

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Aditya (2016) telah melakukan penelitian secara eksperimental mengenai karakteristik nyala api pada *bunsen burner* dan *slot burner* dengan bahan bakar metana. Variasi pada penelitian tersebut adalah *equivalence ratio* metana yaitu 0,78 ; 0,98 ; 1,04 ; 1,24 ; 1,56 ; 2,6. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan api laminar *bunsen burner* lebih besar dari *slot burner*, tinggi api *bunsen burner* lebih tinggi dari *slot burner*, temperatur api *slot burner* lebih tinggi dari *bunsen burner*. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin tinggi *equivalence ratio* maka kecepatan api laminar dan tinggi api menurun sedangkan temperatur meningkat.

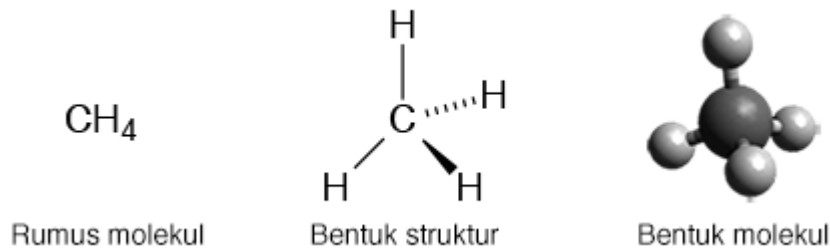
Dhiputra (2015) telah melakukan penelitian mengenai panjang nyala api pada fenomena *flame lift up* pembakaran propana menggunakan *bunsen burner*, dengan variasi ketinggian *ring* dari ujung *bunsen burner*. Variasi ketinggian *ring* dari ujung *burner* yaitu 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 60 mm. Laju aliran gas yang digunakan pada penelitian ini sesuai skala di rotameter yaitu 0,5 cm, 1 cm, 1,5 cm, 2 cm, 2,5 cm, 3 cm. *Ring* yang digunakan ada 2 yaitu yang berbahan *stainless steel* AISI 304 dan keramik, dengan dimensi yang sama 30 mm diameter luar dan 10 mm diameter dalam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fraksi massa bahan bakar sebanding dengan panjang api *lift up*. Penggunaan *ring* keramik lebih baik sebagai *flame hold* dibandingkan bahan *stainless steel* AISI 304, karena keramik cenderung tidak terbakar sehingga akan membawa efek penyerapan panas.

Mulya (2015) telah melakukan penelitian mengenai pembakaran *premix* minyak nabati pada *bunsen burner* tipe silinder, dengan tujuan mengetahui karakteristik kecepatan api laminar dan *equivalence ratio*. Variasi pada penelitian ini berupa 3 jenis minyak nabati yang digunakan yaitu kelapa murni, jarak pagar, dan biji kapuk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *equivalence ratio* terbesar secara berurutan adalah minyak kelapa murni, jarak pagar, dan biji kapuk. Semakin kaya udara maka pola api semakin kecil hingga *blow-off*.

Firdaus (2017) telah melakukan penelitian mengenai karakteristik nyala api pembakaran gas metana pada *bunsen burner* dengan variasi diameter *ring*. Variasi diameter *ring* yang digunakan adalah 21 mm, 26 mm, 31 mm, 36 mm, 41 mm, 46 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur api akan menurun seiring meningkatnya diameter *ring*, tinggi api laminar akan meningkat sebanding dengan meningkatnya diameter *ring*, kecepatan api laminar akan menurun sebanding dengan meningkatnya diameter *ring*.

2.2 Metana

Metana merupakan senyawa hidrokarbon sederhana yang berasal dari golongan alkana. Rumus kimia dari metana adalah CH_4 . Metana merupakan salah satu bahan bakar utama dalam proses pembakaran, karena banyak tersedia di alam. Ilustrasi dan informasi mengenai metana terdapat pada Gambar 2.1 dan Tabel 2.1.



Gambar 2.1 Struktur CH_4

Sumber: F.El-Mahallawy (2002:09)

Tabel 2.1

Properti Metana Pada Kondisi Standar

Rumus senyawa	: CH_4
Massa molekul	: 16,04 g/mol
Temperatur Penyalaan	: 580°C
Kecepatan rambat api pada suhu 25°C	: 43,4 cm/detik
Densitas	: $0,7168 \text{ g/dm}^3$
Nilai kalor tinggi	: 9510 kcal/m^3
Nilai kalor rendah	: 8570 kcal/m^3

Sumber: Wardana (2008:16)

2.3 Pembakaran

Menurut Werlin S. Nainggolan dalam bukunya Termodinamika, pembakaran adalah reaksi kimia yang cepat antara bahan bakar dengan oksigen. Ketika terjadi pembakaran kimia, dikatan-ikatan di dalam model molekul dari reaktan terputus dan atom-atom serta elektron-elektron tersusun ulang menjadi produk. Di dalam reaksi pembakaran, elemen-elemen pada bahan bakar yang memiliki sifat mudah terbakar mengalami proses oksidasi yang cepat sehingga akan menghasilkan pelepasan energi secara bersamaan dengan terbentuknya produk hasil pembakaran. Gambar 2.2 menunjukkan proses pembakaran.

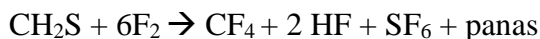
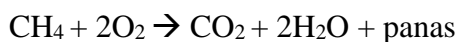
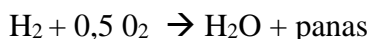


Gambar 2.2 Skema pembakaran

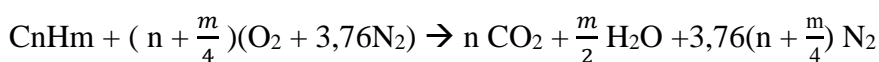
Sumber: *Introduction to Thermodynamics* (1994:236)

Pembakaran disebut sempurna ketika semua karbon yang terkandung dalam bahan bakar telah habis terbakar menjadi karbon dioksida, semua hidrogen telah habis terbakar

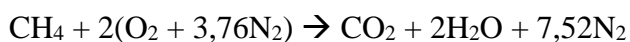
menjadi air, dan semua sulfur telah habis terbakar menjadi sulfur dioksida, dan semua elemen yang mudah terbakar lainnya telah teroksidasi. Contoh pembakaran sempurna:



Stokiometri adalah sebuah ilmu yang mempelajari mengenai keseimbangan reaksi antara jumlah reaktan dan produk dalam sebuah reaksi kimia. Dalam pembakaran stokiometri sangat penting agar dihasilkan pembakaran yang sempurna. Karena pembakaran menggunakan udara kering (yang terdiri dari 21% oksigen dan 78% Nitrogen), maka persamaan pembakaran dapat dicari dengan C_nH_m .



Persamaan diatas merupakan persamaan ideal sebuah pembakaran sempurna. Sebagai contoh untuk pembakaran metana (CH_4) maka stokiometrinya sebagai berikut.



2.3.1 Air Fuel Ratio (AFR) dan Equivalence Ratio (Φ)

Air Fuel Ratio (AFR) didefinisikan sebagai perbandingan massa udara dengan massa bahan bakar dalam proses pembakaran. Rasio ini dapat dicari dengan menggunakan basis molar (mol udara dibagi dengan mol bahan bakar) atau dengan basis massa (massa udara dibagi dengan massa bahan bakar).

$$\text{AFR}_m = \frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{bahan bakar}}} \quad (2-1)$$

Sumber: Wardana (2008)

$$\text{AFR}_n = \frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{bahan bakar}}} \quad (2-2)$$

Sumber: Wardana (2008)

Dimana:

AFR_m = *Air Fuel Ratio* berdasarkan massa

AFR_n = *Air Fuel Ratio* berdasarkan mol

M_{udara} = Massa udara

$M_{\text{bahan bakar}}$ = Massa bahan bakar

N_{udara} = Mol udara

$N_{\text{bahan bakar}}$ = Mol bahan bakar

Contoh menghitung AFR pada reaksi pembakaran metana dengan udara.

$$\text{AFR}_n = \frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{bahan bakar}}}$$

$$AFR_n = \frac{2(1+3,76)}{1} = 9,52$$

$$AFR_m = \frac{M \text{ udara}}{M \text{ bahan bakar}}$$

$$AFR_m = \frac{2(32+105,3)}{16} = 17,16$$

Equivalent ratio (Φ) adalah perbandingan dari nilai FAR (*Fuel Air Ratio*) yang tersedia (aktual) dengan nilai FAR (*Fuel Air Ratio*) stokiometri (teoritis).

$$\Phi = \frac{(Fuel/Air)_{actual}}{(Fuel/Air)_{stoich}} = \frac{AFR_{stoichs}}{AFR_{aktuals}} \quad (2-3)$$

Sumber: Wardana (2008)

Berdasarkan nilai *Equivalent ratio* dapat disimpulkan bahwa sebuah pembakaran mengalami kondisi sebagai berikut

Jika $\Phi > 1$ maka pembakaran *fuel rich* (kaya bahan bakar)

Jika $\Phi = 1$ maka pembakaran *mixture strength* (Pembakaran Sempurna)

Jika $\Phi < 1$ maka pembakaran *fuel lean* (miskin bahan bakar)

2.4 Klasifikasi Pembakaran

Jenis-jenis pembakaran ada beberapa jenis yaitu:

1. Dibedakan menurut pencampuran bahan bakar dan oksidator dibedakan menjadi *premix* dan difusi.
2. Dibedakan menurut jenis aliran pembakaran yaitu laminar dan turbulen.

Pembakaran difusi adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan pengoksida tidak bercampur secara mekanik, melainkan bercampur secara natural melalui proses difusi dalam ruang bakar (Wardana 2008). Sebagaimana difusi adalah proses perpindahan zat dari tekanan tinggi menuju tekanan yang lebih rendah. Pembakaran difusi merupakan pembakaran yang memanfaatkan perbedaan tekanan antara bahan bakar dan udara agar pembakaran dapat terus berlanjut. Perbedaan tekanan biasanya disebabkan oleh udara yang lebih dingin, sehingga tekanan dan densitasnya akan lebih besar daripada udara panas. Contoh pembakaran yang memakai prinsip difusi adalah kompor.

Pembakaran *Premix* adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan oksidator dicampur terlebih dahulu, lalu setelah mencapai stokiometri barulah dibakar sehingga pembakaran dapat berlangsung dan api dapat tetap menyala walau tanpa oksidator dari luar.

2.5 Pembakaran *Premix*

Nyala api *premix* didefinisikan memiliki keseimbangan adiabatik dimana temperatur pembakaran tertinggi dapat dicapai, antara temperatur api dan kecepatan pembakaran. Karena nyala api bergerak dengan kecepatan pembakaran yang khas, nyala api yang stabil mungkin didapat dengan melewati reaktan menuju pembakaran dengan kecepatan yang sama namun arah berlawanan. Untuk mendapat api yang stabil dapat dibantu dengan menambahkan alat lain ataupun *burner* yang berinteraksi secara lokal dengan aliran dan proses pembakaran. Nyala api *premix* hanya bisa didapat jika pada awalnya bahan bakar dan oksidan dicampur diantara batas komposisi terbakar.

Batas komposisi terbakar, terdapat 2 jenis, yaitu batas atas dan batas bawah. Jika bahan bakar yang mudah terbakar terus ditambahkan, maka pembakaran akan terjadi karena sudah mencapai batas bawah komposisi terbakar. Namun bila bahan bakar terus ditambahkan maka api akan padam karena sudah melewati batas atas komposisi terbakar. Beberapa hal yang mempengaruhi batas antara batas atas dan bawah antara lain adalah tekanan.

2.5.1 Stabilitas Nyala Api Laminer

Keseimbangan nyala api didapat dengan cara mengalirkan gas yang seimbang dan arah yang berlawanan dengan arah kecepatan pembakaran. Bisa juga didapat melalui peralatan tambahan atau *burner* yang menyediakan zona penstabil. Ada beberapa hal yang menyebabkan ketidakstabilan dalam *bunsen burner* yaitu:

1. Karena kehilangan kalor pada fasa gas: *reduced temperatur, no feedback*
2. Karena pendinginan pada dinding bunsen: *loss of heat*
3. Karena aliran reaktan: *flashback, blow off, turbulence, lift-off*

1. *flashback*

Flashback adalah ketika kecepatan pembakaran lebih cepat dari kecepatan campuran udara dan bahan bakar, sehingga nyala api kembali masuk dan merambat ke tabung pembakaran. *Flashback* biasanya terjadi jika aliran bahan bakar dikurangi atau ditutup secara tiba-tiba. Ketika kecepatan nyala api lebih cepat dari kecepatan aliran, perambatannya akan menyala menjauhi api. Sehingga pembakaran akan merambat ke selang dan menuju tabung.

2. *Lift-offx*

Lift-off adalah peristiwa keadaan nyala api tidak bersentuhan dengan bibir tabung permukaan, akan tetapi api akan menyala stabil di jarak tertentu dari permukaan tabung permukaan. Fenomena dari *lift off* berhubungan dengan nyala api laminar dan kecepatan

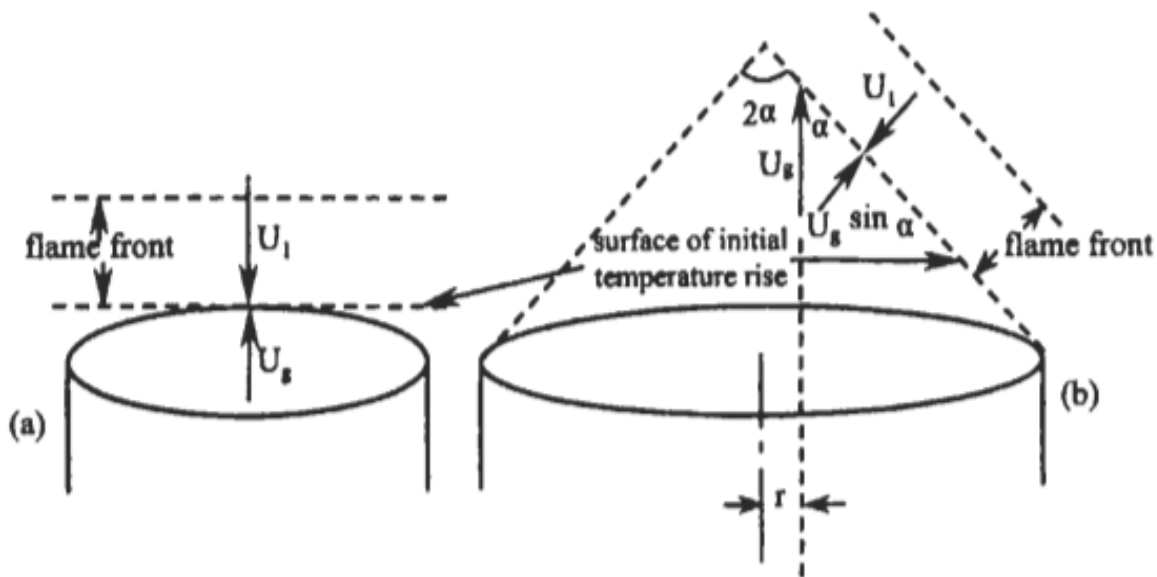
api yang sebanding. Pada saat keadaan ujung terbawah nyala api dekat dengan bibir tabung disebabkan oleh kecepatan aliran yang cukup rendah. Lalu jika kecepatan nyala api meningkat sampai ke batas kritisnya, ujung nyala akan menjauh dari ujung pembakaran dan nyala api akan terangkat, jika terus menerus terangkat maka api akan padam

3. *Blow-off*

Blow-off adalah keadaan dimana api padam dikarenakan kecepatan aliran yang lebih besar dari laju nyala api atau kecepatan pembakaran, bisa juga karena perubahan kecepatan secara mendadak. Kondisi ini memakan banyak bahan bakar dan dapat merusak peralatan seperti *nozzle*. Untuk menghindari fenomena *blow-off* maka *equivalence ratio* yang digunakan harus berada diatas *leaner limit*.

2.5.2 Kecepatan Nyala Api

Kecepatan nyala api laminar didefinisikan sebagai kecepatan dari permukaan depan api (*flame front*) yang relatif terhadap reaktan yang belum terbakar menuju ke permukaan.



Gambar 2.3 (a) Kecepatan nyala api laminar dan kecepatan reaktan (b) Aliran pada sudut α pada bagian depan api

Sumber: Mahallawy (2002:81)

Pada Gambar 2.3 dapat dilihat bahwa U_1 adalah kecepatan pembakaran api laminar, sedangkan U_g merupakan kecepatan reaktan. Jika U_1 lebih besar dari U_g maka api akan cenderung mendekati bibir; *bunsen* sehingga kecepatan keduanya akan sebanding. Namun jika kecepatan reaktan (U_g) lebih tinggi dari kecepatan pembakaran (U_1) maka api pada daerah sekitar bibir *bunsen* akan stabil dan mulai membentuk sudut, seperti pada Gambar 2.3(b). Sehingga didapat kecepatan api laminar dengan *bunsen burner* melalui perhitungan:

$$S_L = V_u \cdot \sin \alpha \quad (2-4)$$

Sumber: Mahallawy (2002)

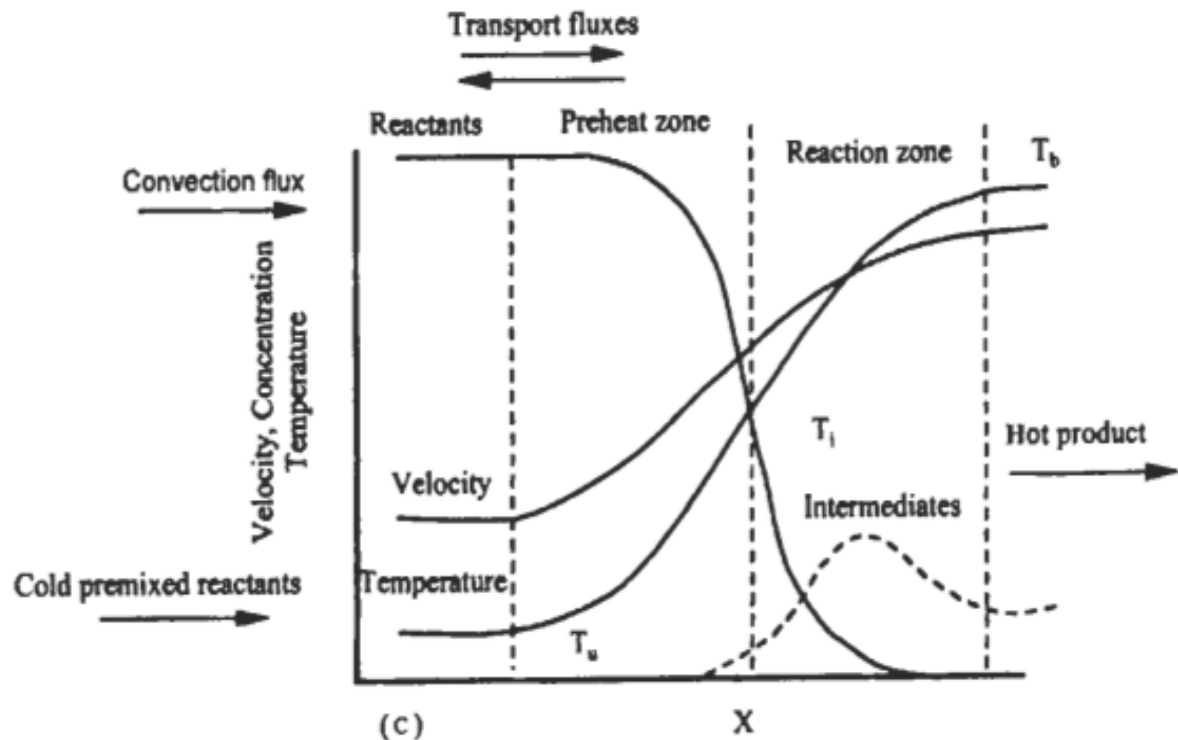
Dengan:

$S_L = U_1 =$ Kecepatan api laminar (cm/s)

$V_u = U_g =$ Kecepatan reaktan (cm/s)

$\alpha =$ Sudut api yang terbentuk ($^\circ$)

Nyala api dapat digambarkan dalam sebuah Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Struktur temperatur dan *heat release rate*
Sumber: Mahallawy (2002:81)

Pada Gambar 2.4 diatas terdapat 4 zona yaitu:

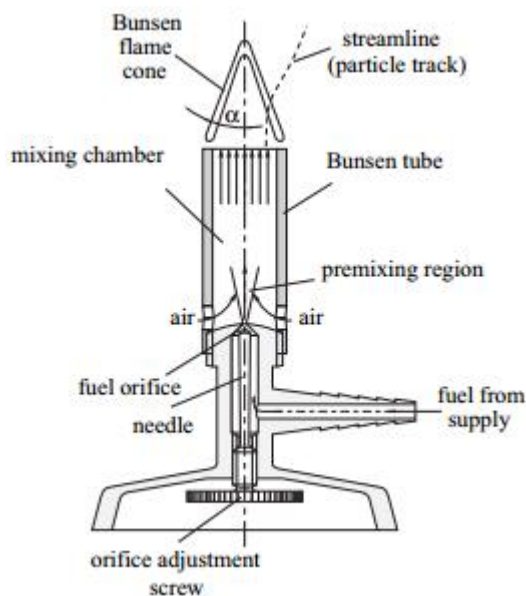
1. Zona Reaktan, merupakan zona dimana reaktan masih pada kondisi sama dengan reaktan dari *mixing chamber*.
2. Zona *Preheat*, pada zona ini temperatur reaktan belum mengalami pembakaran meningkat sampai pada suatu titik. Temperatur tersebut dapat berubah yang merupakan dampak dari temperatur api dan temperatur dinding *bunsen*.
3. Zona Reaksi, zona ini merupakan daerah tempat terjadinya pembakaran langsung dan sebagian besar energi kimia dilepaskan dalam bentuk panas.
4. Zona *Hot Product*, pada zona ini hasil pembakaran yang memiliki temperatur tinggi meninggalkan zona reaksi akibat dari densitasnya yang menurun setelah terjadi pembakaran.

2.5.3 Temperatur Nyala Api

Temperatur nyala api adalah temperatur dari gas ketika meninggalkan zona reaksi. Pada api *premix*, dikarenakan bahan bakar dan pengoksidasi dicampur dengan perhitungan komposisi serta keadaan temperatur dan keadaan lingkungan yang dapat diketahui, maka memungkinkan untuk menghitung suhu adiabatik dari properti termodinamik dari campuran aslinya. Untuk campuran stokiometri yang kebanyakan tersusun dari udara, nyala api berkisar diantara 2000K.

2.6 Bunsen Burner

Bunsen Burner adalah sebuah peralatan pembakaran untuk menghasilkan api laminar. Udara sebagai pengoksidasi bercampur dengan bahan bakar pada tabung dan kemudian dialirkan bersamaan menuju sisi atas *bunsen burner*. Di sisi atas *bunsen burner* akan terbentuk sebuah bentuk kerucut dengan hasil pembakarannya, berikut gambar dari *bunsen burner* pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Bunsen burner

Sumber: Peters Norbert (2010:54)

2.7 Aliran Fluida

Terdapat 3 macam aliran fluida yaitu laminar, transisi, dan turbulensi. Pada penelitian kali ini aliran fluida harus laminar agar terbentuk api laminar juga. Aliran fluida laminar bisa didapat dengan menghitung bilangan *reynolds*-nya. Bilangan *Reynolds* adalah bilangan tak berdimensi dalam mekanika fluida. Persamaan bilangan *reynolds* adalah:

$$Re = \rho \cdot v \cdot d / \mu \text{ atau } Re = V \cdot d / \nu \quad (2-5)$$

Sumber: Wardana (2008)

Dimana:

Re = Bilangan *reynolds*

V = Kecepatan fluida (m/s)

D = Diameter pipa (m)

μ = Viskositas absolut fluida dinamis (1 cp = 0,1g/dm s)

ρ = Densitas fluida (kg/m³)

ν = Viskositas fluida kinematis (km²/s)

Karena massa alir dan *flowcrate* juga berpengaruh pada aliran, maka rumus untuk massa alir dan *flow rate* sebagai berikut.

$$Q = V \cdot A \text{ atau } V = Q/A \quad (2-6)$$

Sumber: Wardana (2008)

$$\dot{m}v = \rho \cdot V \cdot A \text{ atau } \dot{m} = \rho \cdot Q \quad (2-7)$$

Sumber: Wardana (2008)

Pada aliran yang bertemu, *flow rate* dapat dihitung dengan persamaan:

$$\Sigma_{in}.Q = \Sigma_{out}.Q \text{ maka } V = (Q_1 + Q_n)/A \quad (2-8)$$

Sumber: Wardana (2008)

Dimana:

Q = *flow rate*/debit aliran fluida (m³)

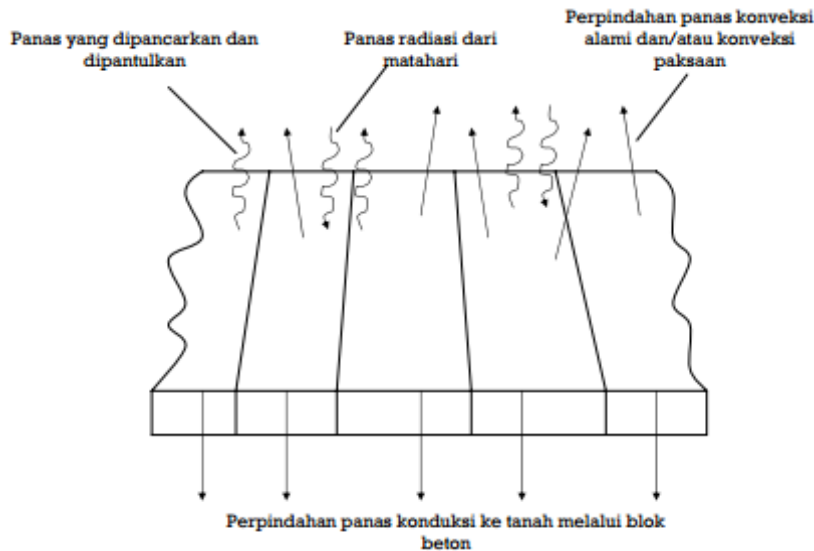
V = Kecepatan aliran fluida (m/s)

A = Luas penampang aliran fluida (m²)

ρ = kerapatan fluida (kg/m³)

2.8 Heat Transfer

Dalam sistem pembakaran terdapat 3 cara untuk kalor berpindah seperti di ilustrasikan pada Gambar 2.6, yaitu: konveksi, konduksi, radiasi.



Gambar 2.6 Macam-macam perpindahan panas

Sumber: Luqman Buchori (2009:18)

1. Konveksi adalah perpindahan panas melalui aliran dimana zat perantaranya ikut berpindah. Contoh dari perpindahan panas konveksi adalah gerakan air yang naik turun ketika dipanaskan, terjadinya angin darat dan angin laut. Untuk mencari besarnya perpindahan kalor secara konveksi dapat menggunakan rumus berikut.

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta t \quad (2-9)$$

Sumber: Luqman Buchori (2009)

Dimana:

Q = Perpindahan kalor (Watt)

h = Koefisien konveksi (watt/m²K)

A = Luas permukaan (m²)

Δt = Perbedaan temperatur (K)

2. Konduksi adalah perpindahan panas dimana zat perantaranya tidak ikut berpindah. Contoh dari perpindahan panas konduksi adalah knalpot motor yang menjadi panas, gelas yang menjadi panas saat diisi air panas, dan lain-lain. Untuk mencari besarnya perpindahan kalor secara konduksi dapat menggunakan rumus berikut.

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta t}{dx} \quad (2-10)$$

Sumber: Luqman Buchori (2009)

Dimana:

Q = Perpindahan kalor (Watt)

K = Konduktivitas thermal (watt/mK)

A = Luas permukaan (m²)

Δt = Perbedaan temperatur (K)

dx = Ketebalan (m)

3. Radiasi adalah perpindahan panas yang tidak membutuhkan zat perantara. Contoh dari perpindahan panas radiasi adalah panas dari api unggun, menjemur pakaian, dan lain-lain. Untuk mencari besarnya perpindahan kalor secara radiasi dapat menggunakan rumus berikut.

$$Q = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2-11)$$

Sumber: Luqman Buchori (2009)

Dimana:

Q = Perpindahan kalor (watt)

e = Emisifitas bahan

σ = Koefisien Stefan Boltzman ($5,672 \times 10^{-8} \text{ J/W/m}^2\text{K}^4$)

A = Luas permukaan (m^2)

T = Temperatur (K)

Perpindahan panas yang sering terjadi pada *bunsen burner* adalah konduksi dan konveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi saat panas api menjalar ke dinding *bunsen burner*, dan juga perpindahan panas ke *ring*. Perpindahan secara konveksi terjadi antara lingkungan dan *ring* serta *bunsen burner*.

2.9 Simulasi Numerik

Simulasi numerik merupakan salah satu metode dalam penelitian ilmiah dengan cara pemodelan kasus yang sedang diteliti kedalam perangkat lunak CAE (*Computer Aided Engineering*) berdasarkan persamaan matematik yang ada dalam kasus tersebut. CAE sendiri adalah suatu teknologi perangkat lunak (*software*) untuk mendukung seorang *engineer* dalam menyelesaikan persoalan-persoalan seperti analisis, simulasi, desain, manufaktur, perencanaan, diagnosis, maupun perbaikan di bidang keteknikan. Perusahaan perusahaan pengembang CAE yang produknya kerap digunakan saat ini diantaranya:

1. ANSYS, Inc.
2. ABAQUS, Inc.
3. ADINA R & D, Inc.
4. Autodesk, Inc.

Dalam hal ini untuk menyelesaikan simulasi numerik dari permasalahan yang telah dijelaskan di bagian sebelumnya dipilih CAE dari ANSYS, Inc. dengan *platform* CFD (*Computational Fluid Dynamic*) menggunakan Fluent. CFD merupakan salah satu alternatif untuk permasalahan mengenai komputasi fluida baik gas maupun cair yang berkaitan di

bidang keteknikan di samping penggunaan laboratorium, Trimulyono (2012). Secara umum tahapan dalam melakukan simulasi numerik menggunakan Fluent dibagi menjadi tiga, yaitu:

1. *Pre processing* (proses awal)
2. *Solution* (proses solusi)
3. *General post processing* (proses pembacaan hasil)

2.10 Computational Fluid Dynamic (CFD)

CFD merupakan ilmu yang mempelajari tentang analisa aliran fluida, perpindahan panas fenomena yang berhubungan dengannya seperti reaksi kimia dengan menyelesaikan persamaan matematika dan menggunakan bantuan simulasi komputer. Persamaan persamaan aliran fluida dapat dideskripsikan dengan persamaan differensial parsial yang tidak dapat dipecahkan secara analitis kecuali dengan kasus yang spesial. Sehingga kita membutuhkan suatu metode pendekatan untuk menentukan suatu hasil. Perbedaan tingkat akurasi eksperimen dengan CFD adalah jika data eksperimen, tingkat akurasi akan bergantung pada alat yang digunakan. Sedangkan akurasi dari solusi numerik, dalam hal ini adalah CFD bergantung pada kualitas diskretisasi yang digunakan. CFD disusun berdasarkan algoritma numerik yang mampu untuk mengatasi masalah aliran fluida. Komponen-komponen yang dibutuhkan dalam algoritma numerik adalah model matematika dan metode diskretisasi (Versteeg, 2007).

Langkah awal dalam menyusun algoritma numerik adalah model matematika. Model matematika digunakan untuk mendeskripsikan aliran fluida dengan menentukan persamaan differensial parsial dan kondisi batas dari suatu prediksi aliran fluida. Persamaan umum dari aliran fluida yang merepresentasikan model matematika didapatkan dari tiga prinsip utama, yaitu:

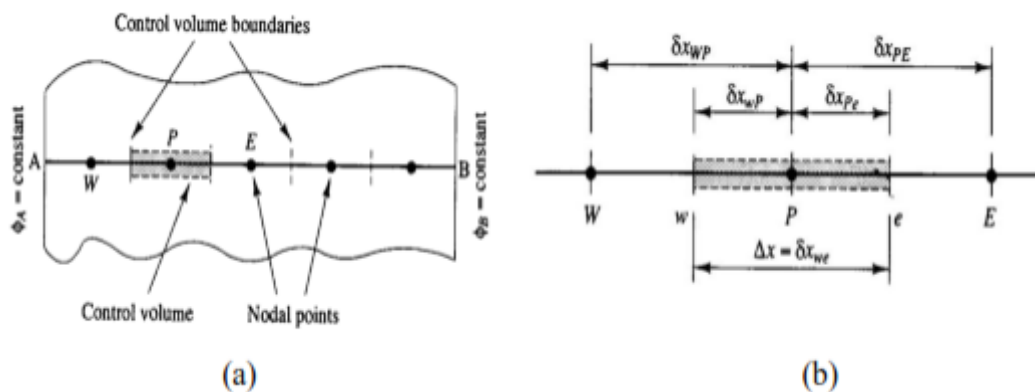
1. Hukum kekekalan massa (persamaan kontinuitas)
2. Hukum II Newton (persamaan momentum)
3. Hukum kekekalan energi (persamaan energi)

Setelah menentukan model matematika, kita harus memilih metode diskretisasi yang cocok dengan kata lain sebuah metode dari pendekatan persamaan differensial dengan sistem persamaan aljabar. Untuk menentukan sebuah solusi pendekatan numerik, kita harus menggunakan metode diskretisasi persamaan differensial dengan sistem persamaan aljabar yang dapat dipecahkan dengan komputer. Ada beberapa metode pendekatan, yaitu *finite difference method*, *finite element method*, dan *finite volume method*. Salah satu metode yang

sering digunakan dalam analisa CFD adalah *finite volume method* atau metode volume hingga.

Metode volume hingga mula-mula dikembangkan dari formulasi *special finite difference*. Metode volume hingga menggunakan bentuk integral dari persamaan umum untuk dilakukan diskretisasi persamaan. Solusi dibagi ke dalam sejumlah *control volume* yang berhingga, dan persamaan umum yang telah didiskretisasi diaplikasikan pada tiap *control volume*. Titik pusat tiap *control volume* merupakan nodal komputasi pada variabel yang dihitung.

Untuk kasus satu dimensi dapat digambarkan seperti Gambar 2.7 dibawah, merepresentasikan pembagian domain ke dalam *control volume* yang berhingga dan notasi yang biasa digunakan. Titik nodal diidentifikasi dengan P dan titik nodal didekatnya di sebelah barat dan timur diidentifikasi dengan W dan E. Titik permukaan *control volume* di sisi barat ditunjuk dengan w dan di sisi timur dengan e. Jarak antara nodal W dan P, dan antara P dan E diidentifikasi dengan δx_{WP} dan δx_{PE} . Sedangkan jarak antara titik permukaan *control volume* w dengan titik nodal P, dan antara titik nodal P dengan titik permukaan *control volume* e dinotasikan dengan δx_{wP} dan δx_{Pe} . Panjang *control volume* adalah δx_{we} .



Gambar 2.7 (a) Pembagian *control volume* 1 dimensi (b) Panjang *control volume*
Sumber: Versteeg (2007)

Persamaan yang mengatur diselesaikan melalui *control volume* diskrit seperti pada Gambar 2.7. Metode volume hingga menyusun kembali persamaan atur diferensial parsial, yaitu persamaan Navier Stokes, dalam bentuk konservatif dan kemudian didiskritkan persamaan baru. Hal ini menjamin konservasi fluks melalui *control volume* tertentu. Yang terbatas menghasilkan persamaan volume yang mengatur persamaan dalam bentuk.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint Q dV + \iint F dA = 0 \quad (2-12)$$

Sumber: Versteeg dan Malalasekera (2007:122)

Dimana Q adalah vektor variabel dilestarikan, F adalah vektor dari fluks, V adalah volume dari elemen kontrol volume, dan luas permukaan elemen volume kontrol. CFD menyajikan pemodelan dari suatu pembakaran dengan sangat baik. Proses pembakaran diatur oleh persamaan *transport* dasar untuk aliran fluida dan *heat transfer* dengan model-model tambahan untuk pembakaran kimiawi, perpindahan panas radiasi dan proses-proses penting lainnya. Adapun persamaan-persamaan yang digunakan dalam proses pemodelan pembakaran di CFD seperti persamaan kontinuitas, persamaan momentum, persamaan *transport species*, persamaan energi dan sebagainya. Persamaan kontinuitas sebagai berikut.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2-13)$$

Sumber: Versteeg dan Malalasekera (2007:363)

Dari persamaan tersebut perlu dicatat bahwa densitas dalam aliran pembakarannya variabel, dan tergantung pada tekanan, temperatur dan *species concentration*. Persamaan momentum sebagai berikut.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_i} + F_i \quad (2-14)$$

Sumber: Versteeg dan Malalasekera (2007:363)

Dimana adalah tegangan *viscous* dan F_i adalah *body force* (dimana sudah termasuk gravitasi):

$$t_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (2-15)$$

Sumber: Versteeg dan Malalasekera (2007:363)

Persamaan *transport equations* sebagai berikut.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \rho Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + \omega_k \quad (2-16)$$

Sumber: Versteeg dan Malalasekera (2007:363)

2.11 Pemodelan Pembakaran

Pembakaran adalah salah satu proses terpenting dalam dunia *engineering*, yang melibatkan aliran fluida turbulen, perpindahan panas, reaksi kimia, perpindahan panas radiasi dan proses fisik dan kimia kompleks lainnya. Aplikasi teknik yang umum termasuk mesin pembakaran internal, pembangkit tenaga listrik, *aero-engines*, turbin gas *combustors*, boiler, *furnaces*, dan peralatan pembakaran lainnya. Penting untuk dapat memprediksi aliran, suhu, hasil konsentrasi dan emisi spesies dari berbagai sistem pembakaran untuk disain dan perbaikan peralatan pembakaran, terutama dengan kekhawatiran saat ini tentang CO₂ dan tingkat emisi lainnya dan pengaruhnya terhadap

lingkungan. CFD sangat cocok untuk pemodelan pembakaran. Proses pembakaran diatur oleh persamaan transportasi dasar untuk aliran fluida dan perpindahan panas dengan model tambahan untuk kimia pembakaran, perpindahan panas radiasi dan sub-proses penting lainnya. Pembakaran adalah subjek yang kompleks, dan pemodelan pembakaran karenanya membutuhkan cukup banyak pengetahuan dan pengalaman.

Ada banyak jenis proses pembakaran. Pembakaran bahan bakar gas, pembakaran bahan bakar cair, pembakaran bahan bakar padat, *spray*, *pulverized*, dan lainnya. Untuk menggambarkan penerapan CFD maka akan difokuskan pada pembakaran gas. Untuk proses lain yang lebih kompleks maka harus dilakukan studi literatur lebih lanjut untuk mengetahui bagaimana CFD berhasil diterapkan di area seperti pembakaran semprot (Beck dan Watkins, 2004), pembakaran batubara bubuk (Lockwood et al., 1980, 1986), diesel dan spark ignition Mesin (Blunsdon et al., 1992, 1993; Henson dan Malalasekera, 2000) sebagai alat pemodelan.

Pembakaran gas melibatkan reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidan yang berada dalam fase gas. Ada dua kategori proses pembakaran gas: pembakaran *premix* dan pembakaran *non-premixed*. Misalnya, pembakaran dalam *spark ignition internal combustion engine* (mesin bensin) dapat dikategorikan sebagai pembakaran *premix*, karena bahan bakar (bensin) dicampur dengan udara sebelum pembakaran, yang terjadi setelah pengapian. Demikian pula *flame* di *bunsen burner* yang sudah dikenal juga merupakan pembakaran *premix*, karena udara telah dicampur dengan gas sebelum pembakaran. Sebaliknya, sebuah *jet flame* dimana bahan bakar memasuki udara ambien dan dibiarkan menyala adalah contoh nyala yang tidak bercampur. Campuran bahan bakar gas dengan aliran oksidan (udara) dan kemudian pembakaran terjadi dimana kondisinya tepat untuk pembakaran. *Non-premix flame* juga disebut difusi *flame* karena bahan bakar dan oksigen dimasukkan ke zona pembakaran di dua atau lebih aliran terpisah dan selanjutnya disatukan karena difusi dan pencampuran sebelum pembakaran.

Sebelum dan sesudah pembakaran, volume gas biasanya mengandung campuran spesies. Oleh karena itu penting untuk mempertimbangkan sifat dasar campuran tersebut. Fraksi mol spesies k dalam campuran didefinisikan sebagai:

$$X_k = \frac{n_k}{n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_N} = \frac{n_k}{n_{\text{total}}} \quad (2-17)$$

Sumber: Versteeg dan Malalasekera (2007:364)

Dalam aliran pembakaran, temperatur bergantung pada keadaan termodinamika dan komposisi dari (*mixture*) campuran. Beberapa model pembakaran tidak membutuhkan persamaan *transport* untuk mencari entalpi, semisal pada model *laminar flamelet*,

temperatur didapatkan dari *laminar flamelet library curves*. Energi kimiawi dilepaskan sebagai panas selama pembakaran dan hasil entalpi diperoleh dengan penyelesaian persamaan *transport*, berikut persamaan energi yang digunakan:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu}{\sigma h} \frac{\partial h}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{1}{s_{ck}} - \frac{1}{\sigma h} \right) \sum_{k=1}^N h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial p}{\partial t} + S_{rad} \quad (2-18)$$

Sumber: Versteeg dan Malalasekera (2007:364)

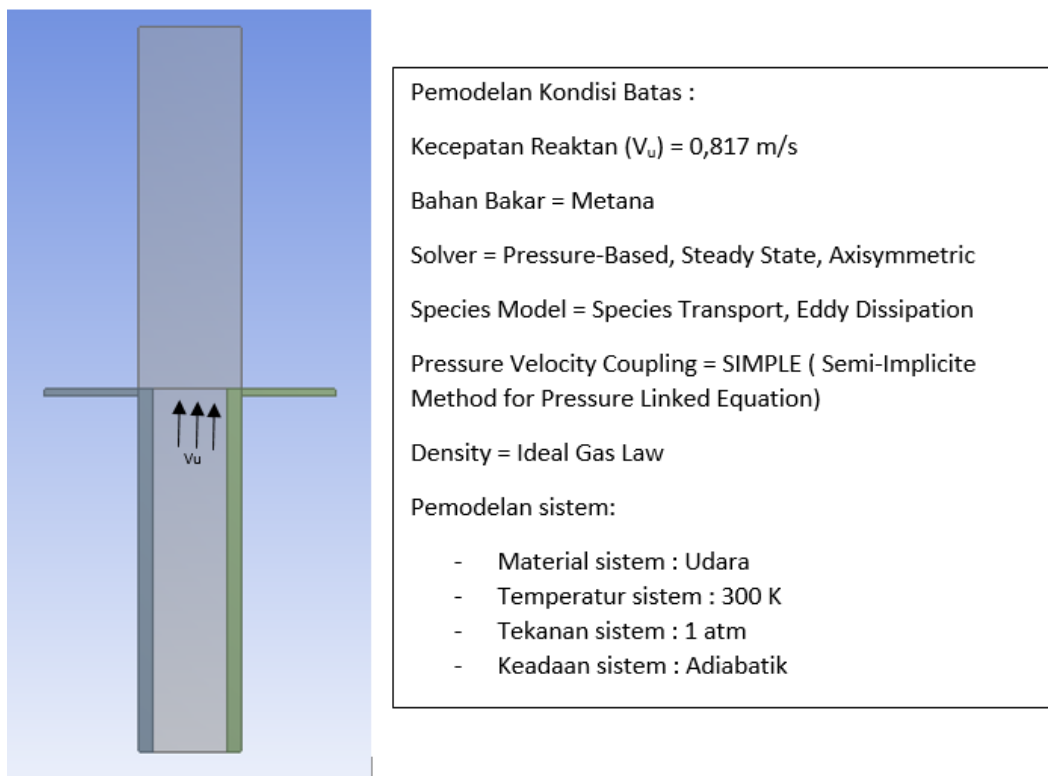
Untuk menyertakan *finite rate* dan ilmu kimia rinci dalam perhitungan pembakaran harus dipertimbangkan mekanisme rinci dan menyelesaikan banyak persamaan *species transport* dalam bentuk:

$$\frac{\partial}{\partial t} (r \rho u Y_k) + \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v Y_k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(r \rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial r} \right) + r \omega_k \quad (2-19)$$

Sumber: Versteeg dan Malalasekera (2007:374)

2.11.1 Pengaturan Kondisi Batas pada Pemodelan Pembakaran *Computational Fluid Dynamic*

Setelah melakukan proses *meshing* tahap selanjutnya adalah proses *setup*, seperti pada Gambar 2.8. Pada tahap ini ada beberapa kondisi yang akan diatur dan dipilih yaitu:



Gambar 2.8 Pemodelan kondisi batas

1. *Pressure-Based*

Penyelesaian *pressure-based* ini digunakan pada aliran yang bersifat subsonik. Pada penyelesaian *pressure-based* ini pada awalnya nilai dari *face pressure* pada batas sistem

sama dengan nilai pada *pressure outlet*. Ketika pilihan *average pressure specification* diaktifkan, maka nilai *face pressure* pada batas luar sistem dihitung dengan menggunakan persamaan.

$$P_f = 0,5 (P_c + P_e) + dp$$

$$dp = \left(p_c - \frac{\sum_{i=1}^{i=n \text{ face}} 0,5 (p_c + p_e) (\text{Area})}{\sum_{i=1}^{i=n \text{ face}} \text{Area}} \right)$$

Keterangan:

P_c = Tekanan *Interior Cell*

P_e = Tekanan Keluar

dp = Perbedaan nilai tekanan antara tekanan spesifik P_e dengan tekanan rata-rata akhir pada batas

2. *Steady State*

Perhitungan *steady state* ini digunakan ketika karakteristik perhitungan tidak mengalami perubahan berdasarkan waktu. Pada kondisi *steady* ini diasumsikan didapat setelah mencapai interval waktu yang relatif panjang. Pada kondisi *steady* ini tidak diperlukan informasi waktu secara terus menerus untuk mendeskripsikan karakteristik perhitungan. Banyak aplikasi aliran yang dapat diasumsikan berupa *steady* setelah awalnya berupa aliran yang *unsteady*, contohnya berupa aliran setelah beroperasinya mesin rotari.

3. *2D Axisymmetric*

Pada permasalahan dengan geometri berupa silinder atau geometri yang berotasi secara simetri, persamaan yang digunakan dapat disederhanakan menjadi persamaan bentuk dua dimensi dengan transformasi koordinat secara *axisymmetric*. Pada sumbu simetri, koefisien reaksi bernilai nol, digunakan sebagai referensi di mana koordinat, gradien, dan operator divergen akan bertransformasi. Dengan metode ini, persamaan ini akan disederhanakan menjadi bentuk dua dimensi, namun tetap menampilkan persamaan rotasi tiga dimensional.

4. *Eddy Dissipation*

Metode *eddy dissipation* ini digunakan karena dalam menggunakan metode *eddy dissipation* ini tidak diperlukan pemantik. dengan menggunakan metode *eddy dissipation* ini cukup sederhana dan praktis, karena memudahkan dalam pembuatan geometri karena tidak perlu menambahkan pemantik untuk menginisiasi terjadinya proses pembakaran dan juga dalam menentukan kondisi batas, tidak perlu menentukan kondisi batas untuk pemantik. Selain itu, *Eddy Dissipation* dapat digunakan pada

berbagai kasus, sehingga tidak perlu dilakukan penyesuaian pada tiap kasus. Berikut ini merupakan persamaan yang digunakan pada metode *eddy dissipation*.

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min R \left(\frac{Y_R}{v'_{i,r} M_{w,i} R} \right)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum p Y_p}{\sum_j^N v'^j \cdot r M_{w,j}}$$

Keterangan:

Y_P = Fraksi massa dari produk

Y_R = Fraksi massa dari reaktan

A = Konstanta Empiris yang Bernilai 4

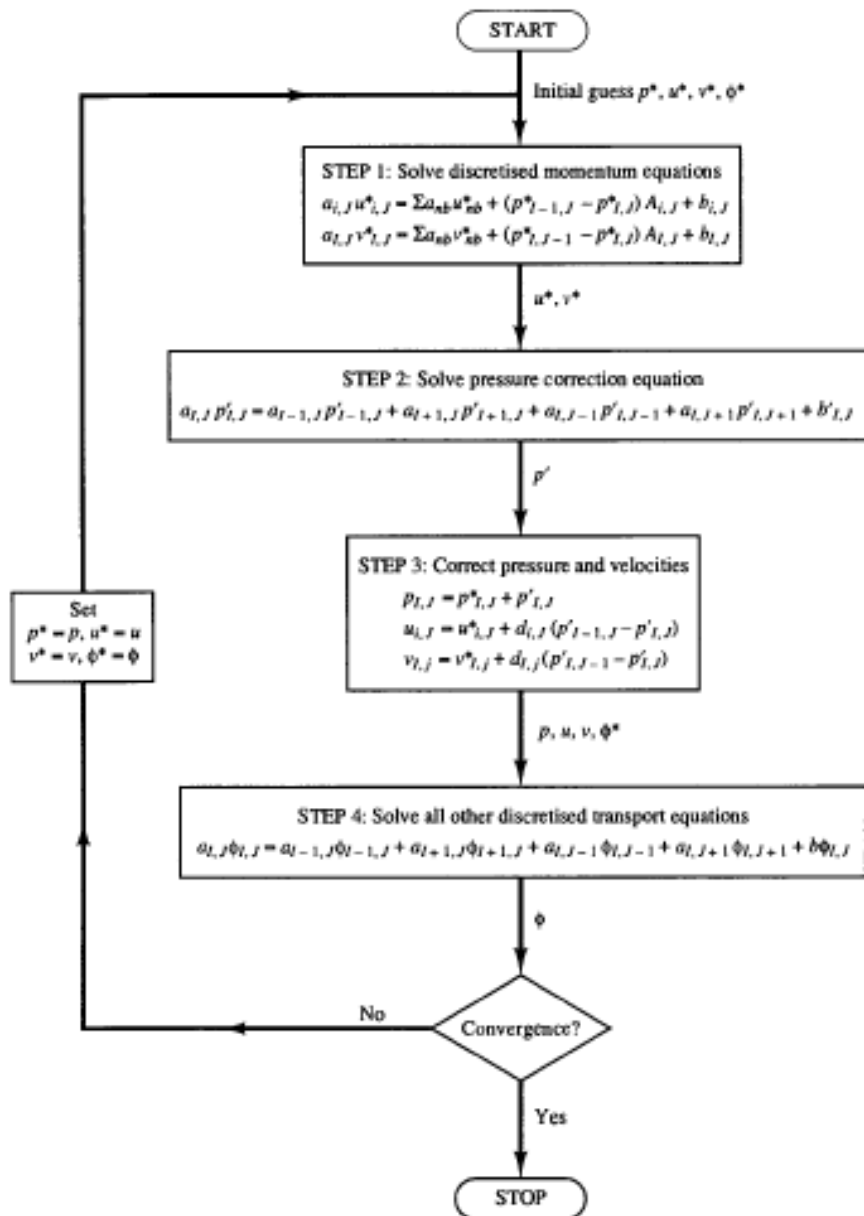
B = Konstanta Empiris yang Bernilai 0,5

5. SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation*)

Metode SIMPLE ini digunakan karena sangat sesuai dengan kondisi analisis pada simulasi yang dilakukan, yaitu analisis berupa analisis dua dimensi, dengan kondisi aliran tunak, dan laminar. Selain itu algoritma dari SIMPLE ini lebih sederhana dibandingkan dengan metode lainnya sehingga proses perhitungan dapat berlangsung lebih cepat dibandingkan metode lainnya. Berikut ini adalah algoritma dari metode SIMPLE:

- a. Membagi persamaan ke dalam bentuk yang lebih kecil
- b. Menyelesaikan persamaan tekanan terkoreksi
- c. Mengkoreksi tekanan dan kecepatan
- d. Menyelesaikan persamaan lain yang telah dibagi ke dalam bentuk kecil tadi

Algoritma tersebut akan mengalami pengulangan secara terus menerus (iterasi) hingga proses perhitungan yang dilakukan telah konvergen. Gambar 2.9 berikut menunjukkan diagram alir dari metode SIMPLE.



Gambar 2.9 Diagram alir metode SIMPLE

2.12 Hipotesis

Karakteristik nyala api pada pembakaran *bunsen burner* dengan tambahan *ring* akan berbeda dikarenakan adanya *ring*. *Ring* tersebut akan melakukan perpindahan panas secara konduksi. Sehingga temperatur nyala api akan semakin kecil jika diameter *ring* semakin besar. Tinggi api juga akan berpengaruh terhadap berkurangnya temperatur suhu, dimana semakin kecil suhu makan api akan semakin tinggi, karena suhu api yang rendah cenderung terhempas oleh aliran reaktan. Kecepatan api laminar akan cenderung naik, dikarenakan tinggi api yang meningkat sehingga sudut api yang terbentuk menurun.

