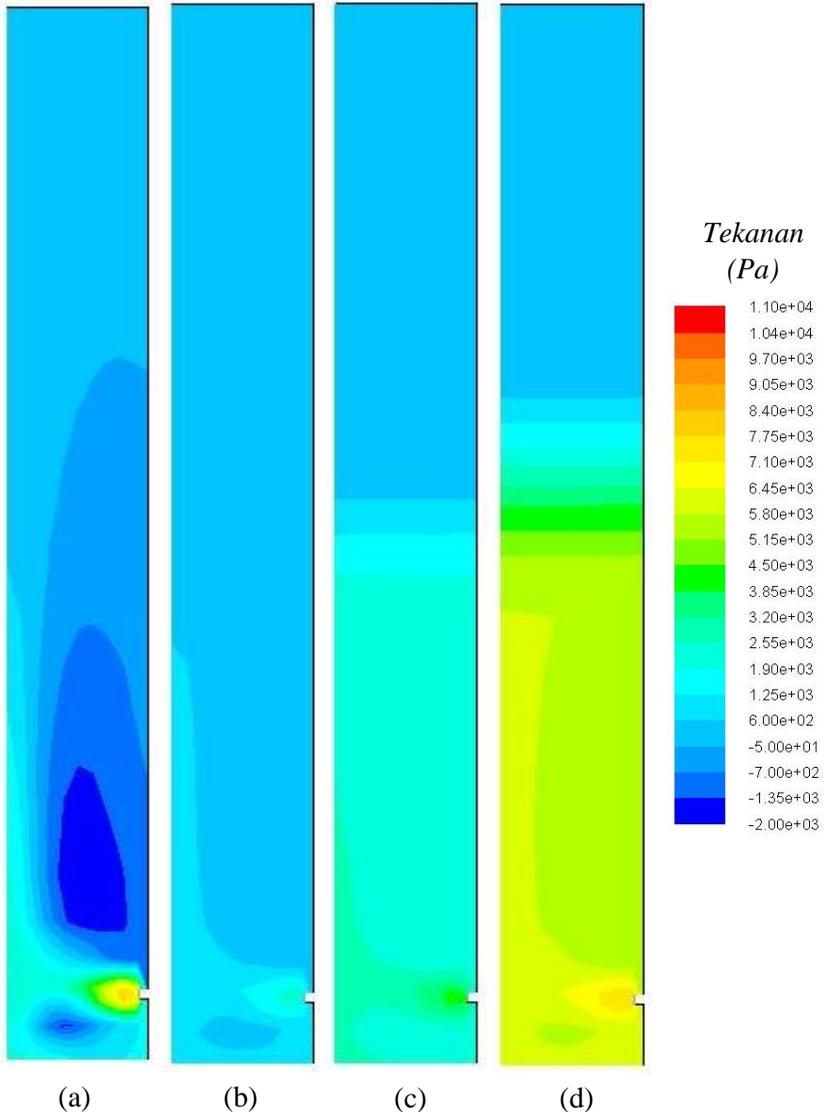
---

Dengan demikian, ditinjau dari pengaruh variasi ketebalan terhadap *pressure drop*, ketebalan *layer* yang paling baik adalah ketebalan paling tipis, namun juga harus disertai porositas lapisan yang tidak terlalu rendah.

#### **4.3 Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan *Burden Material* terhadap proses dalam MBF**

Dari analisa hasil simulasi *single layer* tentang pengaruh variasi ketebalan lapisan material terhadap kecepatan gas dan *pressure drop*, didapatkan bahwa semakin tebal *layer*, transfer momentum semakin tidak baik. Didapat juga pengaruh signifikan porositas terhadap tebal lapisan, yaitu ketebalan lapisan minimum yang tidak didukung porositas memadai tidak akan menghasilkan transfer momentum yang baik. Pada subbab ini akan dibahas dampak kualitas transfer momentum tersebut terhadap proses MBF, dengan menganalisa hasil simulasi *multilayer* atau MBF penuh.

Sesuai dengan *single layer*, Gambar 4.10 menunjukkan kenaikan *pressure drop* seiring bertambahnya ketebalan lapisan material. Kontur yang dihasilkan juga menyerupai hasil penelitian sebelumnya (Natsui, et al., 2015). Kenaikkan tersebut menunjukkan bahwa meski jumlah partikel sama menyesuaikan neraca massa proses ekstraksi, variasi ketebalan menyebabkan perbedaan susunan partikel penyusun lapisan.



**Gambar 4.7** Distribusi Tekanan Layer Batubara  
(a) Tabung Kosong, (b) 17 cm, (c) 68 cm, (d) 170 cm



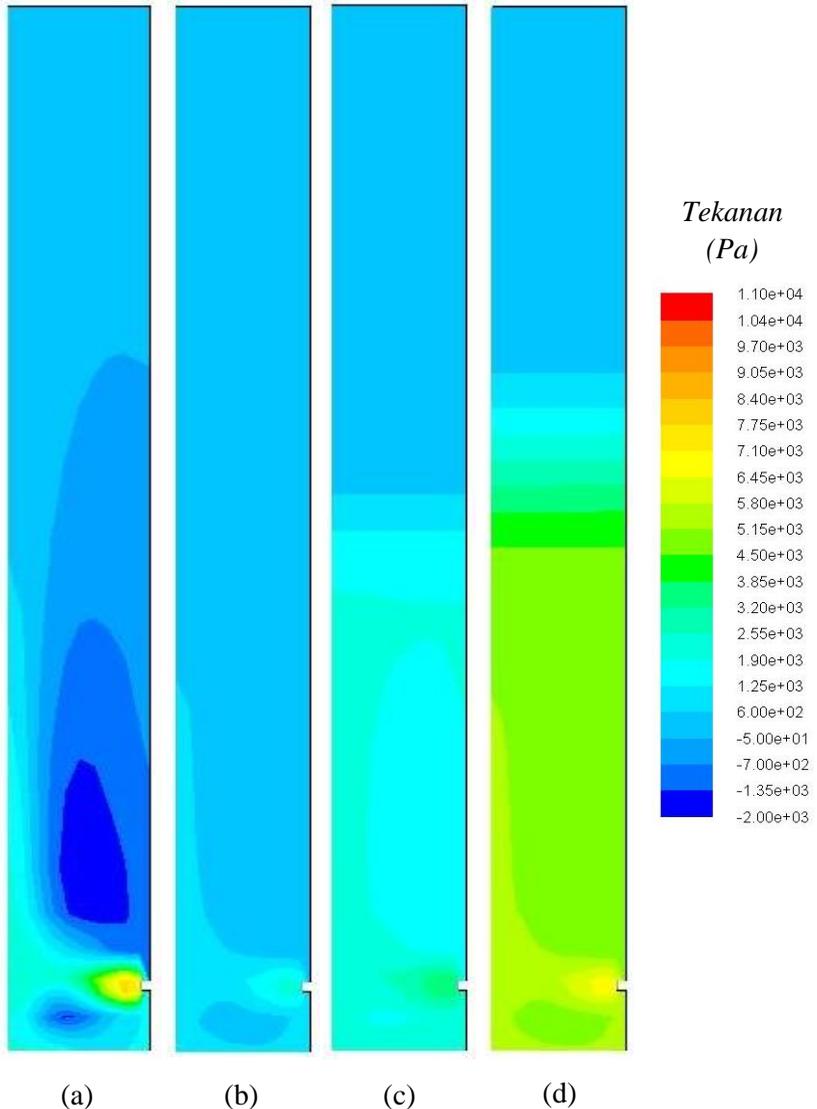
Sehingga diketahui perbedaan susunan partikel merubah porositas MBF. Dengan merujuk ke persamaan Ergun, *pressure drop* naik karena penambahan ketebalan membuat susunan partikel penyusun lapisan mengalami penurunan porositas, dan hal tersebut tidak diinginkan untuk proses MBF yang optimal. Maka ketebalan lapisan material yang sebaiknya digunakan adalah ketebalan asli karena *pressure drop* yang paling rendah.

Untuk analisa lebih mendalam, *pressure drop* dianalisa di dua daerah penting yaitu *tuyere level*, di mana *counter-current flow* mulai terjadi, dan *blast furnace shaft*, di mana interaksi solid dan gas dominan terjadi, dalam bentuk reaksi reduksi *ore* oleh gas reduktor (*blast furnace gas*).

#### 4.3.1 Distribusi tekanan pada *tuyere level*

Gambar 4.11 menunjukkan perbesaran kontur tekanan di *tuyere level*. Profil kontur menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan, *pressure drop* semakin tinggi hingga mencapai titik maksimumnya, dan kemudian mulai turun. Pada simulasi ini, titik maksimum *pressure drop* adalah saat ketebalan bernilai 4 kalinya, karena pada ketebalan 10x tekanan sudah mengalami penurunan, dengan nilai tekanan yang masih lebih tinggi dibanding ketebalan asli.

Grafik 4.12 menunjukkan profil tekanan sepanjang posisi horizontal tepat di depan *tuyere*. *Pressure drop* didefinisikan sebagai perbedaan tekanan di mulut *tuyere* (posisi horizontal pada 1.4 m) dengan tekanan di tengah MBF (posisi horizontal pada 0 m). *Pressure drop* untuk semua variasi ketebalan bernilai lebih besar dibanding ketebalan asli. Secara berurut, nilai ketebalan lapisan material dengan *pressure drop* paling besar hingga paling kecil adalah: 4x, 10x, 1x.



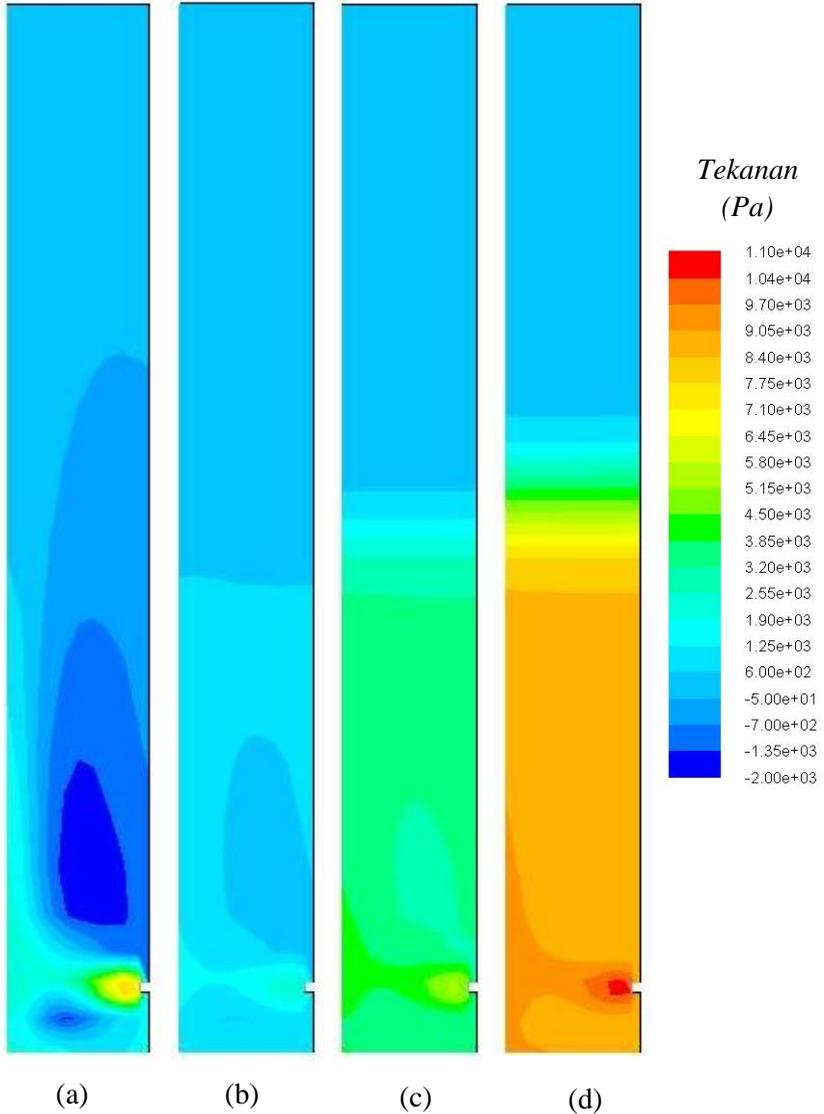
**Gambar 4.8** Distribusi Tekanan Layer Laterit  
(a) Tabung Kosong, (b) 20 cm, (c) 80 cm, (d) 200 cm



---

Pada *tuyere level* dan sekitarnya, material solid yang ada hanyalah hidrokarbon, yang dalam MBF ini berupa batubara. Nilai porositasnya berada diantara laterit dan dolomit. Dengan menelaah lebih jauh lagi, di daerah ini terjadi permulaan *counter-current process*, di mana *blast furnace gas* mengalir ke atas dan fase *liquid* berupa *liquid NPI* dan *slag* mengalir ke bawah melalui celah yang dibentuk porositas itu. Karena aliran *liquid*, luas permukaan jalur gas berkurang sehingga meningkatkan *pressure drop*. Karena gas semakin mengalami resistansi akibat pertemuan dengan *liquid*, kemungkinan terjadinya *liquid hold-up* atau *loading* di celah-celah tersebut semakin besar. Jika semakin mengalami resistansi yang artinya semakin meningkatkan *pressure drop*, kecepatan gas akan semakin meningkat sehingga mampu untuk bergelembung di antara *liquid*. Fenomena ini berujung pada *flooding* yang mengakibatkan penurunan produktivitas *blast furnace*. Dengan demikian, refleksi *pressure drop* di daerah *tuyere* yang paling rendah yang ditunjukkan MBF dengan ketebalan asli menunjukkan resiko *flooding* paling rendah sehingga lebih baik digunakan untuk produktivitas yang baik untuk MBF.

Selain itu, tujuan optimasi proses di dalam sebuah *blast furnace* adalah menciptakan aliran gas yang seragam secara menyeluruh dan tidak mengalami hambatan. Kedua hal tersebut berkaitan salah satunya dengan nilai *pressure drop* yang rendah. Dengan kata lain, ketebalan lapisan material yang paling baik adalah yang nilai tekanannya paling rendah, yaitu ketebalan asli.



**Gambar 4.9** Distribusi Tekanan Layer Dolomit  
(a) Tabung Kosong, (b) 12 cm, (c) 48 cm, (d) 120 cm



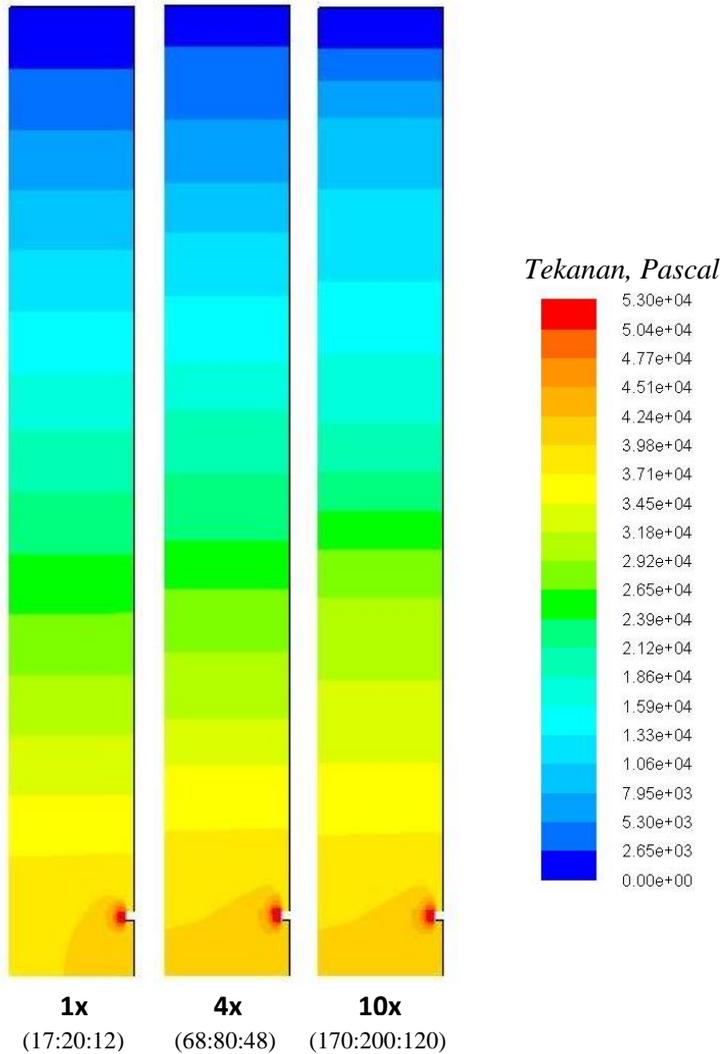
---

### 4.3.2 Distribusi Tekanan pada *Shaft*

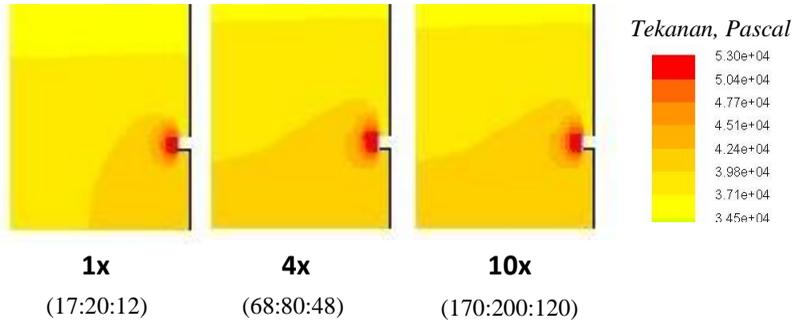
Gambar 4.13 menunjukkan *pressure drop* MBF dari dasar hingga puncak *furnace*, diambil di kondisi simetri,  $x = 0$ . *Pressure drop* pada *shaft* didefinisikan sebagai perbedaan tekanan antara *tuyere level* dan *zero level burden*. Tekanan absolut di *zero level burden* secara otomatis bernilai 1 atm karena pengaturan *boundary condition*. Nilai tekanan di *tuyere level* ditentukan hasil simulasi. MBF. *Pressure drop* hasil simulasi diverifikasi menggunakan kalkulasi manual, dimana didapatkan hasil simulasi bernilai 3% lebih tinggi meski kedua kalkulasi sama-sama menggunakan teori Ergun.

Sama seperti hasil sebelumnya, semua variasi ketebalan menghasilkan *pressure drop* yang lebih tinggi dibanding ketebalan asli. Dengan menggunakan *probing*, didapatkan bahwa *shaft pressure drop* untuk ketebalan 1x bernilai 0.39 bar, dan bernilai 0.4 bar untuk semua variasi ketebalan. Kembali pada pembahasan *single layer*, tekanan naik karena bertambahnya ketebalan lapisan membuat aliran gas terkonsentrasi di daerah dengan porositas rendah sehingga resistansi gas terhadap material solid bertambah. Tekanan yang besar meningkatkan *reduction rate* sekaligus meminimalisir *direct reduction* yang berujung pada *fuel saving* (Biswas, 1981). Sehingga, *layer* yang lebih tebal dari ukuran asli (4x, dan 10x) lebih dianjurkan untuk digunakan.

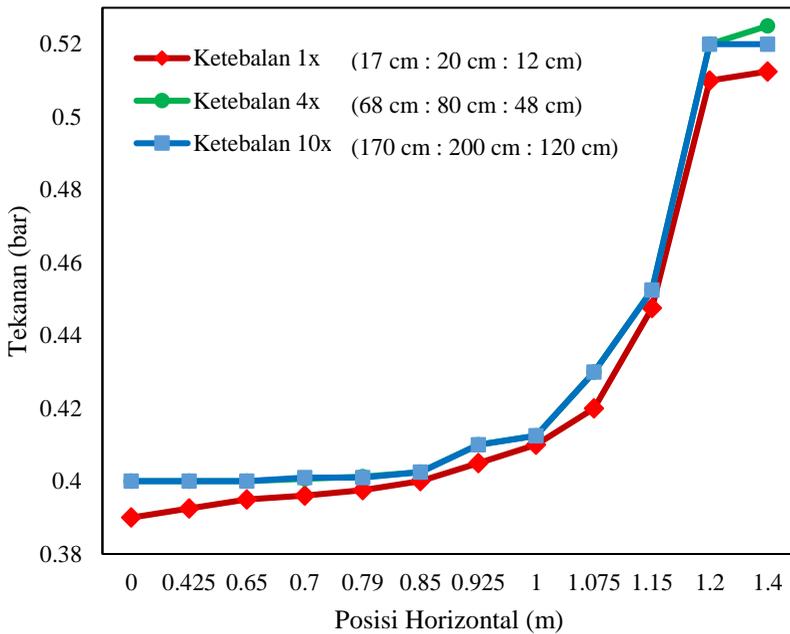
Gambar 4.13 juga menunjukkan naiknya fluktuasi tekanan seiring bertambah tebalnya lapisan *burden material*, ditunjukkan dengan profil grafik yang semakin bergelombang. Perbesarannya dapat dilihat pada Gambar 4.14. Hal ini mengindikasikan terjadi perbedaan resistansi karena variasi ketebalan yang ditemui gas selama mengalir melalui *shaft*. Perbedaan resistansi artinya perbedaan porositas terjadi di daerah-daerah tungku. Hal ini bertentangan dengan teori di mana porositas yang diinginkan di seluruh daerah MBF homogen sehingga aliran gas yang uniform dan bebas hambatan (Biswas, 1981).



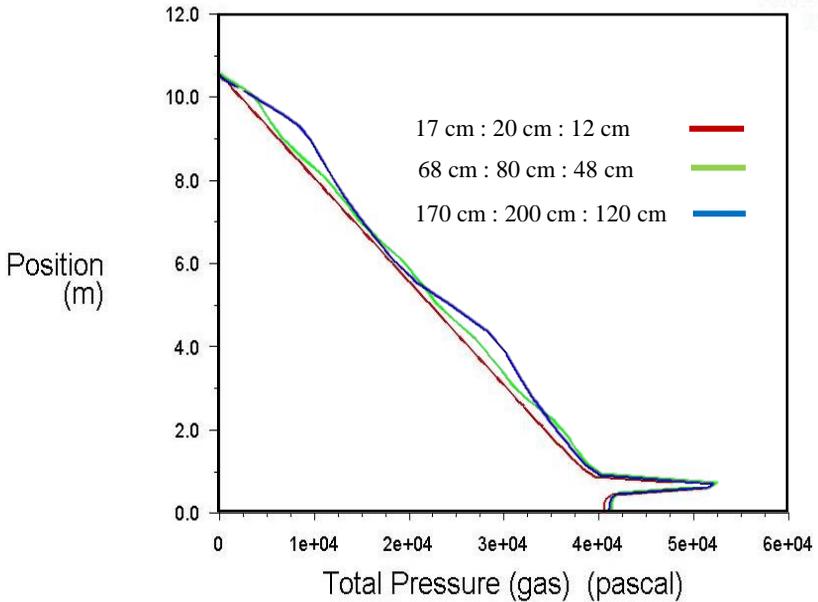
**Gambar 4.10** Distribusi Tekanan MBF *Multilayer*



**Gambar 4.11** Distribusi Tekanan *Tuyere Level*



**Gambar 4.12** *Pressure Drop* pada *Tuyere Level*



**Gambar 4.13** Grafik *Pressure Drop*

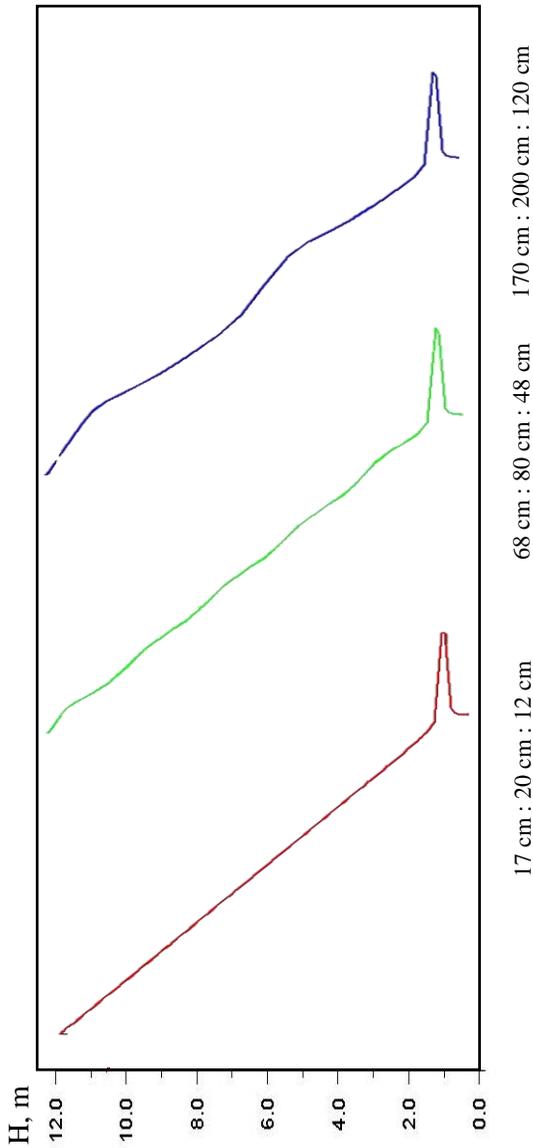
Kemudian, jika melihat kembali analisa *single layer*, perbedaan porositas di sepanjang tungku akan berujung pada terkonsentrasinya aliran gas di satu layer tertentu karena terhambat untuk mengalir ke layer lain. Akibatnya, *pressure drop* yang dihasilkan semakin besar. Sehingga, penggunaan ketebalan asli akan menghasilkan aliran gas yang paling optimal.

*Pressure drop* yang bertambah menunjukkan adanya disipasi energi yang besar akibat pergerakan gas di dalam MBF. Di MBF, energi yang terbuang paling banyak disebabkan oleh temperatur tinggi. Berdasarkan penelitian sebelumnya (Hotta, et al., 1984; Dmitriev, et al., 2006), profil tekanan dapat merefleksikan karakteristik proses BF yang bertemperatur tinggi.



Salah satu karakteristik yang paling penting adalah zona kohesi (*cohesive zone*) yang merupakan bagian dari *lower shaft* dan memiliki resistansi terhadap gas paling tinggi dibanding region MBF yang lain (Matsuhashi, et al., 2012). Dengan menebalnya *layer*, daerah kohesi meluas. Semakin luas *cohesive zone*, zona dengan temperatur tinggi semakin luas. Artinya ada indikasi proses penghasil panas tinggi. Hal ini sesuai dengan refleksi yang dapat ditunjukkan oleh hasil kalkulasi *top gas* yang menyatakan komposisi CO/CO<sub>2</sub> bernilai 1/5, meskipun sudah diasumsikan terjadi reduksi sempurna dengan nilai komposisi CO/CO<sub>2</sub> adalah 2/3. Sebagian besar karbon dioksida yang dihasilkan adalah reaksi pembakaran *volatile matter* (metana) yang menghasilkan panas yang tinggi. Artinya, meski banyaknya CO<sub>2</sub> di *top gas* adalah indikator baiknya produktivitas *blast furnace*, apabila jumlahnya disebabkan reaksi pembakaran, hal tersebut menjadi indikator *low productivity blast furnace* di mana menjadi hanya sedikit CO yang melepas ikatan oksigen pada partikel laterit menjadi CO<sub>2</sub> yang artinya jumlah laterit tereduksi menurun. Dan banyaknya CO<sub>2</sub> tersebut menjadi indikasi adanya *heat loss* karena temperatur MBF yang terlalu tinggi (Geerdes, et al., 2009). Dengan penjelasan-penjelasan tersebut, ketebalan *layer* yang paling baik adalah ketebalan yang menghasilkan daerah rendah resistansi atau menghasilkan nilai *pressure drop* yang kecil, yaitu ketebalan asli.

Sama dengan analisa *single layer*, meski terdapat sisi positif dan negatif lapisan asli dan lapisan lebih tebal, penggunaan ketebalan lapisan asli lebih berpotensi memberikan transfer momentum yang lebih bagus.



**Gambar 4.14** Perbesaran Grafik *Pressure Drop*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa data yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Ketebalan lapisan material tidak signifikan berpengaruh terhadap nilai kecepatan gas. Namun berpengaruh pada terhambat atau tidaknya arah aliran gas. Semakin tebal *burden layer*, arah aliran gas semakin terhambat. Sehingga lebih baik menggunakan lapisan yang tipis.
2. Ketebalan lapisan material berpengaruh terhadap *pressure drop*. Semakin tebal, *pressure drop* semakin naik. Namun penggunaan lapisan tipis juga harus diimbangi dengan porositas yang tidak terlalu rendah
3. Ketebalan lapisan yang paling optimal untuk proses pengolahan bijih nikel laterit di MBF pengolahan NPI milik JTMM berkapasitas 250 ton laterit per hari adalah ketebalan terendah (1x) yaitu 17 cm untuk batubara, 20 cm untuk laterit, dan 12 cm untuk dolomit karena menghasilkan nilai *pressure drop* yang paling rendah

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk kedepannya adalah:

1. Melakukan studi lebih lanjut dengan melibatkan transfer panas dan transfer massa (*species*) agar simulasi lebih representatif.
2. Melakukan *coupling* atau simulasi berderet dengan melibatkan *discrete element method* (DEM) untuk perlakuan fasa solid agar simulasi solid berdasarkan satuan partikel bukan satuan volume, yang dalam hal ini menjadikan simulasi lebih mendekati kondisi lapangan.



*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

**DAFTAR PUSTAKA**

- ANSYS Inc, 2013. *ANSYS Fluent User's Guide*, Canonsburg: ANSYS.
- Bird, R., Stewart, W. & Lightfoot, E., 1960. *Transport Phenomena*. New York: Wiley.
- Biswas, A., 1981. *Principles of Blast Furnace Ironmaking : Theory and Practice*. Calcutta: SBA Publications.
- Campbell, F., 2008. *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. New York: ASM International.
- Crundwell, F. K., 2011. *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt, and Platinum-Group Metals*.s.l.:Elsevier.
- Dalvi, A. D., Bacon, W. G. & Osborne, R. C., 2004. *The Past and The Future of Nickel Laterites*. Canada, Inco, pp. 1-7.
- Dmitriev, A. et al., 2006. *Influence of Pressure on Two-Dimensional Character of Phenomena in The Blast Furnace*, Ekaterinburg: Institute of Metallurgy of Ural Branch of Russian Academy of Sciences.
- Ferziger, J. & Peric , M., 2002. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd ed. Germany: Springer-Verlag.
- Fu, D. et al., 2014. CFD modeling of multiphase reacting flow in blast furnace shaft with layered burden. *Applied Thermal Engineering*, Volume 66, pp. 298 - 308.
- Geerdes, M., Toxopeus, H. & van der Vliet, C., 2009. *Modern Blast Furnace Ironmaking : An Introduction*. 2nd ed. Amsterdam: IOS Press.
- Haddadi, B., Jordan, C., Norouzi, H. R. & Harasek, M., 2016. Investigation of the Pressure Drop of Random Packed Bed Adsorbers. *Chemical Engineering Transaction*, Volume 52.
- Hotta, H., Taninaka, H., Yamamoto, R. & Kishimoto, S., 1984. High Temperature Properties of Mixed Layer of Iron Ores and Coke. *Tetsu-to-Hagane*, Volume 70, p. S814.

- Jeong, W. & Seong, J., 2014. Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 78, pp. 19 - 26.
- Kon, T. et al., 2013. Influence of Cohesive Zone Thickness on Gas Flow in Blast Furnace Analyzed by DEM-CFD Model Considering Low Coke Operation. *Steel Research International*, 84(11), pp. 1146 - 1156.
- LearnCAx, 2015. *learnCax*. [Online]  
Available at: [learnCAx.com](http://learnCAx.com)  
[Accessed 28 October 2016].
- Matsuhashi, S. et al., 2012. Evaluation of Coke Mixed Charging Based on Packed Bed Structure and Gas Permeability Changes in Blast Furnace by DEM-CFD Model. *ISIJ International*, 52(11), pp. 1990 - 1999.
- Middleman, S., 1998. *An Introduction to Fluid Dynamics, Principles of Analysis and Design*. New York: John Miley & Sons, Inc..
- Mousa, E. A., Babich, A. & Senk, D., 2011. Effect of Nut Coke-sinter Mixture on the Blast Furnace Performance. *ISIJ International*, 51(3), pp. 350 - 358.
- Natsui, S. et al., 2015. Model study of the effect of particles structure on the heat and mass transfer through the packed bed in ironmaking blast furnace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 91, pp. 1176 - 1186.
- Nurjaman, F., Shofi, A. & Suharno, B., 2016. *Pembuatan NPI (5-8% Ni) Menggunakan Hot Blast Cupola Furnace Kapasitas 3 Ton/Hari*. Bandung, Institut Teknologi Bandung.
- Patel, G. N., 2010. *CFD Simulation of Two-phase and Three-phase flow in Internal-loop Airlift Reactors*, Finland: Lappeenranta University of Technology.

- Takahasi, H. & Komatsu, N., 1993. Cold Model Study on Burden Behaviour in the Lower Part of Blast Furnace. *ISIJ International*, 33(6), pp. 655 - 663.
- von Kruger, P. et al., 2010. *Relevant Aspects related to Production of Iron Nickel Alloys (Pig Iron containing Nickel) in Mini Blast Furnace*. Helsinki, s.n., pp. 671 - 680.
- Whitaker, S., 1968. *Introduction to Fluid Mechanics*. New Jersey: Prentice Hall Inc..
- Yang, K., Choi, S., Chung, J. & Yagi, J.-I., 2010. Numerical Modeling of Reaction and Flow Characteristics in a Blast Furnace with Consideration of Layered Burden. *ISIJ International*, 50(7), pp. 972 - 980.
- Yildirim, H., Morcali , H., Turan, A. & Yucel, O., 2013. Nickel Pig Iron Production from Lateritic Nickel Ores. *The 13th International Ferroalloys Congress, Efficient technologies in ferroalloys industry*, pp. 237 - 244.
- Zhang, S. et al., 2002. Numerical simulation of solid flow in blast furnace. *Applied Mathematical Modelling*, Volume 26, pp. 141-154.

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## LAMPIRAN

### Lampiran A

Perhitungan Data Operasional Material Umpan

1. Mendapatkan nilai densitas

Nilai densitas batubara, laterit, dan dolomit didapatkan secara eksperimental menggunakan hukum Archimedes (massa dibagi volume). Hasil pengukuran merepresentasikan densitas tiap jenis material secara umum.

**Tabel A1 Hasil Pengukuran Densitas Laterit**

<b>Indikator</b>	<b>Pengukuran</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Massa (g)	225	145	240
Volume (cm <sup>3</sup> )	110	75	125
Massa per Volume	2.045	1.93	1.92
Rerata Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	1966		

**Tabel A2 Hasil Pengukuran Densitas Dolomit**

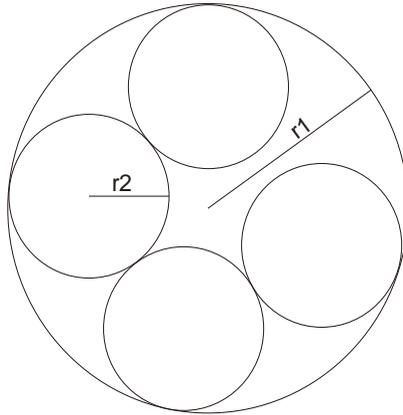
<b>Indikator</b>	<b>Pengukuran</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Massa (g)	97	110	131
Volume (cm <sup>3</sup> )	60	70	75
Massa per Volume	1.616	1.57	1.746
Rerata Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	1645		

**Tabel A3 Hasil Pengukuran Densitas Batubara**

<b>Indikator</b>	<b>Pengukuran</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Massa (g)	188.3	107.4	148
Volume (cm <sup>3</sup> )	125	83	100
Massa per Volume	1.5064	1.294	1.48
Rerata Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	1420		

2. Mendapatkan nilai porositas

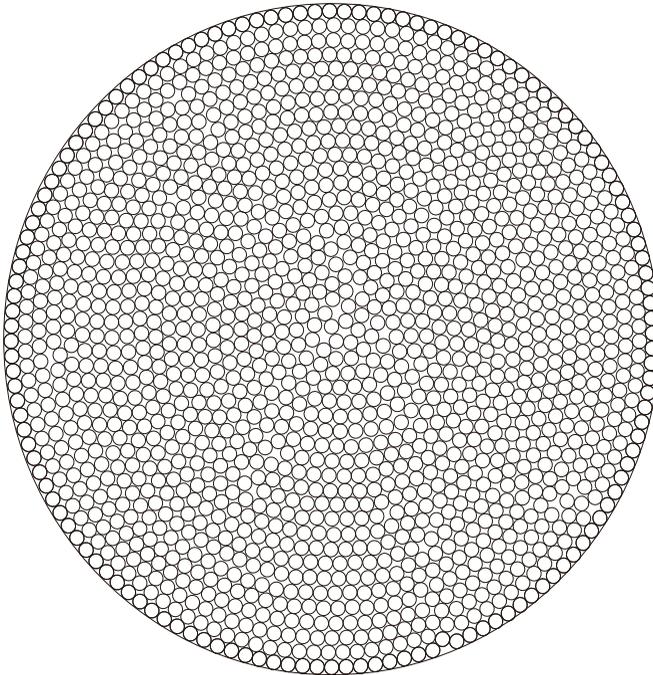
Nilai porositas didapatkan, dengan asumsi distribusi ukuran yang homogen, melalui perhitungan manual dan eksperimen. Porositas *sintered laterite* dapat dihitung secara manual. Porositas batubara dihitung secara eksperimental dengan bantuan air.



**Gambar A1** Porositas *Sintered Laterite*

Gambar di atas adalah ilustrasi untuk perhitungan manual *sintered laterite* dengan menggunakan sebuah bejana. Jari-jari bejana sebesar 7.5 cm ditunjukkan dengan  $r_1$  dan jari-jari laterit bernilai 3 cm ditunjukkan dengan  $r_2$ . Ada total 4 *sintered laterite* yang bisa masuk bejana.

- Volume bejana yang ditempati *sintered laterite*  
 $V_R = V_{\text{tabung}} = \pi r^2 t = 3.14 \times (7.5)^2 \times 6 = 1059.75 \text{ cm}^3$
- Volume 1 partikel *sintered laterite*  
 $V_p = V_{\text{bola}} = 4/3 \pi r^3 = 4/3 \times 3.14 \times 3^3 = 113.04 \text{ cm}^3$
- *Void fraction*  
 $\varepsilon = (V_R - V_{\text{all}}) / V_R = (V_R - V_p N_p) / V_R = (1059.75 - 113.04 \times 4) / 1059.75 = 0.57$



**Gambar A2** Porositas *Sintered Laterite* dengan *Scaled Down*

Gambar di atas adalah ilustrasi 2D lapisan laterit di dalam bejana dengan ukuran scaled down terhadap MBF, dengan satuan centimeter. Sehingga, diameter bejana bernilai 283.2 cm dan diameter laterit bernilai 6 cm. Laterit disusun uniform dan homogen dengan ketebalan 6 cm. Terdapat 1434 laterit yang tertampung di dalam bejana.

- Volume bejana yang ditempati *sintered laterite*  
 $V_R = V_{\text{tabung}} = \pi r^2 t = 3.14 \times (141.6)^2 \times 6 = 377752.55 \text{ cm}^3$
- Volume 1 partikel *sintered laterite*  
 $V_p = V_{\text{bola}} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3} \times 3.14 \times 3^3 = 113.04 \text{ cm}^3$
- *Void fraction*  
 $\varepsilon = (V_R - V_{\text{all}})/V_R = (V_R - V_p N_p)/V_R = (377752.55 - 113.04 \times 1434)/377752.5 = 0.57$

Dengan menjadikan ketebalan lapisan laterit sebagai basis:

- Ketebalan lapisan laterit : 20 cm  
 $V_L = V_{\text{tabung}} = \pi r^2 t = 3.14 \times (141.6)^2 \times 20 = 1259175.17 \text{ cm}^3$
- Volume laterit asli =  $1259175.17/377752.5 = 3.3$  kalinya volume laterit dengan tebal 6 cm atau tinggi laterit asli =  $20/6 = 3.3$  kalinya tinggi laterit ilustrasi. Keduanya menyertakan rongga udara.

Sehingga, sesuai asumsi distribusi ukuran partikel homogen dan lapisan asli disusun dengan pola yang sama:

- Volume total partikel *sintered laterite*  
 $V_{\text{ptotal}} = V_p N_p \times 3.3 = 162099.36 \times 3.3 = 534927.888 \text{ cm}^3$
- *Void fraction*  
 $\varepsilon = (V_L - V_{\text{ptotal}})/V_L = (1259175.17 - 534927.888) / 1259175.17 = 0.58$

Didapatkan porositas lapisan laterit dengan ketebalan 20 cm sebesar 0.58. Sehingga, *error* yang didapat dibanding perhitungan manual dengan bejana berdiameter 15 cm adalah 2%. Dengan nilai *error* yang cukup kecil, pengukuran porositas secara eksperimental selanjutnya dilakukan menggunakan bejana dengan diameter 15 cm.

Penentuan porositas batubara dilakukan juga dengan eksperimen. Batubara dengan ukuran 7 cm disusun hingga ketinggian 7 cm di dalam bejana dengan diameter 15 cm. Kemudian, air dimasukkan ke dalamnya hingga ketinggian yang sama dengan susunan material. Volumennya diukur, dan didapatkan *volume of void*. Melalui 3 kali pengukuran, rerata *volume of void* adalah  $600 \text{ cm}^3$ . Sehingga:

- Volume bejana yang ditempati batubara  
 $V_R = V_{\text{tabung}} = \pi r^2 t = 3.14 \times (7.5)^2 \times 7 = 1236 \text{ cm}^3$
- *Void fraction*  
 $\varepsilon = V_{\text{void}}/V_R = 600/1236 = 0.49$

Penentuan porositas dolomit dilakukan juga melalui eksperimen. Dolomit dengan ukuran 5 cm disusun hingga ketinggian 4.5 cm di dalam bejana dengan diameter 15 cm. Kemudian, air dimasukkan ke dalamnya hingga ketinggian yang sama dengan susunan material. Volumnya diukur, dan didapatkan *volume of void*. Melalui 3 kali pengukuran, rerata *volume of void* adalah 350 cm<sup>3</sup>. Sehingga:

- Volume bejana yang ditempati batubara  
 $V_R = V_{\text{tabung}} = \pi r^2 t = 3.14 \times (7.5)^2 \times 4.5 = 795 \text{ cm}^3$
- Void fraction  
 $\varepsilon = V_{\text{void}}/V_R = 350/795 = 0.44$

### 3. Massa input tiap layer

Perhitungan massa input tiap layer dimulai dari lapisan laterit sebagai basis. Selanjutnya digunakan perbandingan massa laterit, batubara, dan dolomit yang didapatkan dari kapasitas material input MBF per hari.

- Laterit  
 $\rho = 1.966 \text{ g/cm}^3$   
 Volume input = Volume tanpa rongga udara =  $V_{\text{total}} = 534927.888 \text{ cm}^3$   
 Massa input =  $1.966 \times 534927.888 = 1052 \text{ kg}$
- Batubara  
 Kapasitas input laterit per hari = 250 ton  
 Kapasitas input batubara per hari = 170 ton  
 Perbandingan input batubara dan laterit = 17/25  
 Massa input =  $17/25 \times 1052 = 715 \text{ kg}$   
 $\rho = 1420 \text{ kg/m}^3$   
 Volume input =  $0.5 \text{ m}^3$   
 $\varepsilon = 0.49$   
 Volume total dengan rongga udara =  $0.98 \text{ m}^3$   
 Tinggi material = 17 cm
- Dolomit  
 Kapasitas input laterit per hari = 250 ton

Kapasitas input dolomit per hari = 160 ton  
 Perbandingan input batubara dan laterit = 16/25  
 Massa input =  $16/25 \times 1052 = 673 \text{ kg}$   
 $\rho = 1645 \text{ kg/m}^3$   
 Volume input =  $0.41 \text{ m}^3$   
 $\varepsilon = 0.44$   
 Volume total dengan rongga udara =  $0.73 \text{ m}^3$   
 Tinggi material = 12 cm

4. Massa 1 batch

Tinggi 1 paket lapisan material =  $20 + 17 + 12 = 49 \text{ cm}$   
 Kapasitas lapisan maksimum di dalam MBF =  $988/49 = 20$   
 Jumlah laterit per kapasitas maksimum =  $20 \times 1052 = 21.04 \text{ ton}$   
 Jumlah batubara per kapasitas maksimum =  $20 \times 715 = 14.3 \text{ ton}$   
 Jumlah dolomit per kapasitas maksimum =  $20 \times 673 = 13.46 \text{ ton}$

Jumlah batch per hari adalah kapasitas material input maksimum per hari dibagi jumlah material input per kapasitas maksimum. Dengan basis laterit, jumlah batch =  $250/21.04 = 12 \text{ jam}$

Dengan sehari ada 24 jam, *residence time* sebesar 2 jam.

## Lampiran B

### Neraca Massa untuk Sifat Fisik Gas *Mini Blast Furnace*

Komposisi dalam laterit, dolomit, dan batubara dibutuhkan dalam perhitungan neraca massa. Berikut adalah tabel komposisi tersebut.

Tabel B1 Komposisi Batubara

Unsur	Kandungan (%wt)
C	42.35
H <sub>2</sub> O	1.8
SiO <sub>2</sub>	20.96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.33
CaO	1.22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.02

Tabel B2 Komposisi Dolomit

Unsur	Kandungan (% wt)
Mg	14.6135
Al	0.004
Si	0.1825
S	0.0345
Ca	18.015
Mn	0.00105
Fe	0.127
Zr	0.00065
Other	67.022

Tabel B3 Komposisi Laterit

<b>Unsur</b>	<b>Kandungan (% wt)</b>
Ni	2.385
Ca	0.6995
Cr	0.592
Fe	19.85
K	0.01
Mg	13.4
Mn	0.2535
Na	0.0307
P	0.0077
S	0.01
Ti	0.06705
Al	5.465
Si	10
Co	0.0454
Cl	0.005
Cu	0.00526
Zn	0.0208

Tabel B4 Komposisi Udara

<b>Unsur</b>	<b>Kandungan (%wt)</b>
O <sub>2</sub>	23.2
N <sub>2</sub>	75.47

## 1. Debit udara

Perhitungan debit gas didasarkan pada oxygen balance di dalam MBF dengan rincian sebagai berikut:

- Oksigen dari material input

- $\text{CaCO}_3$

$\text{CaCO}_3$  dari dolomit akan mengalami reaksi dekomposisi sebagai berikut:



Dengan  $\text{CaO}$  dibuang ke slag dan  $\text{CO}_2$  dibuang melalui *off gas*.

Kadar Ca dolomit = 18.015%

$\text{CaCO}_3$  dari Ca =  $\frac{\text{Mr CaCO}_3}{\text{Mr Ca}} \times \% \text{Ca} = \frac{100}{40} \times 18.015\% = 45\%$

$\text{CaCO}_3$  dolomit = 6057 kg = 61 kmol

Mol  $\text{CaO}$  = Mol  $\text{CaCO}_3$  = 61 kmol

Atom O dari  $\text{CaCO}_3$  =  $(3 \times \text{Ar O} / \text{Mr CaCO}_3) \times \text{Mol}$

$\text{CaCO}_3$  = 29.28 kmol

Atom O dari  $\text{CaO}$  =  $\frac{\text{Ar O}}{\text{Mr CaO}} \times \text{Mol CaO} = 17.43$  kmol

Atom O yang tersedia =  $29.28 \text{ kmol} - 17.43 \text{ kmol} = 11.85 \text{ kmol}$

Oksigen tersedia =  $2 \times 11.85 \text{ kmol} = 23.7 \text{ kmol}$

- $\text{MgCO}_3$

$\text{MgCO}_3$  dari dolomit akan mengalami reaksi dekomposisi sebagai berikut:



Dengan  $\text{MgO}$  dibuang ke *slag* dan  $\text{CO}_2$  dibuang melalui *off gas*.

Kadar Mg dolomit = 14.61%

$\text{MgCO}_3$  dari Mg =  $\frac{\text{Mr MgCO}_3}{\text{Mr Mg}} \times \% \text{Mg} = \frac{84}{24} \times 14.61\% = 51\%$

$\text{MgCO}_3$  dolomit = 6865 kg = 82 kmol

Mol  $\text{MgO}$  = Mol  $\text{MgCO}_3$  = 82 kmol

Atom O dari  $\text{MgCO}_3 = (3 \times \text{Ar O} / \text{Mr MgCO}_3) \times \text{Mol MgCO}_3 = 46.86 \text{ kmol}$

Atom O dari  $\text{MgO} = \text{Ar O} / \text{Mr MgO} \times \text{Mol MgO} = 32.8 \text{ kmol}$

Atom O yang tersedia =  $46.86 \text{ kmol} - 32.8 \text{ kmol} = 14.06 \text{ kmol}$

Oksigen tersedia =  $2 \times 14.06 \text{ kmol} = 28.12 \text{ kmol}$

○  $\text{MnO}$

Reaksi reduksi  $\text{MnO}$  dari laterit:



Kadar Mn laterit = 0.2535%

$\text{MnO}$  dari Mn =  $\text{Mr MnO} / \text{Ar Mn} \times \% \text{Mn} = 71/55 \times 0.2535 = 0.33\%$

$\text{MnO}$  laterit =  $69 \text{ kg} = 0.98 \text{ kmol}$

Atom O dari  $\text{MnO} = 16/71 \times 0.98 = 0.22 \text{ kmol}$

Oksigen tersedia = 0.44 kmol

○  $\text{SiO}_2$

$\text{SiO}_2$  dari laterit dan batubara akan mengalami reaksi reduksi sebagai berikut:



Kadar Si laterit = 10%

$\text{SiO}_2$  dari Si = 21.39%

$\text{SiO}_2$  laterit =  $4503 \text{ kg} = 75 \text{ kmol}$

Atom O dari  $\text{SiO}_2 = 40 \text{ kmol}$

Oksigen tersedia = 80 kmol

Kadar *ash* batubara = 4.75%

$\text{SiO}_2$  dalam *ash* = 20.96%

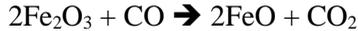
$\text{SiO}_2$  batubara =  $20.96\% \times 4.75\% \times 14300 = 142 \text{ kg} = 2.4 \text{ kmol}$

Atom O dari  $\text{SiO}_2 = 1.28 \text{ kmol}$

Oksigen tersedia = 2.56 kmol

○  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  dari laterit akan mengalami reaksi reduksi sebagai berikut:



Dengan FeO dibuang ke *slag* dan  $\text{CO}_2$  dibuang melalui *off gas*.

Kadar Fe laterit = 19.85%

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  dari Fe = 28.38%

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  laterit = 5971 kg = 37 kmol

Mol FeO = Mol  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  = 37 kmol

Atom O dari  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  = 11.1 kmol

Atom O dari FeO = 8.2 kmol

Atom O yang tersedia = 2.9 kmol

Oksigen tersedia = 5.8 kmol

○ Jumlah total oksigen tersedia

$$= 23.7 + 28.12 + 0.44 + 80 + 2.56 + 5.8 = 140.62 \text{ kmol}$$

- Total karbon dalam gas

$$= \frac{\%C \text{ batubara} \times \text{massa batubara}}{\begin{aligned} & \text{mr karbon} \\ & + \left[ \frac{\% \text{CaCO}_3}{\text{mr CaCO}_3} + \frac{\% \text{MgCO}_3}{\text{mr MgCO}_3} \right] \\ & \times \text{massa dolomit} \\ & - \frac{\%C \text{ pig iron} \times \text{THM}}{\text{mr karbon}} \end{aligned}}$$

THM dengan Ni balance

Asumsi *yielding* Ni = 70%

Ni di pig iron = 20%

*Yielding* Ni x % Ni di laterit = Ni di metal

$$0.7 \times 0.02385 \times 250 = 0.2 \times \text{THM}$$

THM = 21 per *day* = 1.7 THM per *batch* = 1700 kg per 2

jam

Total karbonAsumsi karbon di *pig iron* = 2%

$$= \frac{0.4235 \times 14300}{12} + \left[ \frac{0.45}{100} + \frac{0.51}{84} \right] \times 13460 - \frac{0.02 \times 1700}{12} = 645 \text{ kmol}$$

- Oksigen dari udara

Kebutuhan untuk pembakaran karbonAsumsi CO : CO<sub>2</sub> = 2:1C → CO = 2/3 x 645 = 430 kmol, O<sub>2</sub> = 215 kmolC → CO<sub>2</sub> = 1/3 x 645 = 215 kmol, O<sub>2</sub> = 215 kmolJumlah O<sub>2</sub> = 430 kmol

$$\Rightarrow \text{O}_2 \text{ dari udara} = \text{Kebutuhan O}_2 - \text{O}_2 \text{ tersedia} = 430 - 140.62 = 289.38 \text{ kmol}$$

- Debit udara

O<sub>2</sub> per *batch* = 289.38 kmol/2 jam = 144.69 kmol/jamO<sub>2</sub> per menit = 2.4 kmolKadar O<sub>2</sub> di udara = 23.2%Volume udara dalam STP = 2.4 kmol/0.232 x 22.4 = 232 Nm<sup>3</sup>/menit

Menurut penelitian sebelumnya, debit yang dibutuhkan berlebih sebesar 3 kali dari perhitungan neraca massa sehingga debit sesungguhnya = 3 x 232 = 696 Nm<sup>3</sup>/menit

2. Kecepatan udara masuk per tuyere

Jumlah tuyere : 10

Diameter tuyere : 0.1 m

Luas permukaan tuyere = 7.85x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>Debit per tuyere = 69.6 Nm<sup>3</sup>/menit

Kecepatan gas per tuyere = Debit per luas permukaan tuyere per 60 detik = 148 m/s

### 3. Komposisi *off gas*

Perhitungan komposisi *off gas* didasarkan pada neraca massa masing-masing senyawa di dalam MBF. Komposisi *off gas* dianggap terdiri dari H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, *volatile matter* dan N<sub>2</sub>.

- N<sub>2</sub>

O<sub>2</sub> input dari debit udara yang digunakan =  $696/22.4 \times 0.232 = 7.2$  kmol per menit

O<sub>2</sub> input per *batch* = 864 kmol

Perbandingan N<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> pada udara = 75.47% : 23.2% = 3.3

N<sub>2</sub> hot blast didapatkan langsung dari udara karena tidak mengalami reaksi kimia

$N_2 = 3.3 \times 864 = 2851$  kmol

- SO<sub>2</sub>

Sulfur input laterit = %S x massa input laterit = 0.01% x 21040 = 2.104 kg

Sulfur input batubara = %S x massa input batubara = 0.83% x 14300 = 118.69 kg

Sulfur input dolomit = %S x massa input dolomit = 0.0345% x 13460 = 4.64 kg

Sulfur output Fe-Ni = %S x THM per batch = 6% x 1700 = 102 kg

Sulfur pada *off gas* = 2.104 + 118.69 + 4.64 - 102 = 23.434 kg = 0.73 kmol

SO<sub>2</sub> pada *off gas* =  $64/32 \times 0.73 = 1.46$  kmol

- *Volatile matter (VM)*

Kandungan VM pada batubara = 52.86% = 7559 kg

VM dianggap berupa metana

Jumlah VM = 472 kmol

Sesuai reaksi pembakaran metana berikut ini:



Jumlah O<sub>2</sub> yang dibutuhkan untuk membakar metana = 2 x 472 = 944 kmol

Jumlah O<sub>2</sub> debit total = 864 kmol

Jumlah O<sub>2</sub> yang dibutuhkan neraca massa = 289.38 kmol

Jumlah O<sub>2</sub> sisa untuk membakar VM = 864 – 289.38 =  
574.62 kmol

Sehingga jumlah VM yang dapat terbakar = 287.31 kmol

VM *off gas* = Sisa VM yang tidak terbakar = 472 –  
287.31 = 184.69 kmol

- CO dan CO<sub>2</sub>

Dengan asumsi CO : CO<sub>2</sub> *off gas* = 2 : 3

CO = 2/5 x 289.38 = 115.75 kmol

CO<sub>2</sub> = 3/5 x 289.38 = 173.63 kmol

CO<sub>2</sub> dari VM = mol CH<sub>4</sub> yang terbakar = 287.31 kmol

- H<sub>2</sub>O

Input batubara = %H<sub>2</sub>O x massa input batubara = 1.7% x  
14300 = 243.1 kg

Input laterit = %H<sub>2</sub>O x massa input laterit = 5% x 21040  
= 1052 kg

Input dolomit = %H<sub>2</sub>O x massa input dolomit = 5% x  
13460 = 673 kg

Dari VM = 2 x mol CH<sub>4</sub> yang terbakar = 574.62 kmol =  
9194 kg

H<sub>2</sub>O = 243 + 1052 + 673 + 9194 = 11162 kg = 698 kmol

**Tabel B2** Komposisi *Off Gas*

No	<i>Hot Blast</i>	Nilai (kmol)	Persentase (%)
1.	H <sub>2</sub> O	698	16.19
2.	N <sub>2</sub>	2851	66.13
3.	CO	115.75	2.68
4.	CO <sub>2</sub>	460.94	10.69
5.	SO <sub>2</sub>	1.46	0.03
6.	<i>Volatile matter</i>	184.69	4.28
Total		4311.84	100

#### 4. Densitas dan viskositas *off gas*

Densitas tiap-tiap senyawa pembangun *off gas* dihitung menggunakan persamaan gas ideal untuk *incompressible flow*. Densitas *off gas* secara tunggal dihitung menggunakan *rule of mixture*. Densitas didapatkan sesuai dengan kondisi *blast furnace* pada umumnya yaitu untuk tekanan 1 atm dan temperatur 1200 K.

Persamaan gas ideal untuk *incompressible flow*:

$$\rho_i = (M_{r_i} \cdot P) / (RT)$$

Persamaan *rule of mixture*:

$$\rho = x_1\rho_1 + x_2\rho_2 + \dots + x_n\rho_n$$

Dengan

- i : senyawa pembangun *off gas*
- x : persentase senyawa dalam campuran
- P : tekanan 1 atm
- R : konstanta gas ideal untuk satuan atm dan Kelvin (0.082 L atm / K mol)
- T : temperatur 1200 K

Sehingga didapatkan densitas senyawa pembangun *off gas* dan densitas campuran sebagai berikut (1 gr/l = 1 kg/m<sup>3</sup>):

- H<sub>2</sub>O : 0.18 kg/m<sup>3</sup>
- SO<sub>2</sub> : 0.65 kg/m<sup>3</sup>
- CO : 0.28 kg/m<sup>3</sup>
- CO<sub>2</sub> : 0.45 kg/m<sup>3</sup>
- N<sub>2</sub> : 0.28 kg/m<sup>3</sup>
- VM : 0.16 kg/m<sup>3</sup>
- *Off gas* : 0.27 kg/m<sup>3</sup>

Viskositas *off gas* diambil dari literatur untuk tekanan 1 atm dan temperatur 1200 K dengan nilai  $5 \times 10^{-5}$  kg/m.s

## Lampiran C

### Perhitungan Manual Transfer Momentum

Perhitungan manual transfer momentum dilakukan untuk ketebalan lapisan material yang asli. Dengan nilai hasil simulasi yang tervalidasi, analisa fenomena yang terjadi akibat variasi ketebalan lapisan material dapat dianalisa.

Persamaan yang digunakan adalah persamaan Ergun untuk aliran fluida di dalam tabung isi padat (*flow through packed bed*) seperti yang sudah dijabarkan di tinjauan pustaka.

- *Pressure Drop*

$$Q_o = 696 \text{ Nm}^3/\text{min} = 24579 \text{ ft}^3/\text{min STP} = 25978 \text{ ft}^3/\text{min} \\ (60^\circ\text{F}, 29.9 \text{ inHg})$$

$$P_e = 1 \text{ atm absolut} = 14.7 \text{ lbf/in}^2$$

$$H \text{ (dari tuyere)} = 9.88 \text{ m} = 32 \text{ ft}$$

$$A_a = (3.14 \times 2.832^2) / 4 = 6.3 \text{ m}^2 = 68 \text{ ft}^2$$

$$D_p \text{ rata-rata} = 0.06 \text{ m} = 2.4 \text{ in}$$

$$t \text{ rata-rata} = 1200 \text{ K} = 1700^\circ\text{F}$$

$$\varepsilon \text{ rata-rata} = 0.5$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \sqrt{P_e^2 + 5.9 \times 10^{-6} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}\right) \cdot \left(\frac{t + 460}{520}\right) \cdot \left(\frac{Q_o}{A_o}\right)^2 \cdot \frac{H}{d}} \\ &\quad - P_e \\ &= \sqrt{14.7^2 + 5.9 \times 10^{-6} \left(\frac{1 - 0.5}{0.5^3}\right) \cdot \left(\frac{1700 + 460}{520}\right) \cdot \left(\frac{25978}{68}\right)^2 \cdot \frac{32}{2.4}} \\ &\quad - 14.7 \\ &= \\ &\quad \sqrt{14.7^2 + 5.9 \times 10^{-6} \times 4 \times 4.2 \times 145946.47 \times 13.3} - \\ &\quad 14.7 \\ &= 20.2 - 14.7 \\ &= 5.5 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 0.38 \text{ bar gauge} \end{aligned}$$

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadiran Allah Yang Maha Esa, karena berkat anugerahNya, sehingga penulis diberi kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir. Tugas Akhir ditujukan untuk memenuhi mata kuliah wajib yang harus diambil oleh mahasiswa Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), penulis telah menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “**STUDI PENGARUH VARIASI KETEBALAN LAPISAN *BURDEN MATERIAL* PADA PENGOLAHAN BIJIH NIKEL LATERIT DI *MINI BLAST FURNACE* TERHADAP FENOMENA TRANSFER MOMENTUM MENGGUNAKAN *FINITE VOLUME METHOD*”**. Penulis ingin berterima kasih juga kepada :

1. Kedua Orang Tua dan Adik saya, yang telah mendukung secara moril maupun materil serta doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan ,keselamatan dan kelancaran anaknya dalam menempuh studi.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
3. Bapak Sungging Pintowantoro, Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bekal yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D selaku dosen Co-Pembimbing yang telah memberikan banyak ilmu.
5. Bapak Fakhreza Abdul, S.T., M.Sc. selaku dosen *supervisor* Laboratorium Pengolahan Material yang bersedia meluangkan waktu membimbing penyelesaian tugas akhir.
6. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc. Selaku dosen wali yang sangat mengayomi dan membantu saya dari awal hingga akhir perkuliahan.
7. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

8. Teman-teman Lab. Fisika Material, Lab. Kimia Terapan, dan Lab. Korosi dan Kegagalan yang tidak pernah bosan membiarkan saya “mengungsi” di laboratorium mereka untuk mengerjakan tugas akhir.
9. Teman-teman Lab. Pengolahan Material yang telah membantu tugas akhir saya : Orlando, Anggiat, Fiqri, Bima, Farid, Kemplo, Wasik, Domo, Chibi, Ahlidin, Ridwan, Dio, Narindra; dan pastinya untuk Rizki, dan Hamzah sebagai teman tugas akhir 1 tahun.
10. Keluarga MT15 yang banyak memberikan saya pengalaman berharga selama di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
11. Adik-adik MT 16 dan MT 17 atas pemberian semangat dan motivasi.
12. Dan seluruh pihak yang telah memberikan partisipasi dalam Tugas Akhir ini yang tidak bias saya sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan laporan ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik yang membangun dari pembaca demi perbaikan dan kemajuan bersama. Penulis berharap hasil laporan ini dapat bermanfaat dan dimanfaatkan dengan baik.

Surabaya, Juli 2017

Penulis,  
Rahmania Agustin Aswin

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Bengkulu, 30 Agustus 1995, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN 1 Kota Bengkulu, SMP Negeri 1 Kota Bengkulu, dan SMA Negeri 3 Bogor. Setelah lulus dari SMA penulis melanjutkan studinya melalui jalur PKM di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2013 terdaftar dengan NRP 2713100132. Di

Departemen Teknik Material, sekarang begitu jurusan penulis disebut, penulis mengambil bidang material inovatif dengan spesialisasi di metalurgi ekstraksi. Penulis sejak kuliah aktif mengikuti organisasi di Unit Pelaksana Teknis Kerjasama dan Hubungan Internasional (UPT KHI) ITS atau umum disebut sebagai ITS *International Office*, sebagai *volunteer* di divisi Media dan Informasi. Berbagai pelatihan seperti LKMM Pra TD pernah diikuti oleh penulis. Penulis dapat dihubungi di 081231843954 atau email ke [rhmgus@yahoo.com](mailto:rhmgus@yahoo.com).

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*