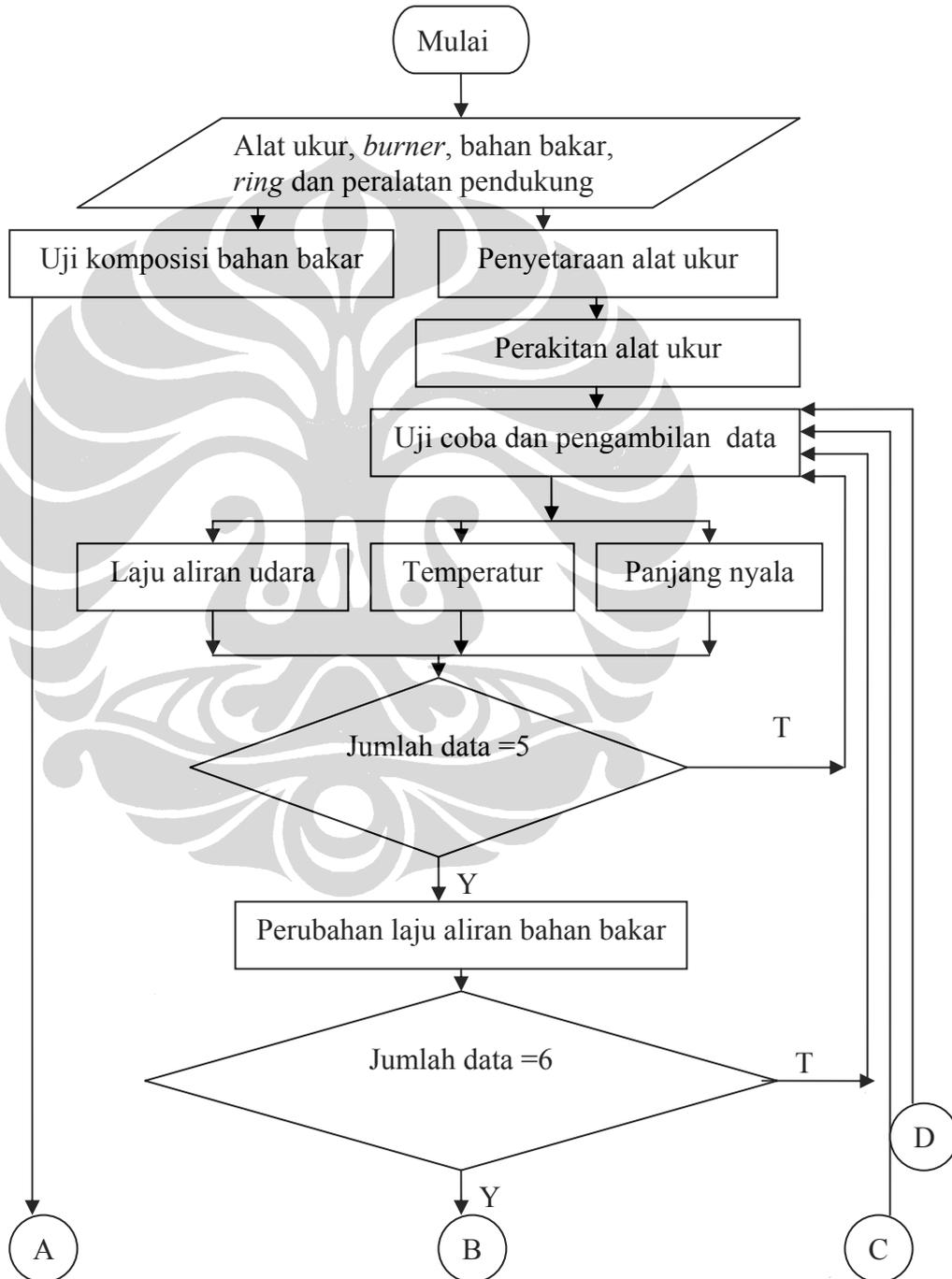


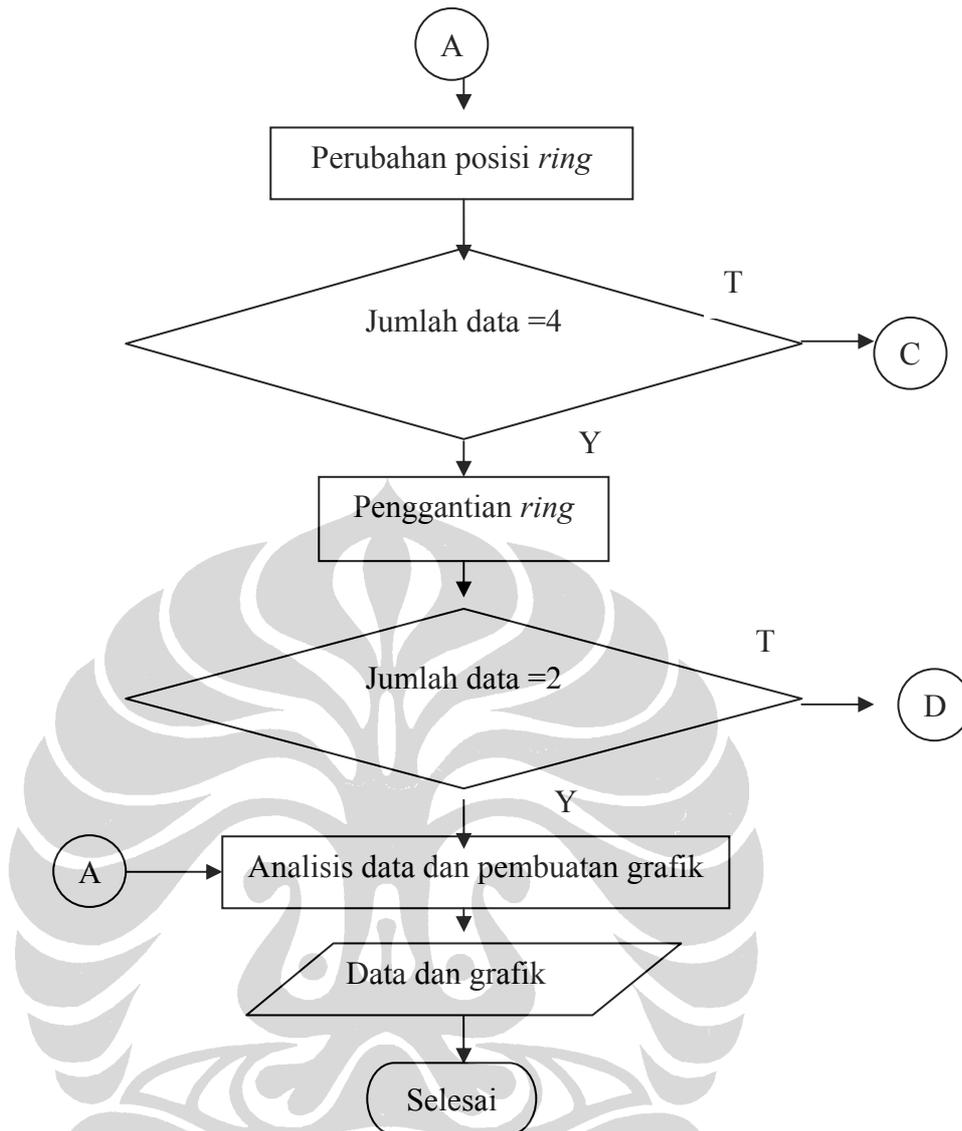
### BAB 3

### METODE PENELITIAN

Penelitian fenomena *flame lift-up* dilaksanakan secara eksperimen dan teoritis. Eksperimen dilaksanakan di laboratorium dengan langkah-langkah seperti pada diagram alir Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Langkah Eksperimental



Gambar 3.1. (Sambungan)

Fenomena *flame lift-up* diteliti dengan menggunakan bahan bakar gas propana yang berasal dari sejenis refrigeran hidrokarbon yaitu Hycool HCR-22 dengan komposisi 98% propana seperti ditampilkan pada Lampiran 1.

### 3.1 Peralatan Penelitian

#### 3.1.1 Bunsen *Burner*

Alat utama yang digunakan pada penelitian ini adalah Bunsen *Burner Flame Propagation and Stability Unit* P.A. Hilton LTD C551, yang dilengkapi dengan *flowmeter* penunjuk aliran udara dan gas dengan indikator dalam satuan

cm (*centimeter*) dan dapat dibaca langsung untuk pengambilan data. Alat ini dilengkapi dengan fan motor AC dan sekering pengaman 2 A, 220 V.

### 3.1.2 Tabung Pembakar (*Barrel*)

Tabung pembakar yang digunakan pada penelitian ini memiliki diameter 14 mm dan panjang 385 mm

### 3.1.3 *Orifice Flowmeter*

Pengukuran laju aliran udara dilakukan juga dengan menggunakan manometer *orifice* yang disetarakan juga dengan *wet gas meter*

### 3.1.4 *Ring Stabilizer*

*Ring Stabilizer* yang digunakan adalah dari dua jenis material yakni *ring stainless steel* AISI 304 dan keramik dengan bahan dasar kaolin. *Ring* AISI 304 divariasikan diameter dalamnya yakni 7 mm, 10 mm dan 14 mm dengan diameter luar yang sama yakni 30 mm dan tebal 5 mm seperti pada Gambar 3.2



Gambar 3.2. *Ring* AISI 304 variasi diameter dalam  
Sedangkan *ring* keramik dibuat hanya 1 yakni diameter dalam 10 mm diameter luar 30 mm dan tebal 5 mm.

### 3.1.5 Termokopel dan Data logger

Termokopel yang dipergunakan adalah termokopel 200  $\mu$ m Ni-Cr tanpa koreksi radiasi dan dilengkapi dengan data logger Fluke.

### 3.1.6 *Infra Red Thermograph* dan *Thermograph Infra View*

Khusus untuk mengukur permukaan *ring*, ujung *burner* dan panjang nyala dipergunakan juga kamera *Infra Red Thermograph*. Sedangkan untuk pengukuran temperatur maksimum nyala api dipergunakan *Thermograph Infra View*. Kedua alat ini telah dilengkapi dengan perangkat lunak pengolah citra dan pemroses data sehingga hasil pengukuran dapat disimpan langsung di komputer. Penyetaraan kedua alat ukur ini telah dilakukan oleh pemasok.

### 3.1.7 Peralatan Pendukung

Peralatan pendukung terdiri dari:

1. *Pressure Regulator*, alat pengatur tekanan gas yang masuk ke dalam rotameter dan dibatasi sebesar 2,5 bar.
2. Pemantik api gas sistem magnet.
3. *Ring Adjuster* untuk mengatur ketinggian *ring* yang dilengkapi dengan mistar.
4. Mistar baja untuk pengukuran tinggi nyala api.
5. Kamera digital untuk pengambilan gambar fenomena nyala api
6. *Hygrometer* untuk mengukur temperatur dan juga *Relative Humidity* ruangan saat pengambilan data.

## 3.2 Penyetaraan *Flowmeter* dan Termokopel

Sebelum dirangkai alat ukur disetarakan terlebih dahulu dengan alat ukur standar. *Flowmeter* yang terdapat pada unit P.A. Hilton memiliki skala baca dalam cm yang dapat dibaca langsung dalam percobaan, tetapi dalam pengolahan data, ukuran dalam cm tersebut harus dikonversikan terlebih dahulu menjadi satuan kapasitas aliran dalam  $\frac{m^3}{s}$ .

Alat yang digunakan untuk menyetarakan *flowmeter* atau rotameter ini yaitu *Type-WE-25 Wet Gas Meter*. Alat ini memiliki temperatur maksimum 60 °C dan tekanan maksimum 1000 mmH<sub>2</sub>O. *Burner* ini memiliki volume 5 L, jadi jika jarum besar melakukan satu putaran maka telah mengalirkan 5 L cairan pengisi. Laju aliran gas yang diukur dapat diketahui dengan mencatat waktu tempuh aliran gas tersebut dalam melakukan satu putaran atau sebesar 5 L.

Langkah-langkah penggunaan *wet gas meter* dilakukan sesuai dengan pedoman penggunaan alat tersebut terutama mengenai penempatan, pengaturan ketinggian cairan, pengeringan dan pemeriksaan kebocoran.

### 3.2.1 Penyetaraan Laju Aliran Gas Propana dan Udara

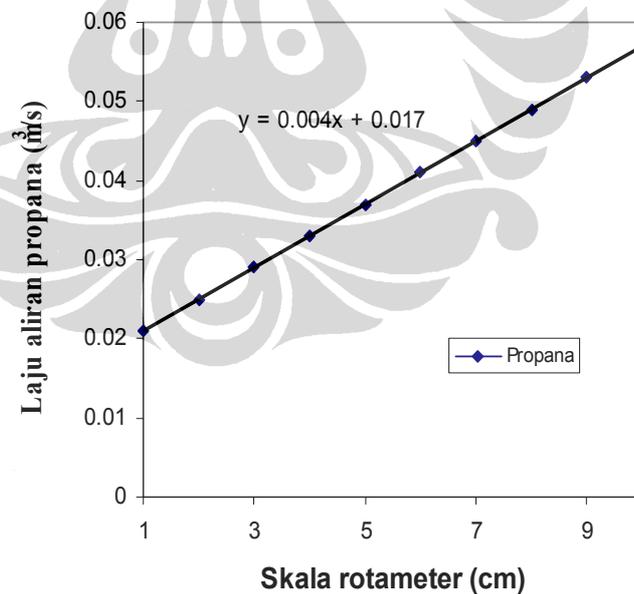
Penyetaraan laju aliran gas propana dilakukan dengan mengalirkan gas melalui rotameter pada skala 1 cm dan. Kemudian dialirkan ke *wet gas meter* seperti pada Gambar 3.3 dan diukur kapasitas aliran gas dengan mencatat waktu

yang dibutuhkan untuk volume gas yang melalui *wet gas meter*. Penyetaraan dilakukan dengan kenaikan skala rotameter 1 cm. Hasil pengukuran ditampilkan dalam bentuk grafik penyetaraan pada Gambar 3.4.

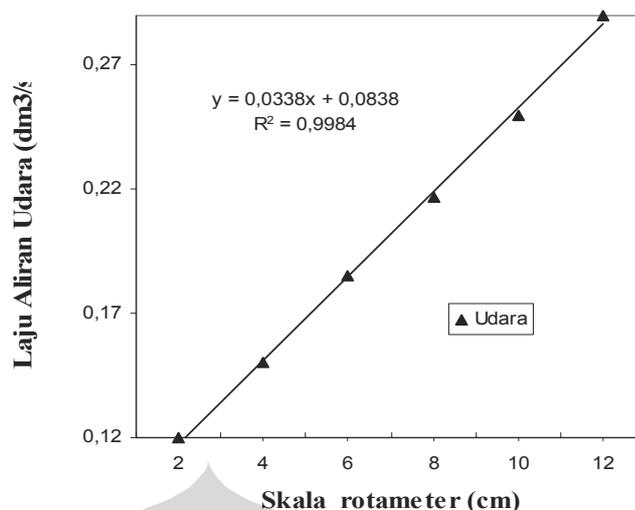


Gambar 3.3. Penyetaraan Rotameter dengan *Wet Gas Meter*

Penyetaraan laju aliran udara dilakukan dengan langkah yang sama namun dengan kenaikan skala rotameter 2 cm dan hasil pengukuran ditampilkan dalam bentuk grafik penyetaraan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.4. Grafik Penyetaraan Laju Aliran Propana



Gambar 3.5. Grafik Penyetaraan Laju Aliran Udara

### 3.2.2 Penyetaraan Termokopel Tipe-K dengan Termometer standar

Pengukuran dengan termokopel Tipe K dilakukan dengan pembacaan pada Data Logger Fluke yang masing-masing memiliki 2 kanal untuk pembacaan T1 dan T2. Penyetaraan termokopel Ni-Cr atau Tipe-K dilakukan dengan mengukur temperatur air menggunakan termometer air raksa sebagai pembandingan atau standarnya. Kabel termokopel tipe-K bersamaan dengan thermometer standar dicelupkan ke dalam air yang dipanaskan, kemudian hasil pembacaan termokopel dibuat penyetaraannya dengan hasil pembacaan thermometer yang ditampilkan pada Gambar 3.6. dan 3.7.

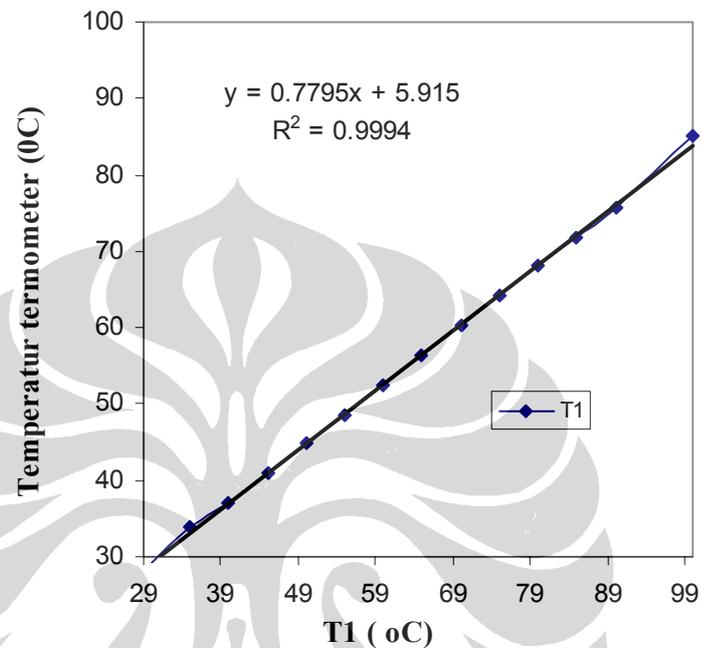
Setelah alat ukur disetarakan penelitian dilakukan dengan merangkai seluruh peralatan dan alat ukur. Pengukuran temperatur *ring*, ujung *burner* dan panjang nyala menggunakan *Infra Red Thermograph* dilakukan dengan merangkainya seperti skema Gambar 3.8. Demikian pula pengukuran temperatur maksimum nyala api dengan menggunakan *Thermograph Infra View*.

Sedangkan pengukuran temperatur nyala menggunakan termokopel dilakukan seperti pada Gambar 3.9.

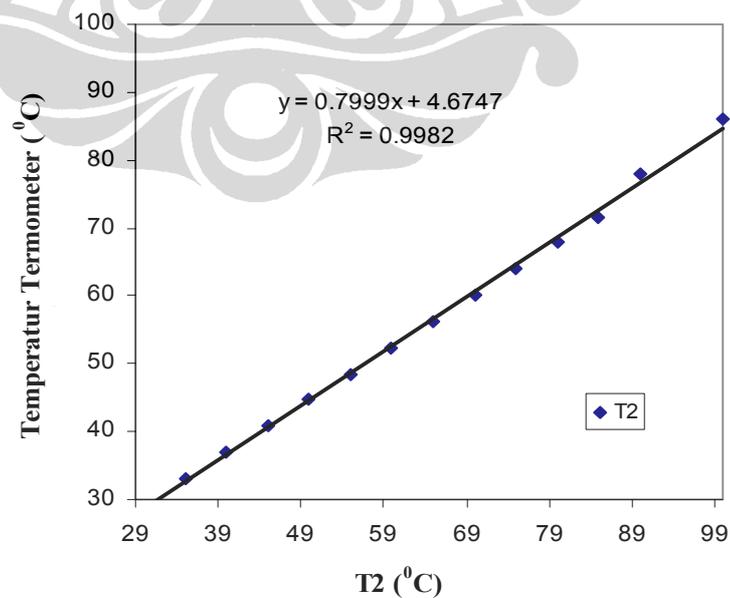
### 3.3 Metode Pengambilan Data

Percobaan dilakukan pada dua kondisi yaitu tanpa menggunakan *ring* dan dengan menggunakan *ring*. Percobaan tanpa *ring* bertujuan untuk menentukan daerah kestabilan nyala gas propana dan temperatur ujung *burner*

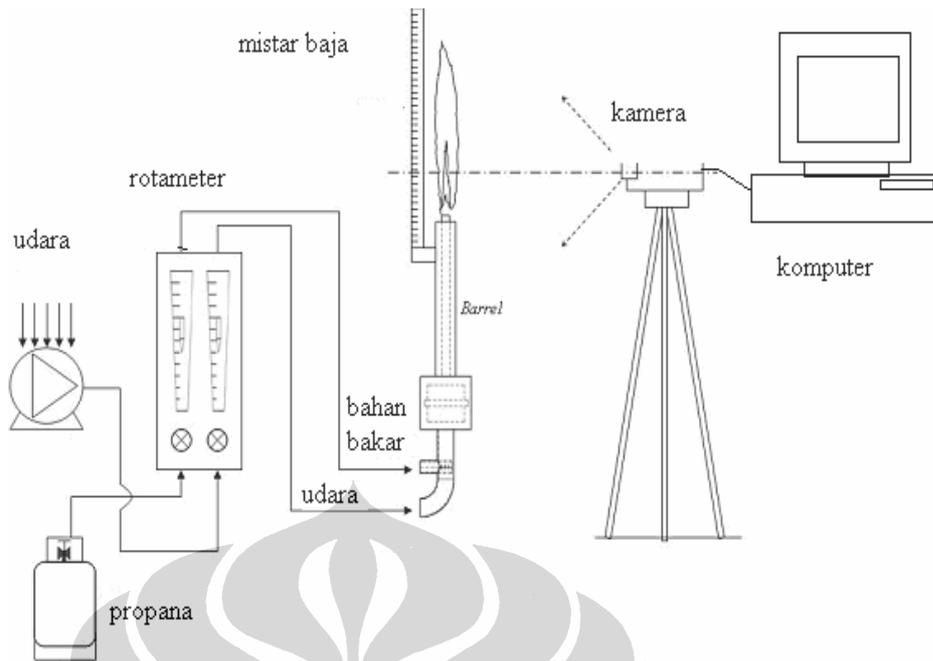
pada kondisi nyala tepat di mulut *burner*. Sedangkan percobaan menggunakan *ring* untuk menentukan parameter terjadinya fenomena flame *lift-up* seperti temperatur *ring*, temperatur ujung *burner*, kestabilan nyala api *lift-up* serta panjang nyala setelah *lift-up*.



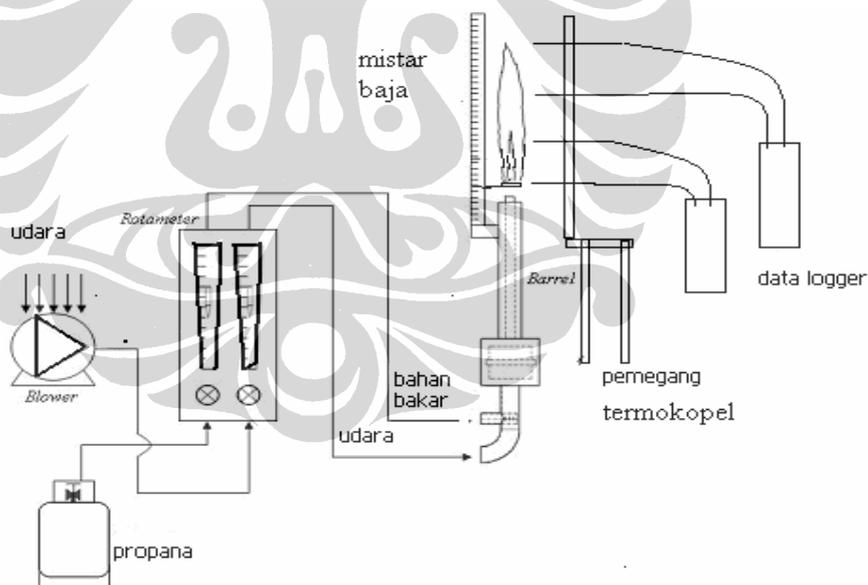
Gambar 3.6. Grafik Penyetaraan Temperatur T1



Gambar 3.7. Grafik Penyetaraan Temperatur T2



Gambar 3.8. Skema Penelitian Menggunakan *Infra Red Thermograph* dan *Thermograph InfraView*

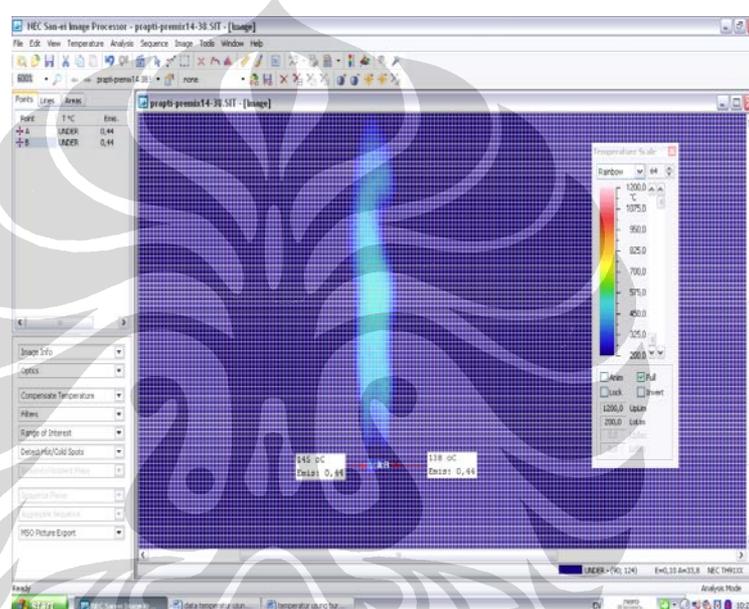


Gambar 3.9. Skema Pengukuran Temperatur Nyala Menggunakan Termokopel

### 3.3.1 Percobaan Tanpa Menggunakan *Ring*

Setelah peralatan dan alat ukur terpasang seperti skema Gambar 3.8 dan Gambar 3.9 namun tanpa *ring* dilakukan uji coba dan persiapan lembar pengambilan data yang sesuai. Pengukuran *yellow tipping*, *flash back* dan *lift-off*

atau *blow off* dan pengukuran temperatur ujung *burner* dilakukan dengan mengatur laju aliran udara pada laju aliran gas yang tetap. Pengukuran temperatur ujung *burner* dilakukan dengan termokopel dan *Infra Red Thermograph*. Percobaan diulangi pada kenaikan laju aliran gas skala 0,5 cm pada rotameter. Salah satu citra hasil pengukuran temperatur ujung *burner* menggunakan *Infra Red Thermograph* ditampilkan pada Gambar 3.10. Nilai emisivitas disesuaikan dengan material *burner* yakni *stainless steel* atau baja tahan karat dengan emisivitas 0,44.



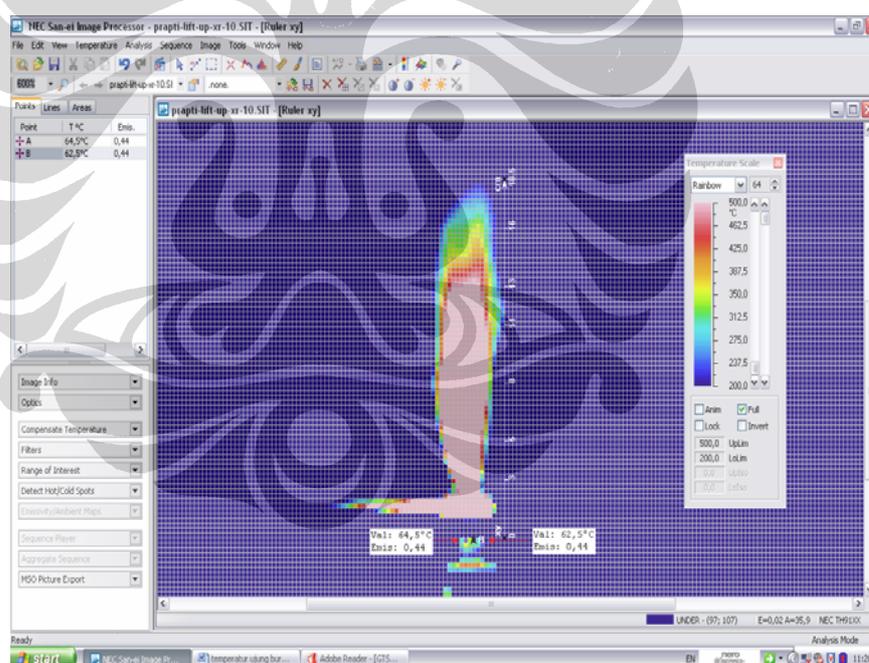
Gambar 3.10. Citra Pengukuran Temperatur Ujung *Burner*

### 3.3.2 Percobaan dengan Menggunakan *Ring*

Setelah peralatan dan alat ukur terpasang seperti skema Gambar 3.8 dan Gambar 3.9 dan *ring* yang sesuai telah terpasang secara konsentris pada jarak tertentu dari ujung *burner* dilakukan uji coba dan persiapan lembar pengambilan data yang sesuai. Pengukuran saat *lift-up*, temperatur *ring*, temperatur ujung *burner*, temperatur maksimum nyala, panjang nyala dan *blow off* dilakukan dengan mengendalikan laju aliran udara pada laju aliran gas tertentu. Saat terjadinya *lift-up* yakni pangkal nyala mulai terangkat ke *ring* laju aliran udara yang ditunjukkan skala pada rotameter dicatat dan panjang nyala dari pembacaan pada mistar baja dicatat. Saat bersamaan juga nyala dipotret menggunakan kamera digital dan citra disimpan dengan memotret menggunakan kamera *Infra Red*

*Thermograph*. Demikian pula pengukuran temperatur maksimum nyala api menggunakan *Thermograph Infra View*. Temperatur ujung *burner* dan temperatur *ring* diukur pula menggunakan thermokopel type K. Laju aliran udara dinaikkan perlahan untuk mencapai kondisi *blow off* dan laju aliran udara yang terbaca pada skala rotameter dicatat. Percobaan diulangi pada kenaikan laju aliran gas 1 cm kemudian diulangi kembali pada kenaikan jarak *ring* 0,5 cm. Keseluruhan percobaan dengan *ring* ini dilakukan kembali dengan diameter dalam *ring* yang berbeda kemudian diulangi kembali dengan jenis material *ring* yang berbeda.

Salah satu citra pengukuran ujung *burner*, temperatur *ring* dan panjang nyala menggunakan perangkat lunak pengolah citra ditampilkan pada Gambar 3.11. Sedangkan hasil pengukuran temperatur nyala maksimum menggunakan *Thermograph Infra View* adalah berupa lembaran kumpulan data seperti pada Gambar 3.12.



Gambar 3.11. Citra Pengukuran Temperatur dan Panjang Nyala

Dalam pengukuran suhu *ring*, besaran yang digunakan adalah  $^{\circ}\text{C}$ . Penelitian ini menetapkan nilai aliran dari gas adalah sebesar 0,5, 1, 1,5, dan 2 cm. Penempatan posisi *ring* adalah pada ketinggian 10, 20 dan 30 mm, di atas ujung *burner*. Aliran udara dicatat pada saat terjadinya fenomena *lift-up* dan diukur tinggi nyala api *premix* dari ujung *burner*.

04/02/08		Sensor 1	
Time	Tobj °C	Tint °C	
8:42:29 PM	908.5	30.3	
8:42:30 PM	908.5	30.3	
8:42:31 PM	908.7	30.3	
8:42:32 PM	909.3	30.3	
8:42:33 PM	909.8	30.3	
8:42:34 PM	910.0	30.3	
8:42:36 PM	909.9	30.3	
8:42:37 PM	910.4	30.3	
8:42:38 PM	910.8	30.3	
8:42:39 PM	911.1	30.3	
8:42:40 PM	911.0	30.3	
8:42:41 PM	911.0	30.3	
8:42:42 PM	910.3	30.4	
8:42:43 PM	909.8	30.3	
8:42:44 PM	909.8	30.3	
8:42:45 PM	910.0	30.3	
8:42:46 PM	910.0	30.3	
8:42:47 PM	909.3	30.3	
8:42:48 PM	907.9	30.4	
8:42:49 PM	907.5	30.4	
8:42:50 PM	907.7	30.4	
8:42:51 PM	907.0	30.4	
8:42:52 PM	907.1	30.3	
8:42:53 PM	906.5	30.3	
8:42:54 PM	907.3	30.3	
8:42:55 PM	908.3	30.3	
8:42:56 PM	907.8	30.3	
8:42:57 PM	908.2	30.4	
8:42:58 PM	908.2	30.3	

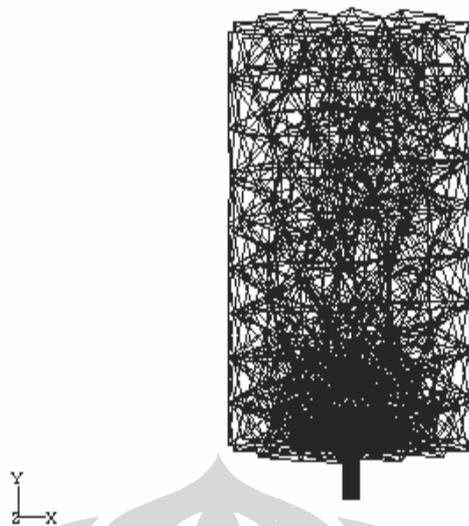
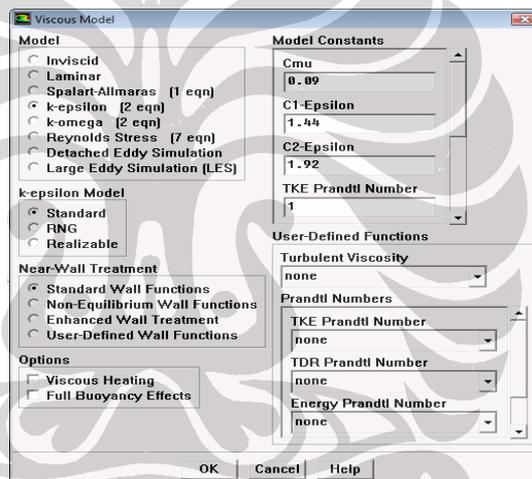
Gambar 3.12. Tampilan Data Hasil Pengukuran dengan *Thermograph Infra View*

### 3.4 Simulasi dengan Perangkat Lunak

Simulasi CFD dilakukan menggunakan perangkat lunak komersial Fluent 6.2 untuk mengetahui medan aliran melewati *ring* serta distribusi temperatur pada *ring*. Konfigurasi *burner* dibuat dengan perangkat lunak Solidwork. Sedangkan proses *meshing* menggunakan Gambit. Simulasi dilakukan dengan konfigurasi *burner* Bunsen dengan posisi *ring* 1, 2 dan 3 cm dari ujung *burner* untuk diameter dalam *ring* 0,7, 0,1, dan 1,4 cm. Parameter input yakni fraksi massa propana dan kecepatan campuran disesuaikan dengan tabel hasil eksperimen.

Sesuai dengan langkah-langkah yang disusun berurutan pada pilihan menu yang tersedia dari kiri ke kanan pada tampilan jendela utama Fluent dilakukan pemeriksaan *grid*, penentuan skala satuan dan penampilan *grid* seperti pada Gambar 3.13.

Model penyelesaian yang dipilih adalah turbulensi  $k-\epsilon$  dengan  $k$  adalah energi kinetik dan  $\epsilon$  adalah laju disipasi. Koefisien-koefisien pada persamaan ini antara lain  $C_{\mu}$  adalah 0,09,  $C_{1,\epsilon}$  adalah 1,44 dan  $C_{2,\epsilon}$  adalah 1,92 [69] seperti pada tampilan Gambar 3.14. Bilangan Schmidt untuk propana ditetapkan 1,366 [22].

Gambar 3.13. Tampilan *Grid*

Gambar 3.14. Tampilan Aktivasi Model Pengaruh Viskositas

Penentuan konstanta-konstanta tersebut disesuaikan dengan Bilangan Reynolds yang cukup tinggi yakni diatas 50.000. Persamaan *species transport* diaktifkan dengan pilihan reaksi volumetris dan jenis reaksi adalah *eddy dissipation rate* [70].

Jenis dan sifat material dapat dipilih dari *data base* Fluent maupun didefinisikan dengan menginputkan sifatnya. Penentuan material fluida untuk simulasi *species transport* adalah *mixture-material*, yang merupakan campuran dari beberapa spesies yakni untuk kondisi inlet adalah [71]:

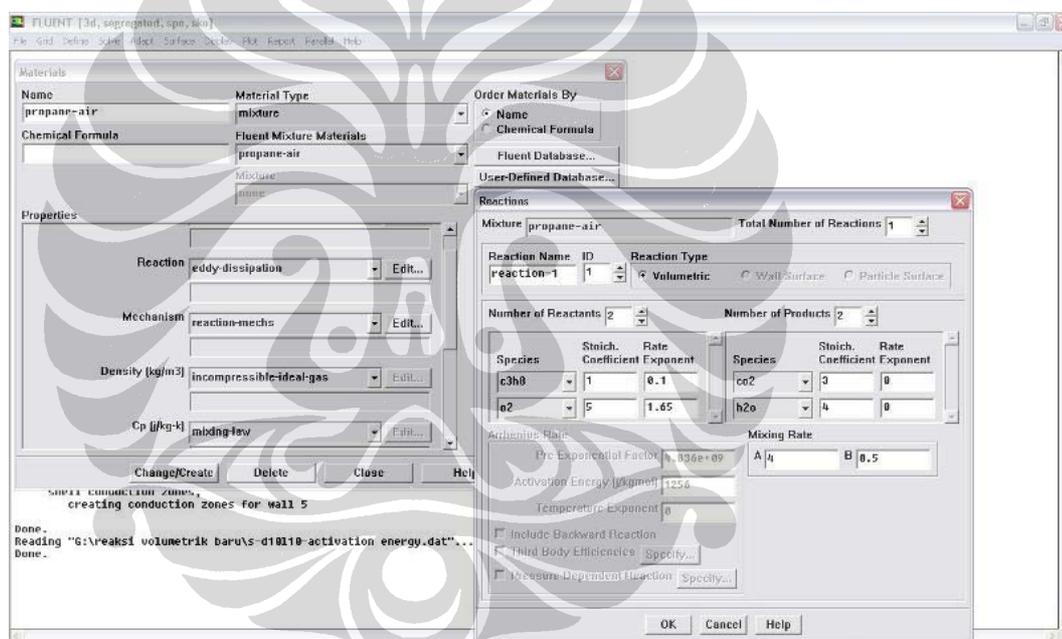
O<sub>2</sub> dengan massa jenis adalah 1,299 kg/m<sup>3</sup>, koefisien panas spesifik, Cp adalah 919,31 J/kg.K dan viskositas adalah 1,919 10<sup>-5</sup> kg/ms

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> dengan massa jenis adalah 1,82 kg/m<sup>3</sup>, koefisien panas spesifik, Cp adalah 1549 J/kg.K dan viskositas adalah 8 10<sup>-6</sup> kg/ms

Sedangkan untuk kondisi outlet adalah:

1. CO<sub>2</sub> dengan massa jenis adalah 1,787 kg/m<sup>3</sup>, Koefisien panas spesifik, Cp adalah 840,37 J/kg.K dan viskositas adalah 1,37 10<sup>-5</sup> kg/ms
2. H<sub>2</sub>O dengan massa jenis adalah 999 kg/m<sup>3</sup>, koefisien panas spesifik, Cp adalah 4640 J/kg.K dan viskositas 1,86 10<sup>-5</sup> kg/ms

Jenis reaksi yang digunakan adalah mekanisme 1 tahap seperti pada tampilan Gambar 3.15.



Gambar 3.15. Tampilan Jenis Reaksi yang Dipilih

Sedangkan jenis dan sifat bahan padat (*solid*) untuk *ring* dipilih baja (*steel*) dari *data base* Fluent dan ditentukan pula sifat bahan keramik Sifat bahan-bahan padat tersebut adalah [72]:

- [1] Baja dengan massa jenis adalah 8020 kg/m<sup>3</sup>, koefisien panas spesifik, Cp adalah 478 J/kg.K dan konduktivitas panas 14,9 W/m.K
- [2] Keramik dengan massa jenis adalah 2325 kg/m<sup>3</sup>, koefisien panas spesifik, Cp adalah 960 J/kg.K dan konduktivitas panas 1,3 W/m.K

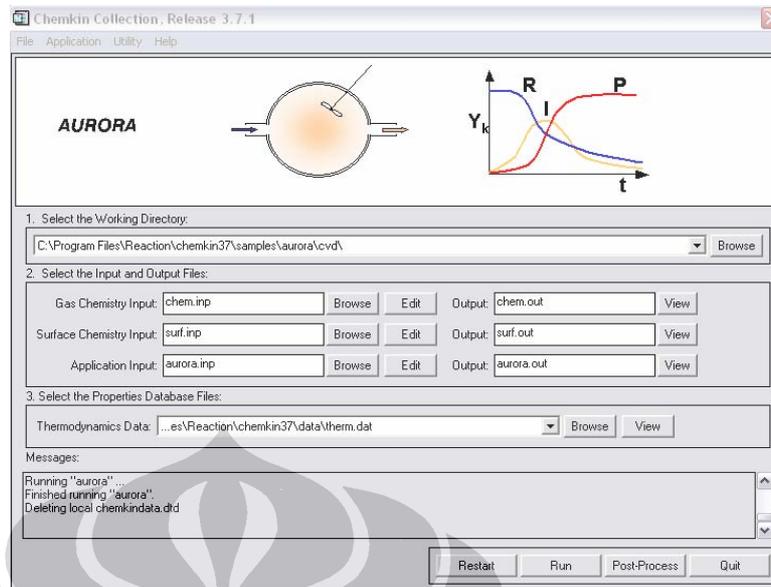
Kondisi batas ditentukan sesuai dengan kondisi masing-masing bagian seperti pada kondisi *inlet* dimasukkan data fraksi massa campuran, kecepatan campuran dan tekanannya. Pada bagian *ring* yang ditetapkan sebagai daerah padat dimasukkan data ketebalan *ring* dan perpindahan panas konduksi yang terjadi serta temperatur awal *ring*.

Kondisi operasi merupakan kondisi dimana domain tersebut bekerja. Nilai yang dimasukkan adalah tekanan yang terjadi selama operasi yakni tekanan atmosfer karena kondisi *burner* adalah kondisi terbuka. Nilai percepatan gravitasi dimasukkan  $9,8 \text{ m}^2/\text{s}^2$  sesuai dengan arah sumbu kerja yakni sumbu Y. Massa jenis campuran juga ditetapkan sebagai nilai masukan pada daerah kerja.

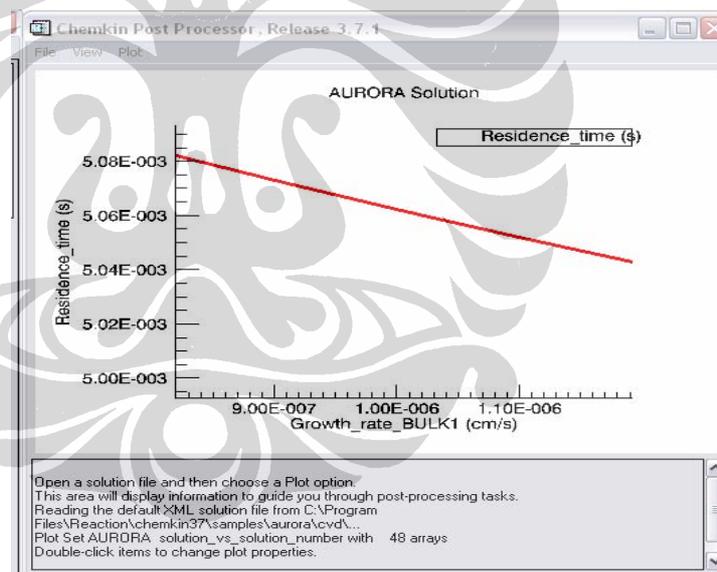
Simulasi pembakaran dengan mengaktifkan model *premix combustion* juga dilakukan pada diameter dalam *ring* 0.7 cm dan posisi *ring* 3 cm. Penyalaan yang digunakan pada simulasi ini adalah *spark ignition* dengan menentukan posisi imajiner dari *spark* pada tepi *tip burner* serta energi penyalaan minimum untuk propana adalah 0,25 mJ. Pada simulasi ini dimasukkan energi penyalaan pada kondisi superkritis yakni 1,23 mJ karena kondisi masukan sangat kurus [73].

Hasil simulasi yang ditampilkan adalah pola medan aliran melewati *ring*, distribusi temperatur nyala dari ujung *burner* sampai ujung nyala serta temperatur *ring* dengan terlebih dahulu melakukan iterasi sampai diperoleh hasil yang konvergen.

Simulasi dengan perangkat lunak Chemkin juga dilakukan untuk menentukan *blow off residence time* [14,74]. Aplikasi yang digunakan adalah AURORA atau yang sesuai dengan pendekatan *WSR* atau *PSR*. Simulasi dilakukan dengan terlebih dahulu menyusun persamaan reaksi yang dibuat dalam file dengan *extension .txt* sebagai file masukan yang dijalankan pada *gas chemistry input*. Persamaan reaksi disusun sesuai dengan GRI Mech 3 [36]. Sedangkan program untuk penentuan *blow off residence time* dibuat dengan menggunakan file *aurora.inp* yang terdapat pada *application input* dengan menyesuaikan kondisi nyala dan memasukkan nilai laju aliran volume reaktan. Simulasi dapat dijalankan dari jendela utama aplikasi AURORA seperti tampak pada Gambar 3.16. Hasil simulasi dapat ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 3.17.



Gambar 3.16. Jendela Utama Aplikasi AURORA



Gambar 3.17. Tampilan Output dalam Bentuk Grafik

Penentuan temperatur nyala untuk perhitungan laju kehilangan kalor pada pendekatan Spalding dilakukan dengan menggunakan aplikasi PREMIX. File input untuk *gas chemistry input* dapat dipergunakan *file* yang sama namun untuk *application input* digunakan *file* premix.inp dengan memasukkan nilai tekanan reaktan dan laju aliran reaktan yang sesuai. Hasil penentuan temperatur nyala juga dapat ditampilkan dalam bentuk grafik.

### 3.5 Kajian Teoritis Fenomena *Flame Lift-up*, Kestabilan Nyala dan Panjang Nyala

Untuk menjelaskan terjadinya fenomena *flame lift-up* dilakukan analisis laju kehilangan kalor dari nyala sesuai dengan pendekatan Spalding. Didefinisikan oleh Spalding kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala yang merupakan fungsi laju kehilangan kalor dari nyala seperti pada Persamaan 3.1 [35].

$$S_{L,c} = \frac{1}{C_p \rho_u} \sqrt{\frac{k_f Q_{loss}}{(T_f - T_u) K_c \lambda_c^+}} \quad (3.1)$$

Dengan mengacu pada terjadinya *lift-off* yakni keseimbangan kecepatan pembakaran dengan kecepatan aliran maka terjadinya *lift-up* adalah saat tercapai keseimbangan kecepatan pembakaran dengan kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala. Hal ini sesuai juga dengan teori perambatan nyala.

Penentuan laju kehilangan kalor ditentukan dengan pendekatan nyala Bunsen berbentuk kerucut. Besarnya laju kehilangan kalor dari nyala digunakan untuk menentukan kecepatan pembakaran pada batas mampu nyala seperti pada Persamaan 3.1.

Kestabilan nyala api setelah *lift-up* dianalisis daerah stabilitas nyalanya berdasarkan diagram Fuidge [23] dengan menentukan *AFR* dan beban pembakaran atau *Burning Load*. *AFR* ditentukan dengan Persamaan 2.2 dan *Burning Load* dihitung dengan Persamaan 3.2.

$$BL = \frac{\dot{m}_f \times HV}{A} \quad (3.2)$$

Berdasarkan kurva *blow off* setelah *lift-up* dan kurva awal terjadinya *lift-up* pada Fuidge diagram dihitung luasan daerah di bawah kurva yang menunjukkan daerah kestabilan nyala api setelah *lift-up*. Daerah ini juga dibandingkan dengan daerah antara kurva *blow off* tanpa adanya fenomena *flame lift-up* dan kurva *blow off* setelah *lift-up*.

Kajian teoritis tentang fenomena *blow off* dari nyala api setelah *lift-up* juga dilakukan dengan pendekatan korelasi *blow off* yang umum digunakan yakni Bilangan Damkohler. Bilangan Damkohler dinyatakan sebagai rasio waktu aliran fisik atau *flow time* dan waktu reaksi kimia atau *chemical time* [14]. Waktu aliran

fisik ditentukan rasio skala panjang karakteristik dan skala kecepatan aliran seperti pada Persamaan 3.3 [14].

$$\tau_{flow} = \frac{D_{ref}}{U_{ref}} \quad (3.3)$$

$D_{ref}$  adalah lebar dari *bluff body* dan  $U_{ref} = U(1 - BR)$  dengan  $BR$  adalah *blockage ratio* dari *bluff body* yakni rasio maksimum luas penampang *ring* dengan luas penampang lubang *ring*.

*Chemical time* ditentukan dari *blow off residence time* ditentukan dari hasil simulasi menggunakan perangkat lunak CHEMKIN berdasarkan Persamaan 3.4 [68]:

$$\tau_{res} = \frac{\rho V}{\left[ \sum_{i=1}^{N_{inlet(j)}} m_i^{*(j)} + \sum_{r=1}^{N_{PSR}} m^{(r)} R_{rj} \right]} \quad (3.4)$$

Kajian tentang panjang nyala api *lift-up* terlebih dahulu dilakukan secara grafis dengan membandingkan pengaruh *AFR*, posisi *ring* dan material *ring* terhadap panjang nyala api. Berdasarkan hasil eksperimental ditentukan korelasi panjang nyala berdasarkan korelasi Rokke dengan metode regresi linier dengan menambahkan pengaruh Bilangan Lewis, perbandingan jarak *ring* dengan diameter dalam *ring*, perbandingan antara selisih temperatur *ring* dan temperatur ujung *burner* dengan temperatur *ring*.

Kajian teoritis panjang nyala juga dilakukan dengan penggabungan persamaan kekekalan massa, momentum, konsentrasi dan energi pada kondisi aliran pancaran atau *jet flow*. Pendekatan ini mengacu pada kondisi aliran setelah *bulff body* yang mirip dengan aliran pancaran [14, 75]. Terlebih dahulu diturunkan radius nyala atau lokasi pada tepi nyala dengan fraksi massa bahan bakar adalah 0,0005 [63] atau perubahan parameter atau *progress variable* yang dapat dinyatakan dalam pengurangan temperatur atau pengurangan fraksi massa dari gas yang terbakar sebagai fungsi dari sumbu nyala. Panjang nyala api premix dapat ditentukan dengan mencari solusi pada turunan fungsi kedua sama dengan nol. *Progress variabel* pada pembakaran *premixed* identik dengan rasio campuran pada pembakaran *non premixed* yakni *progress variable* = 0 adalah kondisi

*unburnt gas* sama dengan kondisi rasio campuran = 1. Sebaliknya *progress variabel* = 1 yakni pada kondisi *burnt gas* identik dengan fraksi campuran = 0 pada pembakaran *non premixed*.

Perhitungan panjang nyala berdasarkan persamaan matematika kemudian dibandingkan dengan panjang nyala dari hasil pengukuran pada percobaan di laboratorium dan ditampilkan dalam bentuk grafik.

