



TEORI DASAR SIMULASI PROSES PEMBAKARAN LIMBAH VINASSE DARI INDUSTRI ALKOHOL BERBASIS CFD

Bayu Triwibowo^{*})

Prodi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Jl Raya Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229, Indonesia

Received 5 September 2013; revised 29 Nopember 2013; accepted 10 Desember 2013

Abstract

In the midst of restrictions issue on the use of fossil fuels, the world began to move towards the use of renewable fuels. One such fuel is bio-ethanol. Production of bio-ethanol itself leaves vinasse wastetreatment problems with large discharge. There have been many ways to treat vinasse one of which is the burning of concentrated vinasse. Combustion process is a complex process in terms physical and chemical. Complex phenomenon will be difficult to be analyzed simultaneously and comprehensively when using conventional techniques. Simulation of combustion process based on CFD can be one such solution. In the case of vinasse as fuel and air as oxydizer the selected combustion model is a non-premixed combustion models with probability density function.

Keywords: vinasse, combustion, CFD, non-premixed, probability density function

1. PENDAHULUAN

Operasi pembakaran dalam sebuah industri merupakan salah satu proses yang vital karena menyangkut keberhasilan dari sintesis suatu produk dan mencakup energi yang sangat besar. Operasi pada kiln, furnace, incenerator, dll, adalah beberapa contoh dari proses pembakaran yang memegang peranan penting bagi suplai energi, pre-heater, atau pengubah fasa pada industri yang bersangkutan. Namun yang terlihat selama ini adalah bahwa proses pembakaran yang dijalankan pada industri di indonesia kurang memperhatikan aspek-aspek penting yang mempengaruhi proses pembakaran secara langsung. Bahan bakar yang digunakan pada proses pembakaran juga bermacam-macam, seperti *methane*, *pulverized coal*, dan *coal-water mixture*. Namun di tengah isu pembatasan pemakaian bahan bakar fosil maka muncul berbagai macam sumber energi alternatif terbarukan seperti hidrogen dan bio-ethanol. Hidrogen memiliki masalah pada teknologi penyimpanan sedangkan masalah tradisional dari industri alkohol adalah limbah yang mencapai sepuluh kali lipat dari produksi. Salah satu limbah dari industri bio-ethanol adalah vinasse. Vinasse yang merupakan limbah dengan debit yang sangat besar dan karakteristik polutan bagi lingkungan harus diolah. Pengolahan vinasse memiliki

^{*}Corresponding author. Tel.: +6224 8508101 ext 115; fax: +6224 8508101; e-mail: triwibowobayu@yahoo.com.

banyak alternatif, salah satu yang paling *feasible* adalah pembakaran vinasse. Pembakaran merupakan bagian dari reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidizer yang disertai dengan pembentukan panas (nyala api) serta harus melibatkan ignition phenomena. Aspek yang berpengaruh terhadap efisiensi operasi pembakaran pada furnace adalah geometri ruang bakar dan *nozzle*, kualitas bahan bakar, laju alir, pemodelan turbulensi, dan AFR (Air to Fuel Ratio). Geometri ruang bakar dan *nozzle* akan mempengaruhi bentuk dan nyala api, sedangkan kualitas bahan bakar akan mempengaruhi efisiensi penggunaan bahan bakar, laju alir dan turbulensi akan mempengaruhi suhu api yang dihasilkan. Laju alir dan turbulensi yang tepat akan menghasilkan api dengan bentuk dan suhu yang sesuai dengan yang diharapkan. Apabila perbandingan tersebut tidak sesuai maka dapat berpengaruh terhadap bentuk dan suhu api. Sedangkan bentuk dan suhu api akan sangat berpengaruh pada kualitas produk karena mempengaruhi panjang daerah pemanasan. AFR harus selalu dikontrol agar efisiensi yang diinginkan bisa tercapai. Terlalu banyak, atau terlalu sedikit nya bahan bakar pada jumlah udara pembakaran tertentu, dapat mengakibatkan pembakaran tidak sempurna dan terbentuknya karbon monoksida. Jumlah O₂ tertentu diperlukan untuk pembakaran yang sempurna dengan tambahan sejumlah udara (udara berlebih) diperlukan untuk menjamin pembakaran yang sempurna. Walau demikian, terlalu banyak udara berlebih akan mengakibatkan kehilangan panas dan efisiensi.

Selama ini proses pembakaran pada industri di Indonesia sebagian besar ditentukan oleh faktor pengalaman. Penelitian ataupun percobaan pada proses pembakaran jarang dilakukan terutama karena mahal dan kompleksnya fenomena pembakaran bila dilakukan scale-up ke skala industri. Dengan menggunakan simulasi berbasis CFD, maka penelitian ini dapat dihitung secara numerik karena pada CFD telah disediakan persamaan-persamaan yang dibutuhkan untuk mengamati profil pembakaran yang terjadi. CFD juga memungkinkan untuk memodelkan proses pembakaran dengan baik karena model matematis yang tersedia untuk semua fenomena yang berkaitan langsung dengan proses pembakaran telah tersedia.

Proses Pembakaran

Pembakaran adalah salah satu teknologi yang paling luas digunakan. Hampir 90% dari supply energi dunia berasal dari proses pembakaran. Maka menjadi penting untuk mempelajari proses ini secara seksama.

Penelitian tentang pembakaran pada awalnya mengarah pada mekanika fluida yang didalamnya terjadi reaksi kimia (*secara global rate reaction*) yang melepaskan sejumlah panas. Sejumlah panas yang dilepaskan oleh reaksi kimia ini pada mulanya didefinisikan secara aspek termodinamika sederhana yang mengasumsikan ada reaksi yang terjadi dan sangat cepat. Pendekatan ini dapat dilakukan jika proses pembakaran dianggap *stationary combustion* dimana tidak mungkin terjadi mengingat adanya fenomena kompleks akan *ignition phenomena* dan terbentuknya polutan.

Pembakaran adalah oksidasi bahan bakar secara cepat yang disertai dengan produksi panas atau panas dan cahaya. Pelepasan panas dan cahaya ini ditandai dengan terbentuknya api. Pembakaran yang sempurna terjadi hanya jika terdapat pasokan oksigen yang cukup dan biasanya pembakaran dilakukan dengan udara berlebih untuk menjamin pembakaran yang sempurna. Proses pembakaran juga dapat diartikan sebagai reaksi kimia antara bahan bakar dengan oksigen dari udara. Hasil pembakaran utama adalah karbondioksida dan uap air serta energi panas. Sedangkan hasil pembakaran yang lain adalah karbonmonoksida, abu (ash), NO_x, atau SO_x, tergantung dari jenis bahan bakarnya.

Kebutuhan oksigen dalam pembakaran dipenuhi dari udara bebas yang telah dipanaskan terlebih dahulu untuk meningkatkan efisiensi. Adanya kandungan nitrogen dalam udara sebesar 79% dapat mengurangi efisiensi pembakaran karena :

- Menyerap panas dari pembakaran bahan bakar
- Mengurangi transfer panas pada permukaan gas buang
- Meningkatkan volume hasil samping pembakaran

Pada suhu pembakaran yang tinggi, nitrogen dapat bereaksi dengan oksigen untuk membentuk senyawa nitro oxide (NOx) yang merupakan polutan.

Tabel 1. Jenis proses pembakaran berdasarkan mekanisme kontak bahan bakar dan oksidizer

Mekanisme Kontak	Jenis Aliran	Contoh
Premix	Laminar	Api bunsen
	Turbulen	<i>Spark ignite gasoline engine</i>
Non-Premix	Laminar	Pembakaran kayu atau lilin
	Turbulen	<i>Pulverized coal combustion</i>

Pada proses pembakaran, bahan bakar dan oksidizer (biasanya udara) dikontakkan (mix) dan dibakar. Jika ditinjau dari mekanisme kontak antara fuel dan oksidizer maka proses pembakaran dapat dibagi menjadi 2 yaitu premix dan non-premix. Premix adalah bahan bakar dan oksidizer dicampur terlebih dahulu kemudian dibakar (dengan ignition phenomena) sedangkan non-premix adalah proses pencampuran dan pembakaran bahan bakar dengan oksidizer terjadi secara simultan. Masing-masing metode ini juga dapat memiliki rezim aliran yang berbeda. (Warnatz.et.al, 2006)

Properti Vinasse sebagai Bahan Bakar

Pembakaran vinasse telah diteliti oleh beberapa peneliti dan mencapai hasil yang bervariasi. Meskipun sebagian besar literatur memvalidasi keberhasilan saat pembakaran dengan bahan bakar vinasse, kurangnya informasi membuat teknologi ini kurang diterapkan.

Perhatian khusus harus diberikan untuk analisis proksimat material yang memberikan persen volatile matter dan fixed carbon yang akan digunakan sebagai bahan bakar. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa vinasse memiliki potensi yang besar sebagai bahan bakar furnace. Pada tabel 2 merupakan penyajian dari komparasi antara batubara dengan vinasse jika digunakan perspektif sebagai bahan bakar.

Tabel 2. Komparasi dari *proximate* dan *ultimate analysis* untuk vinasse dan batubara. (Cortez dan Perez, 1997)

Analysis		Vinasse	Coal
Proximate	Fixed Carbon, %	39.72	16-93
	Volatile Matter, %	69.31	3-50
Ultimate	C, %	39.72	50-95
	H, %	8.60	2-5.5
	O, %	n.a.	2-40
	S, %	0.12	0.5-7
	N, %	1.65	0.5-3
	Ash, %	18.95	2-30
	Moisture, %	≈ 0	≈ 0

Proses pembakaran antara vinasse dengan oksidizer udara adalah proses pembakaran solid-fluid. Maka digunakan fluid – solid reaktor. fluid – solid reaktor terdiri dari :

a. Bed reaktor

Adalah reaktor dimana terjadi tumpukan padatan (solid bed) yang dilewati gas. Reaktor ini terdiri dari dua jenis yaitu :

- Fixed bed reaktor

Dimana bed yang terbentuk tidak bergerak karena adanya gas yang melalui bed tersebut. Reaktor ini biasa digunakan untuk mereaksikan reaktan dengan menggunakan katalis padat.

- Moving bed reaktor

Dimana bed yang terbentuk bergerak karena adanya aliran gas yang melalui bed tersebut, tetapi pergerakan fase padat disini belum bias dikatakan sebagai fluidisasi. Reaktor ini menggunakan rate solid dan liquid yang sama – sama lemah.

Secara umum reaktor ini memiliki criteria sebagai berikut :

- Rate solid dan udara kecil.
- Digunakan untuk mendapatkan efisiensi kontak yang bagus.
- Suhu operasi relatif rendah, sekitar 600 °C.

b. Fluidized bed reaktor

Adalah reaktor dimana terjadi tumpukan padatan (solid bed) yang dilewati gas dimana fase solid akan terfluidisasi karena dilewati gas. Reaktor ini cocok untuk reaksi dengan range suhu yang sempit karena adanya control suhu yang baik, penggunaan solid partikel yang kecil, dan suhu reaksi yang tinggi sekitar 600 – 1000 °C.

c. Entrained bed reaktor

Adalah reaktor dimana tidak terjadi penumpukan solid di dalamnya. Waktu kontak antara solid dan gas relatif kecil. Rate solid yang digunakan dapat sangat besar. Rate udara jauh lebih besar daripada rate solid yang masuk. Suhu operasi relatif tinggi sekitar 1200 – 1800 °C.

Computational Fluid Dynamic

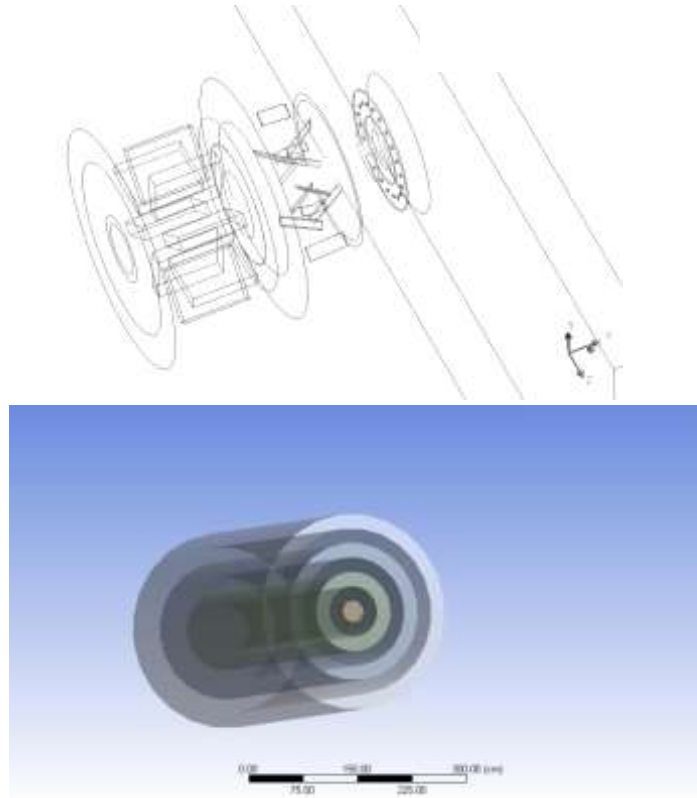
Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan *engineering tools* analisis sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena yang terkait lainnya seperti reaksi kimia dengan menggunakan model matematis yang valid secara simultan dengan bantuan komputer. Fenomena-fenomena pada suatu sistem dapat dimodelkan dengan menggunakan kode CFD yang merupakan rentetan algoritma numerik yang mewakili fenomena perpindahan, aliran fluida, reaksi kimia, dll. CFD sendiri memiliki langkah-langkah sistematis yang harus dipenuhi agar hasil analisis menjadi akurat. Tahap dalam CFD tersebut adalah *pre-processing*, *solver*, dan *post-processing*.

Pre-processing meliputi analisa awal mengenai fenomena yang terjadi serta pengumpulan data yang diperlukan untuk metode solver. Langkah-langkah dalam tahap ini:

- Pendefinisian dimensi geometri yang dianalisis baik 2D atau 3D dengan ukuran yang riil.
- *Grid generation*, yaitu pembagian domain geometri menjadi beberapa *boundary condition* yang disesuaikan dengan fenomena pada sistem yang dianalisis.
- Pendefinisian fenomena fisik dan kimia yang perlu dimodelkan.
- Pendefinisian *boundary condition* (kondisi batas) pada geometri.

- Pembagian geometri menjadi sejumlah kontrol volume atau *cell* (sel). Keakuratan penyelesaian CFD ditentukan oleh jumlah sel dalam grid dan karakteristik grid tersebut.
- Penyelesaian permasalahan aliran (kecepatan, tekanan, temperatur, dan sebagainya) yang didefinisikan pada titik nodal dalam tiap sel.

Contoh pendefinisian geometri dalam *pre-processing* :



Gambar 1. Contoh *grid generation* pada metode *pre-processing* (Pratama dan Hoedaya, 2013 dan Triwibowo dan Fitriady, 2010)

Solver dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu : *finite difference*, *finite element*, *finite volume* dan metode spektral. Secara umum metode numerik *solver* tersebut terdiri dari langkah-langkah sebagai berikut :

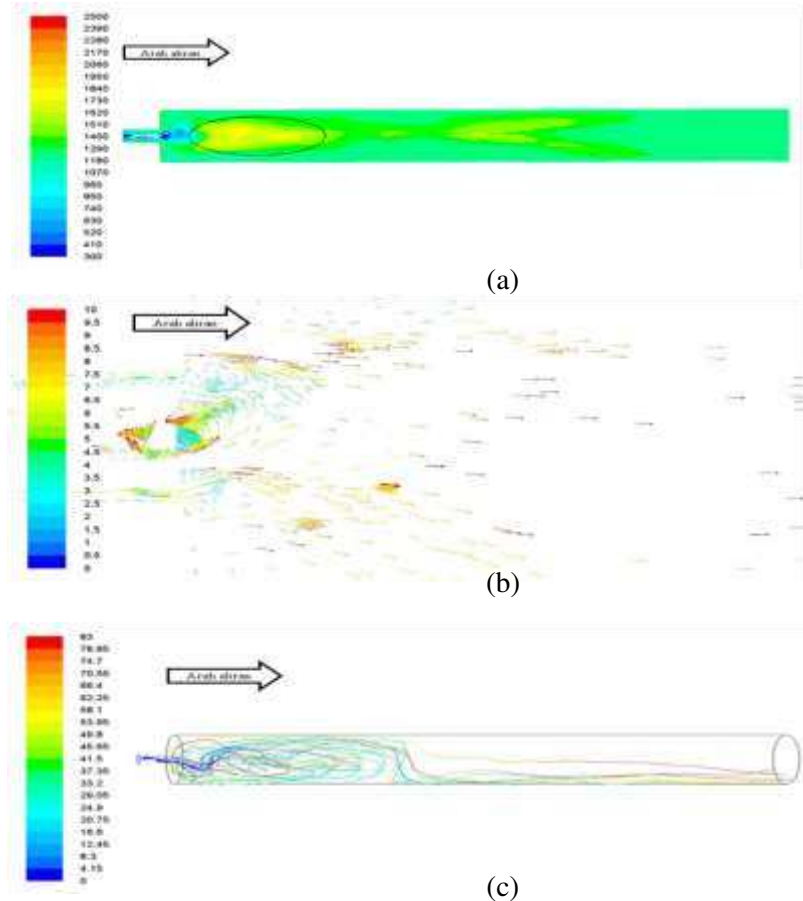
- Prediksi variabel aliran yang tidak diketahui dengan menggunakan fungsi sederhana.
- Diskretisasi dengan substitusi prediksi-prediksi tersebut menjadi persamaan-persamaan aliran utama yang berlaku dan kemudian melakukan manipulasi matematis.
- Penyelesaian persamaan aljabar.
- Metode *finite volume* adalah pengembangan khusus dari formulasi *finite difference*. *Finite volume* digunakan pada berbagai CFD kode komersial.

Post-processing merupakan tahap visualisasi dari hasil tahapan sebelumnya. *Post-processor* semakin berkembang dengan majunya *engineering workstation* yang mempunyai kemampuan grafik dan visualisasi cukup besar. Alat visualisasi tersebut antara lain :

- 1) Plot vektor.

- 2) Plot kontur.
- 3) Plot 2D dan 3D *surface*.
- 4) Manipulasi tampilan (translasi, rotasi, skala, dan sebagainya).
- 5) Animasi *display* hasil dinamik.

Contoh *post-processing* pada sistem pembakaran pada tubular reaktor :



Gambar 2. Contoh *post-processing* untuk bentuk nyala api (a), vektor kecepatan (b) dan *particle track residence time* (c) (Triwibowo dan Fitriady,2010)

Di dalam simulasi, model-model yang digunakan didiskretisasi dengan metode formulasi dan diselesaikan dengan menggunakan algoritma-algoritma numerik yang disesuaikan dengan permasalahan dan sistem yang akan dimodelkan.

Model – model menyelesaikan persamaan-persamaan kekekalan massa, momentum, energi, fraksi massa spesies gas, fraksi massa, dll.

2. METODE DAN PERSAMAAN TEORITIS

Telah dibahas sebelumnya bahwa CFD merupakan salah satu *engineering tools* di dalam penyelesaian sebuah masalah di industri ataupun melihat suatu fenomena yang ditransformasikan dalam algoritma-algoritma numerik. Pada proses pembakaran sendiri ada

banyak sekali fenomena yang terjadi, seperti aliran fluida, transfer energi, neraca momentum, reaksi kimia, *ignition phenomena*, dan model turbulensi.

Algoritma numerik yang digunakan merupakan model matematis dari *software ANSYS® 13.0 Academic Package*. Untuk permodelan geometri digunakan *DesignModeler®* dengan penentuan jumlah *grid* dan *node* menggunakan *Meshing®*. Perhitungan iterasi simulasi CFD menggunakan *FLUENT®*.

Persamaan Kontinuitas dan Kekekalan Momentum

Model-model kekekalan massa, momentum dalam koordinat kartesius adalah sebagai berikut.

a. Persamaan Kontinuitas (Hukum Kekekalan Massa)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left(\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right) + S_m \quad (2)$$

S_m sendiri merupakan massa yang ditambahkan pada fase kontinum dari fase kedua yang terdispersi (misal dari evaporasi liquid jika terbentuk droplet atau dari sumber yang lain).

b. Persamaan Momentum (Hukum Kekekalan Momentum)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

Dengan persamaan tensor :

$$\bar{\tau} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4)$$

[Theory Guide, Ansys Fluent 13.0, hal. 2-3]

Turbulensi

Turbulensi merupakan suatu fenomena yang tidak linier, tiga dimensi, dan berubah terhadap waktu. Pada aliran turbulen, secara kontinu terbentuk pusaran-pusaran besar yang kemudian terpecah menjadi pusaran-pusaran yang lebih kecil dan akhirnya menghilang (dissipasi). Partikel-partikel fluida yang semula berjauhan dapat dibawa saling mendekati dengan adanya pusaran pada aliran turbulen ini. Sebagai konsekuensinya, pertukaran panas, massa dan momentum menjadi sangat efektif. Pencampuran yang efektif ini akan menyebabkan koefisien difusi yang besar untuk perpindahan massa, momentum, dan panas. Tetapi kehilangan energi yang terjadi pada aliran turbulen juga lebih besar dibandingkan pada aliran laminar. Hal ini terjadi karena pusaran-pusaran yang terjadi melakukan kerja melawan *viscous stress* sehingga energi yang terkandung dalam pusaran akan terdisipasi menjadi panas.

Penelitian ini menggunakan *standard k-ε model* yang berdasarkan persamaan *transport model* untuk energi kinetika turbulen (k) dan laju dissipasi (ϵ) yang diperoleh dari persamaan transpor berikut.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

dan

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho a_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (6)$$

Dalam persamaan ini, G_k menunjukkan generasi energi kinetik turbulen yang disebabkan *meanvelocity gradient*. G_b menunjukkan generasi dari energi kinetik turbulen karena *buoyancy*. Y_M menunjukkan kontribusi dari dilatasi yang berfluktuasi dalam *compressible turbulence* terhadap rate dissipasi *overall*. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, dan $C_{3\epsilon}$ adalah konstanta, σ_k dan σ_ϵ sebagai bilangan Prandtl turbulen untuk k dan ϵ , sedangkan S_k dan S_ϵ adalah *user defined source term*.

Dengan konstanta model, $C_{1\epsilon} = 1,44$; $C_{2\epsilon} = 1,92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\epsilon = 1,3$.

[Theory Guide, Ansys Fluent 13.0, hal. 49-50]

Persamaan Energi

ANSYS FLUENT menyelesaikan persamaan energi dalam bentuk sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (7)$$

Dimana k_{eff} merupakan konduktivitas efektif, dan J_j merupakan fluk difusi dari spesies j . Pada sisi sebelah kanan persamaan (2.7) mewakili persamaan energi dari konduksi, spesies difusi, dan dissipasi *viscous*. S_h merupakan panas yang berasal dari reaksi kimia dan sumber panas lainnya.

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (8)$$

Nilai sensibel entalpi h untuk gas ideal didefinisikan sebagai,

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (9)$$

dan untuk aliran *incompressible*,

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (10)$$

Pada persamaan (2.9), Y_j adalah fraksi massa dari spesies j dan

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (11)$$

Pada simulasi ini terdapat reaksi sehingga terdapat sumber energi yang berasal dari reaksi tersebut. Sumber energi S_h pada persamaan (2.7) juga termasuk sumber energi yang berasal dari reaksi kimia, yaitu :

$$S_{h, reaction} = - \sum_j \frac{h_j^o}{M_j} R_j \quad (12)$$

Dimana h_j^o adalah entalpi pembentukan spesies j dan R_j adalah laju volumetrik dari pembentukan spesies j .

[Theory Guide, Ansys Fluent 13.0, hal. 133-136]

Model Pembakaran yang Disertai Reaksi Kimia

- Generalized Finite Rate Model.

Pendekatan ini didasarkan pada penyelesaian persamaan transport senyawa untuk konsentrasi reaktan dan produk dengan mekanisme reaksi kimia yang didefinisikan sendiri. Laju reaksi yang muncul sebagai *source term* dalam persamaan transport senyawa dihitung berdasarkan ekspresi laju Arrhenius atau menggunakan konsep *eddy dissipation* dari Magnussen dan Hjertager. Permodelan dari tipe ini sesuai untuk aplikasi luas yang meliputi sistem reaksi laminar atau turbulen dan sistem pembakaran.

- Non-Premixed Combustion Model.

Dalam pendekatan ini, persamaan transport senyawa individu tidak diselesaikan. Sebagai gantinya, persamaan transport untuk satu atau dua besaran yang dikonservasi (fraksi campuran) diselesaikan dan konsentrasi komponen individu diturunkan dari perkiraan distribusi fraksi campuran. Pendekatan ini secara khusus dikembangkan untuk simulasi dari difusi flame yang turbulen. Efek turbulensi dihitung dengan bantuan *probability density function* atau PDF.

- Premixed Combustion Model

Permodelan ini mengembangkan sistem pembakaran atau sistem disertai reaksi lainnya yang merupakan tipe premixed murni. Dalam hal ini reaktan yang tercampur sempurna dan produk-produk pembakaran dipisahkan oleh *flame front*. *Reaction progress variable* diselesaikan untuk memperkirakan *front* ini. Pengaruh turbulensi dihitung dari kecepatan turbulensi *flame*.

- Partially Premixed Combustion Model

Permodelan ini dikembangkan untuk system yang mempunyai kombinasi antara pembakaran *non-premixed* dan *perfectly premixed*. Persamaan *mixture fraction* dan *reaction progress variable* diselesaikan untuk menentukan konsentrasi senyawa dan letak dari *flame front*.

Jika dianalisis dari jenis bahan bakar (vinasse pekat) dan oksidizer (udara) dan kesulitan dari penentuan properti dari bahan bakar maka model yang digunakan adalah PROBABILITY DENSITY FUNCTION (PDF model) karena fraksi campuran/ model PDF tidak memerlukan solusi dari persamaan transport beberapa spesies, PDF itu lebih efisien daripada komputasi model transport spesies.

Model PDF menghitung properti termokimia diproses sebelumnya dan disusun menjadi tabel. Interaksi turbulen dan kimia dihitung dengan *Probability Density Function* (PDF). *Probability Density Function*, ditulis sebagai $p(f)$, merupakan fraksi waktu yang digunakan oleh fluida pada sekitar kondisi f . PDF adalah dari bentuk:

$$p(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \quad (13)$$

dimana T adalah skala waktu dan τ_i adalah jumlah waktu yang digunakan oleh f pada Δf . Nilai skalar rata-rata fraksi massa dan temperatur dapat dihitung dengan persamaan:

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \phi_i(f, \bar{H}) p(f) df \quad (14)$$

Secara singkat adalah bahwa model PDF ini memtransformasi reaksi proses pembakaran dan proses interaksi antara bahan bakar dan udara dengan menggunakan algoritma tertentu secara statistik.

Discrete Phase Model

Sebagai tambahan dalam penyelesaian persamaan transport pada fase kontinu (*continues phase*), CFD dapat mensimulasikan suatu fase diskret yang mengalir bersama fase kontinu. Fase diskret dalam hal ini bisa berupa partikel *inert*, *bubble/droplet*, dan *combustion partikel*. Penggunaan model diskret dilakukan atas beberapa pertimbangan sebagai berikut:

- Dengan model ini CFD dapat mempertimbangkan sifat fisik partikel khususnya ukuran partikel dan mempertimbangkan gaya-gaya yang mempengaruhi gerakan partikel, antara lain inersia partikel, *hydrodynamic drag*, dan gaya gravitasi.
- Dapat memprediksi efek turbulensi pada penyebaran partikel didalam fase kontinu sehingga diperoleh data-data yang meliputi kecepatan dan posisi partikel.

Surface Combustion

Dalam fenomena pembakaran antara vinasse dengan udara maka akan terjadi fenomena dimana vinasse akan dianggap sebagai *combusting particle* terdiskrit dengan fase heterogen. Maka model *surface combustion* akan menjadi penting untuk dipertimbangkan.

1. Diffusion-limited surface reaction rate model

Model laju reaksi permukaan *diffusion-limited* mengasumsikan bahwa reaksi permukaan berjalan pada laju yang ditentukan oleh difusi oksidan gas ke permukaan partikel. Selain itu, model ini mengasumsikan diameter partikel tidak berubah. Karena massa partikel menurun, densitas efektif menurun, dan partikel *char* menjadi lebih berpori (*porous*).

2. Kinetics/diffusion-limited surface reaction rate model

Model laju reaksi permukaan *kinetics/diffusion-limited* mengasumsikan bahwa reaksi permukaan berjalan pada laju yang ditentukan oleh kinetika atau laju difusi. Ukuran partikel diasumsikan konstan pada model ini selama densitas menurun.

3. Intrinsic model

Intrinsic model pada ANSYS FLUENT adalah berdasarkan pada model Smith [324], mengasumsikan bahwa orde reaksi sama untuk semua. Sama seperti model *kinetics/diffusion-limited*, *intrinsic model* mengasumsikan bahwa laju reaksi permukaan melibatkan efek *bulk diffusion* dan reaksi kimia.

[Theory Guide, Ansys Fluent 13.0, hal. 400-402]

3. KESIMPULAN

Proses pembakaran merupakan salah satu peristiwa yang melibatkan banyak fenomena fisik dan kimia. Eksperimen yang sulit dan biaya mahal serta tidak praktis memerlukan suatu pendekatan lain pada penelitian proses pembakaran. Pembakaran yang melibatkan vinasse dan udara sendiri merupakan hal yang masih sangat sedikit

dilaporkan sehingga sistem pengolahan limbah vinasse dengan teknologi ini menjadi tidak populer. Adanya algoritma numerik yang telah mampu memodelkan fenomena dengan akurat membuat simulasi merupakan suatu cara eksperimen baru yang sangat layak untuk dipertimbangkan. Pembakaran vinasse dengan udara akan dimodelkan dengan jenis pembakaran *non-premixed combustion model with probability density function*. Pembakaran vinasse sendiri akan berkembang menjadi salah satu alternatif pengolahan limbah vinasse di masa yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

- Cortez, L.A.B., Perez, L.E.B. 1997. *Experiences on Vinasse Disposal Part III : Combustion of Vinasse - #6 Fuel Oil Emulsions*. Braz. J. Chem. Eng. vol. 14 no. 1 Sao Paulo March. 1997
- Fluent Inc. 2010. *Theory Guide*. Ansys Fluent 13.0.
- Himma, N.F., Arda, P.F. 2013. *Simulasi Pengaruh Kualitas Batubara pada Gasifikasi Batubara Berbasis CFD*. Tugas Akhir Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.
- Marshall, E.M., Bakker, A., Computational Fluid Mixing, Fluent Inc. Lebanon, New Hampshire, USA, Reprinted, with changes, from the Handbook of Industrial Mixing, sponsored by the North American Mixing Forum, edited by Edward L. Paul, Victor Atiemo-Obeng, and Suzanne M. Kresta, to be published by John Wiley and Sons in Spring of 2003, copyright © 2003 John Wiley and Sons, Inc.
- Pratama, K.M., Hoedaya, Z.I. 2013. *Pengaruh Karakteristik Turbulen Terhadap Profil Pembakaran di Inlet Burner Reaktor ZK*. Tugas Akhir Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.
- Triwibowo, B., Fitriady, M., A. 2010. *Simulasi Proses Pembakaran pada Kiln Semen Berbasis CFD*. Tugas Akhir Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.
- Warnatz, J., Ulrich, M., Dibble, R.W. 2006. *Combustion : Physical and Chemical Fundamentals, Modelling and Simulation, Experiments, Pollutan Formation 4th edition*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2006.