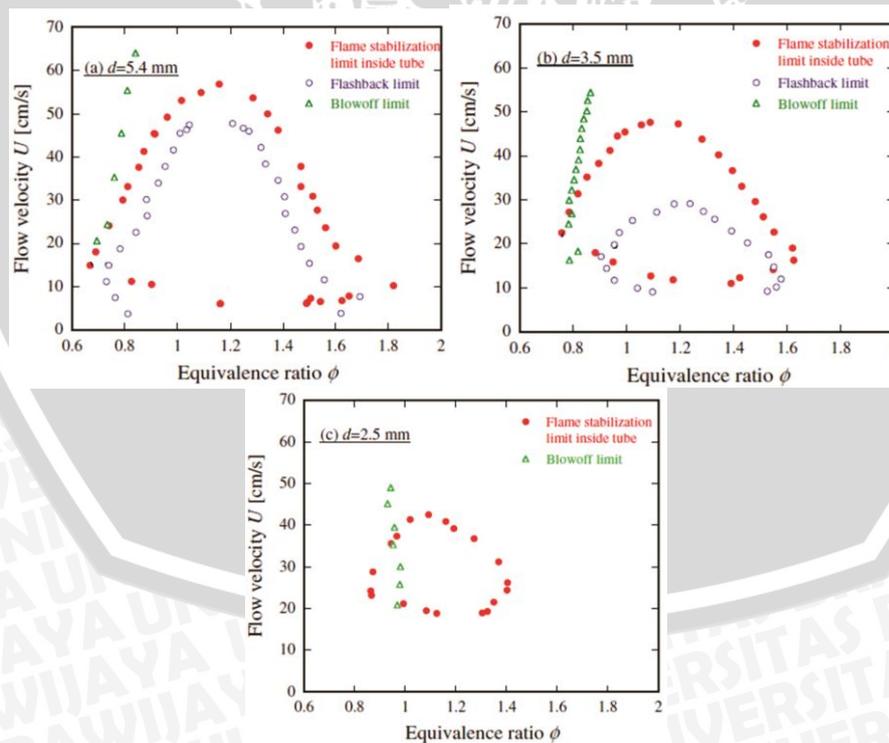


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Hasil Penelitian Sebelumnya

Mikami, et al (2013) melakukan penelitian pada *meso-scale combustor* berbentuk lingkaran dengan variasi ukuran diameter *combustor* terhadap kestabilan api dan kecepatan pembakaran (*flame propagation*). Dari penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa semakin kecil ukuran diameter *combustor* maka daerah stabilitas nyala api juga semakin sempit. Hal ini disebabkan tingkat kehilangan panas tinggi terkait dengan peningkatan rasio permukaan terhadap volume dan keterbatasan waktu nyala yang tidak memadai. Pada penelitian ini didapatkan bahwa *wire mesh* bisa meningkatkan kecepatan pembakaran pada *meso-scale combustor*. Meningkatnya energi aktivasi awal pada *combustor* akibat adanya panas yang berpindah dari dinding *combustor* ke *wire mesh*. Gambar 2.1 menunjukkan daerah *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* untuk variasi diameter *combustor* 5.4 mm, 3.5 mm dan 2.5 mm. Bahan bakar yang digunakan adalah propana ( $C_3H_8$ ) dengan udara sebagai oksidatornya.



Gambar 2.1 Daerah *flammability limit* dengan variasi diameter *combustor* 5.4, 3.5 dan 2.5 mm.

Sumber: Mikami, et al (2013)

## 2.2 Pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi kimia yang melibatkan bahan bakar, pengoksidasi dan energi aktivasi. Reaksi pembakaran menghasilkan produk berupa gas hasil pembakaran dan energi termal (panas). Umumnya kandungan utama bahan bakar adalah senyawa hidrokarbon yang di notasikan dengan  $C_xH_y$ . Dari skema pada Gambar 2.2 ini bisa dilihat bahwa syarat terjadinya pembakaran adalah terdapatnya unsur-unsur sebagai berikut:

1. Bahan bakar
2. Pengoksidasi (oksigen/udara)
3. Panas atau energi aktivasi



Gambar 2.2 Ilustrasi proses pembakaran  
Sumber : Wardana (2008:3)

### 2.2.1 Reaksi Kimia pada Proses Pembakaran

Pada proses pembakaran sering dijumpai pembakaran ideal (stoikiometri) atau bisa disebut dengan pembakaran sempurna. Pembakaran sempurna merupakan pembakaran yang mana semua atom dari bahan bakar dan pengoksidasi bereaksi seluruhnya (sempurna) dan menghasilkan produk. Kenyataannya pembakaran sempurna sangat sulit terjadi, karena kebanyakan reaksi pembakaran yang terjadi menggunakan oksidator (oksigen) dari udara bebas. Kandungan udara bebas tidak hanya oksigen saja, melainkan banyak gas - gas lain yang terkandung didalamnya, terutama nitrogen ( $N_2$ ). Selain menggunakan udara, dapat juga digunakan oksigen sebagai oksidator. Reaksi pembakaran stoikiometri untuk campuran LPG (50% propana dan 50% butana) dengan oksigen murni dapat dituliskan pada persamaan (2-1):



### 2.2.2 Oxygen Fuel Ratio (OFR)

*Oxygen Fuel Ratio* (OFR) adalah rasio perbandingan antara massa atau mol oksigen dan bahan bakar yang terjadi dalam suatu reaksi. Pada reaksi pembakaran OFR memegang peranan penting dalam menentukan jalannya proses pembakaran tersebut. Selain itu, OFR juga berperan dalam pembentukan nyala api pada proses pembakaran yang berlangsung. Persamaan OFR pada reaksi pembakaran dituliskan dalam rumus sebagai berikut:

$$OFR = \frac{N_{\text{oksigen}}}{N_{\text{bahan bakar}}} \quad (2-2)$$

$$OFR = \frac{M_{\text{oksigen}}}{M_{\text{bahan bakar}}} \quad (2-3)$$

(Wardana, 2008:58-59)

Keterangan :

- OFR = Rasio oksigen dan bahan bakar
- $N_{\text{oksigen}}$  = Jumlah mol oksigen
- $N_{\text{bahan bakar}}$  = Jumlah mol bahan bakar
- $M_{\text{oksigen}}$  = Massa oksigen
- $M_{\text{bahan bakar}}$  = Massa bahan bakar

Berdasarkan pada persamaan (2-1) maka dapat dihitung nilai OFR campuran stoikiometri bahan bakar LPG (50% propana dan 50% butana) dengan oksigen seperti dibawah ini:

- Massa atom relatif (Ar)  
C = 12 ; H = 1 ; O = 16
- Perhitungan OFR LPG dengan oksigen berdasarkan massa / persamaan (2-3) :

$$OFR = \frac{5,75 (2 \times 16)}{0,5(12 \times 3+8)+ 0,5 (12 \times 4+10)} = 3.6078 \frac{\text{kg oksigen}}{\text{kg bahan bakar}} \quad (2-4)$$

OFR stoikiometri pada pembakaran LPG dengan oksigen dapat juga dihitung berdasarkan perbandingan mol yang ditentukan berdasarkan koefisien reaktan pada persamaan kimianya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} OFR &= \frac{5.75}{0.5+0.5} \\ &= 5.75 \end{aligned} \quad (2-5)$$

### 2.2.3 Rasio Ekuivalen ( $\Phi$ )

Rasio ekuivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio oksigen - bahan bakar (OFR) stoikiometri dengan rasio oksigen - bahan bakar (OFR) aktual. Rasio ekuivalen ( $\Phi$ ) dirumuskan dengan persamaan (2-6) :

$$\Phi = \frac{OFR_{stoic}}{OFR_{aktual}} \quad (2-6)$$

Keterangan :

- $\Phi$  = Rasio ekuivalen
- $OFR_{stoic}$  = Rasio oksigen dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometri
- $OFR_{aktual}$  = Rasio oksigen dan bahan bakar dalam kondisi aktual

Wardana (2008:65)

$OFR_{stoic}$  yang didapatkan dari perhitungan OFR reaksi pembakaran LPG dengan oksigen berdasarkan volume adalah sebesar 5.75. Sedangkan  $OFR_{aktual}$  diperoleh berdasarkan dari pengukuran ketika pengujian.

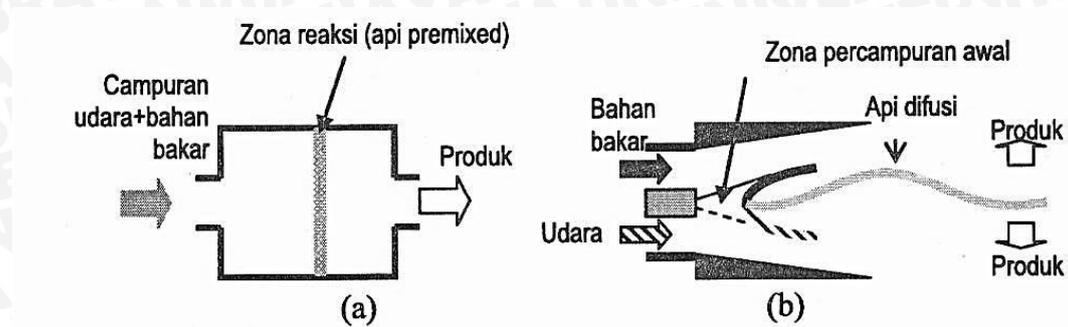
Perhitungan rasio ekuivalen berfungsi untuk menentukan jenis campuran oksigen dan bahan bakar yang terjadi pada reaksi pembakaran. Jenis campuran oksigen dan bahan bakar diklasifikasikan menjadi tiga jenis tergantung dari nilai rasio ekuivalennya, ketiga jenis campuran tersebut adalah :

- $\Phi > 1$  : campuran kaya bahan bakar
- $\Phi = 1$  : campuran stoikiometri
- $\Phi < 1$  : campuran miskin bahan bakar

### 2.2.4 Klasifikasi Pembakaran

Proses pembakaran apabila diklasifikasikan menurut cara reaktan terbakar di zona reaksi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu pembakaran *premixed* dan pembakaran difusi. Pembakaran *premixed* merupakan proses pembakaran dimana udara dan bahan bakar bercampur terlebih dahulu secara mekanik, sebelum dibangkitkan reaksinya oleh energi aktivasi. Sebaliknya, pada pembakaran difusi bahan bakar dialirkan ke ruang yang dipenuhi udara, pada saat yang bersamaan diberikan energi

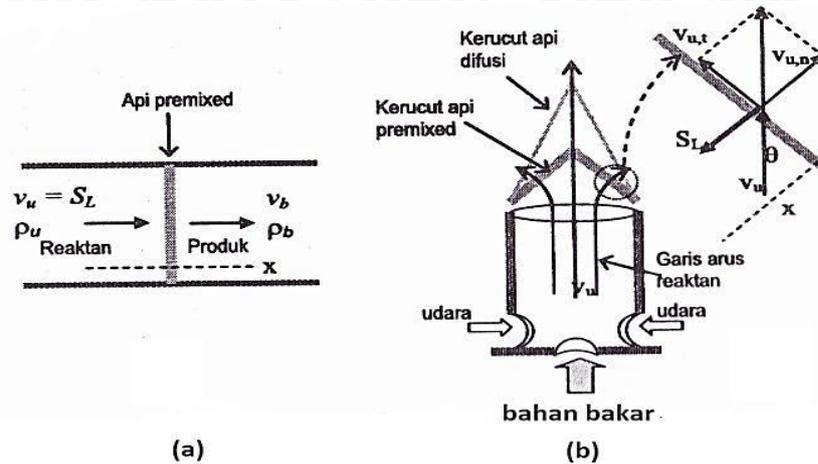
aktivasi untuk mengaktifkan reaksi. Sehingga proses pembakaran berlangsung bersamaan dengan pencampuran udara dan bahan bakar. Pembakaran *premixed* dan difusi ditunjukkan pada Gambar 2.3. Pada penelitian ini proses pembakaran yang digunakan pada *meso-scale combustor* adalah pembakaran *premixed*.



Gambar 2.3 (a) Pembakaran *premixed* (b) Pembakaran difusi  
Sumber : Wardana, (2008: 49)

### 2.3 Pembakaran *Premixed*

Pembakaran *premixed* adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan udara dicampur terlebih dahulu secara mekanik kemudian dibakar. Contoh umum yang sering terjadi di tengah-tengah masyarakat adalah motor bensin. Api *premixed* dibagi menjadi dua jenis menurut jenis alirannya yaitu api *premixed* laminar dan api *premixed* turbulen. Pada pembakaran *premixed*, terjadi perambatan gelombang yang disebut *flame*. Nyala api *premixed* laminar merupakan jenis api *premixed* yang paling sederhana. Reaksi pembakaran dimulai dengan adanya panas lokal pada kondisi lingkungan dalam suatu campuran antara udara dan bahan bakar, sehingga terbentuk api laminar. Bentuk api *premixed* laminar yang paling khas adalah api *bunsen* dan api yang merambat di dalam tabung *combustor*. Kedua jenis api *premixed* laminar tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 (a) Pembakaran *premixed* pada *tube* (b) Pembakaran *bunsen*  
 Sumber : Wardana, (2008:152)

Dapat dilihat bentuk api *premixed* laminar yang merambat didalam tabung *combustor* berbentuk lembar datar tipis dan merambat tegak lurus ke arah reaktan. Sedangkan pada api *bunsen*, api *premixed* berbentuk kerucut dengan dinding kerucut merupakan permukaan api (Wardana, 2008).

Pada Gambar 2.4 (a) dapat dilihat vektor kecepatan rambatan api *premixed* ( $S_L$ ) di dalam tabung sejajar dengan vektor kecepatan reaktan ( $V_u$ ) dan vektor kecepatan produk ( $V_b$ ). Sedangkan untuk api *premixed bunsen*, garis arus reaktan membelok ke dekat api akibat perubahan densitas gas dan mengalir ke luar tegak lurus dengan permukaan api. Penurunan densitas gas yang terjadi sekitar 10 kali lebih rendah akibat kenaikan suhu yang cukup signifikan. Karena sifat fluida yang cenderung mengalir dari densitas tinggi ke rendah, maka gas akan berbelok menuju api secara tegak lurus. Penguraian vektor pada api *premixed bunsen* dapat dilihat pada gambar 2.4 (b).

Keuntungan dari pembakaran *premixed* adalah efisiensinya yang lebih tinggi dari pembakaran difusi. Reaktan telah bercampur terlebih dahulu dengan udara sebelum memasuki daerah reaksi. Hal ini dikarenakan perbandingan bahan bakar dan udara bisa diatur sampai titik stoikiometrinya atau menjadi campuran miskin bahan bakar. Pembakaran pada kondisi stoikiometri membuat bahan bakar bereaksi seluruhnya, sehingga tidak ada bahan bakar yang terbentuk pada produk hasil pembakaran.

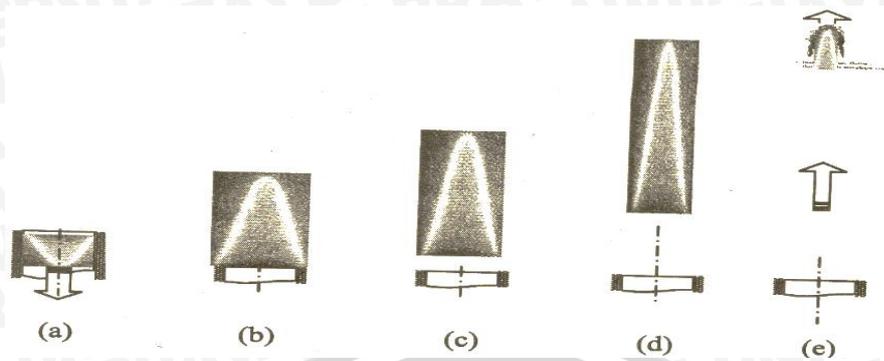
#### 2.4 Flammability Limit

Suatu proses pembakaran akan terjadi jika terdapat campuran antara bahan bakar dan oksidator yang mendukung. Pada *flammability limit* terdapat kisaran campuran

bahan bakar dan oksidator yang menyebabkan nyala api. Kisaran (*flammability range*) tersebut dibatasi oleh kisaran batas bawah mampu nyala dan kisaran batas atas mampu nyala atau yang lebih dikenal dengan *lower flammability limit* (LFL) dan *upper flammability limit* (UFL).

Kisaran batas bawah mampu nyala merupakan suatu kondisi api dapat menyala stabil pada campuran oksidator dengan konsentrasi bahan bakar pada kondisi terendah (kondisi miskin bahan bakar). Ketika suatu konsentrasi bahan bakar di bawah LFL maka kandungan bahan bakar tidak akan cukup untuk mendukung proses pembakaran. Kisaran batas atas mampu nyala adalah sebuah kondisi dimana api dapat menyala stabil pada campuran oksidator dengan bahan bakar pada kondisi tertinggi (kondisi kaya bahan bakar). Ketika suatu konsentrasi bahan bakar di atas UFL maka kandungan oksidator tidak akan cukup untuk mendukung proses pembakaran.

Dalam proses pembakaran, kestabilan api memegang peranan yang sangat penting. Api dikatakan stabil jika tetap stasioner pada posisi tertentu. Peristiwa ini bisa terjadi jika kecepatan pembakaran sama dengan kecepatan aliran reaktan. *Flashback* merupakan salah satu fenomena nyala api dimana api bergerak masuk atau mendekati mulut *combustor*. *Flashback* terjadi ketika kecepatan api lebih besar dari pada kecepatan aliran reaktan. Sedangkan pada fenomena *lift off* nyala api tidak menyentuh permukaan mulut *combustor* tetapi stabil pada jarak tertentu. Pada kecepatan reaktan rendah posisi api akan mendekati mulut *combustor* dan menyentuhnya. Dan apabila kecepatan reaktan meningkat maka posisi hulu api sudah tidak lagi menempel, melainkan menjauh dari mulut *combustor*. Peningkatan kecepatan reaktan yang secara terus menerus akan mengakibatkan hulu api meloncat ke posisi jauh dari mulut *combustor* dan nyala api dikatakan terangkat. Kondisi seperti ini yang dinamakan fenomena *lifted*. Apabila kecepatan reaktan terus ditingkatkan kembali maka akan terjadi *blow off* (api padam). Berbagai kondisi tersebut di atas ditunjukkan pada Gambar 2.5.

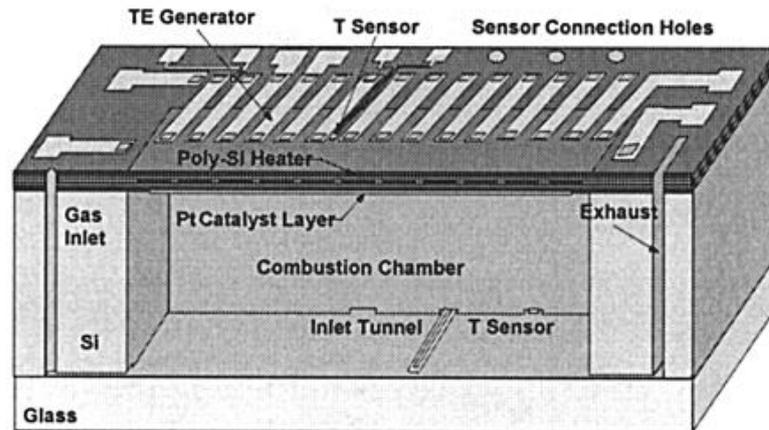


Gambar 2.5 : (a) *flash back*, (b) stabil, (c) *lift off*, (d) *lifted*, (e) *blow off*  
 Sumber : wardana (2008:169)

## 2.5 Micropower Generator

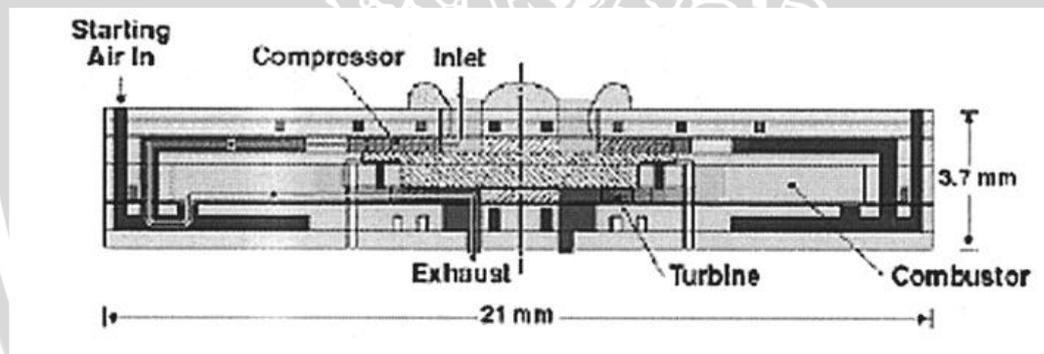
*Micropower generator* adalah pembangkit energi berskala mikro yang memanfaatkan prinsip pembakaran dalam pembangkitan energinya. Penggunaan teknologi ini semakin berkembang karena diawali oleh penggunaan alat-alat portabel yang membutuhkan suplai energi listrik dalam jumlah kecil. Dengan adanya *micropower generator* diharapkan ketergantungan peralatan mikro pada sumber energi yang berupa baterai dapat dikurangi. *Micropower generator* bisa dikategorikan menjadi dua jenis yakni *micropower generator* yang menggunakan modul pengkonversi energi termal menjadi energi listrik (*thermophotovoltaic* atau *thermoelectric*) dan *micropower generator* dengan menggunakan siklus daya konvensional. Perbedaan kedua *micropower generator* ini terletak dari prinsip kerja pembangkitan energinya.

Untuk *micropower generator* dengan menggunakan *thermoelectric* atau *thermophotovoltaic* (TPV) beroperasi dengan menggunakan sistem pembakaran yang dihubungkan dengan pengkonversi energi untuk merubah energi panas menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya hampir sama dengan prinsip kerja *thermoelectric* pada umumnya yang menggunakan sel-sel PV. Radiasi panas dikonversi dari pembakaran bahan bakar menjadi listrik. Bedanya sumber energi termal pada *micropower generator* jenis ini bukan berasal dari sinar matahari melainkan dari proses pembakaran berskala mikro.



Gambar 2.6 *Micropower generator* dengan prinsip *thermoelectric*  
 Sumber : Fernandez-Pello, *et al*, 2002

Sedangkan *micropower generator* yang menggunakan siklus daya konvensional, prinsip kerjanya hampir sama dengan prinsip kerja turbin gas yaitu dengan memanfaatkan pembakaran untuk memutar turbin.



Gambar 2.7 *Micropower generator* dengan siklus daya konvensional  
 Sumber : Fernandez-Pello, *et al*, 2002

## 2.6 Micro/Meso-Scale Combustor

*Microcombustor* terbagi menjadi berbagai macam jenis dan ukuran yang ada. Secara garis besar, *microcombustor* diklasifikasikan menjadi dua golongan yaitu *micro-scale combustor* dan *meso-scale combustor*. Pengklasifikasian tersebut berdasarkan besarnya celah pada ruang bakar. Untuk *micro-scale combustor* celah ruang bakar memiliki ukuran kurang dari 1 mm. Sedangkan untuk *meso-scale combustor* memiliki ukuran lebih dari 1 mm sampai 10 mm, namun karakteristik pembakaran masih menyerupai *microcombustion* (Maruta, 2011).

Pada *meso-scale combustor* pembakaran yang stabil sangat sulit dicapai karena perbandingan luas permukaan dan volume sangatlah besar (*surface to volume ratio*,  $S/V$ ), sehingga *heat-loss* yang terjadi juga semakin tinggi dan dapat menyebabkan api padam. Perbandingan antara *heat loss* dengan kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran (*heat generation*) menjadi lebih besar sehingga terjadi penurunan temperatur nyala api dan kecepatan pembakaran. Hal ini dapat memicu terjadinya pemadaman api (*flame quenching*) karena panas yang terjadi dari pembakaran sebelumnya tidak cukup untuk menjadi energi aktivasi bagi pembakaran selanjutnya. Proses pemadaman api karena adanya *heat loss* disebut *thermal quenching*.

Sejauh ini bahan bakar yang umum digunakan pada *meso-scale combustor* adalah bahan bakar gas. Gas dapat dengan mudah tercampur dengan udara sehingga terbakar dengan cepat. Pada penelitian ini juga digunakan bahan bakar gas LPG dengan oksigen yang akan diaplikasikan pada *meso-scale combustor*, dengan harapan dapat menghasilkan pembakaran yang lebih stabil.

### **2.7 Heat Loss pada Meso-Scale Combustion**

Pembakaran dalam *micro-scale* atau *meso-scale* mempunyai masalah yang berkaitan dengan *heat loss* dan minimnya waktu yang tersedia untuk terjadi reaksi pembakaran. Kebutuhan dasar pembakaran berskala *meso-scale* adalah waktu tinggal yang tersedia untuk pembakaran harus lebih besar dari waktu yang dibutuhkan untuk reaksi kimia pembakaran terjadi. Dengan menyesuaikan aliran fluida yang masuk untuk menstabilkan api dan memungkinkan terjadinya perpindahan kalor dari produk panas ke reaktan karena itu penting untuk meningkatkan temperatur bahan bakar dan oksidator sehingga dapat bereaksi atau terbakar dalam waktu singkat.

Kendala laju/kecepatan reaksi kimia juga diperparah dengan efek kehilangan panas yang besar. Besarnya kehilangan panas dipengaruhi oleh besarnya perbandingan luas permukaan dengan volume ( $S/V$ ) *combustor*. Semakin kecil ukuran/dimensi *combustor*, rasio luas permukaan dengan volume akan semakin besar. Pada skala *meso-scale*, karena tingginya rasio permukaan dengan volume, kehilangan panas melalui dinding *combustor* meningkat secara drastis yang mengakibatkan turunnya temperatur api dan kecepatan pembakaran. Hal tersebut mengakibatkan meningkatnya waktu reaksi kimia/pembakaran. Serta dapat mengakibatkan padamnya api atau berhentinya reaksi bila tingkat kehilangan panas yang terjadi cukup tinggi.

## 2.8 Diameter Hidrolik

Diameter hidrolik merupakan representasi besarnya diameter pada benda dengan bentuk penampang selain silinder. Besarnya diameter hidrolik dapat diperoleh dari persamaan berikut.

$$D_h = \frac{4 \times \text{luas}}{\text{keliling}} \quad (2-7)$$

Diameter hidrolik mewakili suatu panjang karakteristik yang mendefinisikan ukuran sebuah penampang dari bentuk yang ditentukan. Faktor 4 di tambahkan dalam definisi  $D_h$  sehingga untuk penampang berbentuk silinder diameter dan diameter hidroliknya sama. Diameter hidrolik juga dapat digunakan untuk menghitung *reynold number* dalam menentukan apakah aliran turbulen atau laminar. (Munson, 2003:63)

$$D_h = \frac{4 \times \text{luas}}{\text{keliling}} = \frac{4 \left( \frac{\pi D^2}{4} \right)}{(\pi D)} = D \quad (2-8)$$

Besarnya diameter hidrolik akan mempengaruhi stabilitas nyala api pada *meso-scale combustor*. Semakin kecil diameter hidrolik *combustor*, maka perbandingan luas permukaan *combustor* terhadap volumenya akan semakin besar. Sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya luas permukaan yang semakin besar mengakibatkan *heat loss* yang semakin besar pula. Hal tersebut mengakibatkan stabilitas nyala api juga akan lebih sulit terjaga.

## 2.9 LPG (*Liquified Petroleum Gas*)

*Liquified petroleum gas* (LPG) merupakan gas hasil produksi dari kilang minyak sebagai hasil penyulingan minyak mentah yang disimpan dalam bentuk cair dalam tabung bertekanan tinggi. LPG berwujud gas dalam keadaan normal namun dapat dikompresi menjadi cairan dengan menambah tekanan atau menurunkan suhu. LPG berbentuk cair dalam tabung dengan tekanan tinggi sekitar 5.0 – 6.2 kg/cm<sup>2</sup>. Dalam kondisi atmosfer, LPG akan berbentuk gas. Volume LPG dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Karena itu LPG dipasarkan dalam bentuk cair dalam tabung logam bertekanan.

Komponen utama LPG adalah gas propana ( $C_3H_8$ ) dan butana ( $C_4H_{10}$ ) serta komponen pendukung seperti zat pembau. Untuk perbandingan komposisi propana ( $C_3H_8$ ) dan butana ( $C_4H_{10}$ ) adalah 50:50 (Rosmayati, 2012).

Secara umum LPG bersifat :

1. Massa jenis gas LPG lebih besar dari udara, yaitu :
  - a. Butana mempunyai massa jenis dua kali lebih besar dari massa jenis udara.
  - b. Propana mempunyai massa jenis satu setengah kali lebih besar dari massa jenis udara.
2. Perbandingan komposisi, propana ( $C_3H_8$ ) : butana ( $C_4H_{10}$ ) = 50 : 50.
3. LPG tidak mempunyai sifat pelumas terhadap metal.
4. LPG tidak memiliki bau, umumnya LPG komersial ditambahkan zat berbau untuk alasan keselamatan. Zat berbau yang biasa ditambahkan adalah *Etil Mercaptane* kepada LPG untuk memberikan bau yang khas, sehingga kebocoran gas dapat dideteksi dengan cepat.
5. LPG tidak mengandung racun dan tidak berwarna.
6. LPG dalam bentuk cairan dan gas sangat mudah terbakar.
7. LPG dalam bentuk cairan dapat menguap jika dilepas dan menyebar dengan cepat.
8. Gas ini lebih berat dibanding udara sehingga akan banyak menempati daerah yang rendah.

### 2.10 Oksigen

Oksigen adalah unsur kimia dalam sistem tabel periodik yang mempunyai lambang O dan nomor atom 8. Pada temperatur dan tekanan standar, dua atom unsur ini berikatan menjadi dioksigen yaitu senyawa gas diatomik dengan rumus  $O_2$  yang tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau. Gas oksigen diatomik mengisi 20,9% volume atmosfer bumi. Oksigen pada industri dapat dihasilkan dengan proses distilasi bertingkat udara, dengan menggunakan zeolit.

### 2.11 Hipotesa

Variasi diameter hidrolik berpengaruh terhadap karakteristik pembakaran di dalam *meso-scale combustor* dengan bahan bakar LPG dan oksidator oksigen. Semakin kecil diameter hidrolik *combustor* maka perbandingan antara luas permukaan *combustor* terhadap volumenya akan semakin meningkat, sehingga kehilangan panas (*heat loss*) yang terjadi juga semakin meningkat. Hal tersebut mengakibatkan

temperatur api dan kecepatan pembakaran turun sehingga luas daerah *flammability limit* yang dihasilkan juga semakin sempit. Sebaliknya meningkatnya *heat loss* dari api ke dinding *combustor* mengakibatkan temperatur dinding yang dihasilkan semakin tinggi. Variasi diameter hidrolis dengan luas penampang yang sama, menghasilkan bentuk yang bervariasi, hal ini berpengaruh terhadap visualisasi bentuk nyala api yang mengikuti dengan bentuk *combustor*.

