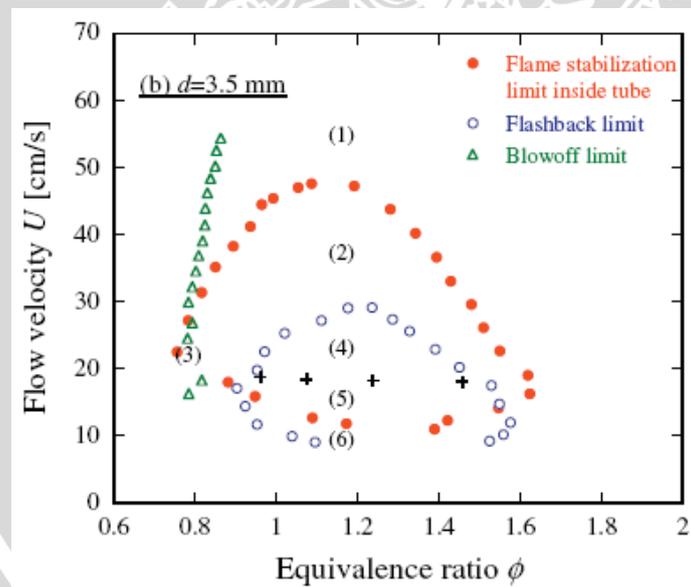


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Sebelumnya

Mikami, et al, (2013) melakukan penelitian tentang penggunaan *wire mesh* pada *meso-scale combustor* terhadap kestabilan api dan kecepatan pembakaran. Dari hasil penelitian tersebut diketahui bahwa dengan menggunakan sebuah *wire mesh* yang terbuat dari *stainless steel* yakni material yang memiliki nilai konduktivitas termal yang tinggi, dapat menstabilkan pembakaran dalam *meso-scale combustor* yang terbuat dari material yang terbuat dari *quartz glass tube* yang mana material ini memiliki nilai konduktivitas termal rendah. *Wire mesh* digunakan karena memiliki peranan sebagai *flame holder* yang mengakibatkan perpindahan panas (*heat recirculation*) dari *flame* ke reaktan sehingga pembakaran yang stabil terjadi di dalam *meso-scale combustor*. Api stabil terjadi didalam *combustor* pada *downstream mesh*. Tanpa *wire mesh*, api stabil hanya terjadi pada ujung pipa. Gambar 2.1 menampilkan batas *flash back* dan *blow off* pada combustor tanpa *wire mesh* dan batas nyala api stabil dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh*.



Gambar 2.1 Diagram kestabilan api dalam *meso-scale combustor*

Sumber : Mikami, et al, 2013

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan pembakaran mengalami peningkatan di daerah sekitar *wire mesh*, yang disebabkan karena *wire mesh* dapat meningkatkan konduksi dari api melalui dinding *combustor* untuk pemanasan awal reaktan. Adanya pemanasan awal ini menyebabkan temperatur dan kecepatan pembakaran juga lebih meningkat sehingga api (pembakaran) menjadi lebih stabil dalam batas nyala tertentu.

Yang, et al, (2002) melakukan penelitian tentang penggunaan *backward facing step* pada *meso-scale combustor* menggunakan bahan bakar hidrogen. Pada penelitian sebelumnya *sudden expansion step* dapat menyediakan ruang untuk resirkulasi pembakaran di dekat dinding *combustor*. Adanya *backward facing step* sendiri dapat mengoptimalkan proses pencampuran bahan bakar dan memperpanjang *fuel residence time* dari campuran bahan bakar. Dengan menggunakan diameter *combustor* 2-3 mm pembakaran yang stabil diperoleh dalam kisaran aliran masuk dan rasio H_2 / udara tertentu. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa *micro combustor* dengan menggunakan *backward facing step* sangat efektif dalam mengatur posisi dari nyala api dan memperluas daerah kestabilan api berdasarkan kecepatan aliran masuk dan rasio bahan bakar dan udara (*fuel air ratio*).

Sari, (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh variasi diameter *combustor backward facing step*. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil bahwa semakin kecil diameter *combustor* maka *flame stability limit* semakin sempit juga. Hal ini disebabkan tingkat kehilangan panas (*heat loss*) yang lebih tinggi, dimana terkait dengan peningkatan perbandingan luas permukaan terhadap *volume* dan temperatur yang dihasilkan semakin rendah. Ditinjau dari temperatur nyala api didapat bahwa temperatur nyala api semakin meningkat ketika *rasio ekuivalen* mendekati 1 (stoikiometri) dan semakin meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan reaktan.

Disini penulis mencoba mengembangkan penelitian tersebut dengan melakukan penelitian eksperimental yaitu meneliti pengaruh *backward facing step*, *perforated plate* dan *wire mesh* terhadap karakteristik pembakaran berupa daerah kestabilan api dan temperatur nyala api pada *meso-scale combustor*.

2.2 Pembakaran

Dalam kehidupan sehari-hari kita tidak terlepas dari proses pembakaran. Pembakaran itu sendiri merupakan reaksi kimia antara oksidator dan bahan bakar, disertai timbulnya cahaya dan menghasilkan kalor. Syarat terjadinya pembakaran adalah ada bahan

bakar, pengoksidasi (udara atau oksigen), dan energi aktivasi. Energi aktivasi adalah energi yang digunakan untuk mengaktifkan molekul bahan bakar. Berikut adalah ilustrasi yang menggambarkan hubungan antara bahan bakar, pengoksidasi dan energi aktivasi.



Gambar 2.2 Ilustrasi Proses Pembakaran

Sumber : Wardana, 2008

2.2.1 Reaksi Kimia Pada Proses Pembakaran

Pada penjelasan mengenai pembakaran di atas diketahui bahwa komponen penyusun reaksi kimia pembakaran dibagi menjadi tiga yaitu bahan bakar, oksigen dan energi aktivasi. Kelangsungan reaksi pembakaran dipengaruhi oleh perbedaan kadar komposisi pada masing - masing komponen tersebut. Secara sederhana persamaan reaksi pembakaran dituliskan sebagai berikut.



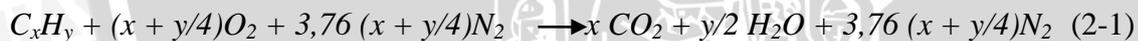
Persamaan di atas merupakan rumus reaksi pembakaran ideal, namun pada faktanya pembakaran sempurna sangat sulit terjadi, karena kebanyakan reaksi pembakaran yang terjadi menggunakan oksidator (oksigen) dari udara bebas. Kandungan udara bebas tidak hanya oksigen saja, melainkan banyak gas - gas lain yang terkandung didalamnya. Pada umumnya komposisi udara bebaskering terdiri dari berbagai gas seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Komposisi udara kering

Udara	Proporsi Volume (%)		Proporsi Massa (%)	
	Aktual	Penggunaan	Aktual	Penggunaan
Nitrogen	78,03	79	75,45	76,8
Oksigen	20,99	21	23,20	23,2
Argon	0,94	0	1,30	0
CO ₂	0,03	0	0,05	0
Gas lainnya	0,01	0	-	0

Sumber : Wardana (2008)

Dari Tabel 2.1 didapat bahwa kandungan gas - gas lain yang persentasenya terlalu kecil dapat diabaikan, maka dapat diasumsikan udara hanya terdiri dari 79% Nitrogen (N₂) dan 21% Oksigen (O₂) saja. Dengan demikian untuk setiap penggunaan 1 mol O₂ yang terkandung di udara pada suatu reaksi pembakaran, secara otomatis akan mencakup penggunaan $\left(\frac{79}{21}\right) = 3,76$ mol N₂. Maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon C_xH_y dapat di tulis dengan persamaan (2-1):



Setelah mengetahui persamaan reaksi pembakaran stoikiometrik, maka untuk LPG yang terdiri dari 50% propana dan 50% butana, reaksi pembakarannya dituliskan dengan persamaan (2-2)



2.2.2 Air fuel Ratio (AFR)

Pada reaksi pembakaran AFR berperan dalam menentukan jalannya proses pembakaran. *Air fuel Ratio* (AFR) merupakan rasio perbandingan antara massa atau mol udara dan bahan bakar yang terjadi dalam suatu reaksi pembakaran, selain itu AFR juga mempengaruhi pembentukan nyala api dan hasil gas buang dari proses pembakaran yang

berlangsung. Persamaan AFR pada campuran stoikiometrik dituliskan dalam rumus sebagai berikut:

$$(AFR)_{stoic} = \left(\frac{N_{udara}}{N_{bahanbakar}} \right)_{stoic} \quad (2-3)$$

$$(AFR)_{stoic} = \left(\frac{M_{udara}}{M_{bahanbakar}} \right)_{stoic} \quad (2-4)$$

Wardana, 2008:58-59

Keterangan :

- $(AFR)_{stoic}$ = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik
- N_{udara} = Jumlah mol udara
- $N_{bahanbakar}$ = Jumlah mol bahan bakar
- M_{udara} = Massa udara
- $M_{bahanbakar}$ = Massa bahan bakar

Sehingga perhitungan AFR LPG berdasarkan koefisien reaksi atau jumlah mol dari persamaan (2-3), menjadi :

$$AFR = \frac{N_{udara}}{N_{bahanbakar}}$$

$$AFR = \frac{5,75 \times (1+3,76)}{(0,5+0,5)} = 27,37 \frac{Mol\ udara}{Mol\ bahan\ bakar}$$

AFR LPG dapat juga dinyatakan dengan dasar perbandingan massa, dapat dituliskan sebagai berikut :

$$AFR = \frac{M_{udara}}{M_{bahanbakar}}$$

$$AFR = \frac{5,75(2 \times 16 + 3,76 \times 14 \times 2)}{(0,5(12 \times 3 + 8)) + 0,5(12 \times 4 + 10)} = 15,44 \frac{kg\ udara}{kg\ bahan\ bakar}$$

2.2.3 Rasio Ekuivalen (ϕ)

Untuk menentukan jenis campuran udara dan bahan bakar yang terjadi pada reaksi pembakaran dapat diketahui dengan perhitungan rasio ekuivalen. Definisi rasio ekuivalen (ϕ) merupakan perbandingan dari nilai AFR stoikiometri dengan AFR aktualnya, rumus rasio ekuivalen dituliskan sebagai berikut.

$$\phi = \frac{(AFR)_{stoic}}{(AFR)_{aktual}} \quad (2-5)$$

Wardana, 2008:65

Keterangan :

- ϕ = Rasio ekuivalen
- AFR_{stoic} = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik
- AFR_{aktual} = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi aktual

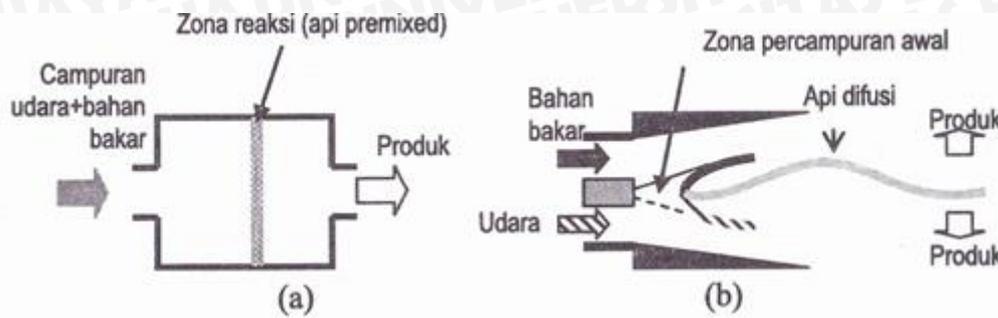
Jenis campuran udara dan bahan bakar diklasifikasikan menjadi tiga jenis tergantung dari nilai rasio ekuivalennya, ketiga jenis tersebut adalah :

- $\phi > 1$ disebut campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*), dalam kondisi ini jumlah mol bahan bakar yang terkandung didalam campuran melebihi jumlah mol yang mampu diikat oleh oksigen secara keseluruhan.
- $\phi = 1$ merupakan campuran stoikiometrik dimana jumlah oksigen dan bahan bakar berada di proporsi yang tepat untuk berikatan seluruhnya.
- $\phi < 1$ disebut campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*), dalam kondisi ini ketersediaan oksigen melimpah namun tidak ada cukup bahan bakar untuk bereaksi.

2.3 Klasifikasi Pembakaran

Proses pembakaran bila diklasifikasikan menurut cara reaktan terbakar di zona reaksi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu pembakaran *premixed* dan pembakaran difusi. Proses pembakaran dimana udara dan bahan bakarnya terlebih dahulu bercampur secara mekanik sebelum dibangkitkan reaksinya oleh energi aktivasi merupakan proses pembakaran *premixed* (Gambar 2.3a). Sebaliknya pada pembakaran difusi, bahan bakar dan udara dialirkan secara terpisah dan akan bertemu pada zona pencampuran, pada saat yang bersamaan diberikan energi aktivasi untuk mengaktifkan reaksi, sehingga proses pembakaran berlangsung bersamaan dengan pencampuran udara dan bahan bakar secara

difusi (Gambar 2.3b). Pada penelitian ini proses pembakaran yang digunakan pada *meso-scale combustor* adalah pembakaran *premixed*.

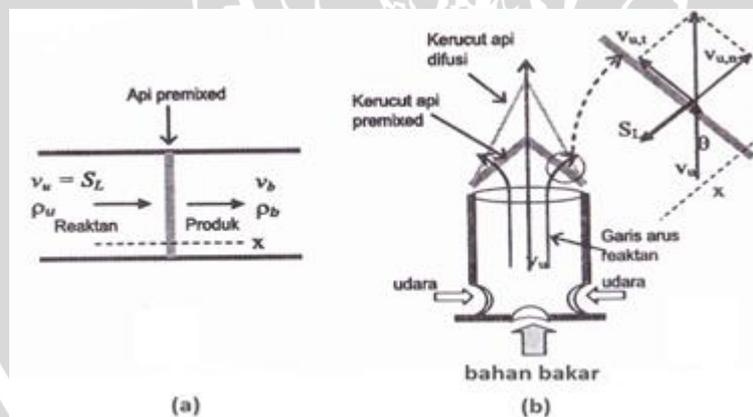


Gambar 2.3 (a) Pembakaran *premixed* (b) Pembakaran difusi

Sumber : Wardana, 2008

2.3.1 Pembakaran *Premixed*

Api *premixed* sendiri dibagi lagi menjadi dua jenis menurut jenis alirannya yaitu api *premixed* laminar dan api *premixed* turbulen. 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 berikut.



Gambar 2.4 (a) Pembakaran *premixed* pada *tube* (b) Pembakaran Bunsen

Sumber : Wardana, 2008

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 (a) diatas dapat dilihat bahwa 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 (b).

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

2.3.2 Flame stability limit dan Kestabilan api

Dalam suatu proses pembakaran, terjadinya nyala api salah satunya disebabkan oleh kisaran campuran bahan bakar dan oksidator. Terdapat kisaran prosentase campuran bahan bakar-udara dimana pembakaran/nyala api dapat terjadi. Kisaran tersebut dibatasi oleh batas mampu nyala bawah dan batas mampu nyala atas atau yang lebih dikenal sebagai *lower limit* dan *upper limit*. *Lower limit* adalah batas terendah campuran reaktan bahan bakar yang masih memungkinkan terjadinya suatu pembakaran dan api yang menyala dengan stabil. Sedangkan *Upper limit* adalah batas tertinggi campuran reaktan bahan bakar yang masih memungkinkan terjadinya suatu pembakaran dan api yang menyala dengan stabil. Diantara dua batas *upper* dan *lower* ini merupakan kondisi rentang dimana proses pembakaran dapat terjadi. Terdapat 3 kondisi dalam kestabilan api, yaitu *flashback*, api stabil dan *lift off*.

Kondisi *flashback* terjadi bila pada prosesnya, kecepatan pembakaran lebih besar daripada kecepatan campuran udara dan bahan bakar, hal ini menyebabkan nyala api masuk ke saluran campuran reaktan menuju sumber bahan bakar, api dapat stabil jika kecepatan reaktan (V_u) sama dengan kecepatan rambat api (S_L) ($V_u = S_L$), sementara itu kondisi *lift-off* merupakan kondisi dimana nyala api tidak berada dipermukaan mulut tabung pembakar, pada jarak tertentu dari ujung tabung pembakar nyala api terlihat stabil. Peristiwa ini disebabkan karena kecepatan reaktan yang lebih besar daripada kecepatan

pembakaran. Pada kecepatan reaktan rendah, posisi api akan mendekati mulut tabung pembakaran dan menyentuhnya. Namun jika kecepatan reaktan ditingkatkan, maka posisi hulu api sudah tidak lagi menempel melainkan menjauh dari mulut *combustor*. Untuk mendapatkan *combustor* dengan densitas energi yang tinggi harus bisa mendapatkan kecepatan pembakaran yang lebih tinggi sehingga api tetap stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi dan memperluas daerah reaksi dalam *combustor*.

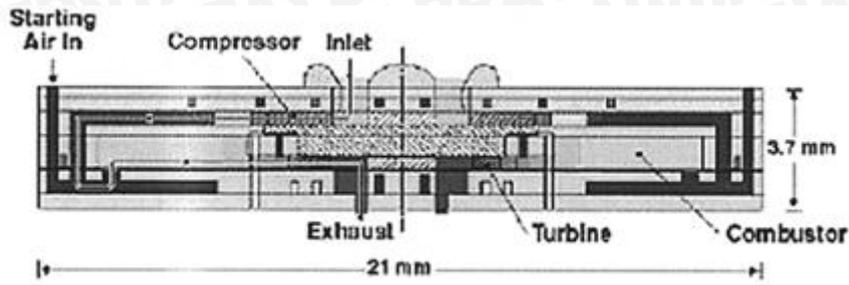
2.4 Bahan bakar LPG (*Liquified Petroleum Gas*)

LPG (*liquified petroleum gas*) adalah campuran dari berbagai unsur hidrokarbon yang berasal dari gas alam. Dengan menambah tekanan dan menurunkan suhunya, gas berubah menjadi cair. Komponennya didominasi propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}). LPG juga mengandung hidrokarbon ringan lain dalam jumlah kecil, misalnya etana (C_2H_6) dan pentana (C_5H_{12}).

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-tabung logam bertekanan. Untuk memungkinkan terjadinya ekspansi panas (*thermal expansion*) dari cairan yang dikandungnya, tabung LPG tidak diisi secara penuh, hanya sekitar 80-85% dari kapasitasnya.

2.5 *Micropower Generator dan Micro / Meso-Scale Combustor*

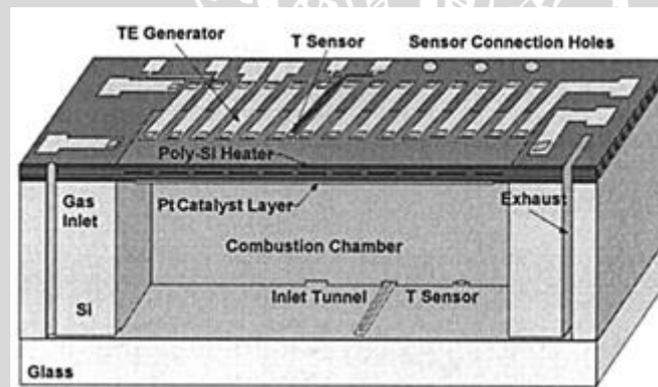
Micropower generator adalah sumber energi berskala mikro yang memanfaatkan prinsip pembakaran dalam pembangkitan energinya. Dengan adanya *micropower generator* diharapkan ketergantungan pada sumber energi baterai dapat dikurangi. *Micropower generator* sendiri pada dasarnya terbagi menjadi dua jenis. Diantaranya adalah *micropower generator* yang menggunakan siklus daya konvensional dan *micropower generator* dengan menggunakan modul pengkonversi energi termal menjadi energi listrik (*thermophotovoltaic* atau *thermo electric*). Perbedaan kedua *micropower generator* ini terletak dari prinsip kerja pembangkitan energinya. Untuk *micropower generator* yang menggunakan siklus daya konvensional prinsip kerjanya hampir sama dengan prinsip kerja turbin gas yaitu dengan memanfaatkan pembakaran untuk memutar turbin yang berskala mikro.



Gambar 2.5 Micropower generator dengan siklus daya konvensional

Sumber : Fernandez-Pello, *et al*, 2002

Sedangkan *micropower generator* dengan menggunakan *thermophotovoltaic* (TPV) prinsip kerjanya hampir sama dengan prinsip kerja *thermoelectric* pada umumnya. Bedanya sumber energi termal pada *micropower generator* jenis ini bekerja dengan mengubah energi panas dari proses pembakaran menjadi energi foton cahaya melalui emitter dan kemudian energi foton ini dikonversi menjadi energi listrik menggunakan sel *photovoltaic* (PV)



Gambar 2.6 Micropower generator dengan prinsip *thermoelectric*

Sumber : Fernandez-Pello, *et al*, 2002

Meskipun *micropower generator* terbagi menjadi dua jenis seperti diatas, dapat dilihat bahwa terdapat persamaan dari kedua *micropower generator* tersebut yaitu sumber energi termalnya. Dimana sumber energi termal pada *micropower generator* berasal dari proses pembakaran berskala mikro atau biasa disebut dengan istilah *microcombustion* pada *micro-* atau *meso-scale combustor*.

Menurut Maruta, (2011) *microcombustion* adalah proses pembakaran pada suatu *combustor* (ruang bakar) yang memiliki karakteristik dimana dimensi relatif mendekati *quenching distance* atau lebar minimal suatu ruang bakar agar dapat terjadi pembakaran

didalamnya. Suatu *combustor* yang panjang karakteristiknya mendekati *quenching distance* disebut *microcombustor*. *Microcombustor* terbagi menjadi berbagai macam jenis dan ukuran yang ada. Namun secara garis besar *microcombustor* diklasifikasikan secara sederhana menjadi dua jenis yaitu *micro-scale combustor* dan *meso-scale combustor*. Penggolongan tersebut berdasarkan besarnya panjang karakteristik pada ruang bakar. Untuk *micro-scale combustor* panjang karakteristik ruang bakar memiliki ukuran kurang dari 1 mm, sedangkan untuk *meso-scale combustor* memiliki ukuran lebih dari 1 mm.

Dalam penelitian ini *combustor* yang digunakan adalah *meso-scale combustor*. 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. Hal ini dapat menyebabkan api padam karena panas yang terjadi dari pembakaran sebelumnya tidak cukup untuk menjadi energi aktivasi bagi pembakaran selanjutnya.

2.6 Flame Holder dalam Meso-scale Combustor

Flame holder merupakan pemegang api. Agar api dapat stabil di dalam *combustor* diperlukan suatu pemegang (*flame holder*) dengan berbagai macam bentuk atau model. Dalam penelitian sebelumnya mengenai karakteristik pembakaran dalam *meso scale combustor* telah dilakukan dengan menggunakan *backward facing step* dan *wire mesh* sebagai *flame holder*.

Backward facing step merupakan macam *flame holder* didalam *meso scale combustor*, *flame holder* jenis ini ditandai dengan adanya perbedaan diameter di dalam *combustor* yang menyebabkan api tertahan pada area dimana terdapat perbedaan diameter didalam *combustor* tersebut. *Backward facing step* terbukti bahwa jenis *flame holder* ini dapat meningkatkan pencampuran bahan bakar dan udara menjadi maksimal dan dapat mencapai distribusi temperatur yang tinggi yang nantinya dibutuhkan untuk pembangkit *thermophotovoltaic* (TPV).

Wire mesh yang digunakan dalam penelitian sebelumnya merupakan suatu material yang memiliki nilai konduktivitas termal yang tinggi yakni *stainless steel*, dapat menstabilkan pembakaran dalam *meso-scale combustor*. *Wire mesh* ini disisipkan pada *meso scale combustor* sebagai *flame holder* yang mengakibatkan terjadinya perpindahan panas (*heat recirculation*) dari *flame* ke reaktan sehingga terjadi pembakaran yang stabil dalam *meso-scale combustor*.

2.7 Hipotesa

Penggunaan *perforated plate* sebagai *flame holder* akan menghasilkan daerah kestabilan api yang lebih luas dan temperatur nyala api yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan *backward facing step* maupun *wire mesh* sebagai *flame holder* didalam *meso-scale combustor*, disebabkan oleh *perforated plate* yang memiliki ketebalan 1 mm dan terbuat dari tembaga yang diharapkan mampu berperan sebagai pemanas awal reaktan. Disebut pemanas awal reaktan karena *flame holder* jenis ini diharapkan mampu menyimpan panas yang diterima oleh dinding *combustor* terlebih dahulu yang mengakibatkan temperatur nyala api meningkat, sehingga dapat menghasilkan temperatur nyala api maupun temperatur dinding yang paling tinggi.

