



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Yazid Bindar

**REKAYASA KOMPUTASI MULTIDIMENSI
SISTEM PEMROSES DAN ENERGI INDUSTRI**

22 November 2017
Aula Timur Institut Teknologi Bandung

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
22 November 2017

Profesor Yazid Bindar

**REKAYASA KOMPUTASI MULTIDIMENSI
SISTEM PEMROSES DAN ENERGI INDUSTRI**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: REKAYASA KOMPUTASI MULTIDIMENSI
SISTEM PEMROSES DAN ENERGI INDUSTRI
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 22 November 2017.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis
Data katalog dalam terbitan

Yazid Bindar
REKAYASA KOMPUTASI MULTIDIMENSI SISTEM PEMROSES
DAN ENERGI INDUSTRI
Disunting oleh Yazid Bindar

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2017
viii+132 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-6624-07-9

1. Rekayasa Komputasi Multidimensi 1. Yazid Bindar

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, bahwasanya atas berkat dan rahmatNya, saya dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, atas perkenannya saya menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar.

Bahan orasi ilmiah ini adalah ringkasan sebuah buku yang sudah ditulis oleh penulis. Buku itu berjudul Rekayasa Komputasi Multidimensi Sistem Pemroses dan Energi Industri yang diterbitkan oleh Penerbit ITB.

Semoga tulisan ini bermanfaat bagi para peneliti, insinyur, mahasiswa dan pembaca lainnya secara umum. Untuk lebih rincinya, materi dalam tulisan ini dapat dilihat pada buku yang disebut di atas sebagai edisi lengkapnya.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada banyak pihak yang banyak membantu dalam semua hal yang terkait dengan kegurubesaran ini. Secara khusus, penulis menyampaikan terima kasih pada istri dan anak tersayang.

Bandung, 22 November 2017

Yazid Bindar

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Hukum Kekekalan Massa	2
1.2 Hukum Kekekalan Momentum.....	3
1.3 Hukum Kekekalan Energi.....	4
1.4 Sistem Pemroses Dan Energi Industri	7
1.5 Kunci Pembuka.....	9
1.6 Kekinian Pengembangan Teknologi Proses	10
2. PEMODELAN FENOMENA TURBULEN	12
2.1 Fundamental Aliran Turbulen	12
2.2 Kontribusi Turbulen pada Perpindahan Momentum	14
2.3 Persamaan Model Turbulen $k-\varepsilon$	15
2.4 Kontribusi Turbulen pada Perpindahan Massa	18
2.5 Kontribusi Turbulen pada Perpindahan Panas	21
3. PEMODELAN KINERJA SISTEM PEMROSES	22
3.1 Pemodelan Sistem pemroses Tungku Industri Bahan Bakar Biomassa Bentuk Serbuk	22
3.1.1 Perpindahan momentum dan turbulen fasa gas	25
3.1.2 Perpindahan momentum fasa padat serbuk partikel.....	25
3.1.3 Perpindahan pada serbuk partikel	26

3.1.4	Pemodelan pembakaran gas hasil devolatilisasi	31
3.1.5	Perpindahan panas radiasi dalam ruang bakar	36
3.2	Pemodelan Pengering Sembur dengan Pergerakan Partikel Diskrit	40
3.3	Pemodelan Sistem pemroses Aliran dalam Media Berpori	43
4.	TEKNIK KOMPUTASI PERISTIWA PERPINDAHAN	49
4.1	Bentuk Umum Persamaan Perpindahan.....	49
4.2	Pembentukan Persamaan Aljabar	50
4.3	Metode Komputasi Medan Tekanan	54
4.4	Metode Diskritisasi Spasial dan Temporal	56
4.4.1	Diskritisasi Spasial	56
4.4.2	Diskritisasi Temporal	58
4.5	Metode Penyelesaian Persamaan Aljabar Besaran	58
4.5.1	Jumlah node ranah komputasi	58
4.5.2	Matrik persamaan aljabar besaran dan penyelesaiannya	59
4.6	Metode Dekomposisi Ranah Komputasi Dan Komputasi Paralel	63
4.6.1	Dekomposisi ranah komputasi	63
4.6.2	Komputer dan komputasi paralel	69
4.7	Algoritma Komputasi Fenomena Perpindahan Massa, Momentum dan Energi	72
4.8	Komputasi Perpindahan Panas Radiasi Metode P-1.....	74

5.	KINERJA SISTEM PEMROSES HASIL KOMPUTASI MULTI DIMENSI	76
5.1	Modifikasi Pelat Penghalang Sebuah Burner	76
5.2	Perancangan <i>Rapid Fired Edge Heater</i>	85
5.3	Analisa dan Modifikasi Burner Minyak Kiln Pengering	90
5.4	Investigasi Efek Ruang dan Kondisi Operasi Produksi Susu Kambing Bubuk dalam Pengering Sembur	98
6.	PENYEMPITAN CELAH KINERJA SISTEM PEMROSES RANCANGAN DAN OPERASI	106
6.1	Celah Kinerja Sistem Pemroses	106
6.2	Kinerja Sistem pemroses Rancangan dari Simulasi CFD	111
6.3	Prediksi Kinerja Sistem pemroses Untuk Beberapa Kasus	113
6.4	Peranan Teknologi Komputasi Multi Dimensi (CFD) pada Penyempitan Celah Kinerja	114
7.	PENUTUP	115
	UCAPAN TERIMA KASIH.....	116
	CURRICULUM VITAE	127

REKAYASA KOMPUTASI MULTIDIMENSI

SISTEM PEMROSES DAN ENERGI INDUSTRI

1. PENDAHULUAN

Teknologi lahir dari ilmu pengetahuan. Ilmu pengetahuan lahir dari olah pikir manusia dalam pembacaan kejadian dan fenomena alam yang terbentang. Ilmu tumbuh dari waktu ke waktu secara perlahan. Setiap ilmuwan pada zamanya meningkatkan terus singkapan-singkapan ilmu yang sudah ada. Terima kasih kepada ilmuwan-ilmuwan yang sudah berkontribusi dalam kesejahteraan hidup manusia di dunia sekarang ini.

Hukum kekekalan adalah hukum alam yang tunduk pada hukum Tuhan. Alam pemiliknya adalah Tuhan. Ilmuwan menelaah kekekalan yang ada di dunia dan mentransformasikan dalam bentuk bahasa hukum alam. Bahasa hukum alam dapat menggunakan bahasa matematika. Bahasa matematika dibangun oleh simbol-simbol yang mewakili besaran-besaran yang terlibat. Hukum kekekalan dituliskan dalam bentuk persamaan matematika untuk besaran-besaran yang dikandungnya.

Persamaan matematikanya hukum kekekalan memerlukan penyelesaian untuk penggambaran hukum itu secara kuantitatif atau diskriptif. Gambaran kuantitatif ini berupa kinerja fenomena yang terjadi dalam ruang dan waktu tertentu. Penyelesaian ini dilakukan secara analitis untuk kasus-kasus khusus atau atau numerik untuk semua kasus. Persamaan yang sederhana dengan pelibatan banyak asumsi dapat saja diselesaikan secara analitis. Persamaan yang kompleks tanpa banyak asumsi yang dipaksakan harus diselesaikan secara numerik.

Metode numerik adalah salah satu metode yang dikembangkan oleh matematikawan. Insinyur menggunakan dan mengembangkan metode ini untuk penelahaan fenomena fisik yang terlibat dalam permasalahan teknik untuk keperluan pengembangan teknologi.

1.2 Hukum Kekekalan Massa

Hukum konservasi atau kekekalan massa diformulasikan oleh Antoine Lavoiser [1] tahun 1789. Formulasi hukum kekekalan massa dibangun oleh laju akumulasi massa dalam sebuah ruang sistem dm/dt , laju massa masuk ke ruang sistem $\dot{m}_{in}$, laju massa keluar dari ruang sistem $\dot{m}_{out}$ dan laju massa terbentuk atau terkonsumsi dalam ruang sistem $\dot{m}_R$. Hukum kekekalan massa tersebut dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} + \dot{m}_R \quad (1.1)$$

Hukum kekekalan atau konservasi massa pada sebuah sistem pemroses ditransformasikan ke bentuk persamaan kontinuitas. Persamaan kontinuitas untuk materi fluida yang mengalir melibatkan densitas fluida ρ , dimensi ruang x , y dan z untuk koordinat kartesia, dimensi waktu t dan komponen kecepatan fluida arah x , y dan z sebagai u_x , u_y dan u_z . Untuk fluida satu fasa, persamaan konservasi massa di atas ditulis dalam bentuk persamaan diferensial

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1.2)$$

Keberadaan komponen kimia tertentu dalam sistem pemroses seperti komponen i dikuantifikasi oleh konsentrasi. Konsentrasi dapat

dinyatakan dalam fraksi massa dengan simbol w_i dengan satuan kg/kg. Laju massa komponen i terbentuk atau terkonsumsi dinyatakan oleh kecepatan reaksi kimia komponen i yang dituliskan dengan simbol R_i . Laju massa komponen i yang berpindah disebabkan oleh perpindahan secara konveksi dan perpindahan secara difusi. Laju perpindahan massa karena difusi dirumuskan oleh Adolf Eugen Fick[2]. Rumusan ini dikenal dengan hukum Fick[3]. Laju pembentukan atau pengurangannya per satuan volume adalah laju kecepatan reaksi komponen kimia i yang disimbulkan sebagai R_i . Persamaan konservasi massa komponen kimia i untuk aliran laminar dirumuskan dalam bentuk persamaan diferensial parsial berikut

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x w_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y w_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z w_i)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_i \frac{\partial w_i}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_i \frac{\partial w_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_i \frac{\partial w_i}{\partial z} \right) &+ R_i \end{aligned} \quad (1.3)$$

Koefisien difusivitas D_i dengan satuan m^2/s digunakan dalam persamaan Fick sebagai sifat dasar perpindahan komponen kimia i secara difusi.

1.3 Hukum Kekekalan Momentum

Hukum konservasi atau kekekalan momentum dirumuskan oleh Sir Isaac Newton[4]. Hukum ini dirumuskan dengan pernyataan bahwa jumlah gaya-gaya yang bekerja pada arah yang sama sebagai F_{ij} untuk satu sistem memberikan kesamaan nilai dengan perkalian massa sistem m itu dengan percepatan sistem sebagai a_i .

Persamaan untuk besaran kecepatan fluida u_x , u_y , dan u_z diturunkan

oleh Navier [5] dan Stokes [6] untuk aliran fluida Newtonian, tak termampatkan dan laminar pada densitas ρ dan viskositas μ konstan. Persamaan-persamaan yang dimaksud diturunkan dari hukum kekekalan momentum. Persamaan-persamaan komponen kecepatan dalam ruang yang dirumuskan oleh Navier dan Stokes di atas dikenal dengan nama persamaan Navier-Stokes [7] dengan bentuk persamaan diferensial parsial berikut

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y u_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z u_x)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial u_x}{\partial z} \right] + \rho g_x + F_x \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x u_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z u_y)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u_y}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial u_y}{\partial z} \right] + \rho g_y + F_y \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x u_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y u_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z u_z)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial u_z}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] + \rho g_z + F_z \quad (1.6)$$

Tekanan p menunjukkan gaya yang diberikan fluida per luas area yang tegak lurus dengannya. Besaran g_x, g_y , dan g_z merupakan gaya gravitasi yang diberikan massa fluida pada masing-masing arah. Gaya-gaya luar yang lain dinyatakan oleh besaran F_x, F_y , dan F_z .

1.3 Hukum Kekekalan Energi

Hukum kekekalan atau konservasi energi dirumuskan oleh James Prescott Joule [8]. Hukum kekekalan energi dinyatakan bahwa energi tidak bisa diciptakan dan tidak bisa dimusnahkan. Asas energi yang

dinyatakan oleh Joule ini dikenal juga dengan Hukum Termodinamika Pertama (HTP). Konsep umum untuk persamaan hukum kekekalan energi ini dinyatakan seperti pada Pers. (1.1) dimana besaran massa m pada persamaan ini diganti dengan energi dengan simbol E .

Fluida yang mengalir dalam sebuah sistem pemroses umumnya melibatkan perpindahan energi dalam bentuk panas. Tingkat kandungan energi panas fluida diindikasikan oleh tingkat temperaturnya dengan besaran T . Temperatur T menjadi besaran kinerja sebuah sistem pemroses. Laju perpindahan panas fluida dikonstruksikan oleh laju perpindahan secara konveksi dan secara konduksi.

Laju perpindahan persatuan luas atau fluksi termal secara konduksi ditimbulkan oleh adanya perbedaan temperatur sepanjang x, y dan z . Perpindahan panas secara konduksi merupakan perpindahan panas secara difusi. Fluksi termal atau panas diberi simbolkan sebagai q_x, q_y dan q_z . Besarnya masing-masing fluksi termal ini diformulasikan oleh Fourier [9] dalam bentuk persamaan berikut

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.7) \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1.8) \quad q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.9)$$

Besaran λ adalah besaran sifat fisis konduktifitas termal fluida yang mengalir.

Untuk sistem pemroses yang di dalamnya terjadi reaksi kimia komponen i pada reaksi j , laju reaksinya adalah R_{ij} . Perubahan entalpi reaksi yang terjadi adalah $\Delta h_{r,j}$. Bila massa molekul kompoen kimia i adalah M_i dan jumlah reaksi yang terlibat adalah N_R , laju panas yang dihasilkan atau dikonsumsi per satuan volume dinyatakan oleh

persamaan

$$\dot{Q}'''_R = \sum_j^{N_R} M_i R_{ij} \Delta h_{rj} \quad (1.10)$$

Persamaan konservasi energi mengandung besaran temperatur T. Persamaan ini dirumuskan untuk fluida dalam sistem pemroses yang mengalir secara laminar. Jumlah komponen kimia yang membentuk fluida adalah N_c . Besaran energi total E untuk fluida didifisikan oleh persamaan

$$E = \frac{1}{2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) - \frac{p}{\rho} + \sum_i^{N_c} \omega_i h_i \quad (1.11)$$

Entalpi h_i untuk setiap komponen kimia i merupakan kandungan panas sensibel pada temperatur T terhadap temperatur acuan T_{ref} yang dirumuskan oleh persamaan

$$h_i = \int_{T_{ref}}^T c_{pi} dT \quad (1.12)$$

Kapasitas panas jenis untuk masing-masing komponen kimia dinyatakan oleh notasi c_{pi} . Untuk aliran tak termampatkan, besarnya energi E dinyatakan sebagai

$$E = \frac{1}{2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) + \sum_i^{N_c} \omega_i h_i \quad (1.13)$$

Persamaan energi dengan besaran E diformulasikan dari hukum kekekalan energi. Sumber energi lain yang terlibat dinyatakan sebagai S_E . Persamaan energi ini dituliskan secara lengkap sebagai berikut

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x E + p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y E + p)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z E + p)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \sum_i^{N_c} h_i \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_i \frac{\partial \omega_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_i \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_i \frac{\partial \omega_i}{\partial z} \right) \right\} - \end{aligned} \quad (1.14)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(u_x \tau_{xx} + u_y \tau_{xy} + u_z \tau_{xz} + p u_x)}{\partial x} - \frac{\partial(u_x \tau_{yx} + u_y \tau_{yy} + u_z \tau_{yz} + p u_y)}{\partial y} - \\ &\frac{\partial(u_x \tau_{zx} + u_y \tau_{zy} + u_z \tau_{zz} + p u_z)}{\partial z} + \dot{Q}'''_R + S_E \end{aligned}$$

Tegangan gesek pada persamaan energi di atas untuk fluida Newtonian aliran laminar berkorelasi dengan gradien kecepatan seperti persamaan berikut

$$\tau_{xx} = -2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (1.15)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (1.16)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = -\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad (1.17)$$

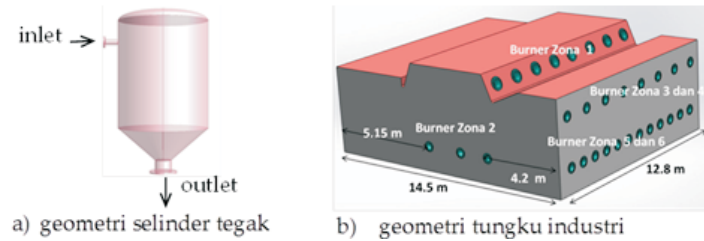
$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = -\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \quad (1.18)$$

$$\tau_{yy} = -2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (1.19)$$

$$\tau_{zz} = -2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (1.20)$$

1.4 Sistem Pemroses Dan Energi Industri

Satu sistem pemroses dan energi di pabrik kimia merupakan sebuah ruang sebagai tempat berlangsungnya proses perlakuan bahan kimia dengan peristiwa perubahan fisika dan atau kimia yang dikendalikan oleh hukum kekekalan di atas. Proses bisa berlangsung secara kontinu atau partaian (*batch*). Ruang atau volume sistem pemroses dibatasi oleh dinding-dinding material konstruksi yang membentuk ruang tiga dimensi dengan bentuk geometri tertentu seperti Gambar 1.1. Bahan kimia diumpankan ke sistem pemroses melalui saluran umpan (*inlet*) dan keluar melalui saluran keluaran (*outlet*).



Gambar 1.1 Geometri sistem pemroses dan energi industri

Sistem pemroses dirancang untuk beroperasi untuk mencapai kinerja yang sudah ditargetkan. Kinerja ini ditunjukkan oleh besaran temperatur T , konsentrasi komponen kimia C_i atau fraksi massa ω_i , tekanan p , distribusi dan pola aliran yang ditentukan oleh komponen kecepatan u_x , u_y , dan u_z . Semua besaran tersebut dikendalikan oleh persamaan konservasi Pers. (1.2) sampai dengan Pers. (1.14). Kinerja sistem pemroses dinyatakan sebagai fungsi dari dimensi ruang dalam koordinat x , y , dan z dan dimensi waktu operasi t . Kinerja ini secara umum dinyatakan oleh persamaan

$$T = f_1(x, y, z, t) \quad (1.21) \quad w_i = f_2(x, y, z, t) \quad (1.22)$$

$$p = f_3(x, y, z, t) \quad (1.23) \quad u_x = f_4(x, y, z, t) \quad (1.24)$$

$$u_y = f_5(x, y, z, t) \quad (1.25) \quad u_z = f_6(x, y, z, t) \quad (1.26)$$

Kondisi aliran fluida dalam setiap sistem pemroses umumnya berada pada kondisi aliran turbulen. Persamaan-persamaan konservasi yang disajikan di atas adalah persamaan konservasi aliran laminar. Pembahasan pemodelan aliran fluida turbulen, perpindahan massa dan perpindahan panas turbulen akan diberikan tersendiri pada Bagian 2.

Pengaruh geometri sistem pemroses dan waktu operasi terhadap kinerja sistem pemroses harus dapat diperkirakan sebelum sistem pemroses ini dibuat dan dioperasikan. Perkiraan ini dilakukan dengan cara penyelesaian persamaan-persamaan konservasi untuk semua besaran dengan kondisi-kondisi batas dan awal yang diketahui. Penyelesaian semua persamaan konservasi untuk geometri kompleks ini hanya bisa dilakukan dengan penyelesaian numerik.

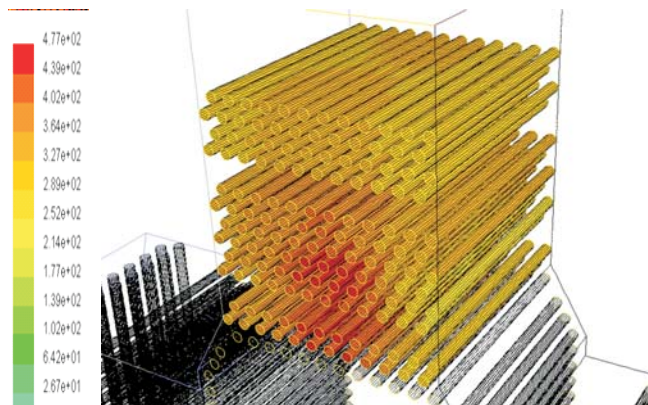
Metode numerik itu adalah metode numerik beda hingga (BH), elemen hingga (EH) atau volume hingga. Solusi numerik dari penyelesaian persamaan konservasi ini adalah fungsi numerik yang diilustrasikan oleh Pers (1.21) sampai dengan Pers (1.26) di atas. Solusi ini divisualkan secara grafis dan dapat dianimasikan dalam ruang tiga dimensi dan waktu sehingga penggambaran kinerja sistem pemroses seperti keadaan operasi yang sebenarnya. Contoh gambaran visual tiga dimensi kinerja sebuah tungku industri diberikan oleh Gambar 1.2. Ini menunjukkan distribusi temperatur pada permukaan tabung-tabung penukar panas *Primary Reformer* sebuah pabrik pupuk urea. Warna menunjukkan tingkat temperatur dalam °C.

1.5 Kunci Pembuka

Keberhasilan perkiraan kinerja sistem pemroses dalam ruang tiga dimensi dan rentang waktu operasi tidak terlepas dari keberhasilan pengembangan model aliran turbulen modern [10]. Tanpa model turbulen tersebut maka metode perkiraan kinerja sistem pemroses akan selalu dengan perumpamaan aliran laminar atau pendekatan penyederhanaan aliran turbulen yang sangat sederhana. Perumpamaan ini tentu tidak

sesuai dengan kenyataan kondisi operasi.

Model aliran turbulen tidak akan bisa diselesaikan dengan metode numerik untuk geometri kompleks dan ukuran besar tanpa perkembangan teknologi komputer. Teknik komputasi numerik mengikuti perkembangan teknologi komputer. Komputer kini tersedia dengan mudah mulai dari harga terjangkau dengan multi-core processornya [11] sampai super komputer[12] sebagai hasil pengembangan sebelumnya [13]. Teknik komputasi menjadi berkembang dengan pesat. Maka dari itu, perkiraan kinerja sistem pemroses serumit apapun dapat diwujudkan sekarang ini.



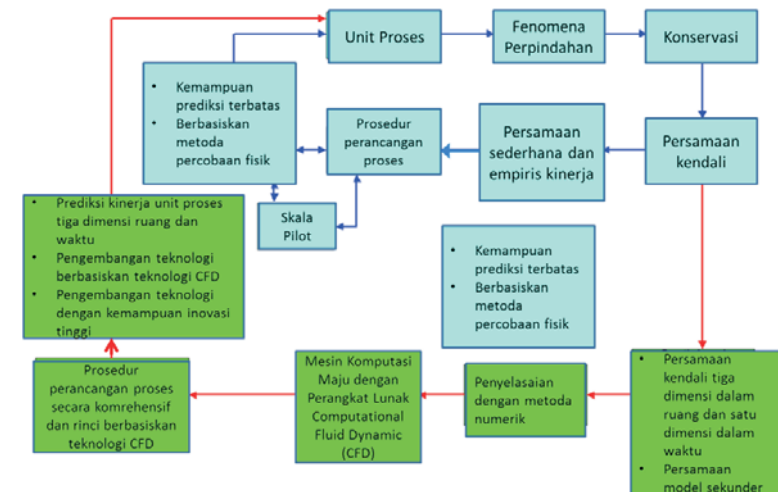
Gambar 1.2 Distribusi temperatur ($^{\circ}\text{C}$) skin tube pada koil E-1005/1 *Primary Reformer* pabrik pupuk 1 [14]

1.6 Kekinian Pengembangan Teknologi Proses

Kemampuan perkiraan kinerja sistem pemroses dengan penyelesaian persamaan konservasi untuk semua besaran dalam ruang tiga dimensi dan waktu memberikan kemudahan berinovasi dalam pengembangan

teknologi proses untuk pabrik kimia. Pengembangan yang selama ini bertumpu pada pengalaman panjang dapat dipotong jalannya dengan pelibatan teknik komputasi sistem pemroses yang komprehensif ini. Kekinian pengembangan teknologi proses pabrik kimia dialurkan pada Gambar 1.3.

Banyak hal menguntungkan dengan pengembangan teknologi proses pada Gambar 1.3. Jalur tradisional yang melalui pengalaman industri yang panjang dapat diperpendek dengan keterlibatan perancangan teknik komputasi dengan penggunaan teknologi komputasi multidimensi yang dikenal juga dengan nama *Computational Fluid Dynamics* (CFD) ini. Inovasi-inovasi pengembangan sistem pemroses dapat diperkirakan kinerja sebelum dibangun dengan biaya murah. Biaya pengembangan proses bisa lebih murah.



Gambar 1.3 Kekinian pengembangan teknologi proses pabrik kimia

2. PEMODELAN FENOMENA ALIRAN TURBULEN

2.1 Fundamental Aliran Turbulen

Aliran turbulen berbeda dengan aliran laminar. Perbedaan ini diindikasikan oleh perilaku besaran aliran dalam sistem pemroses seperti besaran kecepatan, tekanan, temperatur dan konsentrasi dengan simbol u_x, u_y, u_z, p, T , dan C_i . Besaran ini disimbulkan secara umum dengan ϕ . Setiap besaran dalam aliran turbulen berfluktuasi dengan waktu ukuran mikro detik (μs). Ini berbeda dengan aliran laminar tak tunak dimana besaran dalam aliran berubah dengan waktu ukuran detik (s). Secara visual, perbedaan aliran turbulen dan laminar diilustrasikan oleh Gambar 2.1.

Untuk aliran turbulen, besarnya nilai ϕ sesaat dikomposisikan secara matematis oleh komponen nilai rata-rata waktu $\bar{\phi}$ pada rentang waktu pendek t_s dan komponen nilai fluktuasinya ϕ' setiap waktu pada rentang $0 - t_s \mu s$. Dekomposisi dan interaksi besaran-besaran turbulen dinyatakan oleh persamaan matematik berikut

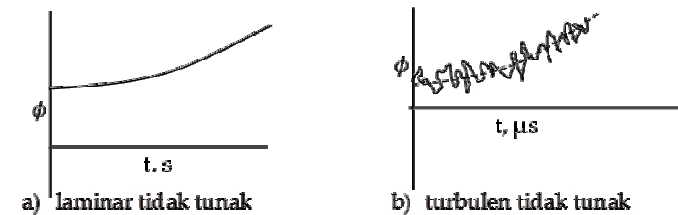
$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.1) \quad \bar{\phi} = \frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} \phi dt \quad (2.2)$$

$$\bar{\phi}' = \frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} \phi' dt = 0 \quad (2.3) \quad \overline{\phi' \phi'} = \frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} \phi' \phi' dt \neq 0 \quad (2.4)$$

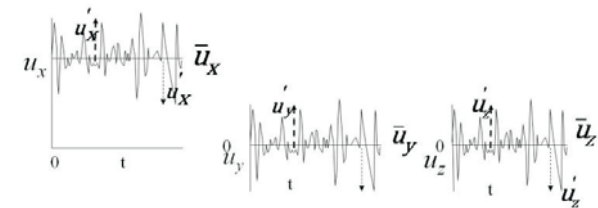
Sifat dasar dari perata-rataan waktu untuk komponen fluktuasi turbulen ϕ' dirumuskan oleh Pers. (2.3) dan Pers. (2.4). Nilai rata-rata waktu interaksi antar komponen fluktuasi $\overline{\phi' \phi'}$ yang nilainya tidak nol menjadi fondasi kontribusi untuk aliran turbulen dalam persamaan konservasi perpindahan. Komponen interaksi akan muncul pada

persamaan konservasi bilamana persamaan konservasi aliran laminar digunakan sebagai dasar pengembangan persamaan konservasi aliran turbulen. Pengembangannya dimulai dengan menggantikan besaran u_x, u_y, u_z, p, T , dan C_i dengan bentuk dekomposisinya, Pers. (2.1), pada persamaan konservasi laminar di Bagian 1.

Nilai positif atau negatif komponen $\overline{\phi' \phi'}$ merupakan kontribusi turbulen pada peristiwa perpindahan dalam sebuah sistem pemroses. Inilah sebuah urgensi dalam pengkuantifikasian komponen $\overline{\phi' \phi'}$ pada persamaan konservasi. Pemodelan turbulen berdasarkan hukum konservasi akan menjawab permasalahan penyelesaian persamaan konservasi secara numerik.



Gambar 2.1 Ilustrasi karakteristik besaran aliran turbulen tidak tunak dan aliran laminar tidak tunak terhadap waktu t .



Gambar 2.2 Dekomposisi kecepatan sesaat u_x, u_y dan u_z turbulen menjadi kecepatan rata $\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z$ dan komponen fluktuasi kecepatan u'_x, u'_y, u'_z

2.2 Kontribusi Turbulen pada Perpindahan Momentum

Kontribusi turbulen pada perpindahan momentum dirumuskan oleh Boussinesq tahun 1872 [15]. Persamaan momentum turbulen dihasilkan dari dekomposisi persamaan momentum laminar sebagaimana yang dirumuskan oleh Reynolds [16]. Persamaan momentum hasil dekomposisi ini dinyatakan pada persamaan berikut

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \sum_{j=x}^{y,z} \left(\bar{\rho} \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial j} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \sum_{j=x}^{y,z} \left[\frac{\partial}{\partial j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) \right] + \rho g_i \quad (2.5)$$

Persamaan momentum turbulen ini memiliki bentuk suku tambahan tegangan Reynolds $\overline{\rho u_i' u_j'}$ yang disingkat sebagai R_{ij} dari persamaan momentum laminar.

Boussinesq [15] merumuskan sebuah pendekatan dalam memodelkan suku kontribusi turbulen sebagai tegangan Reynold pada perpindahan momentum dalam bentuk persamaan

$$\overline{\rho u_i' u_j'} = \frac{2}{3} \left[\rho k + \mu_t \left(\sum_{l=x}^{y,z} \frac{\partial u_l}{\partial l} \right) \right] \delta_{ij} - \mu_t \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial i} \right] \quad (2.6)$$

Indek i, j dan l disubsitusikan dengan x, y atau z pada persamaan di atas. Operator $\delta_{ij}=1$ bila $i=j$ dan $\delta_{ij}=0$ bila $i \neq j$. Energi kinetik turbulen k dinyatakan sebagai

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_x' u_x'} + \overline{u_y' u_y'} + \overline{u_z' u_z'}) \quad (2.7)$$

Boussinesq memperkenalkan viskositas turbulen μ_t . Persamaan momentum turbulen arah x, y dan z yang dihasilkan adalah

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial t} + \bar{\rho} \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + \bar{\rho} \bar{u}_y \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y} + \bar{\rho} \bar{u}_z \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} \right] + \rho g_x + F_x \quad (2.8)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial t} + \bar{\rho} \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial x} + \bar{\rho} \bar{u}_y \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} + \bar{\rho} \bar{u}_z \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial z} \right] + \rho g_y + F_y \quad (2.9)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial t} + \bar{\rho} \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} + \bar{\rho} \bar{u}_y \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial y} + \bar{\rho} \bar{u}_z \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} \right] + \rho g_z + F_z \quad (2.10)$$

Viskositas turbulen μ_t merupakan kontribusi aliran turbulen terhadap perpindahan momentum sebagai penambahan terhadap viskositas laminar μ pada koefisien perpindahan momentum laminar. Pengembangan model turbulen selanjutnya bertujuan untuk mencari metode evaluasi besaran μ_t .

2.3 Persamaan Model Turbulen k-ε

Pengembangan persamaan model turbulen untuk tujuan di atas dimulai oleh Prandtl tahun 1925 [17] dan kemudian oleh Kolmogorov tahun 1942 [18]. Usaha-usaha berikutnya dalam pengembangan model turbulen ini berlanjut terus. Model-model ini dikembangkan untuk memperoleh nilai viskositas turbulen μ_t pada ketiga persamaan momentum turbulen, Pers. (2.8) sampai Pers. (2.10) di atas.

Dua model turbulen dari Prandtl dan Kolmogorov merupakan tonggak dalam pengembangan model turbulen yang banyak diaplikasikan sekarang ini. Model-model turbulen tersebut adalah kelompok model k-ε[19], kelompok model k-ω[20], kelompok model

RSM[21], kelompok model LES[22], [23] dan model DES[24]. Viskositas turbulen μ_t dievaluasi dari hasil penyelesaian salah satu persamaan model turbulen ini. Semua kelompok model di atas dapat digunakan untuk keperluan perancangan dan evaluasi sistem pemroses.

Ada dua besaran turbulen dalam persamaan model turbulen k- ϵ . Pertama adalah energi kinetik turbulen k , Pers. (2.7). Kedua adalah laju disipasi energi kinetik turbulen ϵ yang didefinisikan oleh persamaan

$$\epsilon = \frac{\mu}{\rho} \left[\overline{\left(\frac{\partial u_x'}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u_y'}{\partial y} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u_z'}{\partial z} \right)^2} \right] + \frac{\mu}{\rho} \left[\overline{\left(\frac{\partial u_y'}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u_x'}{\partial y} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u_z'}{\partial z} \right)^2} \right] + \frac{\mu}{\rho} \left[\overline{\left(\frac{\partial u_z'}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u_x'}{\partial y} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial u_z'}{\partial z} \right)^2} \right] \quad (2.11)$$

Dua persamaan diperlukan untuk dapat mengevaluasi nilai besaran k dan ϵ . Persamaan yang dimaksud diturunkan dari manipulasi persamaan konservasi momentum sehingga hasilnya memberikan persamaan konservasi untuk besaran k dan ϵ . Untuk model turbulen k- ϵ standar, persamaan konservasi besaran k dan ϵ dihasilkan sebagai berikut

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_x \frac{\partial k}{\partial x} + \rho \bar{u}_y \frac{\partial k}{\partial y} + \rho \bar{u}_z \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G_k - Y_k \quad (2.12)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_x \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \rho \bar{u}_y \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + \rho \bar{u}_z \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.13)$$

Laju produksi energi kinetik turbulen G_k diformulasikan oleh persamaan

$$G_k = 2\mu_t \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial x} \right)^2 + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} \right)^2 + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_y}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial y} \right)^2 \quad (2.14)$$

Laju disipasi besaran k dinyatakan oleh

$$Y_k = \rho \epsilon \quad (2.15)$$

Viskositas turbulen μ_t diperoleh dari persamaan model yang diturunkan dari hipotesa Boussinesq[15]

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon \quad (2.16)$$

Besarnya nilai konstanta-konstanta model k- ϵ adalah $c_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $c_{\epsilon 1}=1.44$ dan $c_{\epsilon 2}=1.92$.

Model k- ϵ sendiri selalu ditingkatkan kemampuan dan keakuratannya. Model-model k- ϵ hasil pengembangannya adalah **RNG** k- ϵ [25] dan **Realizable** k- ϵ [26].

Kondisi batas menentukan keunikan solusi persamaan aliran turbulen. Ranah komputasi dibatasi oleh bidang-bidang untuk ranah komputasi tiga dimensi dan garis-garis untuk ranah komputasi dua dimensi. Kondisi batas dibedakan pada batas *inlet*, *outlet*, dinding, bidang atau garis simetri, bidang atau garis periodik.

Perilaku turbulen dekat dinding mengalami peristiwa laminarisasi untuk posisi makin dekat ke dinding. Besaran turbulen k dan ϵ makin mengecil bila posisi makin dekat ke dinding. Kedua besaran ini bernilai nol pada zona lapisan laminar tipis dekat dinding. Zona ini disebut sebagai lapisan viskos. Nilai k dan ϵ akan membesar ke arah posisi yang menjauh dari dinding setelah lapisan viskos. Ini memberikan arti bahwa

ada fenomena produksi energi turbulen untuk peningkatan nilai besaran turbulen ini. Perhitungan perilaku ini secara langsung dari penyelesaian persamaan model turbulen di atas memerlukan ukuran kisi dekat dinding yang sangat kecil. Pendekatan ini tidak praktis dan tidak ekonomis. Satu lagi informasi penting adalah persamaan model turbulen yang berlaku untuk bilangan Reynolds tinggi tidak berlaku pada lapisan tipis dekat dinding dengan bilangan Reynolds yang rendah.

Pendekatan yang lebih andal, ekonomis dan praktis dengan persamaan model turbulen tunggal untuk bilangan Reynold tinggi adalah penggunaan persamaan semi empiris untuk profil kecepatan dekat dinding. Persamaan ini dibagi dalam tiga lapis daerah keberlakuan. Lapisan pertama adalah lapisan laminar dengan $Y^+=5$. Lapisan kedua adalah lapisan dengan kondisi $Y^+>5$ dan $Y^+<30$. Lapisan berikutnya adalah lapisan turbulen kembang penuh (*fully developed turbulent core*) atau lapisan luar (*outer layer*) pada daerah $30 \leq Y^+ < 300$. Profil kecepatan yang dimaksud adalah profil kecepatan sejajar dengan permukaan dinding dengan simbol $u_{||}$. Kecepatan ini berubah sepanjang jarak dari dinding y . Profil ini mengikuti persamaan logaritma sebagai daerah *log-law*.

2.4 Kontribusi Turbulen pada Perpindahan Massa

Kontribusi turbulen pada perpindahan massa dikuantifikasi dari persamaan perpindahan massa Pers. (1.3) dimana konsentrasi C_i laminar diganti dengan konsentrasi sesaat C_i yang dikomposisikan oleh Pers. (2.1). Kontribusi turbulen pada fluksi perpindahan massa komponen kimia i diperoleh sebagai $j_{x,t}$, $j_{y,t}$ dan $j_{z,t}$ yang dinyatakan oleh persamaan

$$j_{x,t} = \overline{u_x' c_i'} \quad (2.17)$$

$$j_{y,t} = \overline{u_y' c_i'} \quad (2.18)$$

$$j_{z,t} = \overline{u_z' c_i'} \quad (2.19)$$

Pemodelan untuk laju perpindahan massa turbulen di atas dilakukan dengan menggunakan analogi pendekatan Boussinesq. Koefisien difusivitas turbulen komponen kimia i diperkenalkan sebagai $D_{i,t}$. Persamaan fluksi turbulen di atas menjadi

$$\overline{u_x' c_i'} = -D_{i,t} \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad (2.20)$$

$$\overline{u_y' c_i'} = -D_{i,t} \frac{\partial C_i}{\partial y} \quad (2.21)$$

$$\overline{u_z' c_i'} = -D_{i,t} \frac{\partial C_i}{\partial z} \quad (2.22)$$

Difusivitas turbulen berkorelasi dengan viskositas turbulen dengan menggunakan bilangan Schmidt turbulen $N_{Sc,t}$ dalam bentuk

$$\rho D_{i,t} = \frac{\mu_t}{N_{Sc,t}} \quad (2.23)$$

$$N_{Sc,t} = \frac{\mu_t}{\rho D_{i,t}} \quad (2.24)$$

Persamaan perpindahan massa komponen kimia ialiran turbulen diperoleh dalam bentuk persamaan diferensial parsial konsentrasi C_i sebagai berikut

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial y} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(D_i + \frac{\mu_t}{\rho N_{Sc,t}} \right) \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial x} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(D_i + \frac{\mu_t}{\rho N_{Sc,t}} \right) \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial y} \right] &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(D_i + \frac{\mu_t}{\rho N_{Sc,t}} \right) \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial z} \right] + \bar{R}_i + S_{C_i} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Apabila kuantitas komponen kimia i dinyatakan dalam fraksi massa w_i , maka Pers. (2.25) berubah bentuk menjadi

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial y} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\rho D_i + \frac{\mu_t}{\rho N_{Sc,t}} \right) \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial x} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\rho D_i + \frac{\mu_t}{\rho N_{Sc,t}} \right) \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial y} \right] &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\rho D_i + \frac{\mu_t}{\rho N_{Sc,t}} \right) \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial z} \right] + \rho M_i \bar{R}_i + S_{w_i} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Laju reaksi komponen kimia i $\bar{R}_i$ dalam satuan $\text{mol}/(\text{m}^3\text{s})$ merupakan fungsi konsentrasi $\bar{C}_i$. $\bar{S}_{C_i}$ adalah tambahan laju produksi atau konsumsi $\bar{C}_i$ dari yang lain.

Untuk kondisi waktu reaksi sangat cepat pada reaksi kimia Pers. (2.27), maka bilangan Damkohler N_{Da} lebih besar dari satu. Maka waktu pencampuran oleh aliran turbulen menentukan laju kecepatan reaksi. Ini menandakan bahwa turbulen sangat berpengaruh terhadap laju reaksi. Turbulen pada umumnya meningkatkan laju reaksi tetapi turbulen bisa juga mematikan reaksi.

$$\sum_i^N a_i A_i \xrightleftharpoons[k_b]{k_f} \sum_j^N b_j B_j \quad (2.27)$$

Pendekatan kondisi reaksi kimia cepat dilakukan dengan konsep dissipasi Eddy. Pendekatan ini dikembangkan oleh Magnussen and Hjertager[27] yang berlaku untuk reaksi kimia tunggal saja. Reaksi pembakaran 1 kg bahan bakar memerlukan s kg oksidan dan menghasilkan $(1+s)$ kg produk. Dua laju reaksi $\bar{R}_{1,A_i}$ dan $\bar{R}_{2,A_i}$ diperkenalkan sebagai berikut

$$\bar{R}_{1,A_i} = \alpha a_i \rho \frac{\varepsilon}{k} \alpha \text{Min} \left[\frac{\bar{w}_{A_i,r}}{a_i M_{A_i,r}} \right] \quad (2.28)$$

$$\bar{R}_{2,A_i} = 2\alpha \beta a_i \rho \frac{\varepsilon}{k} \sum_j^N \left[\frac{\bar{w}_{B_j}}{b_j M_{B_j}} \right] \quad (2.29)$$

$\bar{w}_{A_i}$, $\bar{w}_{B_j}$, M_{A_i} dan M_{B_j} adalah fraksi massa komponen kimia A_i dalam reaktan, fraksi massa komponen kimia B_j dalam produk, berat molekul komponen kimia A_i dalam reaktan dan berat molekul komponen kimia B_j dalam produk. Koeffisien reaksi a_i dan b_j untuk masing-masing senyawa reaktan dan produk diambil dari persamaan reaksinya di atas.

Laju reaksi kimia kontribusi turbulen adalah laju reaksi kimia yang terkecil antara kedua laju reaksi di atas yang dituliskan sebagai berikut

$$\bar{R}_{A_i} = \text{Min}[\bar{R}_{1,A_i}, \bar{R}_{2,A_i}] \quad (2.30)$$

Nilai parameter α dan β untuk reaksi pembakaran fasa gas tipe api difusi masing-masingnya adalah 4 dan 0.5 [27].

2.5 Kontribusi Turbulen pada Perpindahan Panas

Kontribusi turbulen pada perpindahan panas adalah penambahan suku interaksi fluktuasi komponen kecepatan dengan fluktuasi temperatur T . Penambahan ini dinyatakan sebagai laju perpindahan panas persatuan luas. Ini disebut juga sebagai fluksi termal turbulen. Tambahan suku pada persamaan panas tersebut sebagai kontribusi turbulen pada fluksi panas dirumuskan oleh persamaan-persamaan

$$q_{x,t} = \rho c_p \overline{u_x' T'} \quad (2.31)$$

$$q_{y,t} = \rho c_p \overline{u_y' T'} \quad (2.32)$$

$$q_{z,t} = \rho c_p \overline{u_z' T'} \quad (2.33)$$

Bila analogi pendekatan Boussinesq digunakan, maka fluksi panas ini dimodelkan sebagai berikut

$$\rho c_p \overline{u_x' T'} = -\lambda_t \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \quad (2.34)$$

$$\rho c_p \overline{u_y' T'} = -\lambda_t \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \quad (2.35)$$

$$\rho c_p \overline{u_z' T'} = -\lambda_t \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \quad (2.36)$$

Persamaan konservasi energi termal turbulen dikonstruksikan dalam bentuk

$$\frac{\partial(\rho c_p \bar{T})}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial(\rho c_p \bar{T})}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial(\rho c_p \bar{T})}{\partial y} + \bar{u}_z \frac{\partial(\rho c_p \bar{T})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right] + \sum_i^N \bar{R}_i \Delta h_{ri} + S_T \quad (2.37)$$

S_T merupakan laju produksi atau konsumsi energi termal dari selain reaksi kimia. Konduktifitas termal efektif λ_{eff} dievaluasi dari konduktifitas termal laminar λ dan konduktifitas termal turbulen λ_t dengan persamaan-persamaan

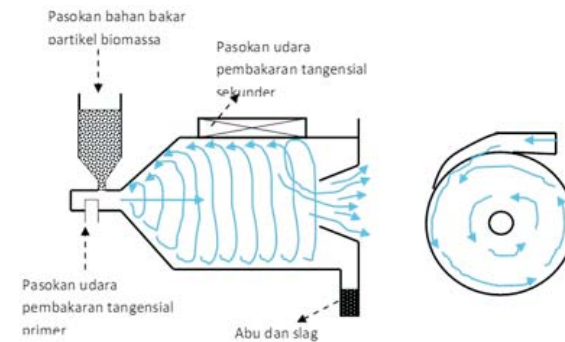
$$\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t \quad (2.38) \quad \lambda_t = \frac{c_p \mu_t}{N_{pr,t}} \quad (2.39) \quad N_{pr,t} = \frac{\mu_t c_p}{\lambda_t} \quad (2.40)$$

Bilangan Prantl turbulen $N_{pr,t}$ bernilai 0.85.

3. PEMODELAN KINERJA SISTEM PEMROSES

3.1 Pemodelan Sistem pemroses Tungku Industri Bahan Bakar Biomassa Bentuk Serbuk

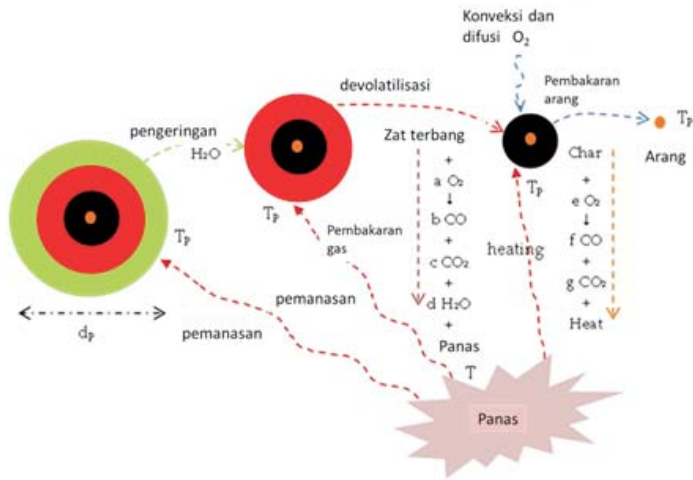
Biomassa berukuran serbuk dibakar untuk mewujudkan intensitas pembakaran tinggi dan untuk penciptaan kestabilan apinya. Ukuran partikel serbuk ini berkisar sekitar 0.5 sampai 2 mm diameter. Bahan bakar serbuk ini disemurkan bersama udara lewat sebuah burner dan diharapkan terbakar dalam ruang burner ini. Salah satu bentuk burner pembakar bahan bakar biomassa adalah burner siklon seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Ruang burner siklon pembakar sembur bahan bakar biomassa serbuk [28].

Pada kondisi pasokan udara cukup untuk pembakaran sempurna, fraksi volume serbuk partikel biomassa dalam ruang lebih kecil dari 10%. Pemodelan fenomena proses pembakaran dalam aliran udara dan partikel pada kondisi ini dapat didekati dengan metode pemodelan fasa diskrit (*discrete phase model*) atau pemodelan Eulerian-Lagrangian. Partikel-partikel bahan bakar biomassa berbentuk serbuk padat bergerak dalam aliran fluida di ruang bakar. Pergerakan partikel ini dikendalikan oleh persamaan gaya yang membentuk lintasannya dalam medan aliran fluida. Pergerakan partikel mengikuti persamaan dengan kerangka Lagrangian. Medan aliran fluida dibentuk oleh aliran fluida dalam ruang yang dibentuk oleh volume kendali. Besaran-besaran aliran fluida dinyatakan oleh perata-rataan dalam volume kendali dan perataan-rataan pada luas permukaan dari muka-muka volume kendali. Medan aliran ini diselesaikan dalam kerangka Eulerian. Massa fasa padat partikel biomassa mengalir sebagai fasa diskrit (Lagrangian) dalam aliran fasa udara atau gas mengalir sebagai fasa kontinu (Eulerian).

Fenomena pembakaran biomassa melibatkan beberapa tahap-tahapan proses. Tahapan yang mendahului adalah tahap pengeringan partikel biomassa (*drying*) dimana air keluar dari partikel melalui peristiwa perpindahan massa uap air dari dalam padatan partikel ke fasa gas yang di luar partikel. Laju perpindahan massa uap air ini diperbesar oleh adanya peristiwa pemanasan. Tahap pengeringan dilanjutkan oleh tahap dekomposisi termal partikel biomassa (*devolatilization*) yang menghasilkan gas-gas terbang (*Volatiles*) dan karbon sisa (*Char*). Tahap ini disebut tahap devolatilisasi. Gas-gas terbang yang bercampur dengan udara akan mengalami peristiwa reaksi pembakaran fasa gas (*gas combustion*). Tahap akhir adalah peristiwa reaksi oksidasi karbon sisa (*char combustion*) sebagai reaksi heterogen dengan dengan oksigen sekitarnya. Bahan terakhir yang tertinggal yang tidak mengalami reaksi pembakaran adalah abu (*Ash*). Fenomena di atas diilustrasikan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Ilustrasi fenomena pembakaran partikel biomassa

3.1.1 Perpindahan momentum dan turbulen fasa gas

Pemodelan perpindahan momentum dan turbulen fasa gas menghasilkan solusi untuk $\bar{u}_x$, $\bar{u}_y$, $\bar{u}_z$, k dan ε bila model turbulen $k-\varepsilon$ digunakan. Persamaan model untuk besaran ini adalah Pers. (2.8), Pers.(2.9), Pers. (2.10), Pers. (2.12) dan Pers. (2.13).

3.1.2 Perpindahan momentum fasa padat serbuk partikel

Pergerakan partikel biomassa dalam ruang burner dimodelkan dengan metode fasa diskrit. Partikel biomassa memiliki medan kecepatan yang dikendalikan oleh neraca momentum pada setiap partikel. Partikel biomassa berinteraksi dengan fluida melalui peristiwa yang disebutkan gesekan partikel padat dengan fluida. Gesekan ini dirumuskan melalui persamaan *drag* partikel.

Untuk setiap ukuran partikel dengan diameter d_p , medan kecepatan setiap partikel memiliki komponen-komponen $\bar{u}_{px}$, $\bar{u}_{py}$, dan $\bar{u}_{pz}$. Persamaan konservasi momentum partikel dinyatakan dalam persamaan-persamaan

$$\frac{\partial \bar{u}_{px}}{\partial t} = \frac{\bar{u}_x - \bar{u}_{px}}{t_{Dx}} + \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g_x + a_x \quad (3.1) \quad \bar{u}_{px} = \bar{u}_{px} + \frac{\partial \bar{u}_{px}}{\partial t} \frac{dx}{\bar{u}_{px}} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_{py}}{\partial t} = \frac{\bar{u}_y - \bar{u}_{py}}{t_{Dy}} + \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g_y + a_y \quad (3.3) \quad \bar{u}_{py} = \bar{u}_{py} + \frac{\partial \bar{u}_{py}}{\partial t} \frac{dy}{\bar{u}_{py}} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_{pz}}{\partial t} = \frac{\bar{u}_z - \bar{u}_{pz}}{t_{Dz}} + \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g_z + a_z \quad (3.5) \quad \bar{u}_{pz} = \bar{u}_{pz} + \frac{\partial \bar{u}_{pz}}{\partial t} \frac{dz}{\bar{u}_{pz}} \quad (3.6)$$

a_x , a_y dan a_z adalah percepatan dari gaya luar untuk arah x , y dan z . Waktu gesekan t_{Dx} , t_{Dy} dan t_{Dz} dirumuskan dari persamaan *drag* berikut

$$t_{Dx} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu C_D N_{Rep,x}} \quad (3.7) \quad N_{Rep,x} = \frac{\rho d_p (\bar{u}_x - \bar{u}_{px})}{\mu} \quad (3.8)$$

$$t_{Dy} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_D N_{Rep,y}} \quad (3.9)$$

$$N_{Rep,y} = \frac{\rho d_p (\bar{u}_y - \bar{u}_{py})}{\mu} \quad (3.10)$$

$$t_{Dz} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_D N_{Rep,z}} \quad (3.11)$$

$$N_{Rep,z} = \frac{\rho d_p (\bar{u}_z - \bar{u}_{pz})}{\mu} \quad (3.12)$$

Fungsi koefisien C_D diformulasikan dari data-data percobaan. Persamaan-persamaan empiris C_D tersedia dari beberapa sumber literatur. Persamaan tersebut antara lain persamaan Morsi-Alexander [29], persamaan Haider-Levenspiel [30] dan persamaan Morrison [31]. Fungsi koefisien C_D pada persamaan Haider-Levenspiel untuk partikel sferisitas φ_p berdiameter bolanya d_p dituliskan dalam persamaan berikut

$$C_D = \frac{\beta_1 N_{Rep}}{\beta_2 + N_{Rep}} + \frac{24}{N_{Rep}} \left(1 + \beta_3 N_{Rep}^{\beta_4} \right) \quad (3.13)$$

Bilangan Reynolds partikel N_{Rep} dievaluasi berdasarkan diameter partikel bentuk bolanya d_p . Koefisien-koefisien β pada Pers. (3.13) di atas merupakan fungsi sferisitas sebagai berikut

$$\beta_1 = \exp(4,905 - 13,894\varphi_p + 18,422\varphi_p^2 - 10,260\varphi_p^3) \quad (3.14)$$

$$\beta_2 = \exp(1,468 + 12,258\varphi_p - 20,732\varphi_p^2 + 15,885\varphi_p^3) \quad (3.15)$$

$$\beta_3 = \exp(2,329 - 6,458\varphi_p + 2,449\varphi_p^2) \quad (3.16)$$

$$\beta_4 = 0,096 + 0,556\varphi_p \quad (3.17)$$

Bentuk partikel dikuantifikasi oleh parameter derajat kebolaan atau sferisitas dengan simbol φ_p . Luas permukaan bola yang memiliki volume yang sama dengan partikel yang tidak berbentuk bola adalah A_{bol} . Luas permukaan partikel bukan bola adalah A_{bbo} . Sferisitas φ_p didefinisikan oleh

$$\varphi_p = \frac{A_{bol}}{A_{bbo}} \quad (3.18)$$

3.1.3 Perpindahan pada serbuk partikel

Perpindahan yang terjadi pada serbuk partikel adalah perpindahan panas dengan temperatur partikel T_p . Persamaan model perpindahan panas pada partikel, untuk temperatur permukaan lebih kecil dari temperatur penguapan T_{vap} atau lebih besar dari temperatur didih T_{bp} dinyatakan sebagai berikut

$$m_p c_{pp} \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_T A_p (T - T_p) + A_p \epsilon_p \sigma_R (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (3.19)$$

Untuk $T_{vap} \leq T_p \leq T_{bp}$. Persamaan model perpindahan panas pada partikel adalah

$$m_p c_{pp} \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_T A_p (T - T_p) + \frac{\partial m_p}{\partial t} \Delta h_{vap} + A_p \epsilon_p \sigma_R (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (3.20)$$

c_{pp} adalah kapasitas panas jenis partikel. Besaran ϵ_p , σ_R dan θ_R adalah besaran-besaran yang terkait dengan perpindahan panas radiasi. ϵ_p adalah emisivitas partikel. σ_R adalah tetapan Boltzmann. Δh_{vap} adalah panas penguapan air. θ_R adalah temperatur radiasi yang diperoleh dari total fluksi radiasi panas datang G pada partikel dengan persamaan berikut

$$\theta_R^4 = \frac{G}{4\sigma_R} \quad (3.21)$$

$$G = \int_{\Omega=4\pi} I d\Omega \quad (3.22)$$

I merupakan intensitas radiasi panas yang dihitung berdasarkan persamaan perpindahan panas radiasi.

Koefisien h_T dievaluasi dari persamaan empiris perpindahan panas konveksi sebagai hubungan bilangan Nusselt partikel $N_{Nu,p}$ dengan bilangan Reynolds partikel N_{Rep} dan bilangan Prandtl N_{Pr} . Persamaan

empiris ini dituliskan sebagai berikut

$$N_{Nu,p} = \frac{h_T d_p}{\lambda} = 2 + 0,6 N_{Rep}^{0,5} N_{Pr}^{0,333} \quad (3.23)$$

Persamaan (2.37) digunakan sebagai persamaan model perpindahan panas di fasa gas dinyatakan. Untuk ini, laju reaksi $\bar{R}_i$ bernilai nol dan suku sumber S_T dikuantifikasi sebagai

$$S_T = -S_{C_{i,tot}} \Delta h_{vap} \quad (3.24)$$

Perpindahan berikutnya adalah perpindahan massa uap air oleh penguapan dan perbedaan tekanan uap air pada permukaan p_{sat} dan tekanan uap air di fasa gas p_{H_2O} . Laju perubahan massa partikel yang disebabkan oleh penguapan air dinyatakan sebagai laju perpindahan massa dinyatakan oleh persamaan berikut

$$\frac{\partial m_p}{\partial t} = -h_m \left(\frac{p_{sat}}{RT} - \frac{p_{H_2O}}{RT} \right) A_p M_{H_2O} \quad (3.25)$$

A_p adalah luas permukaan partikel. M_{H_2O} adalah berat molekul uap air. Konstanta h_m adalah koefisien perpindahan massa dengan satuan m/s . Koefisien ini dievaluasi dari korelasi empiris bilangan Sherwood N_{Sh} , bilangan Schmidt N_{Sc} dan bilangan Reynolds partikel N_{Rep} yang sudah umum digunakan dalam bentuk

$$N_{Sh} = 2 + 0,6 N_{Rep}^{1/2} N_{Sc}^{1/3} \quad (3.26) \quad N_{Sh} = \frac{h_m d_p}{D_{H_2O}} \quad (3.27)$$

Uap air dalam fasa gas menjadi bertambah. Laju pertambahan konsentrasi C_{H_2O} persatuan volume fasa gas oleh perpindahan dari massa partikel dapat dinyatakan sebagai

$$S_{C_i} = \frac{N_{H_2O} A_p M_{H_2O}}{\Delta V} \quad (3.28) \quad \Delta V = \bar{u}_{px} \Delta t \bar{u}_{py} \Delta t \bar{u}_{py} \Delta t \quad (3.29)$$

Perpindahan selanjutnya adalah perpindahan massa hasil devolatilisasi serbuk partikel biomassa dalam bentuk bahan volatiles yang dihasilkan oleh peristiwa dekomposisi termal yang menyebabkan adanya laju pengurangan massa biomassa $\frac{\partial m_p}{\partial t}$. Devolatilasi biomassa berlangsung pada temperatur di atas 200°C. Laju pemanasan lambat menghasilkan jumlah gas ringan dan tar dalam jumlah tidak melebihi kandungan zat terbang pada analisa proksimat $w_{VM,s}$ [32] pada temperatur di bawah 900°C. Pada temperatur di atas 900°C dan pada laju pemanasan cepat, jumlah gas ringan dan tar yang dihasilkan dapat melebihi $w_{VM,s}$ [32].

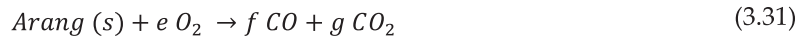
Untuk keperluan proses lanjut setelah devolatilisasi, rumus kimia gas-gas ringan dan tar-tar yang dihasilkan diperlukan secara pasti. Pernyataan laju massa dekomposisi biomassa misalnya untuk kinetika reaksi tunggal [33] belum memberikan rumus kimia pasti seperti yang diperlukan. Laju pengurangan massa biomassa kinetika reaksi tunggal di atas dinyatakan oleh persamaan

$$\frac{\partial m_p}{\partial t} = -k_{v\infty} \exp \left[-\frac{E_a}{RT_p} \right] \left[m_p - (1 - w_{VM,s})(1 - w_{H_2O,s})m_{p,o} \right] \quad (3.30)$$

$w_{H_2O,s}$ masing-masing adalah fraksi massa air dalam partikel biomassa basah dengan massa awal $m_{p,o}$.

Laju berkurangnya biomassa di persamaan di atas menunjukkan laju produksi gas-gas ringan dan berbagai tar. Rumus kimianya untuk keperluan berikut bisa dinyatakan sebagai rumus kimia gas dan tar standar. Gas-gas ringan dinyatakan sebagai gas-gas CO, CO₂, CH₄, C₂H₆, H₂, H₂O, HCN, dan H₂S [32]. Tar-tar terbentuk juga dimisalkan sebagai C₁₆H₁₈, C₁₀H₁₄O₂, C₉H₇N dan C₄H₄S [34].

Apabila proses devolatilisasi biomassa sudah selesai, partikel padat arang yang tertinggal akan mengalami pemanasan lanjut dan reaksi oksidasi dengan oksigen O_2 yang berdifusi dan berkonveksi ke permukaan partikel padat arang. Reaksi oksidasi arang ini dinyatakan oleh persamaan reaksi kimia



Koefisien e , f dan g adalah perbandingan massa komponen kimia terkait dengan massa Arang.

Laju pembakaran arang ini dirumuskan dengan berbagai mekanisme. Salah satunya adalah mekanisme gabungan kinetik dan difusi permukaan yang dikenal dengan “kinetik/difusion limited rate” [35]. Laju reaksi ini dituliskan disini sebagai berikut

$$\frac{\partial m_p}{\partial t} = -A_p \frac{\rho R T w_{O_2}}{M_{O_2}} \frac{C_1 C_2 T_\delta^{0.75} \exp\left[-\frac{E_a}{RT_p}\right]}{C_1 T_\delta^{0.75} + d_p C_2 \exp\left[-\frac{E_a}{RT_p}\right]} \quad (3.32) \quad T_\delta = \frac{T + T_p}{2} \quad (3.33)$$

w_{O_2} adalah fraksimassa oksigen dalam gas. C_1 dan C_2 adalah konstanta.

Persamaan perpindahan komponen kimia selama pembakaran arang adalah Pers. (2.26). Persamaan ini diselesaikan dengan menggunakan Pers. (3.33) untuk memformulasikan suku sumber untuk masing-masing komponen kimia pada reaksi (3.31) di atas.

Persamaan perpindahan panas pada partikel yang diselesaikan adalah

$$m_p c_{pp} \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_c A_p (T - T_p) - \eta_h \frac{\partial m_p}{\partial t} \Delta h_c + A_p \epsilon_p \sigma_R (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (3.34)$$

η_h adalah fraksi energi panas yang diserap oleh partikel itu sendiri.

Δh_c adalah entalpi reaksi pembakaran arang pada reaksi (3.31).

3.1.4 Pemodelan pembakaran gas hasil devolatilisasi

Gas hasil devolatilisasi adalah bahan bakar yang memiliki unsur karbon C. Fraksi massa C dalam ruang hasil pencampuran dinyatakan sebagai w_c . Fraksi massa C dalam inlet bahan bakar adalah $w_{c,bb}$. Fraksi massa C dalam inlet udara dinyatakan sebagai $w_{c,ud}$. Berdasarkan besaran-besaran ini, Kuo dalam bukunya [36] mendefinisikan fraksi campuran f sebagai berikut

$$f = \frac{w_c - w_{c,ud}}{w_{c,bb} - w_{c,ud}} \quad (3.35)$$

Besaran f memiliki sifat yang sama dengan unsur dimana tidak dihasilkan dan tidak dikonsumsi sehingga laju reaksi f adalah nol. Turbulen memberikan pengaruh langsung kepada f sebagai nilai sesaat yang didekomposisi mengikuti Pers. (2.1) dengan nilai rata-rata waktu $\bar{f}$ dan komponen fluktuasi f' . Besaran kedua adalah varian f'^2 dalam bentuk besaran $\overline{f'^2}$. Kedua besaran mengikuti hukum konservasi. Persamaan konservasi kedua besaran ini dimodelkan seperti yang disampaikan oleh Jones dan Whitelaw [37] sebagai berikut

$$\rho \frac{\partial \bar{f}}{\partial t} + \rho \bar{u}_x \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} + \rho \bar{u}_y \frac{\partial \bar{f}}{\partial y} + \rho \bar{u}_z \frac{\partial \bar{f}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} \right] + \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \bar{f}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \bar{f}}{\partial z} \right]$$

$$\rho \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial t} + \rho \bar{u}_x \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial x} + \rho \bar{u}_y \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial y} + \rho \bar{u}_z \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial x} \right] + \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial z} \right] +$$

$$c_g \mu_t \left(\frac{\partial \bar{f}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{f}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{f}}{\partial z} \right)^2 - c_d \rho \frac{\epsilon}{k} \overline{f'^2}$$

Konstanta of , cg , dan cd masing-masing memiliki nilai 0.85, 2.86, dan 2.0.

Pertanyaan berikut yang muncul adalah bagaimana mendapatkan nilai besaran rata-rata waktu $\bar{T}$, $\bar{c}_{A_i}$, dan $\bar{c}_{A_j}$ atau $\bar{w}_{A_i}$ dan $\bar{w}_{A_j}$. Senyawa kimia keluaran reaksi pembakaran antara lain bahan bakar, oksigen (O_2), nitrogen (N_2), uap air (H_2O), karbondioksida (CO_2), karbonmonoksida (CO), karbon (C), nitrogen oksida (NO), sulfuroksida (SO_2) dan senyawa-senyawa radikal lainnya yang mungkin terjadi. Komposisi atau konsentrasi senyawa di atas dapat ditentukan dari prinsip kesetimbangan kimia dalam termodinamika dengan metode minimasi energi bebas Gibbs [38]. Pada kondisi tekanan p dan temperatur tentu tertentu, komposisi setiap senyawa kimia hasil reaksi dapat dihitung.

Entalpi total setiap komponen kimia A_j (energi per satuan massa) dalam campuran ditentukan dari persamaan

$$h_{A_j} = \Delta h_{f,A_j}^0 + \int_{T_{ref}}^T c_p T \quad (3.38)$$

Besarnya entalpi total campuran dengan jumlah komponen kimia N_{cs} diperoleh dari

$$H = \sum_{j=1}^{N_{cs}} \omega_{A_j} \left(\Delta h_{f,A_j}^0 + \int_{T_{ref}}^T c_p T \right) \quad (3.39)$$

Entalpi total campuran $\bar{H}$ juga merupakan besar yang mengikuti hukum kekekalan. Persamaan konservasi besaran H dimodelkan sebagai berikut

$$\rho \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \rho \bar{u}_x \frac{\partial \bar{H}}{\partial x} + \rho \bar{u}_y \frac{\partial \bar{H}}{\partial y} + \rho \bar{u}_z \frac{\partial \bar{H}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{N_{Pr}} + \frac{\mu_t}{\sigma_H} \right) \frac{\partial \bar{H}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu}{N_{Pr}} + \frac{\mu_t}{\sigma_H} \right) \frac{\partial \bar{H}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu}{N_{Pr}} + \frac{\mu_t}{\sigma_H} \right) \frac{\partial \bar{H}}{\partial z} \right] + S_H \quad (3.40)$$

Suku sumber S_H adalah laju energi termal yang masuk atau keluar dari ruang komputasi. Keluar masuk ini disebabkan oleh laju radiasi panas yang datang dan pergi dari ruang komputasi. Keterlibatan radiasi panas menyebabkan proses yang terjadi adalah proses bukan adiabatik.

Hubungan pasti antara konsentrasi senyawa kimia C_{A_j} atau w_{A_j} dan temperatur T pada tekanan p dan entalpi (H) tertentu dengan fraksi massa f terjadi pada kondisi kesetimbangan dapat dihitung dengan metode minimasi energi bebas Gibbs. Hubungan ini disebut sebagai hubungan keadaan yang dinyatakan oleh

$$w_{A_j} = f(f, H) \quad (3.41) \quad T = f(f, H) \quad (3.42)$$

Hubungan di atas ditunjukkan pada Gambar 3.3.

Perilaku turbulen pada fraksi massa digambarkan oleh fluktuasinya terhadap waktu pada skala μs ($10^{-6}s$). Perilaku ini dikonversi ke dalam fungsi distribusi probabilitas yang menyatakan fraksi probabilitas kemunculan nilai f tertentu. Fraksi probabilitas ini dengansimbol p yang besarnya antara 0 dan 1 dinyatakan oleh fungsi

$$p = p(f) \quad (3.43)$$

Besarnya T dan w_{B_j} rata-rata waktu dengan simbol umum $\bar{\phi}$ dapat dievaluasi pada setiap H dengan menggunakan persamaan

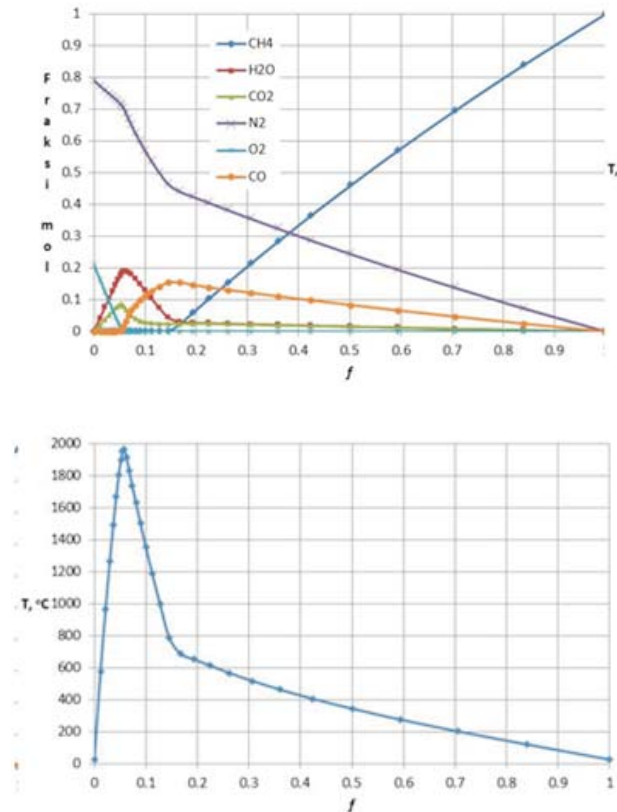
$$\bar{\phi} = \int_0^1 \phi(f, H) p(f) df \quad (3.44)$$

Fungsi distribusi probabilitas ini memenuhi fungsi distribusi yang dibahas di referensi [36] dalam bentuk

$$p(f) = \frac{f^{\eta-1} (1-f)^{\kappa-1}}{\int_0^1 f^{\eta-1} (1-f)^{\kappa-1} df} \quad (3.45)$$

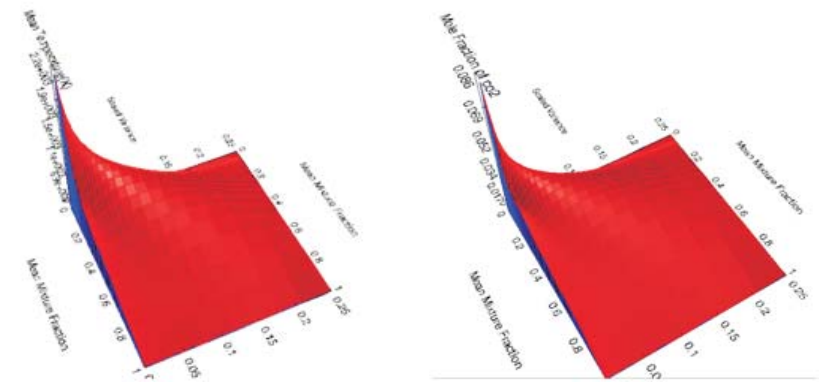
Bentuk fungsi ditentukan oleh nilai pangkat η dan κ yang dievaluasi dari $\bar{f}$ sebagai solusi Pers. (3.36) dan $\bar{f}^{\prime 2}$ sebagai solusi Pers. (3.37) dengan korelasi berikut

$$\eta = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^{\prime 2}} - 1 \right] \quad (3.46) \quad \kappa = (1 - \bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^{\prime 2}} - 1 \right] \quad (3.47)$$



Gambar 3.3 Hubungan keadaan reaksi pembakaran metana (CH₄) untuk fraksi mol komponen gas produk dan temperatur pada kondisi kesetimbangan, adiabatik, tekanan atmosferik sebagai bentuk fungsi Pers. (3.41) dan Pers. (3.42).

Tabel nilai variabel rata-rata waktu T dan ω_{A_j} dikonstruksikan dengan menggunakan Pers. (3.44) – Pers. (3.47) untuk setiap nilai $\bar{f}$, $\bar{f}^{\prime 2}$ dan H . Data temperatur dan konsentrasi yang ditabelkan ini dapat ditampilkan dalam bentuk grafik tiga dimensi bentuk permukaan sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 3.4. Jadi, besarnya nilai rata-rata waktu T dan ω_{B_j} dievaluasi dari tabel yang sudah dibuat di atas dengan menggunakan nilai $\bar{f}$ (mean mixture fraction) dan $\bar{f}^{\prime 2}$ (scaled variance) pada H dari solusi perpindahan konservasi masing-masing.



Gambar 3.4 Permukaan temperatur T dan fraksi mol CO₂ sebagai fungsi dari $\bar{f}$ (mean mixture fraction) dan $\bar{f}^{\prime 2}$ (scaled variance) pada H adiabatik.

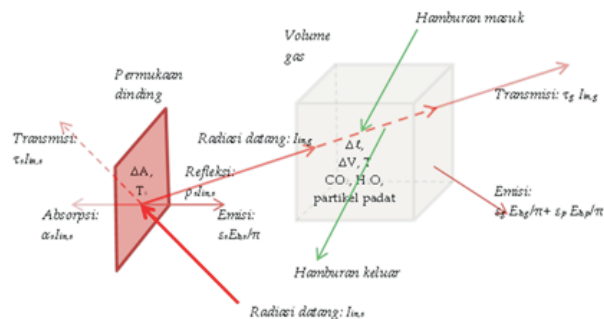
Pemodelan reaksi kimia cepat kondisi turbulen menggunakan besaran skalar fraksi campuran $\bar{f}$, variannya $\bar{f}^{\prime 2}$ dan entalpi total $\bar{H}$ yang diturunkan neraca unsur dan energi. Besaran-besaran yang mengikuti hukum kekekalan memiliki persamaan perpindahan, Pers.(3.36), Pers. (3.37) dan Pers. (3.40). Besaran skalar konsentrasi $\bar{w}_{A_j}$ dan temperatur $\bar{T}$ dievaluasi dengan penggunaan perata-rataan dari fungsi keadaanya

terhadap fraksi campuran dan entalpi, Pers.(3.41) dan Pers. (3.42), dan fungsi distribusi densiti (pdf) yang sudah diketahui, Pers. (3.45). Pemodelan ini dikenal dengan nama pemodelan pembakaran tak-campur awal (*non-premixed combustion*).

3.1.5 Perpindahan panas radiasi dalam ruang bakar

Besaran utama perpindahan panas radiasi adalah intensitas radiasi panas I . Intensitas radiasi panas adalah fluksi panas radiasi (W/m^2) per satuan sudut arah atau sudut pancar dalam segmen sudut pancar Ω steradian (sr). Intensitas radiasi panas I dinyatakan sebagai fungsi posisi dalam ruang tiga dimensi dan sudut arah Ω .

Fenomena perpindahan panas radiasi dalam ruang volume gas ΔV dan pada permukaan dinding luas ΔA digambarkan pada Gambar 3.5. Dinding memiliki temperatur T_s . Ruang gas berisi gas-gas peradiasi CO_2 dan H_2O dengan temperatur T . Ruang ini juga mengandung partikel padatan.



Gambar 3.5 Perjalanan intensitas radiasi panas ke dan dari permukaan dan volume gas

Intensitas radiasi panas datang I_{in} ke permukaan dinding diserap sebesar $\alpha_s I_{in}$, dipantulkan sebesar $\rho_s I_{in}$ dan diteruskan sebesar $\tau_s I_{in}$. Kesetimbangan energi dijaga oleh permukaan dinding pada temperatur T_s dengan cara pemancaran (emisi) kembali dalam sudut arah ruang Ω sebesar $\epsilon_s \sigma T_s^4 / \pi$. Besaran α_s , ρ_s , τ_s dan ϵ_s masing-masing dikenal dengan absorptivitas, reflektifitas, transmisivitas dan emisivitas permukaan dinding. Tetapan σ adalah tetapan Stefan-Boltzmann dengan nilai $5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$. Emisi benda hitam E_b didefinisikan sebagai σT^4 .

Gas-gas seperti CO_2 , H_2O dan CH_4 yang ada dalam ruangan tungku memiliki sifat penyerapan dengan absorptivitas gas α_g dan penerusan dengan transmisivitas gas τ_g untuk radiasi panas. Volume gas V mempertahankan temperaturnya T dengan cara pengemisian radiasi panasnya ke semua arah dalam sudut arah ruang Ω satu bola dengan besar $\epsilon_g E_b$. Besaran emisivitas gas ϵ_g diperkenalkan sebagai ukuran kekuatan gas mengemisikan radiasi panas.

Absorpsi dan emisi radiasi panas berada dalam kesetimbangan energi termal pada temperatur T . Pada kondisi ini, maka absorptivitas memiliki nilai yang sama dengan emisivitas. Koefisien absorpsi radiasi panas oleh media gas dinyatakan sebagai K_g dengan kedalaman perjalanan radiasi $\Delta \ell$. Absorptivitas dan emisivitas gas pada temperatur seimbang T dinyatakan oleh

$$\alpha_g = \epsilon_g = 1 - e^{-K_g \Delta \ell} \quad (3.48)$$

Partikel padat yang ada dalam volume gas berkontribusi dalam perpindahan panas radiasi. Partikel padat berperilaku penyerapan radiasi

panas dan sekaligus pengemisiannya. Koefisien penyerapan partikel dinyatakan sebagai K_p . Absorptivitas α_p dan ϵ_p didefinisikan oleh Pers. (3.48) di atas. Partikel padat juga melakukan penghamburan radiasi panas (*scattering*) kesegala arah. Koefisien hamburan partikel dinyatakan oleh besaran K_c . Hamburan terdiri dari hamburan masuk dan hamburan keluar ruang.

Persamaan perpindahan radiasi panas dengan besaran intensitas radiasi panas diperoleh dalam bentuk

$$\frac{dI(\vec{r}, \ell)}{d\ell} = K_g n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{3}{2} \epsilon_p \frac{\epsilon_p}{d_p} \frac{\sigma T_p^4}{\pi} + \frac{K_c}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \ell') \Phi(\ell, \ell') d\Omega' - (K_g + K_p + K_c) I(\vec{r}, \ell) \quad (3.49)$$

Koefisien penyerapan dan pengamburan datang oleh volume secara total dinyatakan sebagai

$$K_{gpc} = (K_g + K_p + K_c) \quad (3.50)$$

Fluksi radiasi panas G yang sampai pada sebuah sekmen volume dievaluasi berdasarkan intensitas I yang datang ke volume tersebut yang dinyatakan oleh persamaan berikut

$$G = \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \ell') d\Omega \quad (3.51)$$

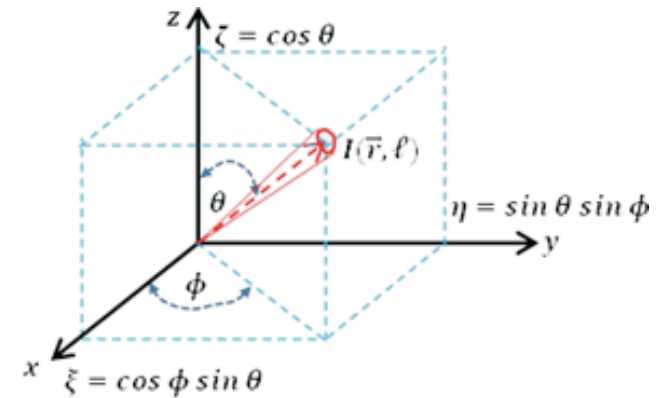
Fluksi panas G yang sampai pada permukaan dinding padatan dievaluasi dari sudut setengah bola dengan persamaan

$$G_{w,in} = \int_{n \cdot \Omega' > 0}^{4\pi} I(\vec{r}, \ell) d\Omega \quad (3.52)$$

Fluksi radiasi panas yang meninggalkan sebuah permukaan q_w pada temperatur T_w dan emisivitas permukaan E_w dirumuskan sebagai

$$q_w = \epsilon_w \sigma T_w^4 + (1 - \epsilon_w) G_{w,in} \quad (3.53)$$

Intensitas radiasi panas I dari satu titik dalam ruangan berisi fluida memancar ke semua arah dalam sudut 360° . Orientasi I untuk satu sudut pancar ($d\Omega$) dengan vektor arah $\vec{r}$ dalam ruangan tiga dimensi dengan koordinat x , y dan z dibentuk oleh sudut polar θ dan sudut azimuth ϕ , Gambar 3.6. Perubahan $I(\vec{r}, \ell)$ terhadap ℓ dalam koordinat $\vec{r}$ dan x, y dan z dinyatakan oleh Pers. (3.54).



Gambar 3.6 Orientasi intensitas radiasi panas $I(\vec{r}, \ell)$ untuk satu sudut pancar ($d\Omega$) dengan vector arah $\vec{r}$ dalam ruangan tiga dimensi dengan koordinat x , y dan z .

$$\frac{dI(\vec{r}, \ell)}{d\ell} = \xi \frac{dI(\vec{r}, \ell)}{dx} + \eta \frac{dI(\vec{r}, \ell)}{dy} + \zeta \frac{dI(\vec{r}, \ell)}{dz} \quad (3.54)$$

$$\xi = \cos \phi \sin \theta \quad (3.55)$$

$$\eta = \sin \theta \sin \phi \quad (3.56)$$

$$\zeta = \cos \theta \quad (3.57)$$

Vektor arah I pada satu segmen sudut ruang yang dinyatakan oleh sudut-sudut θ dan ϕ memiliki komponen arah ξ , η dan ζ mengikuti

persamaan vektor

$$\vec{r} = \xi i + \eta j + \zeta k \quad (3.58)$$

3.2 Pemodelan Pengering Sembur dengan Pergerakan Partikel Diskrit

Fenomena dalam pengering sembur saling terkait antara peralatan pengering, kondisi udara pengering dan kondisi lumpur umpan. Keterkaitan ini akan menghasilkan kondisi bubuk produk yang keluar dari ruang pengering. Skema keterkaitan ini ditunjukkan pada Gambar 3.7.

Pendistribusian udara pengering dalam ruang pengering sembur mengikuti perilaku aliran gas turbulen. Interaksi antara umpan yang mengandung partikel dengan udara pengering terjadi dalam ruang pengering. Udara pengering yang panas berperan untuk menguapkan air dalam umpan dan membawa air yang teruapkan keluar ruangan. Umpan yang airnya sudah teruapkan hampir keseluruhan meninggalkan sisa dalam bentuk partikel padat sebagai bubuk produk.



Gambar 3.7 Keterkaitan kinerja pengering sembur dengan kondisi operasi, parameter rancangan dan kondisi umpan

Pencampuran dengan perpindahan momentum, perpindahan panas dan perpindahan massa air adalah fenomena utama yang terjadi dalam pengering sembur. Persamaan konservasi massa, konservasi momentum, konservasi kuantitas turbulen dan konservasi energi pada fasa udara dan fasa partikel yang ada di umpan mengendalikan fenomena ini.

Khusus untuk sistem pemroses pengering sembur produksi bahan bentuk bubuk kering dengan udara pengering yang panas, besaran-besaran bebas yang membentuk persamaan konservasi massa dan momentum fasa fluida untuk diselesaikan secara komputasi adalah komponen-komponen kecepatan $\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z$ dan tekanan statik $\bar{p}$. Persamaan model turbulen yang berbentuk persamaan konservasi dengan model turbulen $k-\epsilon$ melibatkan besaran kuantitas turbulen k dan ϵ . Persamaan konservasi energi dibentuk oleh besaran utama temperatur fasa fluida kontinu T . Persamaan konservasi massa komponen yang melibatkan komponen kimia uap air (H_2O) dan udara memiliki besaran fraksi massa uap air ω_{H_2O} untuk diselesaikan. Persamaan-persamaan yang terlibat untuk besaran-besaran di atas pada sistem pemroses pengering sembur ini disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Persamaan konservasi pengendali fasa fluida kontinu sistem pemroses pengering sembur model turbulen $k-\epsilon$

Besaran utama	Persamaan konservasi	Sifat fisis dan koefisien perpindahan difusional	Persamaan
$\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z$ dan $\bar{p}$	Massa	ρ	Pers. (1.2)
$\bar{u}_x$	Momentum arah x	ρ, μ, μ_t	Pers. (2.8)

Besaran utama	Persamaan konservasi	Sifat fisis dan koefisien perpindahan difusional	Persamaan
$\bar{u}_y$	Momentum arah y	ρ, μ, μ_t	Pers. (2.9)
$\bar{u}_z$	Momentum arah z	ρ, μ, μ_t	Pers. (2.10)
k	Energi kinetik turbulen	ρ, μ, μ_t	Pers. (2.12)
ε	Laju dissipasi energi kinetik turbulen	ρ, μ, μ_t	Pers. (2.13)
C_{H_2O} atau ω_{H_2O}	Komponen uap air	$\rho, \mu, D_{H_2O}, \mu_t$	Pers. (2.25) atau Pers. (2.26)
T	Energi termal	$\rho, \mu, \lambda, \mu_t$	Pers. (2.37)

Butiran mengalami pemanasan dari fasa fluida kontinu dengan mekanisme perpindahan panas konveksi dari fasa fluida pada temperatur T ke butiran dengan temperatur T_p . Air dalam butiran dengan temperatur yang naik memiliki tekanan uap yang lebih tinggi dari tekanan uap air di fasa udara pengering. Perpindahan massa uap air dari butiran ke fasa udara terjadi dengan adanya perbedaan fraksi massa uap air dalam butiran. Konsentrasi uap air di butiran berada dalam kondisi kesetimbangan atau jenuh $C_{H_2O,s}$. Konsentrasi uap air pada ruang pengering C_{H_2O} jauh lebih kecil dari $C_{H_2O,s}$. Keberadaan udara pengering yang mengalir dalam jumlah yang besar juga mengencerkan konsentrasi uap air. Persamaan-persamaan model perpindahan pada butiran yang akan diselesaikan sebagai fasa diskrit disampaikan pada Tabel 3.2.

Besaran utama	Persamaan model	Sifat fisis dan koefisien perpindahan difusional	Persamaan
Kecepatan partikel $\bar{u}_{px}$	Momentum butiran diskrit (partikel) arah x dalam lintasan Langranian	ρ_p, ρ, μ	Pers. (3.1) sampai dengan Pers. (3.17)
Kecepatan partikel $\bar{u}_{py}$	Momentum butiran diskrit (partikel) arah y dalam lintasan Langranian	ρ_p, ρ, μ	Pers. (3.1) sampai dengan Pers. (3.17)
Kecepatan partikel $\bar{u}_{pz}$	Momentum butiran diskrit (partikel) arah z dalam lintasan Langranian	ρ_p, ρ, μ	Pers. (3.1) sampai dengan Pers. (3.17)
Besaran utama	Persamaan model	Sifat fisis dan koefisien perpindahan difusional	Persamaan
Temperatur partikel T_p	Perpindahan panas pada partikel	$c_{pp}, h_c, \epsilon_p, \lambda, \rho, \mu$	Pers. (3.21) sampai dengan Pers. (3.23) dan Pers. (3.20)
Konsentrasi uap air C_{H_2O} atau ω_{H_2O}	Perpindahan massa uap air dari partikel ke fasa udara	ρ, μ, D_{H_2O}, h_m	Pers. (3.25)

3.3 Pemodelan Sistem pemroses Aliran dalam Media Berpori

Sebuah unit proses dapat diisi oleh partikel-partikel padat berupa bubuk atau badan padat yang berpori. Fluida dialirkan ke dalam sistem pemroses yang terisi oleh media padat berpori ini mengalami peristiwa pengaliran dalam ruang-ruang pori ini. Media padat berpori berada

dalam ruang sistem pemroses ini pada kondisi tidak bergerak (*stasioner*). Ruang-ruang pori berupa saluran sempit dan kecil sekali dalam media padat. Fraksi volume ruang-ruang pori yang dialiri oleh fluida ini disebut sebagai fraksi ruang kosong yang dikenal sebagai porositas dengan simbol ϕ . Fluida ini menelusuri sela-sela pori yang tersambungkan dengan panjang lintasan L_t dari satu titik asal ke titik tujuan dengan jarak lurusnya L_s . Perbandingan antara L_t dan L_s dikenal dengan nama tortuositas dengan simbol τ_t .

Peristiwa aliran dalam saluran sempit dalam media berpori ini menimbulkan friksi antara fluida yang mengalir pada kecepatan $\bar{u}_i$ dengan dinding saluran pori ini. Friksi antara fluida dan dinding saluran pori dirumuskan dalam satu fungsi kecepatan pada persamaan momentum. Fungsi ini merupakan persamaan model yang dikenal dengan model faktor gesekan atau *shear factor model* (SFM) dengan simbol F_S . Ada beberapa persamaan SFM yang sudah banyak digunakan. Rekapitulasi persamaan SFM ini diberikan oleh Bindar dkk [39]. SFM akan menjadi sebuah suku sumber dalam persamaan momentum yang akan berkontribusi pada penurunan tekanan oleh keberadaan media berpori dalam aliran.

Kecepatan fluida dalam media berpori $\bar{u}_i$ dinyatakan sebagai kecepatan superfisial. Kecepatan superfisial adalah kecepatan fluida yang dievaluasi dalam ruangan sistem pemroses tanpa memperhitungkan volume ruang yang diisi oleh media berpori ini. Nilai besaran-besaran yang lain dalam media berpori didefinisikan sebagai nilai rata-rata volume dari nilainya secara lokal seperti yang dinyatakan oleh persamaan

$$\phi = \frac{1}{\Delta V} \int \phi_i dV \quad (3.59)$$

Persamaan konservasi massa dalam media berpori dengan besaran kecepatan superfisial dituliskan sebagai

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \sum_{j=x}^{y,z} \frac{\partial (\rho \bar{u}_j)}{\partial j} = 0 \quad (3.60)$$

Persamaan momentum untuk aliran fluida dengan kondisi aliran laminar untuk kecepatan superfisial $\bar{u}_i$ dalam media berpori yang stasioner dirumuskan oleh Liu dan Masliyah [40]. Persamaan ini dikembangkan untuk kondisi aliran turbulen dalam bentuk persamaan berikut

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho \bar{u}_i}{\tau_i} \right) + \frac{1}{\phi} \sum_{j=x}^{y,z} \bar{u}_j \frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial j} = \sum_{j=x}^{y,z} \left[\frac{\partial}{\partial j} \left\{ \tau_l (\mu + \phi \mu_p + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\} \right] - \tau_l \frac{\partial \bar{p}}{\partial i} + \tau_l \rho g_i + \tau_l F_S \quad (3.61)$$

Kontribusi media berpori pada perpindahan momentum ditunjukkan dengan keberadaan penambahan viskositas dengan kuantitas μ_p . Viskositas tambahan μ_p dimodelkan dari diameter partikel media pori d_p , kecepatan superfisial $\bar{u}_i$ dan faktor dispersi oleh media berpori f_{dis} dengan persamaan model berikut

$$\mu_p = \rho f_{dis} d_p |\bar{u}_i| \quad (3.62)$$

Persamaan model untuk F_S sebagai kontribusi faktor friksi aliran fluida dengan dinding pori media padat dapat diwakili persamaan Darcy untuk dominansi aliran viskos

$$F_S = -\frac{\mu}{k} \bar{u}_i \quad (3.63)$$

Permeabilitas media berpori dinyatakan sebagai k . Untuk keterlibatan konveksi, maka persamaan Forchheimer digunakan untuk persamaan model F_s sebagai berikut

$$F_s = - \left(c_{F1} \bar{u}_i + c_{F2} \bar{u}_i \sqrt{\sum_{j=x}^{y,z} (\bar{u}_j \bar{u}_j)} \right) \quad (3.64)$$

Persamaan model F_s yang lain adalah persamaan SHF yang dikembangkan oleh Ergun [41] dalam bentuk berikut

$$F_s = - \left\{ 150 \frac{\mu}{d_p^2} \frac{(1-\varphi)^2}{\varphi^3} \bar{u}_i + 1,75 \frac{\rho(1-\varphi)^2}{d_p \varphi^3} \bar{u}_i \sqrt{\sum_{j=x}^{y,z} (\bar{u}_j \bar{u}_j)} \right\} \quad (3.65)$$

Bentuk umum dari persamaan SHF ini dituliskan oleh Ansys CFD [42] untuk media berpori homogen dalam bentuk

$$F_s = - \left[\frac{\mu}{k} \bar{u}_i + C_{A2} \frac{1}{2} \rho \bar{u}_i \sqrt{\sum_{j=x}^{y,z} (\bar{u}_j \bar{u}_j)} \right] \quad (3.66)$$

Untuk media berpori yang tidak homogen, persamaan SHF dinyatakan oleh Ansys CFD [42] dalam bentuk

$$F_s = - \left[\sum_{j=x}^{y,z} \mu D_{ij} \bar{u}_j + \sum_{j=x}^{y,z} \left\{ C_{ij} \frac{1}{2} \rho \bar{u}_j \sqrt{\sum_{j=x}^{y,z} (\bar{u}_j \bar{u}_j)} \right\} \right] \quad (3.67)$$

Matrik ketidakhomogenan media berpori dinyatakan dalam matrik koefisien D_{ij} dan C_{ij} . Suku pertama dan suku kedua dari Pers. (3.64) sampai (3.67) diidentifikasi masing-masing sebagai kehilangan viskos dan kehilangan inersia.

Peristiwa turbulen dalam media berpori memberikan fenomena interaksi aliran turbulen dengan dinding media berpori. Interaksi ini akan meningkatkan atau menurunkan tingkat turbulensi pada fluida yang

mengalir. Pemodelan kuantitas turbulen untuk model turbulen k- ε didekati dengan perata-rataan volume persamaan konservasi k dan persamaan konservasi ε dengan penggunaan Pers. (3.59). Kuantitas turbulen k dan ε menjadi kuantitas rata-rata volume. Keberadaan media berpori memberikan kontribusi penambahan laju produksi energi kinetik turbulen k yang dinyatakan sebagai S_{kp} . Ini juga memberikan efek yang sama terhadap besaran laju disipasi energi turbulen ε dengan penambahan suku produksi pada persamaan konservasi ε sebesar $S_{\varepsilon p}$. Persamaan model turbulen k- ε dalam media berpori diberikan oleh de Lemos [43] yang dinyatakan oleh Pers. (3.68) dan Pers. (3.69). Kontribusi media berpori terhadap persamaan model k- ε dimodelkan oleh Pers. (3.70) dan Pers. (3.71).

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{\varphi} \sum_{j=x}^{y,z} \left(\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial j} \right) = \sum_{j=x}^{y,z} \left\{ \frac{\partial}{\partial j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial j} \right] \right\} + G_k - Y_k + S_{kp} \quad (3.68)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{\varphi} \sum_{j=x}^{y,z} \left(\rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial j} \right) = \sum_{j=x}^{y,z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\varepsilon p} \quad (3.69)$$

$$S_{kp} = C_{kp} \rho \frac{k}{\sqrt{k}} \sqrt{\sum_{j=x}^{y,z} (\bar{u}_j \bar{u}_j)} \quad (3.70)$$

$$S_{\varepsilon p} = C_{kp} C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon}{\sqrt{k}} \sqrt{\sum_{j=x}^{y,z} (\bar{u}_j \bar{u}_j)} \quad (3.71)$$

Laju produksi energi kinetik turbulen G_k dan laju disipasi Y_k didefinisikan oleh Pers. (2.14) dan Pers. (2.15).

Viskositas turbulen μ_t dalam media berpori dimodelkan pada persamaan berikut

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / (\varphi \varepsilon) \quad (3.72)$$

Besarnya nilai konstanta c_{kp} adalah 0,28

Persamaan energi termal berlaku untuk fasa fluida yang mengalir dan media berpori yang tidak bergerak. Koefisien perpindahan panas konveksi antara fluida dan dinding saluran media berpori dinyatakan sebagai h_{fs} . Partikel media berpori memiliki diameter d_p . Reaksi kimia untuk reaksi R_i terjadi dalam fasa dalam ruang pori dimana fluida mengalir. Temperatur dinding media berpori adalah T_s . Temperatur fluida dalam ruang pori adalah T . Persamaan konservasi energi termal fluida yang mengalir dalam ruang pori dirumuskan pada persamaan.

$$\frac{\partial(\rho c_p \bar{T})}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \sum_{j=x}^{y,z} \left\{ \bar{u}_j \frac{\partial(\rho c_p \bar{T})}{\partial j} \right\} = \sum_{j=x}^{y,z} \left\{ \frac{\partial}{\partial j} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial j} \right] \right\} + \frac{1}{\phi} \sum_i^{N_R} (\bar{R}_i \Delta h_{ri}) + \frac{h_{fs}(1-\phi)}{d_p} (T_s - \bar{T}) \quad (3.73)$$

Konduktifitas termal efektif fluida dinyatakan sebagai λ_{eff} . Untuk kondisi temperatur fluida tidak sama dengan temperatur media padat pori dengan konduktifitas termalnya λ_s , persamaan konservasi energi termal dalam media padat pori dinyatakan sebagai

$$\frac{\partial(\rho c_p T_s)}{\partial t} = \sum_{j=x}^{y,z} \left\{ \frac{\partial}{\partial j} \left[\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial j} \right] \right\} + \frac{h_{fs}}{d_p} (\bar{T} - T_s) + \frac{S_{Ts}}{1-\phi} \quad (3.74)$$

Konduktifitas termal efektif fluida melibatkan kontribusi turbulen dan konduktifitas media padat berpori. Ini dirumuskan pada persamaan berikut

$$\lambda_{eff} = \rho c_p \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} + \frac{\mu_t}{\rho N_{Pr}} \right) \phi + (1-\phi) \lambda_s \quad (3.75)$$

Perubahan komponen kimia dinyatakan hanya terjadi pada ruang pori yang diisi oleh fluida. Media padat berpori tidak mengalami perubahan massa. Persamaan konservasi komponen $\bar{w}_i$ dirumuskan pada

persamaan di bawah ini

$$\rho \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \sum_{j=x}^{y,z} \left(\bar{u}_j \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial j} \right) = \sum_{j=x}^{y,z} \left\{ \frac{\partial}{\partial j} \left[\left(\rho D_i + \frac{\mu_t}{\rho N_{Sc,t}} \right) \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial j} \right] \right\} + \frac{1}{\phi} \rho M_i \bar{R}_i + \frac{S_{w_i}}{\phi} \quad (3.76)$$

4. TEKNIK KOMPUTASI PERISTIWA PERPINDAHAN

4.1 Bentuk Umum Persamaan Perpindahan

Persamaan perpindahan momentum dengan besaran vektor kecepatan pada Pers. (2.8) sampai Pers. (2.10) dapat dituliskan dalam bentuk umum

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \sum_{j=x}^{y,z} \left(\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial i} + \sum_{j=x}^{y,z} \left\{ \frac{\partial}{\partial j} \left[\Gamma_u \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial j} \right] \right\} + \rho g_i \quad (4.1)$$

Persamaan perpindahan besaran skalar kuantitas turbulen, temperatur, dan konsentrasi komponen dengan variable umum ϕ dinyatakan sebagai

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \sum_{j=x}^{y,z} \left(\rho \bar{u}_j \frac{\partial \phi}{\partial j} \right) = \sum_{j=x}^{y,z} \left\{ \frac{\partial}{\partial j} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial j} \right] \right\} + S_\phi \quad (4.2)$$

S_ϕ merupakan suku sumber sebagai laju produksi atau konsumsi besaran ϕ persatuan volume ruang dimana proses in terjadi.

Persamaan-persamaan di atas merupakan persamaan diferensial parsial (PDP). Persamaan ini hanya bisa diselesaikan dengan metode numerik. Metode numerik melibatkan proses diskritisasi pada volume hingga untuk merubah persamaan umum PDP ke persamaan aljabar untuk besaran yang diselesaikan.

4.2 Pembentukan Persamaan Aljabar

Persamaan perpindahan di atas diubah bentuknya menjadi persamaan aljabar dengan metode integrasi dan diskritisasi pada volume hingga ΔV . Metode ini dikenal dengan nama metode volume hingga (FVM). FVM dikembangkan untuk penyelesaian persamaan momentum aliran fluida secara numerik oleh Patankar dan Spalding tahun 1970-an [44]. FVM secara rinci dibahas dalam bukunya Patankar [45].

Metode volume hingga melibatkan beberapa tahapan. Tahapan awal adalah pengkisian ruang proses dalam volume-volume hingga. Persamaan konservasi yang sudah diintegrasikan diformulasikan untuk masing-masing volume hingga. Persamaan integral dihampiri dengan pendekatan integral numerik. Fungsi turunan pertama besaran dalam persamaan konservasi didekati dengan penggunaan interpolasi metode beda hingga (FDM) atau elemen hingga (FEM). Hasil tahapan-tahapan di atas dikonstruksikan dalam bentuk persamaan aljabar untuk besaran yang diselesaikan. Persamaan aljabar ini diselesaikan dengan teknik numerik dan komputasi.

Setiap volume hingga ditutupi oleh N_s jumlah permukaan. Kecepatan fluida yang tegak lurus ke masing-masing permukaan volume hingga dinyatakan sebagai $\bar{u}_s$. Luas masing-masing permukaan adalah ΔA_s . Luas permukaan yang mana kecepatan fluida $\bar{u}_j$ tegak lurus padanya dinyatakan sebagai ΔA_j . Bila vektor normal pada permukaan ΔA_s adalah n_j , maka

$$A_j = \Delta A_s n_j \quad (4.3)$$

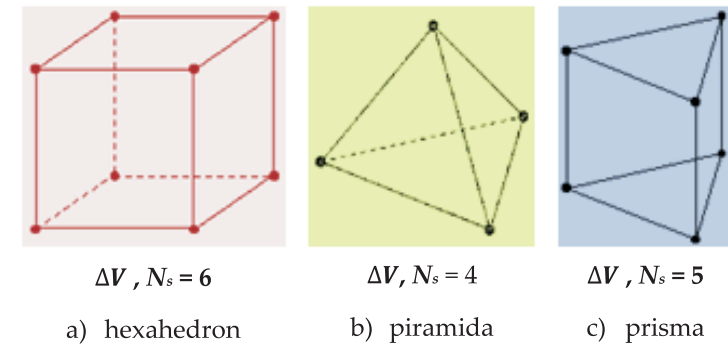
Integral Pers. (4.1) pada volume hingga ΔV menghasilkan persamaan

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \Delta V + \iint_{\Delta A} \rho \bar{u}_i \bar{u}_j dA_j = - \iint_{\Delta A} \bar{p} dA_i + \iint_{\Delta A} \Gamma_u \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial j} dA_j + f_i \Delta V \quad (4.4)$$

Volume hingga dibentuk oleh sejumlah permukaan N_s yang melingkupinya. Setiap permukaan s memiliki nilai-nilai besaran. Persamaan di atas ditulis dalam bentuk penjumlahan setiap permukaan dengan bentuk

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \Delta V + \sum_s^{N_s} (\rho \bar{u}_j \Delta A_j \bar{u}_i)_s = - \sum_s^{N_s} (\bar{p} \Delta A_i)_s + \sum_s^{N_s} \left(\Gamma_u \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial j} \Delta A_j \right)_s + f_i \Delta V \quad (4.5)$$

Ruang tempat terjadinya proses dibagi-dibagi dalam bentuk sekian banyak volume hingga. Volume hingga ini dapat dalam bentuk dasar hexahedron, tetrahedron, prisma dan yang lainnya, Gambar 4.1.

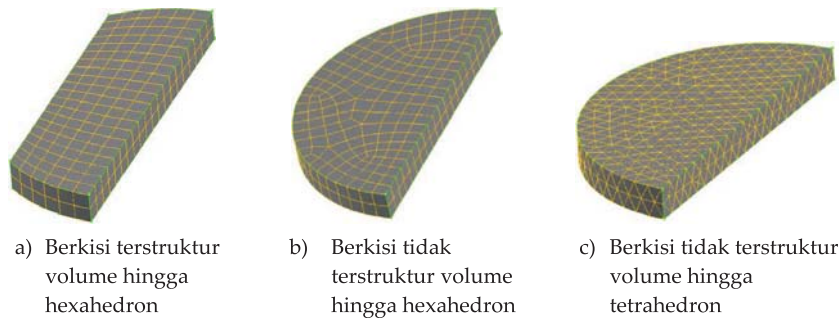


Gambar 4.1 Bentuk dasar volume hingga

Ruang proses sebagai ranah komputasi, yang sudah dibagi dalam kisi-kisi volume hingga, bisa tersusun secara terstruktur atau tidak terstruktur

dengan keleluasaan untuk penggunaan bentuk dasar volume hingga di atas. Sebagai contoh dalam pembuatan ruang berkisi ini ditunjukkan pada Gambar 4.2.

Persamaan momentum bentuk dan pendekatan integral, Pers. (4.5), diekspansi dengan pendekatan numerik FDM atau FEM untuk suku gradien waktu $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t}$ dengan beda waktu Δt dan suku difusional $\Gamma_u \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \Delta A_j$ untuk besaran $\bar{u}_i$ pada waktu $t+\Delta t$ dengan beda jarak Δj . Suku konveksi $\rho \bar{u}_j \Delta A_j \bar{u}_i$ dihampiri dengan teknik interpolasi antar nilai-nilai $\bar{u}_i$ pada volume hingga tetangganya untuk nilainya pada permukaan. Nilai besaran $\bar{u}_i$ tetanga dinyatakan sebagai $\bar{u}_{i,nb}$ pada waktu $t+\Delta t$. Nilai $\bar{u}_i$ pada waktu t dinyatakan sebagai $\bar{u}_{i,t}$.



Gambar 4.2 Ranah komputasi yang berkisi dengan susunan terstruktur dan tidak terstruktur yang dibentuk oleh variasi bentuk volume hingga

Berdasarkan prosedur di atas, persamaan momentum pada satu volume hingga tinjau diformulasikan dalam bentuk persamaan aljabar besaran $\bar{u}_i$ sebagai fungsi dari nilai-nilai besaran $\bar{u}_i$ volume hingga tetangga dan suku sumber S_{ui} . Suku S_{ui} dihasilkan oleh

$$S_{ui} = f_i \Delta V + \rho \frac{\Delta V}{\Delta t} \bar{u}_{i,t} \quad (4.6)$$

Besaran $\bar{u}_i$ volume hingga tinjau memiliki koefisien $a_{ui,p}$ untuk volume hingga tinjau dan $a_{ui,nb}$ untuk volume hingga tetangga. Persamaan aljabar besaran $\bar{u}_i$ sebagai penurunan dan penghampiran persamaan momentum untuk diselesaikan secara numerik dan komputasi dihasilkan dalam bentuk

$$a_{ui,p} \bar{u}_i = \sum_{nb}^{N_{nb}} a_{ui,nb} \bar{u}_{i,nb} + \sum_s^{N_s} \bar{p}_f (\Delta A_s n_i) + S_{ui} \quad (4.7)$$

Koefisien $a_{ui,p}$ dibentuk oleh

$$a_{ui,p} = \sum_{nb}^{N_{nb}} a_{ui,nb} + \rho \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (4.8)$$

Koefisien $a_{ui,nb}$ dikonstruksikan oleh ukuran volume hingga (Δx_j , ΔA_j), densitas fluida ρ , koefisien difusional Γ_u dan kecepatan-kecepatan fluida $\bar{u}_{i,t}$ yang terhitung pada waktu t . Koefisien ini dapat dievaluasi untuk setiap volume hingga pada setiap waktu.

Persamaan aljabar untuk besaran skalar ϕ dapat diturunkan dari Pers. (4.2) dengan pendekatan yang sama dengan persamaan aljabar untuk besaran momentum. Hasilnya diperoleh sebagai berikut

$$a_{\phi,p} \phi_p = \sum_{nb}^{N_{nb}} a_{\phi,nb} \phi_{nb} + S_{\phi}^* \quad (4.9)$$

$$S_{\phi}^* = S_{\phi} \Delta V + \rho \frac{\Delta V}{\Delta t} \phi_{p,t} \quad (4.10)$$

Persamaan aljabar besaran kecepatan, Pers. (4.7), diselesaikan dengan menggunakan nilai tebakan untuk besaran kecepatan dan besaran tekanan. Ini menghasilkan nilai-nilai kecepatan yang akan digunakan pada perhitungan berikutnya $\bar{u}_i^*$.

4.3 Metode Komputasi Medan Tekanan

Medan tekanan p diperlukan nilainya untuk penyelesaian persamaan aljabar besaran kecepatan dalam persamaan konservasi momentum. Besaran tekanan p tidak memiliki persamaan konservasi secara eksplisit. Persamaan kontinuitas pada satu volume hingga dibangun oleh fluksi massa F_s yang masuk dan keluar permukaan-permukaan volume hingga. Tekanan pada volume hingga sebelah hulu dan sebelah hilir permukaan dinyatakan sebagai p_0 dan p_1 . Fluksi massa pada permukaan s dikontribusi oleh konveksi dan difusi karena perbedaan tekanan dalam bentuk persamaan berikut

$$F_s = \rho_f \bar{u}_s + D_f(p_0 - p_1) \quad (4.11)$$

Hukum konservasi massa pada volume hingga berlaku dalam bentuk persamaan

$$\sum_s^{N_s} F_s A_s = 0 \quad (4.12)$$

Persamaan aljabar momentum, Pers. (4.7), diselesaikan dengan medan tekanan tebakan, p^* . Fluksi massanya diperoleh sebagai F_s^* . Persamaan koreksi tekanan dibangun dari Pers. (4.12) dalam bentuk persamaan aljabar untuk koreksi tekanan p'

$$a_{p',p} p' = \sum_{nb}^{N_{nb}} a_{p',nb} p'_{nb} + b \quad (4.13)$$

$$b = \sum_s^{N_s} F_s^* A_s \quad (4.14)$$

Suku b pada persamaan di atas merupakan penjumlahan perbedaan laju massa masuk dan keluar permukaan. Untuk perhitungan yang konvergen, nilai b harus sangat kecil dalam tingkat dekat ke nilai 0. Besaran b dikenal sebagai residual persamaan konservasi massa.

Persamaan aljabar koreksi tekanan p' , Pers. (4.13), diselesaikan untuk menghasilkan medan p' . Solusinya dicapai bilamana nilai residual b sudah sangat kecil dan mendekati nilai 0. Medan tekanan p dikoreksi nilainya dari nilai tebakan p^* dengan menggunakan nilai koreksi tekanan p' . Nilai tekanan p diperoleh dari persamaan

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (4.15)$$

Faktor relaksasi α_p digunakan untuk pengendalian besarnya pengkoreksian sehingga proses solusi numerik iteratif dapat berjalan stabil untuk menuju proses komputasi yang konvergen. Kecepatan $\bar{u}_x$, $\bar{u}_y$ dan $\bar{u}_z$ dikoreksi dengan penggunaan hubungan

$$\bar{u}_x = \bar{u}_x^* + (p'|_x - p'|_{x+\Delta x}) \frac{\Delta A_x}{a_{ux}} \quad (4.16)$$

$$\bar{u}_y = \bar{u}_y^* + (p'|_y - p'|_{y+\Delta y}) \frac{\Delta A_y}{a_{uy}} \quad (4.17)$$

$$\bar{u}_z = \bar{u}_z^* + (p'|_z - p'|_{z+\Delta z}) \frac{\Delta A_z}{a_{uz}} \quad (4.18)$$

Komputasi penyelesaian persamaan aljabar momentum, Pers. (4.7), dilanjutkan dengan menggunakan nilai tebakan baru untuk tekanan yang diperoleh dari Pers. (4.15). Komputasi diteruskan secara berulang sampai nilai b pada Pers. (4.14) diperoleh sangat kecil.

Metode komputasi yang dipaparkan di atas dalam penanganan medan tekanan secara khusus dikenal dengan metode SIMPLE. Untuk lebih rincinya, pembaca dapat mengikuti pada buku Patankar [44] dan Chung [46]. Metode ini disusun dalam sebuah algoritma komputasi yang dikenal dengan Algoritma Segregasi. Versi lain dari metode SIMPLE adalah metode SIMPLEC, SIMPLER dan PISO. Metode SIMPLEC [47]

dikembangkan dari metode SIMPLE dengan koreksi kecepatan sebagai berikut

$$\bar{u}_x = \bar{u}_x^* + (p'|_x - p'|_{x+\Delta x}) \frac{\Delta A_x}{a_{ux} - \sum_{nb}^{N_{nb}} a_{ux,nb}} \quad (4.19)$$

$$\bar{u}_y = \bar{u}_y^* + (p'|_y - p'|_{y+\Delta y}) \frac{\Delta A_y}{a_{uy} - \sum_{nb}^{N_{nb}} a_{uy,nb}} \quad (4.20)$$

$$\bar{u}_z = \bar{u}_z^* + (p'|_z - p'|_{z+\Delta z}) \frac{\Delta A_z}{a_{uz} - \sum_{nb}^{N_{nb}} a_{uz,nb}} \quad (4.21)$$

Metode PISO [48] menggunakan metode SIMPLE dengan menambahkan sekali lagi perhitungan koreksi. Disamping algoritma segregasi ini, ada algoritma lain yaitu Algoritma Mengkait (*Coupled Algorithm*).

4.4 Metode Diskritisasi Spasial dan Temporal

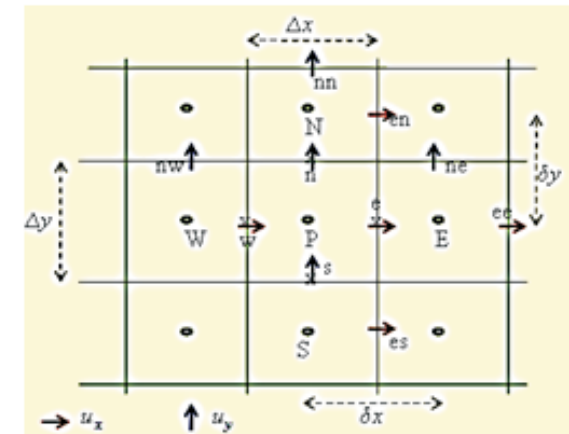
4.4.1 Diskritisasi Spasial

Ruang komputasi dua dimensi (2D) dengan titik tengah, titik antarmuka dan jarak titik tengah diberikan pada Gambar 4.3. Beberapa metode diskritisasi spasial digunakan untuk memperkirakan nilai besaran pada antarmuka. Nilai besaran antarmuka diperlukan untuk perhitungan koefisien-koefisien persamaan aljabar a_ϕ . Metode-metode ini dikenal dengan nama *scheme*. Metode yang paling sederhana adalah *Upwind Differencing Scheme* (UDS), [45]. UDS menggunakan pendekatan nilai besaran pada antarmuka memiliki nilai yang sama dengan nilai besaran pada titik pusat volume hingga. Untuk Gambar 4.3, metode UDS memberikan $\phi_e = \phi_p$, $\phi_n = \phi_p$ dan seterusnya.

Metode lain adalah metode *Central Differencing Scheme* (CDS), [45].

Metode CDS memberlakukan perataan sederhana nilai besaran pada antarmuka dengan dua nilai besaran pada titik-titik pusat yang mengapitnya. Contoh pada Gambar 4.3 memberikan nilai $\phi_e = (\phi_p + \phi_E)/2$ bila CDS digunakan.

Metode-metode yang lebih akurat dikembangkan dengan menggunakan nilai besaran pada tiga lokasi. Penentuan nilai ϕ_e pada Gambar 4.3 melibatkan nilai ϕ_E , ϕ_P dan ϕ_W . Metode-metode itu antara lain *Second Order Upwind Scheme* [49], *QUICK Scheme* [50], *MUSCL Scheme* [51] dan lainnya. Kesemua metode ini diberikan secara komprehensif oleh Patankar [45], Chung [46] dan Bindar [52].



Gambar 4.3 Ruang komputasi 2D terstruktur dengan titik tengah (P,W,E,N,S), titik antar muka (e,w,s,n,nn,en,es,ns), ukuran volume hingga (Δx , Δy) dan jarak antar titik tengah (δx , δy)

4.4.2 Diskritisasi Temporal

Suku transien besaran perpindahan pada Pers. (4.1) dan Pers. (4.2) berupa $\partial\phi/\partial t$ didiskritisasi pada beda waktu Δt . Nilai besaran pada waktu sekarang t ditulis sebagai ϕ_t , nilai besaran waktu akan datang pada $t+\Delta t$ dinyatakan sebagai $\phi_{t+\Delta t}$ dan nilai besaran waktu berlalu $t-\Delta t$ disimbulkan $\phi_{t-\Delta t}$. Nilai besaran waktu sekarang dan waktu berlalu sudah diketahui besarnya. Diskritisasi orde satu suku transien dihasilkan dalam bentuk pendekatan

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{\phi_{t+\Delta t} - \phi_t}{\Delta t} \quad (4.22)$$

Diskritisasi orde dua untuk suku transien ini dapat dilakukan dalam bentuk

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{3\phi_{t+\Delta t} - 4\phi_t + \phi_{t-\Delta t}}{2\Delta t} \quad (4.23)$$

Persamaan aljabar besaran ϕ untuk kondisi transien diselesaikan secara implisit atau eksplisit. Cara implisit melibatkan nilai ϕ_p , ϕ_{nb} dan S_ϕ^* pada Pers. (4.10) pada waktu $t+\Delta t$ sebagai yang dihitung. Sebaliknya, cara eksplisit menghitung nilai ϕ_p pada waktu $t+\Delta t$ dari nilai ϕ_{nb} dan S_ϕ^* pada waktu t .

4.5 Metode Penyelesaian Persamaan Aljabar Besaran

4.5.1 Jumlah node ranah komputasi

Ranah komputasi dengan kisi-kisi volume hingga dibentuk oleh titik-titik pusat volume hingga. Titik-titik pusat ini disebut dengan istilah *node*. *Node* pada bidang-bidang batas ranah komputasi terletak pada pusat

volume hingganya. Volume dari volume hingga bidang batas bernilai nol. Nilai besaran yang diketahui dan yang dihitung dinyatakan sebagai nilai besaran pada *node* tersebut.

Untuk ranah komputasi tiga dimensi dengan kisi terstruktur, Gambar 4.2a, jumlah *node* pada sisi x , sisi y dan sisi z dinyatakan sebagai N_x , N_y dan N_z . Jumlah node total N_{nv} ranah komputasi tiga dimensi ini adalah $N_x N_y N_z$. Jumlah node pada bidang batas disimbulkan oleh N_{ns} . Dengan kondisi batas untuk besaran diketahui, maka jumlah node untuk nilai besaran yang harus dihitung N_{nvc} adalah

$$N_{nvc} = N_{nv} - N_{ns} \quad (4.24)$$

4.5.2 Matrik persamaan aljabar besaran dan penyelesaiannya

Persaman aljabar linear Pers. (4.9) merupakan bentuk umum dari persamaan aljabar untuk semua besaran proses dalam peristiwa perpindahan dengan simbol ϕ . Persamaan (4.9) dituliskan dalam bentuk persamaan matrik yang mengandung matrik koefisien **A**, matrik besaran proses Φ , dan matrik penyamaan **B**. Bentuk persamaannya adalah

$$A \Phi = B \quad (4.25)$$

Matrik **A** berukuran $N_{nvc} \times N_{nvc}$ dimana jumlah baris dan kolomnya adalah sama sebesar N_{nvc} . Matrik **A** ini nilainya diketahui pada setiap tahap perhitungan. Matrik Φ adalah matrik dengan ukuran $N_{nvc} \times 1$. Matrik **B** juga berukuran $N_{nvc} \times 1$ dengan status nilainya juga diketahui. Nilai dari matrik Φ merupakan sasaran perhitungan dengan menggunakan Pers. (4.25) di atas.

4.5.2.1 Metode penyelesaian kisi tunggal

Matrik A yang dihasilkan berupa matrik sebar (*sparse matrix*). Penyelesaian Pers. (4.25) dengan metode langsung melalui inversi matrik sebar A tidak mungkin dilakukan dengan ukuran matrik $N_{nVC} \times N_{nVC}$ yang besar di atas. Metode-metode yang digunakan adalah metode penyelesaian matrik secara iteratif.

Metode iteratif yang lebih sederhana adalah metode iteratif Jacobi dan Gauss Seidel [53], [54], [55]. Kedua metode ini dimulai dengan tebakan nilai matrik Φ pada iterasi ke k untuk menghitung nilai Φ pada iterasi k+1. Matrik A memiliki anggota a_{ij} pada baris ke i dan kolom ke j. Anggota pada diagonalnya dinyatakan a_{ii} . Nilai a_{ii} selalu lebih besar dari nol. Matrik B memiliki anggota b_i . Nilai Φ_i pada iterasi k+1 dihitung dengan metode iteratif Jacobi dengan persamaan

$$\Phi_{i,k+1} = \frac{1}{a_{ii}} (b_i - \sum_{i \neq j} a_{ij} \Phi_{j,k}) \quad (4.26)$$

Iterasi dianggap selesai bila perbedaan antara nilai besaran Φ pada iterasi ke k+1 dengan nilai besaran Φ pada iterasi ke k mendekati nilai 0 atau nilai karakteristik residu r_{aeq} dalam persamaan

$$r_{aeq} = B - A\Phi_{k+1} \quad (4.27)$$

mendekati nilai yang sangat kecil. Nilai karakteristik residu r_{aeq} dapat berupa nilai maksimum $r_{aeq}(R_{m,eq})$ pada Pers. (4.27) atau nilai akar dari penjumlahan kuadrat $r_{aeq}(R_{s,aeq})$.

$$R_{M,aeq} = \text{Max}[B - A\Phi_{k+1}] \quad (4.28) \quad R_{s,aeq} = \sqrt{\sum [B - A\Phi_{k+1}]^2} \quad (4.29)$$

Metode iteratif Gauss-Seidel hampir sama dengan metode iteratif Jacobi. Metode Gauss-Seidel menggunakan besaran Φ_i pada iterasi k+1 untuk lokasi j lebih kecil dari i pada suku ke dua bagian kanan Pers. (4.26) yang dinyatakan dalam bentuk persamaan

$$\Phi_{i,k+1} = \frac{1}{a_{ii}} (b_i - \sum_{j < i} a_{ij} \Phi_{j,k+1} - \sum_{j > i} a_{ij} \Phi_{j,k}) \quad (4.30)$$

Metode-metode iteratif lainnya dikembangkan dengan pemanfaatan kekhususan matrik A yang dihasilkan dari persamaan differensial parsial asalnya. Penggunaan sifat matrik triadiagonal yang dimiliki, maka metode iteratif Line Gauss-Siedel dikembangkan [46]. Matrik triadiagonal diselesaikan dengan metode langsung dengan menggunakan algoritma Thomas yang dikenal dengan metode TDMA [56]. Kekhususan keberadaan matrik diagonal ini dimanfaatkan juga dalam penyelesaian matrik ini dengan teknik ubah-ubah arah dari baris i ke kolom j. Metode ini dikenal dengan nama metode *Alternating Direction Implicit* (ADI)[53],[57].

4.5.2.2 Metode penyelesaian dengan kisi bertingkat (*multigrid*)

Metode kisi bertingkat ini dikembangkan secara konsisten oleh Prof. Archi Brandt [58]. Pengembangan ini ditandai dari publikasinya tahun 1973 tentang teknik adaptif bertingkat untuk solusi numerik problem bernilai batas [59]. Aplikasi metode kisi bertingkat dalam komputasi aliran transonik dipublikasikan oleh South dan Brandt tahun 1977 [60]. Solusi dengan kisi bertingkat aliran dengan persamaan diferensial parsial eliptik dikembangkan oleh Brandt dan Dinar tahun 1979 [61].

Solusi untuk kisi halus dinyatakan sebagai Φ_h . Residu kisi halus dihitung dengan menggunakan Pers. (4.27) yang memberikan hasil r_h .

Perkiraan residu untuk matrik kasar r_{2h} dari residu r_h dengan menggunakan matrik restriksi R_{h-2h} dengan persamaan

$$r_{2h} = R_{h-2h} r_h \quad (4.31)$$

Matrik restriksi adalah matrik yang bisa dievaluasi langsung. Tahap ini dikenal tahap restriksi.

Matrik koefisien untuk kisi kasar dievaluasi dengan hasil A_{2h} . Residu matrik kasar dihitung kembali sebagai e_{2h} dengan menggunakan persamaan

$$A_{2h} e_{2h} = r_{2h} \quad (4.32)$$

Koreksi residu e_h untuk kisi halus diperoleh dengan cara interpolasi dari residu r_{2h} dengan menggunakan matrik prolongasi I_{2h-h} . Matrik prolongasi juga matrik yang bisa dihitung langsung. Tahap ini dikenal dengan tahap prolongasi. Residu e_h diperoleh dari persamaan berikut

$$e_h = I_{2h-h} e_{2h} \quad (4.33)$$

Solusi terkoreksi untuk Φ_h diperoleh dari pengkoreksian berikut

$$\Phi_{h,baru} = \Phi_h + e_h \quad (4.34)$$

Proses komputasi dengan siklus V satu kisi kasar ini dapat diulang kembali sampai sekian kali siklus.

Siklus V dengan beberapa kisi kasar mengikuti tahap-tahap sama dengan siklus V satu kisi kasar di atas. Ini dimulai dari kisi halus (kisi h) ke kisi kasar kedua ($2h$), terus ke kisi kasar ketiga ($3h$) dan sampai ke kisi kasar terakhir. Tahap berikut adalah tahap prolongasi dari kisi kasar terakhir ke kisi kasar di atasnya dan sampai ke kisi halus (h). Selain siklus

V, penyelesaian kisi bertingkat dari restriksi ke prolongasi juga menggunakan siklus W.

4.6 Metode Dekomposisi Ranah Komputasi Dan Komputasi Paralel

4.6.1 Dekomposisi ranah komputasi

Kemajuan berikutnya dalam teknik komputasi untuk tujuan kecepatan komputasi ini adalah keberhasilan dalam pengembangan metode dekomposisi ranah komputasi (*domain decompositions method*). Metode ini dijelaskan secara teoritis dan rinci dalam beberapa buku antara lain Smith dkk [62], Quarteroni dan Valli [63], Mathew [64], dan Toselli dan Widlund [65]. Aplikasi metode ini disampaikan secara ringkas dalam bukunya Chung [46].

Dekomposisi ranah komputasi melahirkan inovasi dalam hal komputasi paralel atau terdistribusi yang dikerjakan oleh komputer yang memiliki banyak prosesor. Satu prosesor bekerja secara paralel dengan prosesor lain untuk penyelesaian masing-masing ranah komputasi yang sudah didekomposisi. Komputasi besar dengan metode dekomposisi ranah komputasi dilaksanakan oleh satu komputer dengan prosesor dalam jumlah ratusan dan bahkan ribuan.

Teknik dasar dekomposisi ranah komputasi adalah pembagian ranah komputasi dalam beberapa komponen ranah komputasi. Ranah komputasi dua dimensi pada Gambar 4.4 memiliki kisi-kisi 1-63. Ukuran matrik koefisien ranah komputasi adalah 63×63 untuk persamaan aljabar besaran yang dihitung Φ , Pers. (4.9). Ranah komputasi ini didekomposisi menjadi tiga komponen ranah komputasi. Komponen 1 memiliki kisi-kisi

1-15. Komponen 2 berisikan kisi-kisi 16-35. Komponen 3 dibentuk oleh kisi-kisi 36-63. Ukuran matrik koefisien komponen 1, 2 dan 3 berturut adalah 15×15 , 20×20 dan 28×28 . Matrik-matrik koefisien ini dituliskan sebagai $A_{1,15 \times 15}$, $A_{2,20 \times 20}$ dan $A_{3,28 \times 28}$. Bila jumlah kisi pada komponen ranah komputasi adalah N_k , komponen ranah komputasi adalah K , maka matrik koefisiennya ditulis dalam bentuk umum $A_{K \times N_k}$. Besaran pada kisi-kisi dalam komponen ranah komputasi disimbulkan sebagai Φ_{0k} .

31	32	33	34	35	76	60	61	62	63
26	27	28	29	30	75	56	57	58	59
21	22	23	24	25	74	52	53	54	55
16	17	18	19	20	73	48	49	50	51
64	65	66	67	68	72				
11	12	13	14	15	71	44	45	46	47
6	7	8	9	10	70	40	41	42	43
1	2	3	4	5	69	36	37	38	39

Gambar 4.4 Ranah komputasi dua dimensi (kisi 1 – 63) didekomposisi menjadi tiga komponen ranah komputasi kisi 1 – 15, kisi 16-35 dan kisi 36-63 yang memiliki kisi antarmuka 64 -76.

Komponen ranah komputasi berikutnya adalah ranah komputasi antarmuka komponen-komponen ranah komputasi ruang dalam. Nilai besaran antarmuka dua komponen ranah komputasi bertetangga ditentukan oleh ketergantungan antara nilai besaran pada antarmuka ini dan nilai besaran pada komponen ranah komputasi yang berdekatan dengan antarmukanya. Kisi-kisi antarmuka komponen ranah komputasi berjumlah N_f . Contoh pada Gambar 4.4 memiliki jumlah kisi antar muka

sebanyak 13 yaitu kisi-kisi 64-76. Ketergantungan antar kisinya ini membentuk tambahan matrik koefisien antarmuka untuk kisi-kisi 64-76. Matrik ini berukuran 13×13 yang dituliskan sebagai $A_{f,13 \times 13}$. Besaran pada kisi antarmuka dinyatakan sebagai Φ_f .

Hubungan antara besaran pada kisi dekat antarmuka masing-masing komponen ranah dengan besaran pada antarmukanya dan sebaliknya memberikan koefisien interaksi antara besaran kisi dengan besaran antarmuka dan besaran antar muka dengan besaran kisi. Pada komponen 1, nilai besaran pada kisi 11 berkorelasi nilai besaran pada kisi antarmuka 64. Untuk kebalikannya, nilai besaran pada kisi antarmuka 64 mempunyai korelasi dengan nilai besaran kisi 11. Untuk contoh ini, hanya ada satu koefisien kebergantungan dalam matrik dengan persamaan

$$a_{1164}\phi_{11} = b_{11} \quad (4.35) \quad a_{6411}\phi_{11} = b_{64} \quad (4.36)$$

Koefisien korelasi interaksi untuk kisi yang berdekatan dengan kisi antar muka seperti a_{1164} dan a_{6411} bernilai tidak nol. Koefisien korelasi interaksi kisi dengan kisi antarmuka yang tidak berdekatan memiliki nilai nol seperti a_{2164} dan a_{6421} . Ini akhirnya memberikan matrik koefisien interaksi antara kisi dalam komponen ranah dan kisi antar muka. Kisi-kisi ruang dalam 1-63 berinteraksi dengan kisi-kisi antarmuka 64-76. Ini menghasilkan matrik interaksi $A_{f,K \times N_f}$ dan $A_{K,f \times N_f}$. Contoh Gambar 4.4 memberikan matrik interaksi $A_{f,63 \times 13}$ dan $A_{f,13 \times 63}$.

Bila jumlah komponen ranah komputasi adalah K , maka jumlah total kisi dalam adalah

$$M = \sum_k^K N_k \quad (4.37)$$

Jumlah total kisi antarmuka antara komponen ranah komputasi adalah N_f . Persamaan aljabar untuk besaran yang dihitung ditulis dalam bentuk matrik dekomposisi ranah komputasi pada Pers. (4.38).

$$\begin{pmatrix} A_{1,N_1 \times N_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{1f,N_1 \times N_f} \\ 0 & A_{2,N_2 \times N_2} & 0 & 0 & 0 & A_{2f,N_2 \times N_f} \\ 0 & 0 & A_{3,N_3 \times N_3} & 0 & 0 & A_{3f,N_3 \times N_f} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{k,N_k \times N_k} & A_{kf,N_k \times N_f} \\ A_{f1,N_f \times N_1} & A_{f2,N_f \times N_2} & A_{f3,N_f \times N_3} & \dots & A_{fk,N_f \times N_k} & A_{f,N_f \times N_f} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_{01,N_1 \times 1} \\ \Phi_{02,N_2 \times 1} \\ \Phi_{03,N_3 \times 1} \\ \dots \\ \Phi_{0k,N_k \times 1} \\ \Phi_{f,N_f \times 1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{01,N_1 \times 1} \\ B_{02,N_2 \times 1} \\ B_{03,N_3 \times 1} \\ \dots \\ B_{0k,N_k \times 1} \\ B_{f,N_f \times 1} \end{pmatrix} \quad (4.38)$$

Untuk penyampaian teknik penyelesaian Pers. (4.38) di atas, jumlah komponen ranah komputasi yang digunakan adalah 2. Komponen ranah komputasi yang ketiga adalah kisi antarmukanya. Persamaan matriknya ditulis secara sederhana dalam bentuk

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} \\ 0 & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Φ_3 adalah nilai besaran pada kisi-kisi antarmuka. Matrik koefisien A Pers (4.39) di atas difaktorisasi dengan teknik blok LU dengan hasil

$$A = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ A_{31}A_{11}^{-1} & A_{32}A_{22}^{-1} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} \\ 0 & A_{22} & A_{23} \\ 0 & 0 & S \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Matrik S di atas dikenal sebagai matrik komplemen Schur yang didefinisikan oleh persamaan berikut

$$S = A_{33} - A_{31}A_{11}^{-1}A_{13} - A_{32}A_{22}^{-1}A_{23} \quad (4.41)$$

Nilai besaran pada antarmuka Φ_3 dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan

$$S\Phi_3 = B_3 - A_{31}A_{11}^{-1}B_1 - A_{32}A_{22}^{-1}B_2 \quad (4.42)$$

$$\Phi_3 = S^{-1}(B_3 - A_{31}A_{11}^{-1}B_1 - A_{32}A_{22}^{-1}B_2) \quad (4.43)$$

Nilai besaran Φ_1 dan Φ_2 untuk komponen 1 dan komponen 2 diselesaikan secara berturut-turut dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut

$$\Phi_1 = A_{11}^{-1}(B_1 - A_{13}\Phi_3) \quad (4.44)$$

$$\Phi_2 = A_{22}^{-1}(B_2 - A_{23}\Phi_3) \quad (4.45)$$

Persamaan kompelemen Schur di atas diselesaikan dengan metode iteratif. Matrik koefisien A_{11}^{-1} dan A_{22}^{-1} dapat diselesaikan secara sendiri-sendiri tanpa adanya ketergantungan satu sama lain. Matrik ini dapat diselesaikan dengan menggunakan penyelesaian iteratif matrik kisi tunggal atau kisi bertingkat seperti yang dibahas pada bagian 0.

Komponen 1 ranah komputasi dengan kisi-kisi dalam 1-15 untuk besaran ϕ dibangun korelasinya dengan kisi-kisi tetangga menggunakan persamaan aljabar Pers. (4.9). Untuk kisi 1, besaran ϕ_1 sebagai fungsi linear dari besaran ϕ_2 pada kisi 2 dan ϕ_2 pada kisi 3 dalam bentuk persamaan

$$a_{11}\phi_1 - a_{12}\phi_2 - a_{16}\phi_6 = b_1 \quad (4.46)$$

Persamaan aljabar untuk besaran pada kisi 4 dihasilkan sebagai berikut

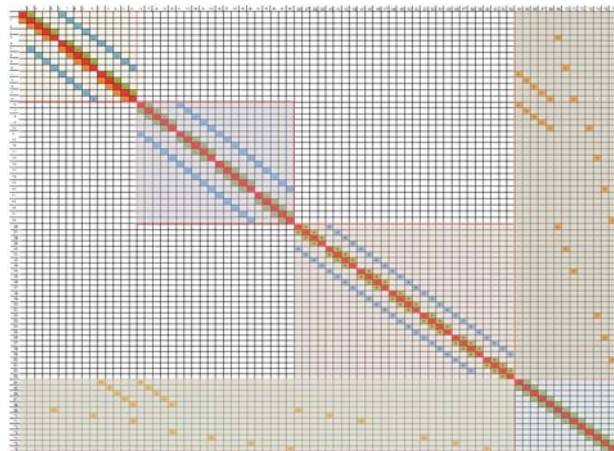
$$a_{44}\phi_4 - a_{43}\phi_3 - a_{45}\phi_5 - a_{49}\phi_9 = b_4 \quad (4.47)$$

Persamaan aljabar untuk besaran pada kisi-kisi yang lain dapat diformulasikan dengan cara yang sama dengan di atas. Persamaan-persamaan itu disusun dalam bentuk matrik renggang. Koefisien matriknya tidak dituliskan tetapi ditandai dengan warna dan titik hitam

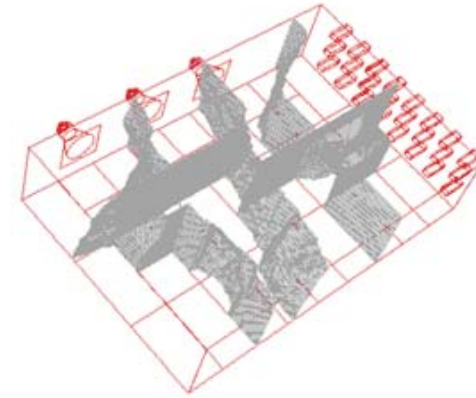
saja. Bila anggota matriknya tidak diwarnai dan tidak ditandai dengan titik, maka nilai anggota matrik ini adalah nol.

Matrik koefisien dekomposisi ranah komputasi pada Pers. (4.38) dapat ditampilkan dalam satu bentuk matrik utuh. Bentuk matriknya digambarkan pada Gambar 4.5.

Ada beberapa cara dalam membangun komponen dekomposisi pada satu ranah komputasi. Salah satu cara yang paling banyak digunakan adalah cara yang dikembangkan oleh Karpys dan Kumar dalam software METIS yang mereka buat [66]. Cara ini didasarkan atas teknik partisi grafik. Ranah komputasi tungku api gas percobaan yang berukuran $4.5 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ [52] dengan jumlah kisi 4 juta didekomposisi ke 8 komponen ranah komputasi dengan cara METIS. Hasil dekomposisi ini ditunjukkan oleh



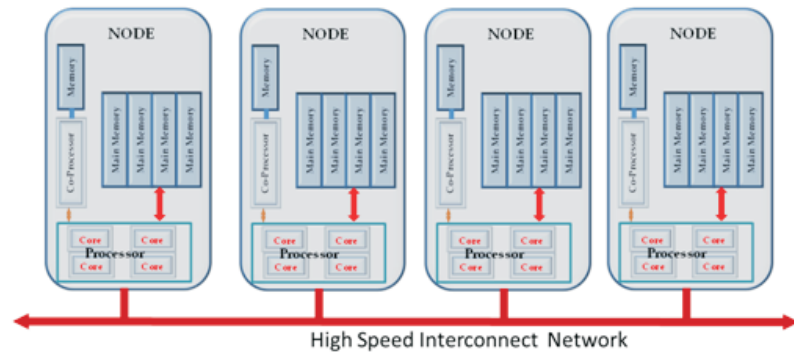
Gambar 4.5 Bentuk utuh matrik koefisien hasil dekomposisi ranah komputasi pada Gambar 4.4 dengan ukuran 76×76 .



Gambar 4.6 Ranah komputasi tungku api percobaan yang berukuran $4.5 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ [52] dengan jumlah kisi 4 juta didekomposisi ke 8 komponen ranah komputasi dengan cara METIS.

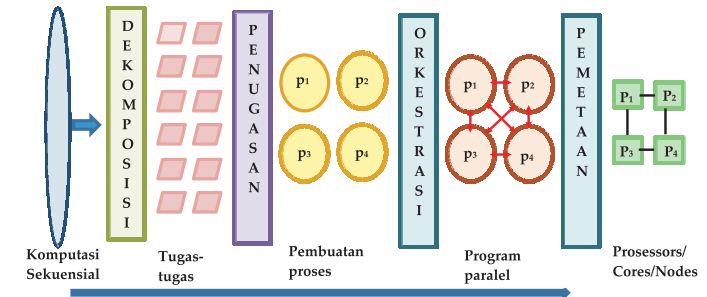
4.6.2 Komputer dan komputasi paralel

Masing-masing fisik komputer yang memiliki banyak *processor* di dalamnya dapat juga dihubungkan satu sama lain secara fisik membentuk satu komputer besar dengan jumlah *processor* yang sangat banyak. Misalkan satu komputer besar ini dibangun oleh 100 buah komputer yang masing-masing memiliki 12 *processor*, maka komputer besar ini memiliki total *core* sebanyak 4800 *core*. Masing-masing komputer yang disambungkan disebut juga dengan *node*. Komputer paralel ini memiliki 100 *node* dengan jumlah total *core* 4200. Komputer besar seperti ini dikenal juga dengan nama *Supercomputer*. Secara skematik, struktur komputer paralel ditunjukkan oleh Gambar 4.7.



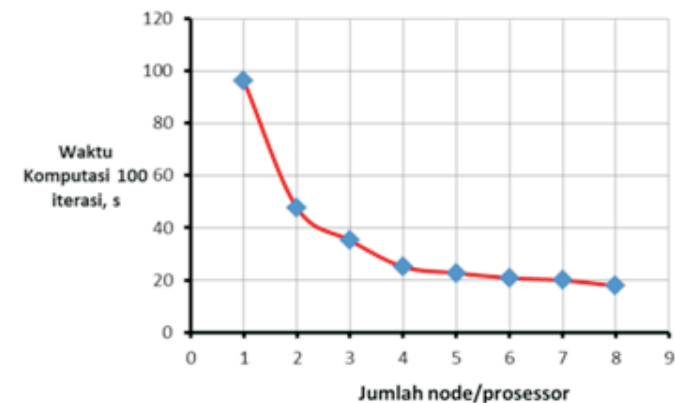
Gambar 4.7 Struktur komputer paralel yang dibangun dari beberapa node komputer

Komputasi paralel dikendalikan oleh proses penyelenggara komputer dalam komputer paralel (*Computing Process Host*) dalam pengaturan penugasan masing-masing node komputer secara paralel. Pengguna komputer paralel berinteraksi dengan *Computing Process Host* melalui fasilitas perantara pengguna (*user interface*) yang dikenal dengan *Cortex*. Langkah pertama yang dilakukan oleh *prosesor* adalah membagi kisi-kisi dan data-data ke komponen ranah komputasi masing-masing. Langkah kedua adalah penyusunan tugas-tugas komputasi pada masing-masing komponen untuk dilaksanakan secara paralel masing-masing *Node* computer. Langkah ketiga adalah orkestrasi, komunikasi dan sinkronisasi data. Langkah keempat adalah pemetaan proses untuk dilaksanakan oleh *Node*. Alur langkah-langkah komputasi paralel di atas ditunjukkan oleh Gambar 4.8. Jumlah komponen ranah komputasi dibuat tidak lebih besar dari jumlah *core*-nya komputer paralel.



Gambar 4.8 Alur langkah komputasi paralel [67]

Hasil komputasi paralel ini dengan variasi jumlah *core* pada parameter komputasi lainnya sama menunjukkan bahwa komputasi paralel mempercepat waktu komputasi. Pada jumlah iterasi yang sama, waktu komputasi dengan 8 *core* hanya diperlukan seperlima dari waktu komputasi dengan 1 *core* untuk contoh komputasi paralel ini seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Waktu komputasi berbagai jumlah *core* pada 100 iterasi untuk kasus komputasi aliran turbulen dua dimensi 1 m x 0,2 m model k-e yang ukuran kisi 1 mm

Algoritma komputasi untuk keperluan penyelesaian di atas disusun untuk kondisi tekanan tidak memberikan perubahan pada besarnya densitas fluida dan kondisi tekanan yang memberikan perubahan pada besarnya densitas fluida. Algoritma pertama adalah Algoritma Berdasarkan Tekanan (*pressure-based solver*) atau PBS. Algoritma berikutnya adalah Algoritma Berdasarkan Densitas (*density-based solver*)

Algoritma untuk komputasi proses perpindahan tak tunak atau tunak melibatkan banyak tahapan-tahapan. Algoritma segregasi tekanan dan kecepatan metode SIMPLE atau SIMPLEX dengan komputasi paralel disusun sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Algoritma Berdasarkan Tekanan Skema SIMPLE atau SIMPLEC untuk Komputasi Paralel

4.8 Komputasi Perpindahan Panas Radiasi Metode P-1

Persamaan perpindahan radiasi, Pers.(3.49) dikonversi dalam bentuk persamaan perpindahan radiasi dengan besaran fluksi radiasi datang G ke volume yang didefinisikan oleh Pers. (3.51), [68]. Hasil konversi persamaan radiasi panas dengan besaran G dinyatakan sebagai

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial G}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial G}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial G}{\partial z} \right) = -4\pi \left(K_g n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p \right) + (K_g + K_p)G \quad (4.48)$$

E_p adalah kekuatan emisi radiasi oleh partikel padatan. Bila setiap partikel j memiliki temperatur T_{pj} , emisivitas ϵ_{pj} , luas proyeksi partikel A_{pj} , maka E_p diperoleh untuk jumlah partikel N dari

$$E_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{j=1}^N \epsilon_{pj} A_{pj} \frac{\sigma T_{pj}^4}{\pi V} \quad (4.49)$$

Koefisien absorpsi radiasi partikel K_p dirumuskan sebagai

$$K_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{j=1}^N \epsilon_{pj} \frac{A_{pj}}{V} \quad (4.50)$$

V adalah volume gas. Luas proyeksi partikel dinyatakan oleh

$$A_{pj} = \frac{\pi d_{pj}^2}{4} \quad (4.51)$$

Fluksi panas radiasi q_i menyatakan perubahan fluksi radiasi sepanjang jarak i . Bila i itu adalah x , y dan z , maka fluksi panas radiasi diperoleh dari hubungan

$$q_{rx} = -\Gamma \frac{\partial G}{\partial x} \quad (4.52)$$

$$q_{ry} = -\Gamma \frac{\partial G}{\partial y} \quad (4.53)$$

$$q_{rz} = -\Gamma \frac{\partial G}{\partial z} \quad (4.54)$$

Koefisien Γ pada persamaan perpindahan di atas dibentuk oleh koefisien absorpsi radiasi pada persamaan berikut

$$\Gamma = \frac{1}{3(K_g + K_p + K_c)} \quad (4.55)$$

Koefisien hambur partikel padat K_c dievaluasi dari persamaan

$$K_c = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{j=1}^N (1 - f_{pj}) (1 - \epsilon_{pj}) \frac{A_{pj}}{V} \quad (4.56)$$

Faktor f_{pj} adalah faktor hamburan radiasi panas oleh partikel padat j .

Sumber energi panas dalam persamaan energi, Pers. (2.37), sebagai suku ST diperoleh dari penyelesaian persamaan radiasi dengan metode P-1 di atas. Suku sumber S_T didefinisikan sebagai

$$S_T = -4\pi \left(K_g n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p \right) + (K_g + K_p)G \quad (4.57)$$

Kondisi batas untuk Pers. (4.48) melibatkan kondisi batas dinding, inlet dan outlet. Fluksi panas radiasi pada dinding q_{rw} didefinisikan sebagai

$$q_{rw} = -\Gamma \frac{\partial G}{\partial l} \quad (4.58)$$

Jarak tegak lurus ke dinding dinyatakan sebagai l . Fluksi radiasi datang pada dinding G_w memiliki persamaan

$$G_w = -q_{rw} \quad (4.59)$$

Untuk dinding yang memiliki temperatur T_w , emisivitas ϵ_w dan reflektifitas ρ_w , maka fluksi radiasi pada dinding diperoleh dari persamaan

$$q_{rw} = \frac{4\pi\epsilon_w n^2 \frac{\sigma T_w^4}{\pi} - (1 - \rho_w)G_w}{2(1 + \rho_w)} \quad (4.60)$$

Berdasarkan Pers. (4.59), fluksi radiasi datang pada dinding diperoleh dari persamaan

$$G_w = - \frac{4\pi\epsilon_w n^2 \frac{\sigma T_w^4}{\pi}}{(1+3\rho_w)} \quad (4.61)$$

Teknik komputasi Pers. (4.48) mengikuti metode diskritisasi volume hingga yang sudah disampaikan bagian di atas. Perbedaan penyelesaiannya dengan persamaan perpindahan yang lain hanyalah pada bentuk persamaan pada bagian kanan Pers. (4.48). Metode penyelesaian persamaan radiasi panas dalam bentuk Pers. (4.48) dengan teknik komputasi diskritisasi volume hingga. Ini dikenal dengan nama metode P-1.

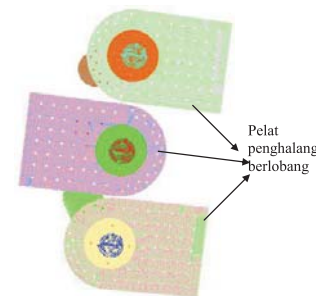
5. KINERJA SISTEM PEMROSES HASIL KOMPUTASI MULTI DIMENSI

5.1 Modifikasi Pelat Penghalang Sebuah Burner

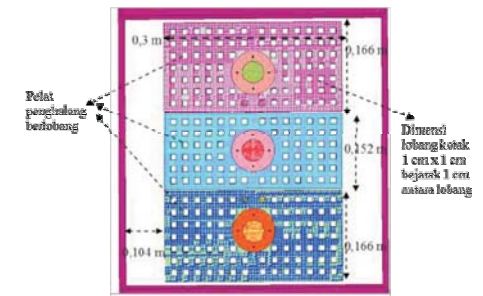
Pelat penghalang burner memiliki fungsi utama sebagai penambat api (*flame*) di mulut burner sehingga api yang stabil dapat diwujudkan. Pelat penghalang untuk burner sebelum modifikasi ditunjukkan oleh Gambar 5.1. Disamping ini, pelat ini juga berfungsi sebagai alat peningkatan pencampuran antara udara dan gas alam. Modifikasi untuk pencapaian keseimbangan pencampuran yang terkait dengan perubahan distributor gas alam di atas adalah penambahan pelat penghalang yang tetap berlobang pada kedua sisi ujung burner seperti terlihat pada Gambar 5.2. Burner dengan modifikasi lobang dan pelat penghalang ditunjukkan pada Gambar 5.3. Penyelesaian masalah ini dilaporkan pada laporan teknis Bindar [69].

Geometri model CFD sistem pemroses burner gas pada Gambar 5.4 melibatkan model aliran turbulen, model pembakaran reaksi cepat dan perpindahan panas radiasi. Model aliran turbulen yang ampuh untuk digunakan adalah model turbulen $k-\epsilon$. Model pembakaran reaksi cepat yang cocok untuk kasus ini adalah model pembakaran fraksi campuran. Persamaan-persamaan model yang digunakan disarikan pada Tabel 5 1.

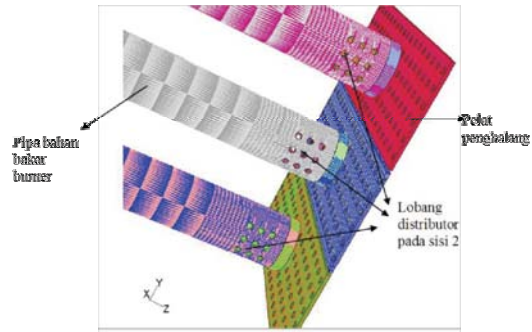
Ada dua inlet sebagai kondisi batas yang terlibat. Satu inlet untuk udara pembakaran dan satu inlet untuk gas alam sebagai bahan bakar. Kecepatan pada masing-masing inlet ditetapkan sesuai dengan lajur alir massanya untuk operasi burner. Temperatur pada masing inlet juga ditetapkan sesuai dengan kondisi lapangan. Besaran fraksi campuran $\bar{f}$ pada inlet bahan bakar bernilai 1 dan pada inlet udara bernilai 0. Varian $\bar{f}^2$ ditetapkan bernilai 0. Komposisi gas alam ditetapkan sesuai dengan komposisi yang dilaporkan oleh pabrik. Komposisi udara dinyatakan sebagai 79% gas nitrogen dan 21% gas oksigen.



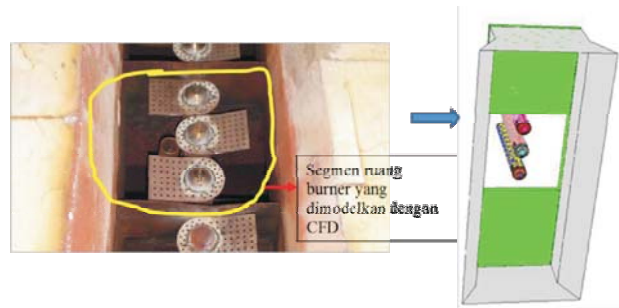
Gambar 5.1 Pelat penghalang burner sebelum modifikasi



Gambar 5.2 Pelat penghalang burner setelah modifikasi



Gambar 5.3 Pipa, lobang distributor dan pelat penghalang untuk burner yang dimodifikasi



Gambar 5.4 Segmen ruang burner yang dimodelkan dan geometri model CFD ruang burner modifikasi

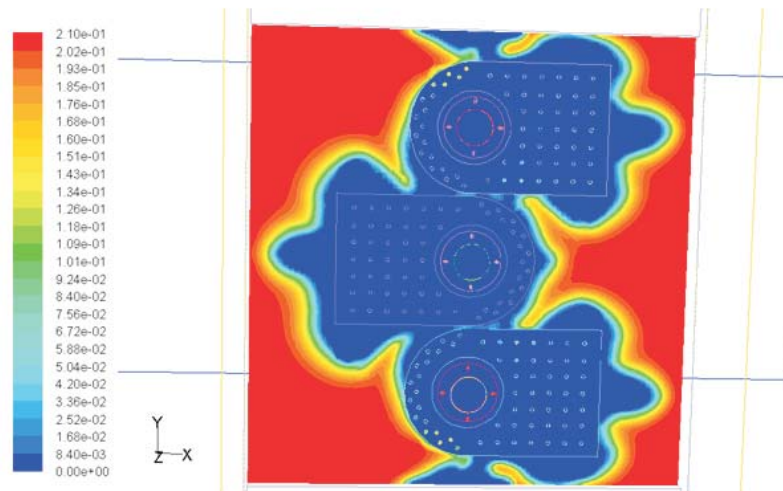
Tabel 5 1 Persamaan model sistem pemroses burner bahan bakar gas alam model aliran turbulen $k-\epsilon$

Besaran utama	Persamaan konservasi	Sifat fisis dan koefisien perpindahan difusional	Persamaan
$\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z$ dan $\bar{p}$	Massa	ρ	Pers. (1.2)

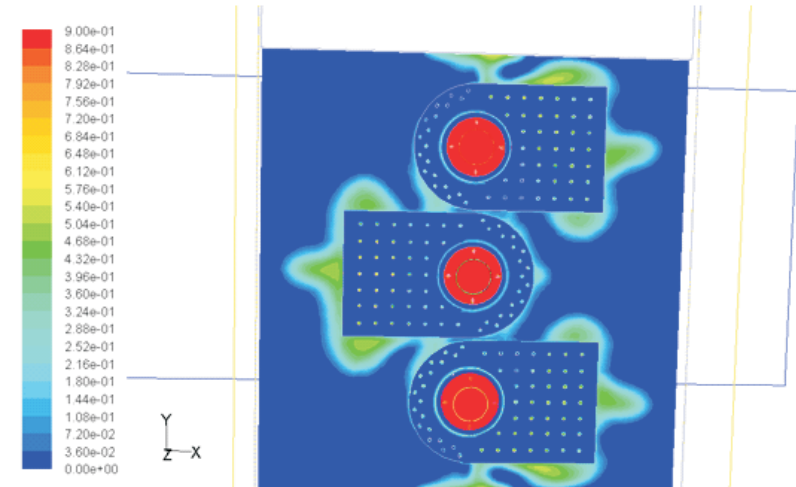
Besaran utama	Persamaan konservasi	Sifat fisis dan koefisien perpindahan difusional	Persamaan
$\bar{u}_x$	Momentum arah x	ρ, μ, μ_t	Pers. (2.8)
$\bar{u}_y$	Momentum arah y	ρ, μ, μ_t	Pers. (2.9)
$\bar{u}_z$	Momentum arah z	ρ, μ, μ_t	Pers. (2.10)
k	Energi kinetik turbulen	ρ, μ, μ_t	Pers. (2.12)
ϵ	Laju dissipasi energi kinetik turbulen	ρ, μ, μ_t	Pers. (2.13)
Fraksi campuran gas alam $\bar{f}$	Fraksi campuran bahan bakar mengikuti hukum konservasi tanpa suku pembentukan	ρ, μ, μ_t	Pers. (3.36)
Varian f' dalam bentuk $\overline{f'^2}$	Varian f' dalam bentuk $\overline{f'^2}$ mengikuti hukum konservasi tanpa suku pembentukan	ρ, μ, μ_t	Pers. (3.37)
Entalpi $\bar{H}$	Energi termal	$\rho, \mu, \lambda, \mu_t$	Pers. (3.40)
I	Intensitas radiasi panas	ϵ_p, K_g	Pers.
Temperatur, T	Persamaan keadaan		Pers. (3.42), Pers. (3.44), Pers. (3.45), Pers. (3.47)
Fraksi massa komponen kimia, ω_{A_j}	Persamaan keadaan		Pers. (3.41), Pers. (3.44), Pers. (3.45), Pers. (3.47)

Burner *existing* seperti pada Gambar 5.1 memiliki beberapa karakteristik yang dianalisa berdasarkan hasil simulasi CFD. Karakteristik pertama adalah ketidakseimbangan dalam pemasokan udara jumlah udara dengan bahan bakar dimana di satu sisi jumlah udara jauh lebih banyak dibanding bahan bakar dan satu sisi lagi terjadi

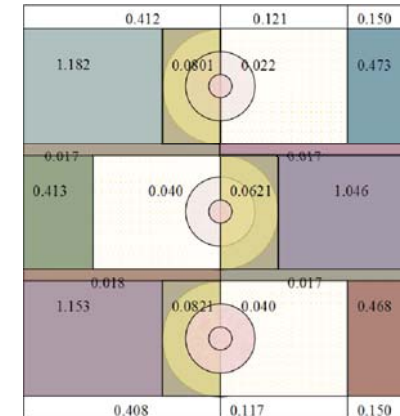
sebaliknya yang ditunjukkan oleh Gambar 5.5 dan Gambar 5.6. Hanya sebagian kecil fraksi massa gas mengalir ke lobang-lobang pelat penghalang. Gas yang mengalir didominasi oleh bahan bakar yang digambarkan oleh Gambar 5.7. Distribusi temperatur pada bidang horizontal tidak simetris karena ketidak seimbangan distribusi massa udara yang dilihatkan oleh Gambar 5.8. Keberadaan pola api yang relatif panjang dilihat dari distribusi temperatur ini.



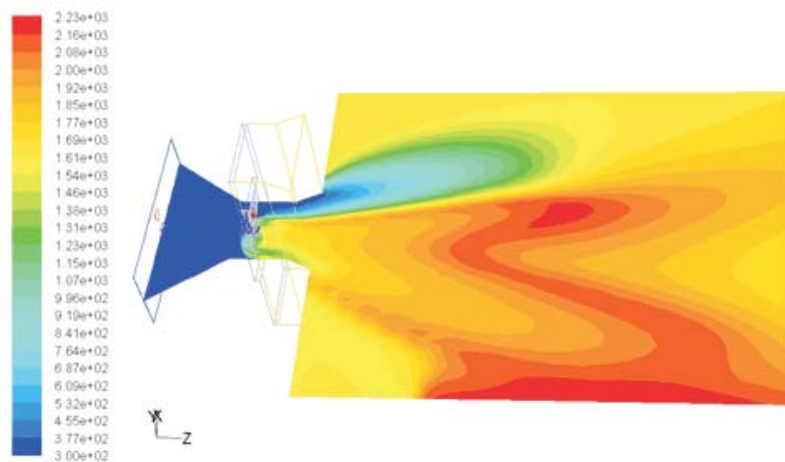
Gambar 5.5 Distribusi oksigen pada mulut burner untuk burner *existing*



Gambar 5.6 Distribusi metana pada mulut burner untuk burner *existing*.



Gambar 5.7 Distribusi laju massa (kg/s) gas total pada segmen penampang mulut burner untuk burner *existing*



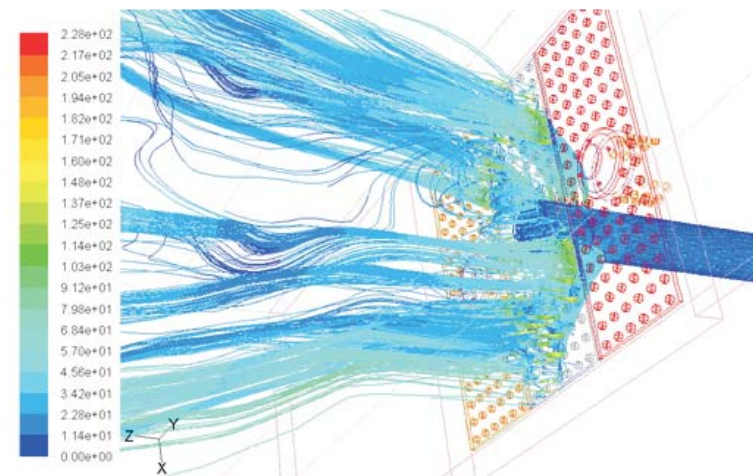
Gambar 5.8 Distribusi temperatur gas dalam K pada bidang horizontal pipa tengah burner *existing*

Hasil simulasi untuk modifikasi burner pelat penghalang

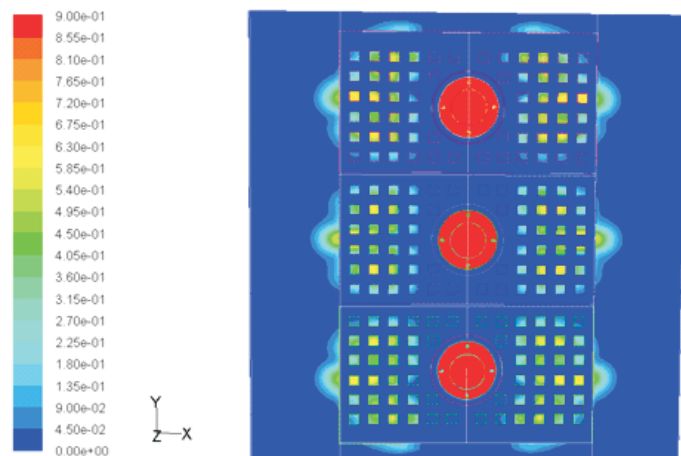
Gambar 5.2 memberikan informasi tentang karakteristik kinerja burner termomodifikasi ini. Keseimbangan jumlah pasokan udara dan bahan bakar dapat diwujudkan oleh burner termomodifikasi ini, Gambar 5.9. Aliran yang dihasilkan adalah aliran yang simetris sebagaimana ditunjukkan oleh lintasan aliran pada Gambar 5.10. Keefektifan lobang distributor pada pelat penghalang dalam pendistribusian bahan bakar dan udara dapat dicapai dimana lobang-lobang dekat semburan bahan bakar teraliri oleh bahan bakar, Gambar 5.11. Pembakaran pada ruang dekat burner terjadi lebih intensif dengan api yang simetris, Gambar 5.13.

	0.2741 (4,1 %)		
	0.0369		
2.5974 (39,0 %)	0.1397 (2,10 %)	0.1351 (2,00 %)	2.6180 (39,4 %)
	0.0371		
	0.1365 (2,00 %)	0.1322 (1,98 %)	
	0.2769 (4,2 %)		

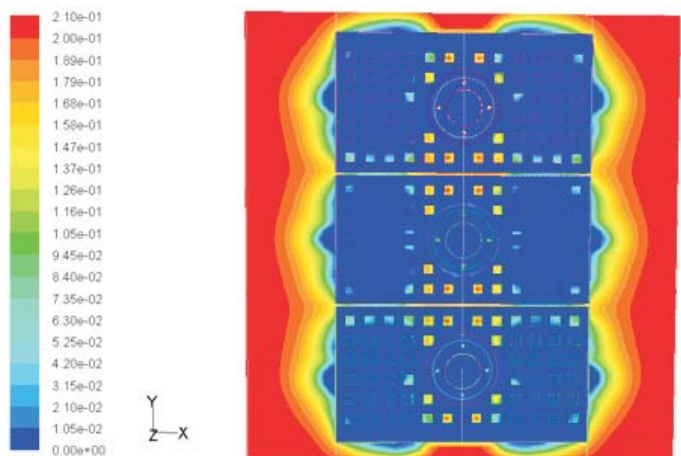
Gambar 5.9 Distribusi laju massa (kg/s) gas total pada segmen penampang mulut burner untuk burner termofikasi untuk pelat penghalang



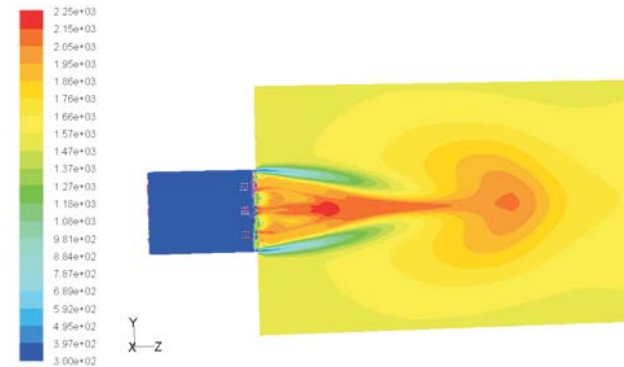
Gambar 5.10 Lintasan aliran dari sumber pipa gas tengah untuk burner termofikasi pelat penghalang dimana besaran lagenda menunjukkan besarnya kecepatan dalam m/s



Gambar 5.11 Distribusi metana pada mulut burner untuk burner termofikasi lobang distributor pipa gas, pelat penghalang dan sudut sebar ruang burner dimana besaran lagenda dalam menunjukkan fraksi mol metan.



Gambar 5.12 Distribusi oksigen pada mulut burner untuk burner termofikasilobang distributor pipa gas, pelat penghalang dan sudut sebar ruang burner dimana besaran lagenda dalam menunjukkan fraksi mol oksigen



Gambar 5.13 Distribusi temperatur gas pada bidang vertikal tengah untuk burner termofikasi lobang distributor pipa gas, pelat penghalang dan sudut sebar ruang burner dimanabesaran lagenda dalam menunjukkan temperatur gas dalam K

Kajian kinerja burner *existing* telah dilakukan dengan menggunakan metode simulasi CFD. Hasil simulasi menunjukkan bahwa racangan burner *existing* kurang memberikan pencampuran udara dan bahan bakar yang intensif dan tidak memberikan pencampuran yang seimbang.

Modifikasi rancangan burner dirumuskan dengan penggunaan metode simulasi CFD. Optimasi rancangan dilakukan dengan beberapa alternatif. Hasil akhir yang memberikan kinerja sebagai solusi permasalahan adalah modifikasi sudut sebar ruang burner menjadi 30° , penambahan lobang distributor pada pipa gas yang menjadi 9 buah lobang pada sisi kiri dan 9 buah pada sisi kanan dan perubahan pelat penghalang yang simetris dengan lobang-lobang yang lebih besar.

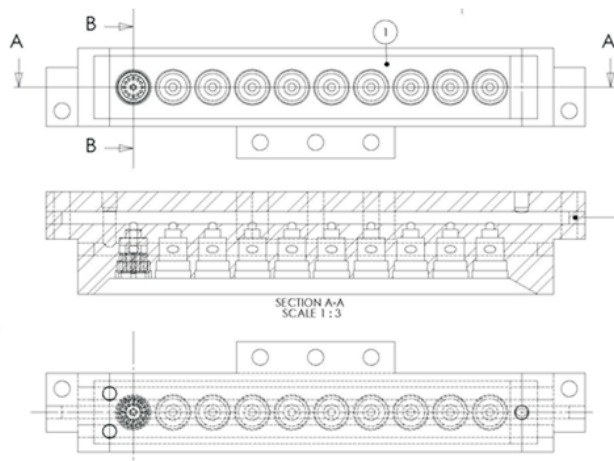
5.2 Perancangan *Rapid Fired Edge Heater*

Rapid Fire Edge Heater (RFEH) ditujukan untuk pemanasan pinggir

slab baja pada operasi produksinya oleh pabrik pabrik baja PT. ZZZ. Kajian ini dilakukan secara komprehensif yang dilaporkan laporan teknis dari Bindar dan Irawan [70].

Hasil kajian dan analisa permasalahan operasi Reheating [70], parameter rancangan RPEH ditentukan berdasarkan kebutuhannya. Energi yang dibutuhkan untuk memanaskan sisi-sisi dari *transfer bar* adalah 700 kW untuk kedua sisi *slab* baja sebagai sisi OS dan sisi DS. Sistem burner yang digunakan adalah burner dengan api difusi (*non-premixed burner*). Laju massa gas alam sebagai bahan bakar diperlukan sebesar 75 kg/jam. Laju udara pembakaran dibutuhkan sebesar 1250 kg/jam.

Satu *block* burner dirancang untuk memiliki 10 *nozles*, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.14. Satu sisi panel memiliki satu *block* burner. Untuk tiga buah panel, sistem burner dirancang untuk memiliki tiga *block*

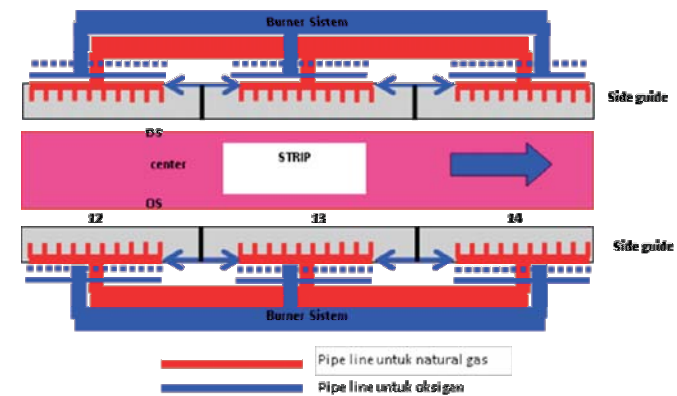


Gambar 5.14 Rancangan satu *block* burner RFEH yang memiliki *multi-nozle* dan *multi-hole*

burner pada sisi OS dan tiga block burner pada sisi DS. Rancangan sistem ini termasuk pendistribusian udara dan bahan bakar digambarkan pada Gambar 5.15.

Api yang dihasilkan oleh burner dihalangi oleh penampang sisi *strip* atau *slab*. Api ini pada dasarnya akan menabrak permukaan *strip* atau *slab*. Peristiwa ini akan meningkatkan laju perpindahan panas konveksi.

Bentuk api yang dihasilkan oleh burner dan interaksinya diperoleh secara simulasi. Metode simulasi yang digunakan disini adalah metode simulasi CFD. Berhubung tujuan simulasi hanya sebagai penentuan bentuk api, maka simulasi CFD dapat dibuat hanya untuk satu nosel saja



Gambar 5.15 Rangkaian sistem burner *multi-block* mengisi panel 12, 13 dan 14

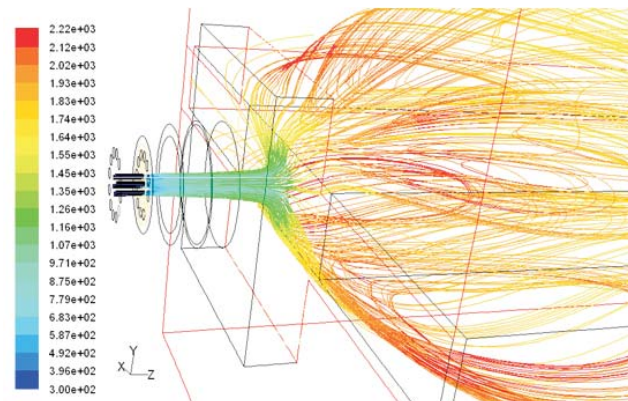
Persamaan model CFD yang terlibat adalah persamaan konservasi massa, persamaan momentum aliran turbulen, persamaan kuantitas turbulen model $k-\epsilon$. Persamaan model pembakaran adalah model pembakaran reaksi cepat dengan fraksi campuran. Perpindahan panas

yang terlibat adalah perpindahan panas radiasi. Persamaan-persamaan ini disajikan pada Tabel 5.1.

Kondisi-kondisi batas ditetapkan sesuai dengan kondisi lapangan. Kondisi batasnya hampir sama dengan penetapan kondisi batas pada simulasi CFD burner di atas.

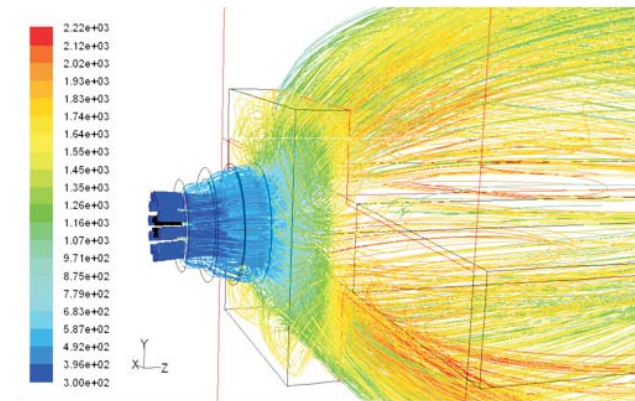
Bentuk api yang dihasilkan oleh burner hasil rancangan ditunjukkan oleh Gambar 5.16. Gas alam yang disemprotkan dari lubang pasokannya menghasilkan api yang menabrak *strip* atau *slab*. Sebagian gas didistribusikan ke permukaan atas dan sebagian lagi ke permukaan bawahnya. Pola api kelihatan lebih jelas lagi seperti pada Gambar 5.17. Udara yang disemburkan dari lubang-lubang pasokannya membentuk api yang menabrak *strip* atau *slab*.

Pola aliran di dalam ruang nosel ditunjukkan oleh Gambar 5.18. Lagenda pada gambar menunjukkan besarnya fraksi mol gas metana.

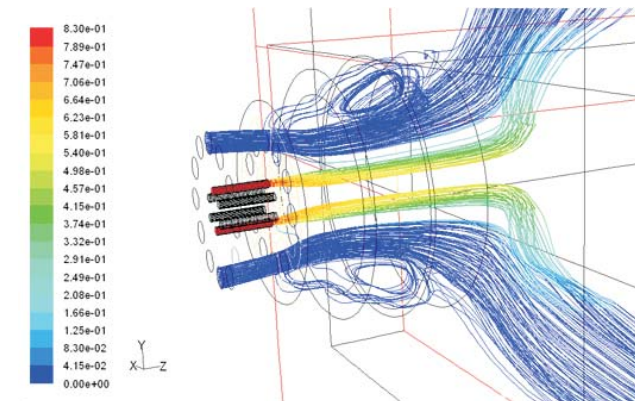


Gambar 5.16 Semprotan gas alam dari lubang pasokan menghasilkan api yang menabrak strip atau slab dengan warna menunjukkan tingkat temperatur dalam K.

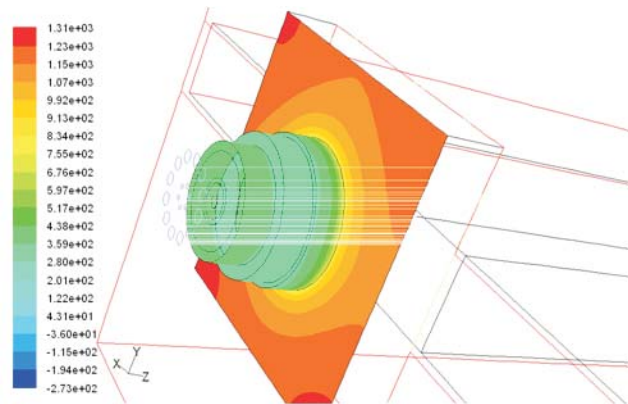
Hasil ini memberikan informasi bahwa aliran balik terjadi dekat mulut nosel. Dinding mulut nosel akan menjadi lebih panas. Distribusi temperatur pada dinding dalam ruang nosel diberikan pada Gambar 5.19.



Gambar 5.17 Semprotan udara dari lubang pasokan menghasilkan api yang menabrak strip atau slab dengan warna menunjukkan tingkat temperatur dalam K



Gambar 5.18 Pola aliran yang terjadi dalam ruang nosel yang menciptakan aliran balik pada ruang ujungnya dimana lagenda menunjukkan fraksi mol gas metana.



Gambar 5.19 Distribusi temperatur pada dinding dalam ruang nosel burner dimana legenda menunjukkan besar temperatur dinding dalam K

5.3 Analisa dan Modifikasi Burner Minyak Kiln Pengering

Konsumsi bahan bakar dalam *kiln* pengering di pabrik PT. UYX pada kondisi operasi dinyatakan terlalu tinggi dari yang seharusnya. Usaha penurunan konsumsi ini menjadi perhatian penting oleh PT. UYX. Maka dari itu, kajian yang komprehensif tentang kinerja *kiln* pengering ini sangat diperlukan.

Konsumsi spesifik bahan bakar minyak pada operasi *kiln* ini adalah 27,7 – 29,5 kg bahan bakar untuk satu ton umpan kering. Angka ini cukup besar apabila dibandingkan dengan capaian operasi sebelumnya yang berkisar 13,5 – 17 kg/ton umpan kering.

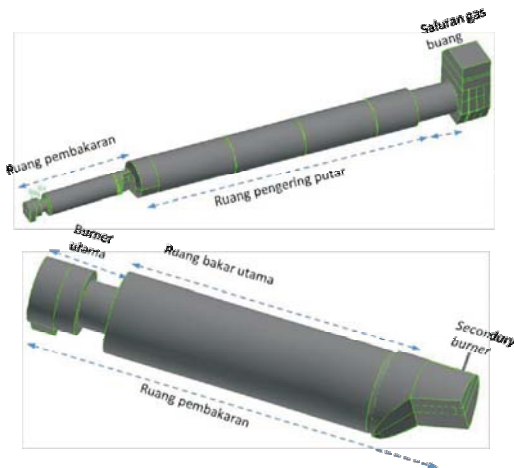
Ada beberapa arahan perbaikan kinerja *kiln* pengering ini. *Kiln* pengering harus dioperasikan pada tingkat udaran pengencer yang optimal dimana nilai optimal udara pengencer dapat ditentukan secara

operasi dan pemodelan. Kinerja *secondary burner* dioptimalkan dari sisi kinerja atomisasinya dengan peningkatan kontribusi *uap* sebagai media pengkabutan melalui perbaikan rancangannya. Beban pembakaran bahan bakar minyak dimaksimalkan pada burner utama dimana laju bahan bakar minyak ditetapkan lebih besar dari laju bahan bakar minyak pada *secondary burner*. Temperatur gas buang ddioperasikan pada temperatur yang serendah mungkin dengan fluktuasinya serendah mungkin. Analisa CFD untuk penentuan kinerja *kiln* pengering dilakukan untuk perumusan keputusan yang didukung oleh informasi yang komprehensif dan bersifat kuantitatif.

Permasalahan ini diselesaikan dengan penggunaan teknik CFD untuk perbaikan kinerja burner utama dan *secondary burner*. Analisa CFD diharapkan dapat memberikan informasi akan penentuan tingkat dilusi udara yang optimal, perbandingan beban antara burner utama dan *secondary burner*, efektifitas kinerja burner utama dan evaluasi kinerja *secondary burner* dalam usaha-usaha perbaikannya. Secara rinci, penyelesaian permasalahan ini sudah dikaji dan dilaporkan pada laporan teknis Bindar [71].

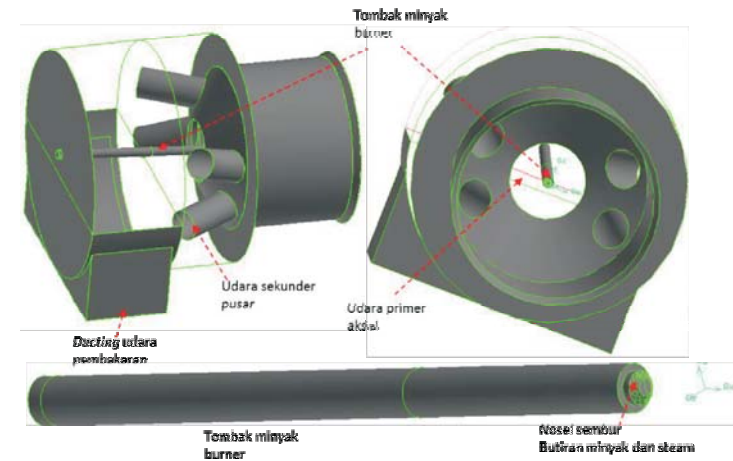
Permasalahan yang dinyatakan di atas terkait dengan pembangkitan gas panas oleh pembakaran bahan bakar minyak dalam ruang bakar *kiln* pengering. *Kiln* pengering memiliki dua ruang utama berbentuk selinder horizontal. Ruang pertama adalah ruang bakar yang statis dan ruang kedua adalah ruang kontak yang berputar untuk pengontan gas panas dengan umpan basah. Ruang bakar memiliki ukuran diameter dalam 3,1 m, diameter luar 3,9 m dan panjang 13,5 m. Ruang selinder pengering

umpan berukuran diameter dalam 5,5 m dan panjang 43 m. Geometri *kiln* pengering keseluruhan ditunjukkan oleh Gambar 5.20. Kecepatan putar selinder pengering ini adalah 2 rpm.



Gambar 5.20 Kiln pengering dengan ruang pembakaran (burner utama, ruang bakar utama, dan *secondary burner*), ruang pengering putar sebagai ruang kontak bahan dengan gas panas dan saluran gas buang.

Burner utama terdiri dari tombak minyak, distributor pusar udara sekunder, distributor aksial udara primer dan saluran udara pembakaran. Tombak minyak burner merupakan sebuah pipa annular dimana pipa tengah untuk pemasok minyak bakar dan pipa annularnya tempat pemasokan uap pengkabut. Nosel sembur pada tombak minyak adalah tempat penyemburan minyak oleh uap dalam bentuk butiran kabut. Geometri detail burner utama diberikan pada Gambar 5.21.



Gambar 5.21 Geometri detail burner utama kiln pengering

Persamaan model aliran turbulen yang melibatkan reaksi pembakaran bahan bakar minyak menggunakan persamaan momentum turbulen dan model turbulen. Persamaan model kuantitas turbulen yang digunakan adalah persamaan model turbulen $k-\epsilon$. Persamaan-persamaan di atas disarikan pada Tabel 5 1.

Reaksi pembakaran bahan bakar cair hanya terjadi bila bahan bakar cair sudah berubah menjadi fasa uap. Fasa uap bahan bakar ini bereaksi dengan oksigen secara cepat. Reaksi pembakaran cepat uap bahan bakar dalam aliran turbulen ini dimodelkan dengan model pembakaran tak-campur awal (*non-premixed combustion*). Persamaan model pembakaran tak-campur awal yang digunakan seperti yang disarikan pada Tabel 5 1. Besaran-besaran $\bar{f}$, $\bar{f}^2$, $\bar{H}$, $\bar{T}$, dan $\overline{\omega_A}$ merupakan solusi yang diberikan dari penyelesaian persamaan pada Tabel 5 1.

Bahan bakar cair keluar dari nosel burner bersama uap dalam bentuk butiran-butiran halus yang berupa fasa cair. Butiran bahan bakar cair yang tersembur dalam rentang ukuran diameter minimum $d_{p,min}$ sampai diameter maksimum $d_{p,mak}$. Butiran dikelompokkan dalam diameter yang sama. Misalnya, butiran yang disebarkan dari nosel burner memiliki 10 kelompok diameter antara $d_{p,min}$ dan $d_{p,mak}$. Diameter rata-rata butiran dinyatakan sebagai $d_{p,avg}$. Fraksi massa butiran dengan diameter lebih besar dari d_p diberikan sebagai w_p . Hubungan fraksi massa butiran w_p dengan diameter butiran d_p dinyatakan oleh persamaan distribusi Rossin-Rammler berikut

$$w_p = e^{-\left(\frac{d_p}{d_{p,avg}}\right)^{n_s}} \quad (5.1)$$

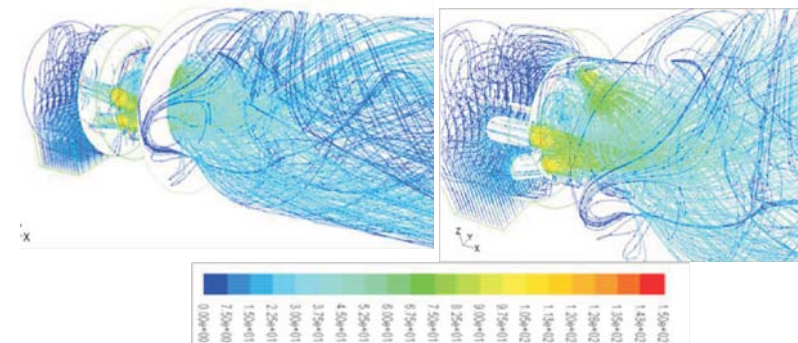
Parameter sebaran n_s ditentukan dari pengukuran dari persamaan berikut

$$n_s = \frac{\ln(-\ln w_p)}{\ln\left(\frac{d_p}{d_{p,avg}}\right)} \quad (5.2)$$

Persamaan momentum untuk setiap kelompok diameter butiran diberikan oleh Pers. (3.1), Pers. (3.3) dan Pers. (3.5). Persamaan untuk setiap kelompok diameter butiran diselesaikan secara komputasi dengan medan kecepatan fluida kontinu yang diketahui. Gaya interaksi antara butiran dan fluida adalah gaya seret pada permukaan butiran dengan fluida yang memiliki kecepatan yang berbeda dengan kecepatan butiran. Gaya ini dikenal dengan gaya seret atau *drag* yang langsung dievaluasi dalam besaran waktu *drag* pada Pers. (3.7), Pers. (3.9) dan Pers. (3.11). Koefisien *drag* C_d dievaluasi dari Pers. (3.13).

Penyelesaian persamaan momentum butiran yang berinteraksi dengan fluida menggunakan metode komputasi Lagrangian partikel. Penyelesaian ini menghasilkan medan kecepatan butiran untuk setiap kelompok diameter berupa besaran $\bar{u}_{px}$, $\bar{u}_{py}$ dan $\bar{u}_{pz}$.

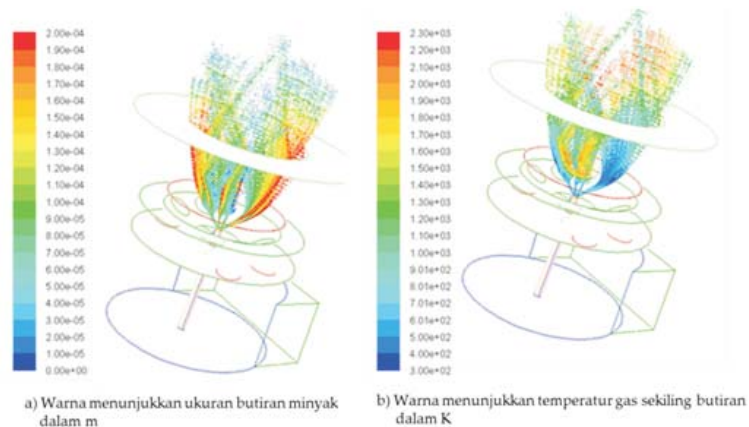
Udara yang dipasok melewati empat saluran yang berpusar memberikan hasil aliran pusar di depan mulut nosel burner dan dalam ruang bakar. Karakter udara berpusar ini ditunjukkan oleh hasil simulasi CFD pada Gambar 5.22. Ini menandakan bahwa pencampuran udara dan uap bahan bakar HSFO terjadi secara intensif sehingga pembakaran dapat berlangsung secara cepat dan sempurna di ruang bakar burner utama. Disamping aliran pusar, jumlah udara yang dipasok jauh lebih besar dari jumlah udara teoritisnya.



Gambar 5.22 Lintasan aliran udara pembakaran yang membentuk aliran pusar dalam ruang bakar kiln pengering dimana lagenda menunjukkan besarnya kecepatan.

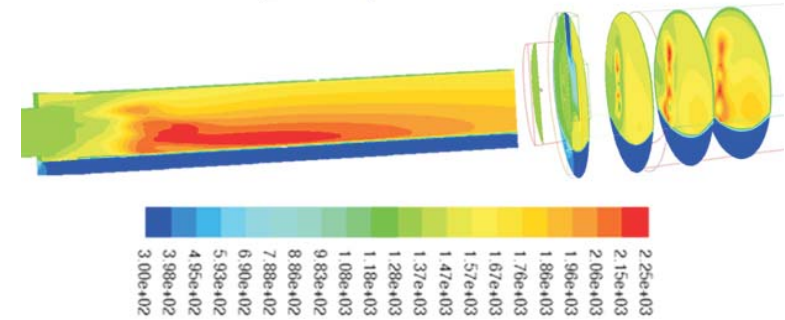
Lintasan semprotan butiran minyak keluar nosel dihasilkan dari simulasi CFD. Bentuk lintasan butiran minyak yang menyembur dari

nosel ditunjukkan oleh Gambar 5.23. Nosel burner utama memiliki 12 lobang. Ukuran dan butiran minyak keluar dari lobang berdiameter rata-rata 130 μm , diameter maksimum 200 μm dan minimum 70 μm . Butiran minyak menguap pada jarak yang relatif pendek dari posisi semprotanya. Ini dapat dikatakan pencampuran antara udara dan uap minyak berlangsung secara intensif.



Gambar 5.23 Lintasan semburan minyak HSFO dari nosel burner utama dari semua lobang dimana a) warna menunjukkan ukuran butiran minyak dalam satuan m dan b) warna menunjukkan temperatur gas sekeliling butiran

Pembakaran bahan bakar HSFO dari *secondary burner* seharusnya terjadi pada daerah dekat mulut pengering atau daerah pengumpanan umpan. Kinerja faktual menunjukkan bahwa pembakaran terjadi terlambat atau menjauh dari daerah dimana umpan diumpankan. Ini berakibat pada intensitas perpindahan panas yang kurang pada daerah dimana ore masih sangat basah.

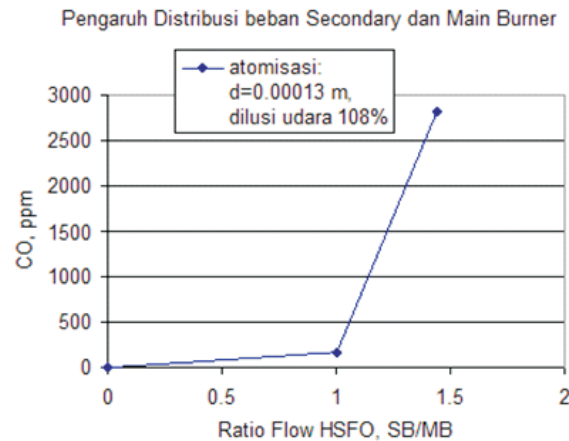


Gambar 5.24 Kontur temperatur gas pada bidang 0.5 m dari tengah pengering secara vertikal dan beberapa penampang melintang dimana legenda menunjukkan tingkat temperatur dalam K.

Kajian CFD juga dilakukan untuk penentuan pengaruh ketiga faktor di atas dengan cara pemvariasian tingkat dilusi udara, ukuran butiran minyak yang dihasilkan oleh *secondary burner* dan distribusi pembebanan antara *secondary burner* dan *secondary burner*. Sasaran kinerja adalah tidak adanya kandungan gas CO dalam gas buang. Hasil kajian CFD untuk pengaruh faktor-faktor tersebut di atas ditunjukkan pada Gambar 5.25.

Berdasarkan informasi kuantitatif yang dihasilkan dari simulasi CFD, beberapa kesimpulan dan rekomendasi dihasilkan. Pembakaran yang terjadi pada burner utama lebih intensif dibanding dengan pembakaran yang dihasilkan oleh *secondary burner* sehingga peningkatan kinerja *secondary burner* akan memberikan peningkatan kinerja kiln pengering yang berarti. Burner utama lebih mampu menanggung beban laju alir minyak yang lebih besar dibanding *secondary burner* sehingga sebaiknya perbandingan beban laju alir minyak *secondary burner* dan burner utama ,

SB/MB, bernilai di bawah satu. Modifikasi pada burner utama juga diarahkan untuk mendapatkan butiran minyak yang halus dan peningkatan beban pembakaran bahan bakar minyak yang lebih besar.



Gambar 5.25 Pengaruh rasio laju alir minyak pada *Secondary Burner* (SB) dan Burner Utama (MB) terhadap kandungan gas CO dalam gas buang yang diperoleh dari simulasi CFD *kiln* pengering

5.4 Investigasi Efek Ruang dan Kondisi Operasi Produksi Susu Kambing Bubuk dalam Pengering Sembur

Susu kambing mudah mengalami kerusakan yang disebabkan oleh cemaran mikroba. Ini bisa menimbulkan penyakit terbawa-pangan (*food-borne disease*). Maka dari itu, pengawetan dan peningkatan efisiensi dan efektivitas penyimpanan susu kambing harus dilakukan. Salah satu caranya adalah pengubahan susu cair ke susu bubuk. Proses ini umumnya dilakukan dalam sistem pemroses pengering sembur (*spray drier*).

Pemrosesan susu cair ke susu bubuk dalam pengering sembur dilakukan hanya untuk penyingkiran kandungan air tanpa perubahan komponen-komponen pembentuknya yang lain seperti lemak, protein, vitamin dan mineral.

Pengeringan sembur untuk produksi susu bubuk dilakukan dengan cara penyemprotan cairan susu dalam bentuk butiran halus ke dalam ruang pengering. Udara panas secara bersamaan dengan aliran yang umumnya searah dengan semburan butiran susu cair dialirkan ke dalam ruang pengering sembur. Udara panas bertemu dan berkontak dengan butiran halus susu cair. Pertemuan dan kontak ini mengakibatkan penguapan air dalam susu cair yang diikuti oleh perpindahan uap air dari butiran susu cair ke udara pengering. Pengurangan kandungan air dalam butiran susu ke tingkat kandungan air sampai di bawah 10% dalam butiran susu.

Dinamika aliran udara pengering dan dinamika aliran butiran susu berbentuk cair dalam ruang pengering sembur menjadi fenomena yang menentukan kinerja pengering sembur ini. Dinamika ini digambarkan dalam bentuk pola aliran udara pengering dan lintasan pergerakan butiran susu dengan perubahan fasanya dari fasa cair ke fasa padat. Pola aliran dan lintasan partikel butiran susu dalam ruang pengering tergolong rumit dan kompleks. Pola aliran udara pengering, lintasan butiran susu, distribusi konsentrasi uap air dalam udara pengering dan distribusi temperatur sangat diperlukan untuk diketahui secara lengkap. Penentuan kinerja ini secara pengukuran fisik memerlukan waktu yang lama dan biaya yang besar. Pengukuran fisik ini memiliki keterbatasan pada banyak

hal. Maka dari itu dengan perkembangan teknologi komputasi yang pesat saat ini, teknologi CFD menjadikan pengembangan teknologi pengering sembur dapat dilakukan secara komprehensif dan inovatif.

Kondisi operasi dan rancangan ruang pengering mempengaruhi performa pengering sembur. Performa itu dapat dilihat dari parameter produk akhir seperti kadar air dan temperatur produk dan temperatur medium pengering. Pencapaian performa dengan berbagai kondisi operasi dan bentuk ruang pengering perlu dikaji secara komprehensif. Untuk pencapaian tujuan ini, teknologi CFD digunakan untuk analisa performa pengering sembur untuk produksi susu kambing bubuk. Kajian ini memberikan informasi rancangan yang komprehensif dalam mengkonstruksi pengering sembur type *cylinder-on-cone* dengan *atomizer* jenis *rotary atomizer* untuk produksi susu kambing bubuk. Secara lengkap, kajian ini dilaporkan dalam tesisnya Alwan [72].

Persamaan model yang diselesaikan dalam simulasi CFD untuk pengering sembur melibatkan persamaan konservasi massa, persamaan konservasi momentum turbulen udara dan uap air, persamaan konservasi kuantitas turbulen, persamaan konservasi komponen uap air, permasalahan konservasi energi termal, persamaan lintasan partikel butiran dalam aliran udara pengering dan persamaan perpindahan yang antara partikel dengan udara pengering. Pendekatan yang dilakukan pada model ini adalah dengan metode Eulerian - Lagrangian untuk memodelkan neraca massa, energi dan momentum antara fasa udara dan fasa partikel butiran cairan di dalam ruang pengering sembur.

Simulasi CFD ini melibatkan solusi penyelesaian numerik untuk

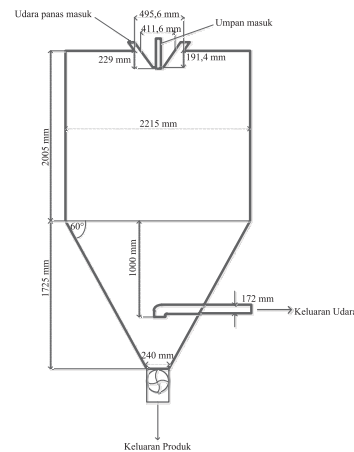
mendiskretisasi semua persamaan-persamaan konservasi di atas. Persamaan-persamaan model untuk simulasi CFD pengering sembur ini diberikan secara khusus pada Bagian 3.2.

Investigasi CFD proses pengeringan susu kambing menggunakan alat pengering sembur dilakukan untuk berbagai besaran perancangan. Untuk mendapatkan rancangan pengering sembur yang memiliki kinerja baik, beberapa pengujian terhadap penyelesaian numerik dan geometri ruang pengering harus dilaksanakan. Kinerja pengering sembur ini diindikasikan oleh besaran temperatur, kecepatan, konsentrasi dan lintasan butiran. Ruang pengering sembur Kieviet[73] digunakan sebagai dasar perancangan ruang pengering sembur susu kambing.

Besaran yang digunakan dalam investigasi CFD adalah besaran ukuran dan perancangan sudut semburan (φ_{CA}). Kajian sensitifitas terhadap ukuran grid dilakukan terlebih dahulu. Kinerja model turbulen seperti model turbulen RNG- $k-\epsilon$ (φ_{GT}) juga dikaji. Diameter ruang pengering merupakan besaran rancangan. Diameter yang digunakan adalah 1,4 m; 1,6 m; 2,0 m; dan 2,2 m. Sudut Semburan yang digunakan adalah sudut 20°, 60°, 76° dan 100°. Besaran *grid* yang digunakan adalah ukuran serta bentuk *grid*. Ukuran *grid* yang digunakan adalah 5 mm dan 4 mm. Bentuk *grid* yang digunakan adalah bentuk segitiga (*trilateral*) dan bentuk segiempat (*quadrilateral*).

Geometri pengering sembur yang disimulasi adalah pengering sembur tipe *cylinder-on-cone* dan aliran searah (*co-current*). *Atomizer* yang digunakan tipe *rotary atomizer*. Dimensi ruang pengering ini adalah ruang pengering dari data percobaan Kieviet [73]. Posisi *atomizer* dan inlet udara

pengering berada diatas ruang. Udara keluar melalui saluran yang terletak di tengah bidang *cone* ruang pengering. Partikel bubuk keluar melalui area keluaran partikel di ujung *cone*. Gambar 5.26 menampilkan geometri pengering sembur ini.

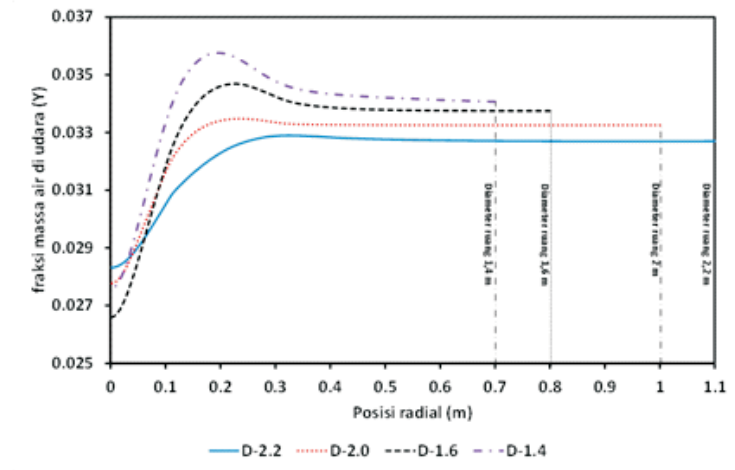


Gambar 5.26 Geometri ruang pengering sembur dengan *atomizer* jenis *rotary atomizer*, [73]

Proses produksi susu kambing bubuk dalam pengering sembur dibatasi oleh kelembaban relatif udara pengering. Kelembaban relatif merupakan fungsi dari tekanan parsial air dan temperatur udara. Volume ruang yang semakin kecil menurunkan jumlah udara di ruang pengering. Ini berakibat pada naiknya fraksi massa air (Y) dalam ruang pengering.

Gambar 5.27 dan Gambar 5.28 menampilkan kurva profil fraksi massa air sepanjang radius pada ketinggian 2 m dan 1 m. Fraksi air di udara meningkat tajam pada posisi radial dari pusat ke pinggir dinding

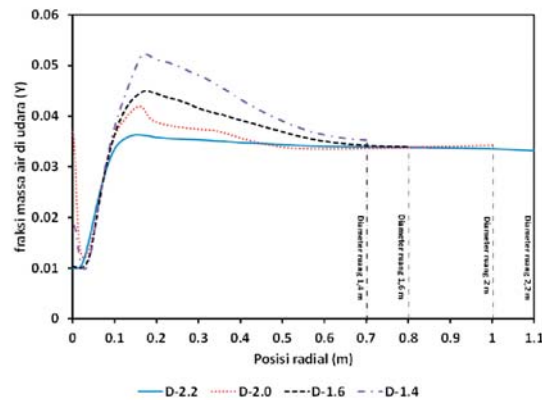
pengering sembur. Kondisi ini disebabkan oleh aliran balik udara yang bertemu dengan aliran utamanya. Fraksi massa air di udara menurun dengan berubahnya posisi aksial. Semakin jauh dari *atomizer*, air yang tersisa di dalam partikel semakin berkurang. Kandungan air di udara pada area keluaran adalah sekitar 0,037 kg air/kg udara.



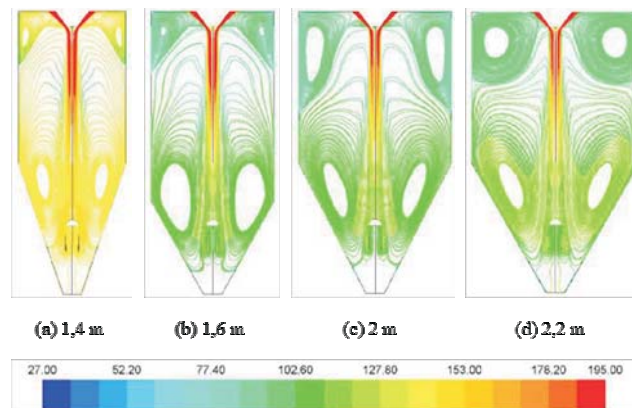
Gambar 5.27 Profil fraksi massa air di udara (Y) sepanjang radius untuk berbagai diameter ruang pada posisi 2 m arah aksial.

Volume ruang yang semakin kecil memberikan arti bahwa volum gas di ruang tersebut juga semakin kecil. Laju energi termal yang masuk sebesar 54 kW pada kondisi volume ruang kecil, temperatur udara di dalam ruang akan semakin tinggi. Ini ditunjukkan oleh gambar lintasan aliran gas dalam ruang pengering yang melalui posisi-posisi yang memiliki temperatur seperti yang diindikasikan oleh warna pada Gambar 5.29. Temperatur udara yang tinggi di dalam ruang pengering

menyebabkan temperatur udara keluar juga tinggi. Hal ini dapat dihubungkan dengan efisiensi termal yang dihasilkan.

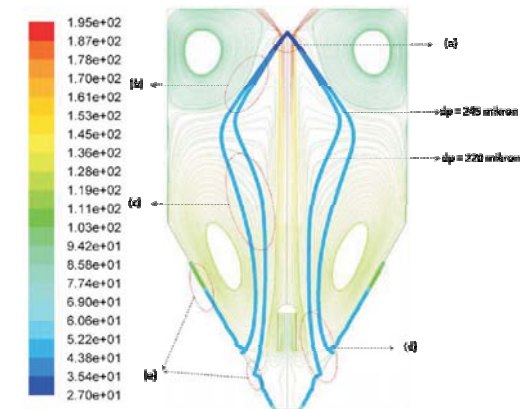


Gambar 5.28. Profil fraksi massa air di udara (Y) sepanjang radius untuk berbagai diameter ruang pada posisi 1 m arah aksial.



Gambar 5.29 Lintasan aliran gas dalam ruang pengering sembur yang melalui posisi-posisi dengan temperatur seperti yang dindikasikan oleh warna dalam °C.

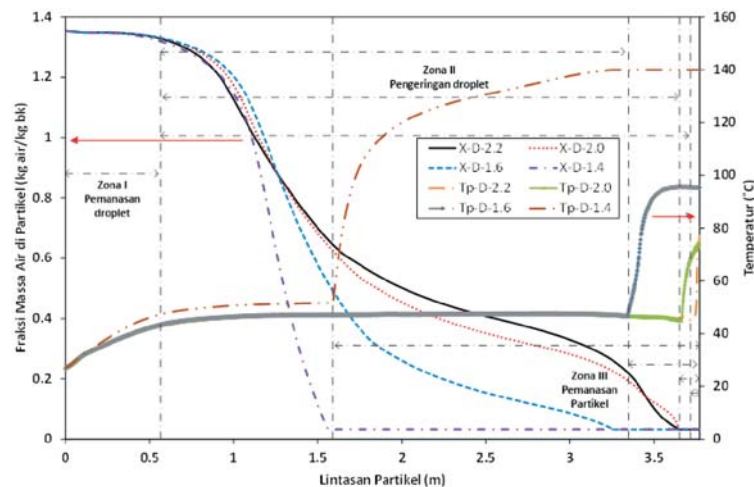
Ketika butiran atau partikel bubuk susu terbawa oleh aliran sirkulasi ini, maka waktu tinggal butiran atau partikel akan lebih lama. Aliran balik memberikan proses transfer massa dan panas yang lebih baik. Tetapi waktu tinggal yang terlalu lama dapat menyebabkan kerusakan pada produk susu yang dihasilkan. Gambar 5.30 menampilkan lintasan yang dilalui oleh setiap partikel dalam lintasan aliran udara. Lintasan ini dipengaruhi oleh pola aliran udara sebagai medium pengering. Area sirkulasi balik yang diciptakan oleh udara akan membawa sebagian partikel.



Gambar 5.30 Lintasan butiran susu (garis tebal biru) dalam lintasan aliran gas dalam ruang pengering sembur yang melalui posisi-posisi dengan temperatur seperti yang dindikasikan oleh warna dalam °C untuk diameter ruang pengering 2,2 m.

Gambar 5.31 menggambarkan proses pengeringan butiran pada berbagai ukuran. Kurva laju pengeringan ini menggambarkan hubungan kandungan air dalam butiran dalam kg air per kg padatan bubuk (X)

dengan jarak lintasan yang ditempuh butiran. Besarnya kandungan air dalam butiran ditunjuk oleh sumbu ordinat sebelah kiri pada kurva di Gambar 5.31. Kurva kedua proses pengeringan ini menggambarkan hubungan temperatur butiran T_p dengan jarak posisi lintasan yang ditempuh. Besarnya temperatur butiran ini dinyatakan pada sumbu ordinat sebelah kanan pada kurva di Gambar 5.31.



Gambar 5.31. Kurva laju pengeringan butiran dan temperatur akhir partikel pada diameter ruang 2,2 m; 2 m; 1,6 m; dan 1,4 m sepanjang lintasan yang dilalui untuk diameter butir tersebut 220 μm .

6. PENYEMPITAN CELAH KINERJA SISTEM PEMROSES RANCANGAN DAN OPERASI

6.1 Celah Kinerja Sistem Pemroses

Pabrik kimia terdiri dari banyak sistem pemroses. Seluruh kinerja

pabrik dihasilkan oleh kinerja masing-masing unit dengan adanya faktor saling tergantung antara sistem pemroses yang berhubungan. Untuk hal seperti ini, analisis celah kinerja $\Delta\Phi_{OD}$ antara operasi dan disainnya menjadi lebih kompleks. Celah kinerja untuk sebuah sistem pemroses unit dinyatakan sebagai kan oleh $\Delta\Phi_{OD,i}$. Ketergantungan celah kinerja untuk keseluruhan pabrik $\Delta\Phi_{OD,L}$ dengan yang memiliki N jumlah sistem pemroses kepada kinerja masing-masing sistem pemroses unit dapat dinyatakan secara umum dalam bentuk fungsi

$$\Delta\Phi_{OD,L} = f(\Delta\Phi_{OD,1}, \Delta\Phi_{OD,2}, \Delta\Phi_{OD,3}, \dots, \Delta\Phi_{OD,N}) \quad (6.1)$$

Kinerja yang dirancang untuk sebuah sistem pemroses dinyatakan oleh Φ_{Di} . Kinerja operasinya diperoleh sebagai Φ_{Oi} . Celah kinerja sebuah sistem pemroses unit didefinisikan sebagai

$$\Delta\Phi_{OD,i} = \Phi_{Oi} - \Phi_{Di} \quad (6.2)$$

Besarnya celah Φ_{Di} menjadi sasaran untuk diketahui. Dengan mengetahui besarnya celah ini, pengembangan teknologi sistem pemroses dapat terus dilanjutkan sampai ke tahap komersial. Spesifikasi sistem pemroses menjadi spesifikasi yang sudah dalam kondisi terjamin pencapaiannya tanpa keraguan.

Besarnya nilai celah ini dapat bermula dengan nilai besar untuk menuju nilai kecil selama pengembangan teknologinya. Ada sembilan tahapan dalam proses pengembangan teknologi sistem pemroses secara terstruktur. Tahapan-tahapan terstruktur pengembangan teknologi sistem pemroses bermula dari tahap perumusan ide produk atau teknologi sampai tahap pengembangan produk dan teknologi yang siap

dikomersialkan. Urutan tahap-tahap keseluruhannya adalah sebagai susunan berikut:

- Tahap 1 : Perumusan ide produk atau teknologi,
- Tahap 2 : Riset dasar tentang ide yang sudah dirumuskan skala laboratorium,
- Tahap 3 : Riset awal aplikasi dari riset dasar skala bangku,
- Tahap 4 : Riset produksi skala pilot,
- Tahap 5 : Riset sistem teknologi produksi skala persiapan semi-komersial,
- Tahap 6 : Riset sistem teknologi produksi skala semi-komersial,
- Tahap 7 : Pengembangan sistem teknologi produksi mendekati kondisi komersial,
- Tahap 8 : Pengembangan sistem teknologi produksi untuk uji komersial dan
- Tahap 9 : Pengembangan sistem teknologi produksi komersial, pematangan keamanan keandalan operasi, pencapaian kapasitas produksi dan peningkatan efisiensi sistem produksi.

Capaian tahapan-tahapan di atas secara berurut dikuantifikasi dengan Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) atau *Technological Readiness Level* (TRL) seperti yang disampaikan di atas. Tahap 1 sampai dengan tahap 6 digolongkan sebagai kegiatan riset. Tahap 6 sampai dengan Tahap 9 menjadi kegiatan pengembangan. TKT proses dan produk industri dengan tahap-tahap yang diusulkan ini dikuantifikasi secara berurut berdasarkan Gambar 6.1.

Teknologi yang telah terbukti atau matang dapat memasuki tahap komersialisasi sebagai TKT 9. Pada tahap ini, spesifikasi yang dirancang akan tercapai tanpa ada risiko dalam kinerja operasional. Ketika tahap semi komersial masih berkembang dan pengembangan teknologi dipaksa beralih ke tahap komersial maka celahkinerja operasional dan rancangan akan semakin lebar.

Selama waktu pengembangan berlangsung, $\Delta\Phi_{OD,i}$ pada setiap tahap dapat diturunkan nilainya. Durasi waktu t_{TD} pengembangan teknologi sampai ke tahap komersial harus sesingkat mungkin. Biaya pengembangan C_{TD} harus dapat serendah mungkin. Ketiga parameter ini, $\Delta\Phi_{OD,i}$, t_{TD} dan C_{TD} secara hipotesis dapat dikorelasikan dengan tahap-tahap pengembangan teknologi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.2.



Gambar 6.1 Tahapan dan tingkatan pengembangan teknologi sistem pemroses dan produk industri proses komersial

Makin sempit celah kinerja teknologi $\Delta\phi_{OD,i}$, makin pendek waktu pengembangan t_{TD} dan makin rendah biaya pengembangan C_{TD} menjadi fungsi objektif dalam pengembangan teknologi. Celah nyata dapat diperoleh jika skala penuh dari teknologi komersial itu dirancang, dibangun dan dioperasikan. Namun, tahap ini tidak mudah diwujudkan dan kesempatan itu kadang sulit tersedia.

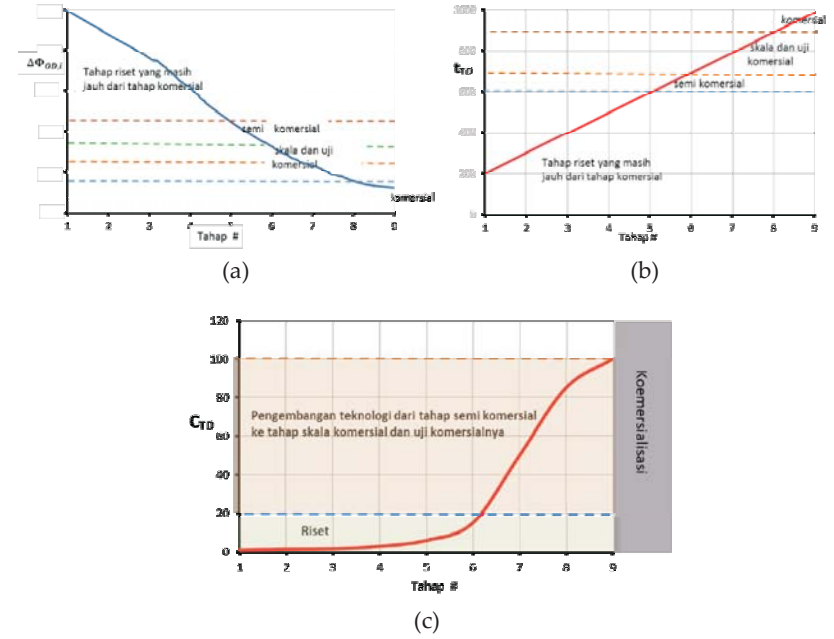
Untuk pencapaian fungsi objektif di atas, celah kinerja desain dan kinerja operasional dapat disempitkan dengan penggunaan metodologi perancangan dengan penggunaan teknologi CFD yang merupakan penyelesaian persamaan model matematika komprehensif yang berasal dari fenomena rinci yang mengatur perilaku sistem pemroses. Perilaku sistem pemroses kemudian diprediksi secara komprehensif di dalam ruang tiga dimensi pada koordinat x , y , z dan waktu operasi t dengan penggunaan teknologi CFD ini.

Kinerja proses suatu sistem pemroses diukur oleh besaran proses temperatur T , fraksi massa komponen kimia ω_j , velocity components, tekanan p , komponen kecepatan $\bar{u}_x$, $\bar{u}_y$ dan $\bar{u}_z$ dan lainnya. Semua besaran ini mematuhi persamaan konservasi yang mengatur fenomena proses. Kinerja proses ini dinyatakan sebagai fungsi dimensi ruang x , y , dan z dan waktu operasi t . Fungsi ini dinyatakan oleh Pers. (1.21) sampai Pers. (1.26). Celah kinerja antara proses yang dioperasikan dan yang dirancang untuk besaran kinerja di atas didefinisikan oleh persamaan

$$\Delta\bar{T}_{OD,i} = \bar{T}_{Oi} - \bar{T}_{Di} \quad (6.3) \quad \Delta\bar{\omega}_{OD,i} = \bar{\omega}_{Oi} - \bar{\omega}_{Di} \quad (6.4)$$

$$\Delta\bar{u}_{xOD,i} = \bar{u}_{xOi} - \bar{u}_{xDi} \quad (6.5) \quad \Delta\bar{u}_{yOD,i} = \bar{u}_{yOi} - \bar{u}_{yDi} \quad (6.6)$$

$$\Delta\bar{u}_{zOD,i} = \bar{u}_{zOi} - \bar{u}_{zDi} \quad (6.7) \quad \Delta\bar{p}_{OD,i} = \bar{p}_{Oi} - \bar{p}_{Di} \quad (6.8)$$



Gambar 6.2 Karakteristik penurunan celah kinerja $\Delta\phi_{OD,i}$, keperluan waktu t_{TD} dan biaya pengembangan teknologi C_{TD} dari tahap ke tahap pengembangan

6.2 Kinerja Sistem pemroses Rancangan dari Simulasi CFD

Metode yang lebih maju untuk memperkirakan kinerja sistem pemroses yang dirancang untuk teknologi yang dikembangkan adalah penggunaan teknologi prediksi CFD yang menyelesaikan persamaan model perpindahan dalam ruang tiga dimensi dengan ketergantungan pada dimensi waktu. Model persamaan matematika ini merumuskan fenomena perpindahan dalam ruang sistem pemroses yang aktual dalam bentuk persamaan model dengan melibatkan bentuk dan ukuran aktual berupa geometri tiga dimensi dari sistem pemroses. Contoh bentuk tiga

dimensi dan ukuran sistem pemroses diberikan pada Gambar 1.1. Model persamaan diselesaikan secara numerik untuk mendapatkan solusi tiga dimensi dalam ruang dan satu dimensi dalam waktu. Metode numerik yang melibatkan digambarkan sebagai metode komputasi lanjutan dengan dukungan komputer komputasi.

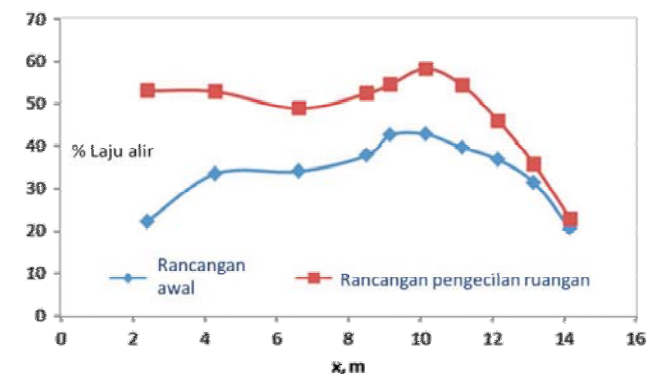
Prosedur perancangan sistem pemroses secara komputasi yang komprehensif mengambil alih prosedur perancangan konvensional. Kinerja sistem pemroses yang dirancang dari teknologi proses yang dikembangkan diprediksi dari penyelesaian persamaan model perpindahan yang mengaturnya secara komprehensif. Siklus prosedur perancangan unit proses dengan metode maju ini ditunjukkan pada Gambar 1.3. Metode komputasi untuk model persamaan fenomena perpindahan tiga dimensi dalam ruang dan satu dimensi dalam waktu dirumuskan dan dituliskan dalam bentuk kode program komputer untuk penyelesaiannya dalam bentuk satu mesin komputasi. Mesin komputasi ini dikenal dengan nama *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Teknologi CFD dapat mencakupi semua parameter kinerja sistem pemroses dan besaran dalam semua persamaan perpindahan dalam simulasi kinerja sistem pemroses dirancang. Berbagai bentuk geometri, dimensi dan skala sepenuhnya diakomodasi oleh teknologi CFD. Geometri, bentuk dan susunan skala aktual dari sistem pemroses disimulasi sebagai pengganti sistem pemroses aktual sebelum sistem pemroses ini dipasang secara sesungguhnya di lokasi. Oleh karena itu, celah yang terjadi antara kinerja operasional dan rancangan, Pers. (6.3) sampai Pers. (6.8), diprediksi dengan baik. Kepercayaan untuk

mendapatkan kinerja sistem pemroses operasional yang mendekati kinerja yang dirancang akan tinggi.

6.3 Prediksi Kinerja Sistem pemroses Untuk Beberapa Kasus

Bagian 5 menampilkan beberapa kasus prediksi dan penyelesaian permasalahan sistem pemroses di industri dengan teknologi CFD. Kasus perubahan ruang tungku api pemanas baja bantalan berjalan diperkirakan kinerja alirannya dengan simulasi CFD[74]. Pola aliran hasil simulasi CFD untuk ruangan yang diperkecil dapat memberikan informasi untuk pencapaian tujuan pengecilan ruangan. Analisa hasil ini memberikan kesimpulan bahwa perubahan geometri ini akan memberikan peningkatan kinerja seperti yang ditarget. Perubahan persentase laju alir massa sepanjang tungku dikuantifikasi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6.3. Ini menandakan bahwa pemanasan baja dari bawah untuk rancangan tungku yang dimodifikasi akan dominan.



Gambar 6.3 Perubahan persentase laju alir massa sepanjang tungku x di bagian bawah untuk desain awal tungku i dan desain yang dimodifikasi dengan pengecilan volume ruang

Prediksi kinerja perubahan desain bejana pengendap pasir dari air yang bercampur minyak dilakukan dengan simulasi CFD [74]. Analisa pengaruh beberapa modifikasi geometri diberikan dari hasil simulasi ini. Pola aliran air dan lintasan gerakan partikel pasir sebagai hasil simulasi CFD memberikan informasi bahwa perubahan geometri secara internal tidak memberikan peningkatan kinerja pengendapan pasir yang berarti.

6.4 Peranan Teknologi Komputasi Multi Dimensi (CFD) pada Penyempitan Celah Kinerja

Celah kinerja sebagai perbedaan antara kinerja operasional dan kinerja yang dirancang digunakan untuk pengkuantifikasian Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) sampai ke teknologi komersial yang terbukti di lapangan. Kinerja pabrik keseluruhan ditentukan oleh kinerja masing-masing sistem pemrosesnya. Siklus pengembangan teknologi melibatkan waktu, biaya dan risiko. Ketiga beban ini dapat diminimalkan dengan menggunakan instrumen pengetahuan dan teknik yang komprehensif pada tahap perancangan.

Teknologi CFD telah terbukti menjadi metode penggalian pengetahuan secara kuantitatif dan teknik yang komprehensif untuk memprediksi kinerja sistem pemroses rancangan. Perancangan sistem pemroses dengan geometri tiga dimensinya dengan berbagai parameter desain sudah dicontohkan untuk mendapatkan semua besaran kinerja seperti temperatur T , kecepatan $\bar{u}_i$, konsentrasi $\bar{w}_j$, tekanan p , kuantitas turbulen dan lainnya. Geometri dan bentuknya dapat dikaji secara kuantitatif dalam hal untuk mendapatkan kondisi optimumnya, Penyempitan celah kinerja dalam pengembangan teknologi sistem

pemroses dengan teknologi CFD ini menjadi lebih menarik, memberikan hasil akurat dan komprehensif, menggunakan waktu lebih pendek dan biaya lebih murah.

7. PENUTUP

Tulisan ini memaparkan semua persamaan-persamaan konservasi dalam sistem pemroses yang melibatkan aliran turbulen dalam ruang tiga dimensi ruang dan satu dimensi waktu untuk sistem pemroses dan energi industri. Tulisan ini juga dinyatakan sebagai sebuah buku kecil yang berjudul **Rekayasa Komputasi Multidimensi Sistem Pemroses dan Energi Industri**. Buku kecil adalah hasil ringkasan dari buku besar dengan judul yang sama dengan judul di atas. Teknik komputasi persamaan-persamaan dalam multidimensi ini dibahas secara rinci untuk bisa digunakan untuk penyelesaian semua permasalahan kompleks dalam sistem pemroses dan energi skala industri. Teknik komputasi ini menjelma namanya menjadi teknologi atau rekayasa karena kemampuannya dalam produksi solusi untuk semua permasalahan pada perkiraan kinerja sistem pemroses. Nama teknik komputasi yang dibahas dalam buku adalah *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Apa-apa permasalahan yang dibahas dalam buku *Transport Phenomena*, teknologi CFD menyelesaikannya tanpa penyederhanaan. Buku ini menampilkan hasil simulasi CFD dalam bentuk gambar-gambar secara komprehensif fenomena yang divisualkan.

Tulisan diharapkan sebagai rujukan atau acuan bagi para insinyur dalam penggunaan teknologi CFD pada tahap perancangan dan evaluasi

kinerja operasional sistem pemroses dan energi di pabrik. Disamping ini, mahasiswa sarjana dan pascasarjana teknik yang memerlukan teknologi CFD dalam penelitiannya dapat mengambil informasi dan inspirasi dalam penggunaan dan peningkatan pemahaman teknologi CFD.

UCAPAN TERIMA KASIH

Keterlibatan penulis dalam bidang rekayasa komputasi multi dimensi sistem pemroses dan energi tidak terlepas dari didikan dan arahan dari Prof. H. A. Becker dan Prof. A. Pollard dari Queen's University Canada sebagai pembimbing program doktor penulis. Penulis mengucapkan terima kasih secara khusus kepada kedua beliau di atas.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada ITB yang telah banyak memberikan kesempatan dalam hal peningkatan kemampuan profesional sebagai dosen, sebagai peneliti dan sebagai kontributor pada masyarakat. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Forum Guru Besar ITB yang memberikan kesempatan untuk menyampaikan isi tulisan ini kepada sivitas akademika ITB dan publik.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua kolega dosen di Teknik Kimia FTI ITB yang telah menjadi bagian kehidupan profesional penulis sampai saat ini dan ke depan. Salah satu dari kolega senior dosen adalah Prof. Herri Susanto yang sudah banyak memberikan arahan dan masukan kepada penulis sebagai dosen di Teknik Kimia ITB ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada bapak dan ibu dosen di Teknik Kimia ITB yang sudah mendahului kami. Ucapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada alm. Prof. Ir. Sudarno MSChE dan alm Ir. Soeparwadi.

Keterpakaian dan aplikasi teknologi CFD untuk kasus-kasus industri di Indonesia dimulai penulis sejak tahun 1996. Keterpakaian ini tidak terlepas dari kesempatan dan kepercayaan dari banyak senior dan kolega di industri. Di antara para senior dan kolega insinyur di industri yang telah memberikan kesempatan adalah Ir. Suardin (alm), Ir. Benny Haryoso MT., Ir. Fazwar Budjang MM., Ir. Nurhudin M.Eng., Ir. Tatang Kusmara, M.Eng., Ir. Mulyono Prawiro, Ir. Nugraha Budi Eka Irianto, Ir. Praherso M.Sc., Ph.D dan yang lainnya. Penulis mengucapkan terima kasih kepada beliau-beliau senior dan kolega di atas. Kasus-kasus yang diselesaikan dengan teknologi yang ditulis di buku ini tidak terlepas dari kepercayaan dan kesempatan yang beliau-beliau berikan.

Penulisan buku ini dapat terwujud tidak terlepas dari dukungan banyak pihak. Dukungan khusus datang dari istri dan anak penulis. Penulis menyampaikan terima kasih kepada istri dan anak tersayang karena mereka tahu bahwa suami dan ayahnya selalu sibuk dengan pekerjaan seperti ini. Mereka selalu lihat garis-garis semberawut ketika penulis sedang membuat geometri dan mesh dalam tahapan pelaksanaan simulasi multi dimensi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wikipedia, "Antoine Lavoisier," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Antoine_Lavoisier. [Accessed 24 August 2015].
- [2] Wikipedia, "Adolf Eugen Fick," 24 August 2015. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Adolf_Eugen_Fick. [Accessed 24

- August 2015].
- [3] Wikipedia, "Fick's laws of diffusion," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Fick's_laws_of_diffusion. [Accessed 24 August 2015].
 - [4] Wikipedia, "Isaac Newton," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton. [Accessed 24 August 2015].
 - [5] Wikipedia, "Claude-Louis Navier," 26 August 2015. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Claude-Louis_Navier. [Accessed 31 August 2015].
 - [6] Wikipedia, "Sir George Stokes," 26 August 2015. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Sir_George_Stokes,_1st_Baronet. [Accessed 31 August 2015].
 - [7] Wikipedia, "Navier–Stokes equations," 28 August 2015. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Navier%E2%80%93Stokes_equations. [Accessed 31 August 2015].
 - [8] Wikipedia, "James Prescott Joule," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/James_Prescott_Joule. [Accessed 24 August 2015].
 - [9] Wikipedia, "Joseph Fourier," 20 August 2015. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Fourier. [Accessed 31 August 2015].
 - [10] CFD Online, "Turbulence modeling," 23 June 2013. [Online]. Available: http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_modeling. [Accessed 31 August 2015].
 - [11] Wikipedia, "Multi-core processor," 25 August 2015. [Online].

- Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-core_processor. [Accessed 31 August 2015].
- [12] Wikipedia, "Supercomputer," 28 August 2015. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercomputer>. [Accessed 31 August 2015].
- [13] Wikipedia, "History of computing hardware," 28 August 2015. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_computing_hardware. [Accessed 31 August 2015].
- [14] Y. Bindar, "Audit Primary Reformer Pupuk Kaltim 1," Departemen Teknik Kimia FTI ITB, Bandung, 2004.
- [15] F. Schmitt, "About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity," vol. 335, no. 9-10, pp. 617-627, 2007.
- [16] O. Reynolds, "On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion," *Phil. Trans. R. Soc. London A*, vol. 185, pp. 123-164, 1895.
- [17] L. Prandtl, "Bericht ueber Untersuchungen zur ausgebildeten Tu," *ZAMM*, vol. 3, pp. 136-139, 1925.
- [18] N. Kolmogorov, "Equations of motion of an incompressible turbulen," *Izv Akad Nauk SSSR Ser Phys*, vol. VI, no. 1-2, p. 56, 1942.
- [19] B. L. a. D. Spalding, *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, London: Academic Press,, 1972.
- [20] F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598-1605, 1994.

- [21] G. J. R. a. W. R. B. E. Launder, "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure," *J. Fluid Mech*, vol. 68, no. 3, pp. 537-566, 1975.
- [22] A. Leonard, "Energy cascade in large-eddy simulations of turbulent fluid flows," *Advances in Geophysics A*, vol. 18, p. 237-248, 1974.
- [23] P. Sagaut, *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows*, Springer, 2006.
- [24] M. Shur, P. R. Spalart, M. Strelets and A. Travin, "Detached-Eddy Simulation of an Airfoil at High Angle of Attack," in *4th Int. Symposium on Eng. Turb. Modeling and Experiments*, Corsica, France,, 1999.
- [25] S. A. Patel, B. Orszag, V. Yakhot, W. Flannery, F. Boysan, D. Choudhury and J. Maruzewski, "Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations," in *In International Conference on Near-Wall Turbulent Flows*, Tempe, Arizona, 1993.
- [26] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang and Y. Zhu, "A New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation," *Computers Fluids*, vol. 24, no. 3, pp. 227-238, 1995.
- [27] B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," in *16th Symp. (Int.) on Combustion. Comb. Inst*, Pittsburg, Pennsylvania, 1976.
- [28] Y. Bindar, "Pengembangan Teknologi Burner Siklon Biomassa Untuk Digunakan Pada Boiler Uap Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Kapasitas Di Bawah 1 MW," LPPMITB, Bandung, 2015.

- [29] S. A. Morsi and A. J. Alexander, "An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems," *J. Fluid Mech*, vol. 55, no. 2, p. 193-208, 1972.
- [30] A. Haider and O. Levenspiel, "Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles," *Powder Technology*, vol. 58, p. 63-70, 1989.
- [31] F. A. Morrison, "Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere," Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University, [Online]. Available: www.chem.mtu.edu/~fmorriso/DataCorrelationForSphereDrag2013.pdf.
- [32] Y. Bindar, "New Correlations for Coal and Biomass Pyrolysis Performances with Coal-Biomass Type Number and Temperature," *J. Eng. Technol. Sci*, vol. 45, no. 3, pp. 275-293, 2013.
- [33] S. Badzioch and P. W. Hawksley, "Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles," *Ind. Eng. Chem. Process Design and Development*, vol. 9, pp. 521-530, 1970.
- [34] Y. Bindar, A. Riza, H. Susanto and D. Sasongko, "Metoda Dekomposisi Batubara Berdasarkan Neraca Elemen dan Teori Devolatilisasi dari Data Analisa Proksimat dan Ultimat," *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, 2008.
- [35] M. A. Field, "Rate of Combustion of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K," *Combustion and Flame*, vol. 13, p. 237-252, 1969.
- [36] K. Kuo, *Principle of Combustion*, New York: John Wiley and Sons, 1986.

- [37] W. P. Jones and J. H. Whitelaw, "Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review," *Combustion and Flame.*, vol. 48, pp. 1-26, 1982.
- [38] J. M. Smith, H. C. Van Ness and M. M. Abbott, Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, New York: McGraw-Hill, 2005.
- [39] Y. Bindar, I. G. Makertihartha, M. D. Supardan and L. Buchari, "Utilizing Shear Factor Model and Adding Viscosity Term in Improving a Two-Dimensional Model of Fluid Flow in Non Uniform Porous Media," *Journal of Engineering and Technological Sciences (Previously ITBJ. Eng. Sci.)*, vol. 39, no. 2, pp. 109-127, 2007.
- [40] S. Liu and J. H. Masliyah, "Non-linear Flows in Porous Media," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 86, pp. 229-252, 1999.
- [41] S. Ergun, "Fluid Flow through Packed Columns," *Chem Eng. Prog.*, vol. 48, p. 89, 1952.
- [42] Ansys Inc, "Ansys Documentation: Fluent User Guide and Solver Theory," Ansys Inc, Canonsburg, PA, United States, 2013.
- [43] M. J. de Lemos, Turbulent Impinging Jets into Porous Materials, New York: Springer, 2012.
- [44] S. V. Patankar and D. B. Spalding, "A calculation procedure for heat, mass and momentum in three dimensional parabolic flows," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 15, pp. 1787-1806, 1972.
- [45] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, New York: McGraw-Hill, 1980.
- [46] T. J. Chung, Computational Fluid Dynamics, Cambridge: Cambridge

University Press, 2010.

- [47] J. P. Vandoormaal and G. D. Raithby, "Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows," *Numerical Heat Transfer*, vol. 7, p. 147-163, 1984.
- [48] R. I. Isaa, "Solution of Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting," *Journal of Computational Physics*, vol. 62, p. 40-65, 1986.
- [49] Barth and D. Jespersen, "The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. Technical Report AIAA-89-0366.," in *AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting*, Reno, Nevada., 1989.
- [50] B. P. Leonard and S. Mokhtari, "ULTRA-SHARP Nonoscillatory Convection Schemes for High-Speed Steady Multidimensional Flow," in *NASATM1-2568 (ICOMP-90-12)*, NASA Lewis Research Center, 1990.
- [51] B. Van Leer, "Toward the Ultimate Conservative Difference Scheme. IV. A Second Order Sequel to Godunov's Method," *Journal of Computational Physics*, vol. 32, p. 101-136, 1979.
- [52] Y. Bindar, Experimental and Numerical Investigation of a Gas Fired Furnace with Various Heat Transfer Boundary Conditions, Ph.D Thesis,, Kingston: Queens University, 1996.
- [53] Y. Saad, Iterative Methods for Sparse Linear Systems, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2003.
- [54] Wikipedia, "Jacobi method," 26 March 2016. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Jacobi_method. [Accessed 30 March 2016].

- [55] Wikipedia, "Gauss–Seidel method," 25 November 2015. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Gauss–Seidel_method. [Accessed 30 March 2016].
- [56] Wikipedia, "Tridiagonal matrix algorithm," Wikipedia, 29 February 2016. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tridiagonal_matrix_algorithm. [Accessed 2 April 2016].
- [57] Wikipedia, "Alternating direction implicit method," Wikipedia, 9 April 2014. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Alternating_direction_implicit_method. [Accessed 2 April 2016].
- [58] W. I. o. Science, "Prof. Archi Brandt," The Weizmann Institute of Science, 2016. [Online]. Available: <http://www.wisdom.weizmann.ac.il/~achi/>. [Accessed 3 April 2016].
- [59] A. Brandt, "Multi-level adaptive technique (MLAT) for fast numerical solutions to boundary value problems," in *Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Fluid Mechanics (Cabannes, H. and Temam, R., eds.)*, 1973.
- [60] J. C. South and A. Brandt, "Application of a multi-level grid method to transonic flow calculations," in *Transonic Flow Problems in Turbo Machinery*, Washington, Hemisphere, 1977, pp. 180-207.
- [61] A. Brandt and N. Dinar, "Multi-grid solutions to elliptic flow problems, in," in *Numerical Methods for Partial Differential Equations (Parter, S., ed.)*, New York, Academic Press, 1979, pp. 53-147.
- [62] B. F. Smith, P. E. Bjorstad and W. Gropp, *Domain decomposition: Parallel Multilevel Methods for Elliptic Partial Differential Equations*, Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

- [63] A. Quarteroni and A. Valli, *Domain Decomposition Methods for Partial Differential Equations*, Oxford: Oxford Science Publications, 1999.
- [64] T. P. Mathew, *Domain Decomposition Methods for the Numerical Solution of Partial Differential Equations*, Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [65] A. Toselli and O. Widlund, *Domain Decomposition Methods- Algorithms and Theory*, Springer, 2005.
- [66] G. Karypys and V. Kumar, "METIS - A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs, Partitioning Meshes, and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices, Version 3.0. Manual," University of Minnesota and Army HPC Research Center, Minnesota, 1997.
- [67] D. E. Keyes, "Domain Decomposition Methods for Partial Differential Equations," Department of Applied Physics & Applied Mathematics Columbia University, 2008. [Online]. Available: <https://www.image.ucar.edu/public/TOY/2008/focus4/Presentations/TALKKeyes.pdf>.
- [68] R. Siegel and J. R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Washington DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
- [69] Y. Bindar, "Perancangan Sistem Pembakaran (Burner) Boiler X," PT. LAPI ITB, Bandung.
- [70] Y. Bindar and A. Irawan, "Perancangan Sistem Rapid Fired Edge Heater (RFEH) Pemanasan Strip di Hot Strip Mill (HSM," PT. LAPI ITB, Bandung.
- [71] Y. Bindar, "Analisa CFD Permasalahan Operasi Burner Kiln Pengering

untuk Penurunan Konsumsi Bahan Bakar Minyaknya," PT. LAPI ITB, Bandung.

[72] H. Alwan, "Investigasi Efek Ruang, Kondisi Operasi dan Rejim Lengket Produksi Susu Kambing Bubuk dalam Pengering Sembur Menggunakan Metoda CFD," Tesis, Program Studi Magister Teknik Kimia, FTIITB, Bandung, 2015.

[73] F. G. Kieviet, "Modeling Quality in Spray Drying," Disertasi Program Doktor, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 1997.

[74] Y. Bindar, Rekayasa Komputasi Multi Dimensi Sistem Pemroses dan Energi Industri, Bandung: Penerbit ITB, 2017.

CURRICULUM VITAE



Nama : **YAZID BINDAR**
Tmpt. & tgl. lhr. : Tb. Panjang Baso Agam Sumbar,
17 Agustus 1961
Kel. Keahlian : Energi dan Sistem Pemroses
Teknik Kimia
Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10 Bandung
Nama Istri : Nefrida Hayati
Nama Anak : Muhammad Abdul-Mubdi
Bindar

I RIWAYAT PENDIDIKAN

- Doctor of Philosophy (Ph.D.), bidang Teknik Kimia, Queen's University Canada, 1996
- Master of Science (M.Sc), bidang Teknik Kimia, Queen's University Canada, 1990
- Sarjana Teknik Kimia (Ir), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1985.

II. RIWAYAT KERJA di ITB

- Staf Pengajar Fakultas Teknologi Industri ITB, 1987-Sekarang,
- Wakil Dekan Bidang Sumber Daya FTIITB, 2011-2015,
- Ketua KK Sistem Pemroses dan Energi Teknik Kimia FTI ITB, 2016-Sekarang

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/A, 1 Februari 1987

- Penata Muda, III/A, 1 Oktober 1996
- Penata Muda TK 1, III/B, 1 Oktober 1997
- Penata, III/C, 1 Januari 2011
- Penata TK.I, III D, 1 April 2012
- Pembina, IV A, 1 April 2014
- Pembina TK.1, IV B, 1 April 2016

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 1 Oktober 1996
- Asisten Ahli, 1 Oktober 1997
- Lektor, 1 Januari 2001
- Lektor Kepala, 1 Desember 2011
- Profesor/Guru Besar, 1 Juni 2014

V. KEGIATAN PENELITIAN, (2012-2017)

- Pengaruh Jumlah Pasokan Aliran Tangensial pada Distribusi Partikel Biomassa dalam Model Burner Siklon Tangensial-Akial Biomassa Ringan, **Yazid Bindar** (ITB), Peneliti Utama, 2017, Riset P3MIITB (Sumber Dana)
- Pengembangan Teknologi Produksi Bio-Crude Oil untuk BBM masa depan (Peneliti Utama), **Yazid Bindar** (ITB), Peneliti Utama, 2016-sekarang, Badan Pengelolalan Dana Perkebunan Kelapa Sawit (Sumber Dana)
- Pengembangan Teknologi Burner Siklon Biomassa untuk Pembangkit Listrik di bawah 1 MW, **Yazid Bindar** (ITB), Peneliti Utama, 2015-2016, Kemenristek Dikti (Sumber Dana)

- Pengembangan Teknologi Produksi Fercaf, **Yazid Bindar** (ITB), Peneliti Pendamping, 2016-2017, PPTI Kemenristek Dikti (Sumber Dana)
- Pengembangan Fermentor Sirkulasi Untuk Produksi Tepung Singkong Tekstur Halus Aroma Netral Kandungan Sianida Rendah Dan Terukur Dengan Pemenuhan Kondisi Produksi Higienis Tahun ke-2, **Yazid Bindar** (ITB), Peneliti Pendamping, 2013-2015, MP3EI DIKTI (Sumber Dana)

VI. PUBLIKASI (2012-2017)

- Pasymi, Budhi, Y.W and **Bindar, Y.**, (2017), The effect of inlet aspect ratio (RIA) to the three dimensional mixing characteristics in tangential burner, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Volume 12, Issue 18, pp 5300-5306.
- Pasymi, Budhi, Y.W and **Bindar, Y.**, (2017), Effect of initial tangential intensity on the fluid dynamic characteristics in tangential burner, *MATEC Web of Conferences*, Volume 101.
- Purbasari, A., Samadhi, T.W., **Bindar, Y.**, (2017), Synthesis and characterization of bamboo ash based geopolymer cement, *Advanced Science Letters*, Volume 23, Issue 6, pp 5723-5725.
- Romadhon, R., Rinata, A.D., Suprijanto, **Bindar, Y.**, Soelami, F.X.N., (2017), Development of Thermoregulation Model of Surgical Patient and Heat Exchange with Air Condition in the Operating Room, *Procedia Engineering*, Volume 170, pp 547-551.
- Hadisoebroto, R., Notodarmojo, S., Kamil, I.M., **Bindar, Y.**, Santosa, R., (2017), Obtaining complete mixing using hydrodynamic analysis on batch reactor, *International Journal of*

GEOMATE, Volume 12, Issue 34, 2017, pp 130-134.

- Yunardi, Wusnah, Darmadi, Hisbullah, **Bindar, Y.**, (2017), On the suitability of turbulence models for the prediction of velocity and temperature distributions in methane non-premixed flame, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, Volume 7, Issue 1, pp 86-91.
- Meitha, A., **Bindar, Y.**, Kresnowati, M.T.A.P., (2016), Effects of cassava chips fermentation conditions on the produced flour properties, *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, Volume 16, Issue 1, pp 50-58.
- Wikanswasto, R.A., **Bindar, Y.**, Devianto, H., (2015), Maintaining higher efficiency of lpg butane boil-off gas re-liquefaction in LPG butane storage tanks using unsteady state process simulation, *AIChE Annual Meeting*, Volume 1, pp 284-294.
- Elwina, Yunardi, **Bindar, Y.**, Syukran, (2014), Simulation of the influence of air preheat combustion on the temperature of propane turbulent flame using probability density function approach and eddy dissipation model, *Advanced Materials Research*, Volume 871, pp 95-100.
- Bindar, Y., (2014), New correlations for coal and biomass pyrolysis performances with coal-biomass type number and temperature, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Volume 45 B, Issue 3, pp 275-293.
- Istadi, I., **Bindar, Y.**, (2014), Improved cooler design of electric arc furnace refractory in mining industry using thermal analysis modeling and simulation, *Applied Thermal Engineering*, Volume 73, Issue 1, pp 1127-1138.

- Budhi, Y.W., Effendy, M., **Bindar, Y.**, Subagjo, (2014), Dynamic behavior of reverse flow reactor for lean methane combustion, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Volume 46, Issue 3, pp 299-317.
- Hadisoebroto, R., Kamil, I.M., , Notodarmojo, S., **Bindar, Y.**, (2014), Improving performance of water treatment on oxidation ditch using modification of reactor hydrodynamic, *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, Volume 69, Issue 6, pp 101-104.
- Aziz, A.N., Nazaruddin, Y.Y., Siregar, P., **Bindar, Y.**, (2014), Structured mathematical modeling of industrial boiler, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Volume 46 B, Issue 1, pp 102-122.
- Subagjo, Budhi, Y.W., Effendy, M., **Bindar, Y.**, (2014), Homogeneity of continuum model of an unsteady state fixed bed reactor for lean CH₄ oxidation, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Volume 46 B, Issue 2, 2014, Pages 195-21.
- Kresnowati, M.T.A.P., **Bindar, Y.**, Aliwarga, L., Lestari, D., Prasetya, N., Tanujaya, A.R., (2014), Effects of retting media circulation and temperature on the fermentation process in soft-texture and low cyanogenic content cassava flour production, *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, Volume 14, Issue 2, pp 67-75.
- Wonoputri, V., Effendy, M., Wibisono Budhi, **Y.**, **Bindar, Y.**, Subagjo, (2013), Determination of kinetic parameters for methane oxidation over pt/?-Al₂O₃ in a fixed-bed reactor, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Volume 45 B, Issue 2,
- **Bindar, Y.**, Efan, A., Rahmi, (2013), Sodium hydroxide (NaOH)

concentration and steeping time duration effects on starch production from dry-milled low quality rice IR 64 grade 3 flour using alkaline-protease enzyme digestion method, *International Food Research Journal*, Volume 20, Issue 3, pp 1353-1358.

- Senda, S.P., Renanto, R., Roesyadi, A., Sumaryono, W., **Bindar, Y.**, (2012), The power consumption performance of an orbiting screw solid-solid mixer, *ITB Journal of Engineering Science*, Volume 44 B, Issue 3, pp 287-302.
- **Bindar, Y.**, Irawan, A., (2012), Characteristics of flame shapes and map for LPG and hydrogen inverse confined diffusion flames at high level of fuel excess, *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, Volume 12, Issue 1, pp 1-10
- Yunardi, Elwina, Sylvia, N., Wusnah, **Bindar, Y.**, (2012), A comparative performance study of soot formation models in methane elevated pressure non-premixed flames, *Applied Mechanics and Materials*, Volume 110-116, pp 18-22.

VII. PENGHARGAAN

- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian 10 Tahun

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen, 2009. Kementerian Pendidikan Nasional