

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

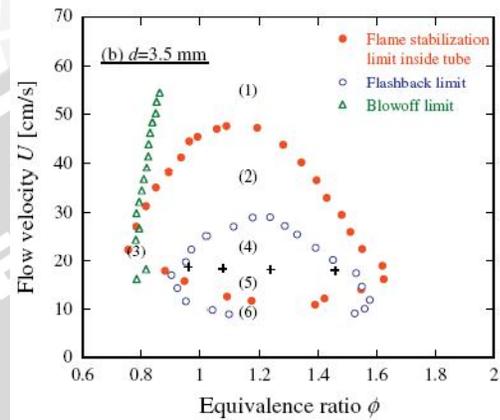
Chou *et al.* (2010) meneliti tentang pembakaran pada *micro combustor* yang berbentuk silinder dengan dan tanpa menggunakan *porous media*. Dalam *micro*

(*TPV*) *power generator* sistem tersebut menggunakan *PV cells* (sel *Photovoltaic*) untuk mengkonversi radiasi panas dari pembakaran bahan bakar fosil menjadi energi listrik. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mencapai distribusi temperatur yang tinggi di sepanjang dinding *micro combustor*. Sehingga dihasilkan *combustor* dengan efisiensi kerja yang tinggi dan densitas energi yang tinggi pula. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa *porous media* mampu meningkatkan laju perpindahan panas antara dinding *combustor* dan produk pembakaran, sehingga distribusi temperatur yang tinggi dapat dicapai sepanjang dinding *micro combustor*. Ketika debit campuran bahan bakar (H_2) dan O_2 di atur sebesar 0,008 g/s dan rasio ekuivalen $\Phi = 0,9$ dengan *SiC* (*Silicon Carbide*) sebagai *porous media*, energi radiasi yang dihasilkan pada *micro combustor* mencapai 81,2% lebih besar dibandingkan *micro combustor* tanpa menggunakan *porous media*. Hal ini membuktikan bahwa adanya *porous media* sebagai *flame holder* dapat meningkatkan distribusi energi termal antara produk pembakaran dengan dinding *combustor*.

Yuliati *et al.* (2012) melakukan penelitian dan menyelidiki kemungkinan terjadinya pembakaran yang stabil dari bahan bakar cair menggunakan teknik *electrospray* tanpa *external heating* atau katalis. Campuran 30% volume etanol dan 70% volume heptana disuplai ke ruang bakar yang terdiri dari kapiler, *ring extractor*, dan *mesh collector* dengan teknik *electrospray*. *Combustor* ini mempunyai 2 buah *wire mesh* didalamnya, yang pertama berfungsi sebagai *ground* dalam sistem *electrospray* dan pengumpul *droplet*. Sedangkan *wire mesh* yang kedua berfungsi sebagai *flame holder*. *Droplet* bahan bakar menguap di permukaan *mesh* pertama atau didaerah antara 2 *wire mesh*. Dan hasilnya api menyala dengan stabil didalam *glass tube* pada rasio ekuivalen sekitar $\Phi = 0,86-1,7$ dengan *flowrate* sebesar 0,5 mL/jam – 2 mL/jam pada *downstream wire mesh* yang kedua. Studi ini menyimpulkan bahwa *wire mesh* mempunyai peranan penting sebagai *flame holder* agar api menyala dengan stabil pada *combustor* berbentuk tabung yang sempit. Tanpa adanya *wire mesh*, api tidak dapat menyala dengan stabil didalam *combustor*.

Mikami *et al.* (2012) meneliti mengenai pembakaran bahan bakar gas pada *meso-scale combustor* dengan menggunakan *single wire mesh* (sebagai *flame holder*) yang terbuat

dari *stainless steel* yang mana *wire mesh* tersebut disisipkan pada material yang mempunyai konduktivitas termal rendah, yaitu material *quartz glass tube* dengan diameter 3,5 mm. Bahan bakar yang digunakan adalah C_3H_8 dengan udara sebagai oksidator. *Mesh* dapat meningkatkan perpindahan panas secara konduksi melalui dinding *combustor* ke arah reaktan sebagai pemanas awal, sehingga mengakibatkan kenaikan kecepatan reaktan, temperatur dan api yang lebih stabil dalam batas nyala tertentu.



Gambar 2.1 Diagram kestabilan api & *flammability limit* dalam *meso-scale combustor* dengan dan tanpa *wire mesh*
Sumber : (Mikami *et al.*, 2012 in press)

Gambar 2.1 menunjukkan diagram kestabilan api dan *flammability limit* dalam *meso-scale combustor*, dengan dan tanpa *wire mesh* didalamnya. Dalam *meso-scale combustor* tanpa *wire mesh* api hanya dapat stabil pada ujung *combustor*. Api stabil diperoleh pada daerah disebelah kanan *blow-off limit* dan diatas *flashback limit*. Disebelah kiri *blow-off limit*, api mengalami *blow-off* dibawah (didalam) *flashback limit*, api mengalami *flashback*. Selanjutnya, dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh*, api stabil dalam combustor didalam daerah *flame stabilitation limit*.

Dalam *meso-scale combustor* api dapat stabil terbatas pada debit/kecepatan reaktan yang rendah, hal ini berhubungan dengan batas mampu nyala/*flammability limit* yang sempit pada kecepatan reaktan yang rendah. Pada gambar 2.1 diagram ini menunjukkan bahwa api stabil dalam *combustor* hanya dapat terjadi pada kecepatan reaktan yang relatif rendah, lebih kecil dari 0.5 m/s (Mikami 2012). Rendahnya kecepatan reaktan dan sempitnya daerah reaksi pembakaran seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya menghasilkan *meso-scale combustor* dengan laju pembangkitan energi yang rendah. 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*.

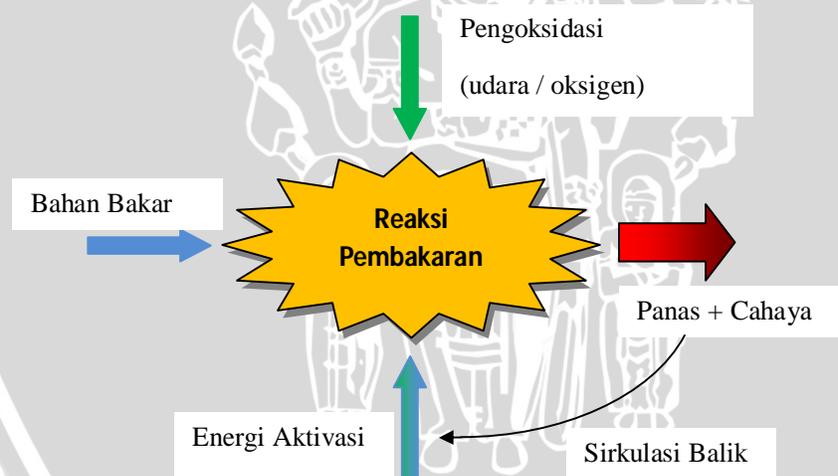
Dari hasil penelitian tersebut kecepatan aliran udara dan bahan bakar yang digunakan masih relatif kecil, sehingga densitas energi yang dibangkitkan juga tidak besar. Maka dari itu dalam penelitian ini digunakan *multiple wire mesh* sebagai *flame holder* yang diharapkan dapat memberikan perluasan daerah *flammability limit* dan meningkatkan stabilitas nyala api pada kecepatan aliran reaktan yang lebih tinggi, sehingga diharapkan akan didapat *meso scale combustor* dengan laju pembangkitan energi yang tinggi pula.

2.2 Pembakaran

Ada tiga syarat agar pembakaran bisa terjadi, yaitu :

1. Bahan Bakar
2. Oksidator (segala substansi yang mengandung oksigen)
3. Energi aktivasi

Berikut ini merupakan sebuah ilustrasi bagaimana pembakaran bisa terjadi.



Gambar 2.2 Ilustrasi proses Pembakaran.

Sumber: Wardana (2008:3)

Agar suatu proses pembakaran dapat berlangsung perlu adanya energi aktivasi dimana energi ini berfungsi untuk mengaktifkan molekul – molekul bahan bakar, sehingga molekul tersebut menjadi bermuatan dengan cara melepaskan satu atau beberapa elektron dari kulit terluar atom atau memutus ikatan rantai molekul. Akan tetapi yang perlu diperhatikan apabila terlalu banyak atau terlalu sedikit oksidator pada jumlah bahan bakar tertentu dapat mengakibatkan tidak terbakarnya bahan bakar dan terbentuk CO. Jumlah oksigen tertentu

sangat dibutuhkan agar pembakaran dapat terjadi secara sempurna selain itu dibutuhkan tambahan udara berlebih untuk menjamin pembakaran yang terjadi benar – benar sempurna. Walaupun demikian apabila terlalu banyak tambahan udara berlebih maka dapat mengakibatkan kehilangan panas, penurunan temperatur api dan rendahnya efisiensi.

Sehingga dari penjelasan diatas dapat disimpulkan bahwa pembakaran adalah reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen atau udara) yang menghasilkan panas dan cahaya.

2.2.1 Reaksi Pada Proses Pembakaran

Pada proses pembakaran terjadi reaksi kimia yang kompleks antara bahan bakar dan pengoksidasi. Kondisi dimana dicapai pembakaran yang sempurna disebut dengan pembakaran stoikiometri. Pembakaran stoikiometri dapat dikatakan pembakaran yang mana semua atom dari bahan bakar dan pengoksidasi bereaksi seluruhnya (sempurna) menghasilkan berbagai produk CO_2 , H_2O , dan N_2 .

Pada kondisi umum udara yang dipakai untuk mengoksidasi bahan bakar pada kenyataannya mengandung Oksigen (O_2), Nitrogen (N_2), Argon (Ar), Karbon dioksida (CO_2), Uap air (H_2O), uap air (H_2O) dan sejumlah gas dalam bagian yang cukup kecil. Udara yang normal merupakan campuran gas-gas meliputi 78,03 % N_2 ; 20,99 % O_2 ; 0,94 % Ar ; 0,03 % CO_2 sedangkan gas-gas lainnya sangat kecil konsentrasinya. Komposisi udara kering yang bersih, dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Komposisi Udara Kering

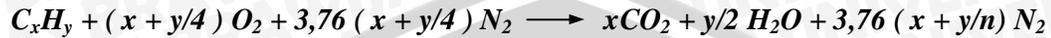
Udara	Proporsi Volume %		Proporsi masa %	
	Aktual	Penggunaan	Aktual	Penggunaan
Nitrogen	78,03	79	75,45	76,8
Oksigen	20,99	21	23,20	23,2
Argon	0,94	0	1,30	0
CO_2	0,03	0	0,05	0
Gas lainnya	0,01	0	-	0

Sumber : Wardana (2008)

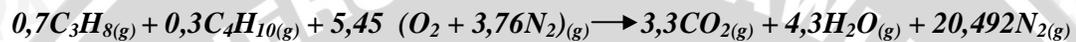
Agar lebih memudahkan perhitungan dalam reaksi pembakaran, dapat dipakai asumsi udara terdiri 21 % O_2 dan 79% N_2 . Oleh karena itu, pada reaksi pembakaran dengan udara, penggunaan 1 mol O_2 akan melibatkan penggunaan $\left(\frac{79,0}{21,0}\right) = 3,76$ mol N_2 .

Untuk dapat mencapai pembakaran yang sempurna semua atom C diharapkan dapat terbakar menjadi CO_2 dan semua atom H_2 dapat terbakar menjadi H_2O .

Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara, di mana udara terdiri dari 21% oksigen dan 79% nitrogen, maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon C_xH_y dapat ditulis dengan persamaan:



Maka untuk LPG yang terdiri dari 70% propane dan 30% butane (Wardana, 2008:18) dapat dituliskan sebagai berikut:



Reaktan

Produk

Dari prediksi dalam buku Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran karangan I.N.G Wardana, perhitungan LHV (*Low Heating Value*) dan HHV (*High Heating Value*) untuk campuran antara bahan bakar propane 70 % C_3H_8 dan butane 30 % C_4H_{10} :

$$\text{LHV} = 0,7(-103,85) + 0,3(-126,15) + 0 + 0 - 3,3(-393,52) - 4,3(-241,83) - 0$$

$$\text{LHV} = 2227,945 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{HHV} = 0,7(-103,85) + 0,3(-126,15) + 0 + 0 - 3,3(-393,52) - 4,3(-285,81) - 0$$

$$\text{HHV} = 2417,059 \text{ kJ/mol}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa molar bahan bakar campuran adalah} &= 0,7(12 \times 3 + 8) + 0,3(12 \times 4 + 10) \\ &= 30,8 + 17,4 \\ &= 48,2 \text{ kg/kgmol} \end{aligned}$$

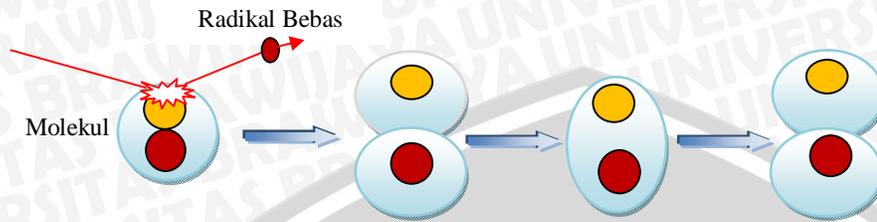
Jadi LHV dan HHV dalam basis massa adalah

$$\text{LHV} = 2227,945 \times 1000 / 48,2 = 46222,925 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{HHV} = 2417,059 \times 1000 / 48,2 = 50146,452 \text{ kJ/kg}$$

Agar reaksi pembakaran bisa berlangsung maka molekul – molekul bahan bakar dibuat bermuatan dengan cara memutus ikatan kimia suatu bahan bakar menjadi molekul bermuatan atau disebut ion. Molekul bermuatan akibat pemutusan ikatan molekul-molekul disebut radikal bebas. Radikal bebas jika menghantam (menumbuk) molekul lainnya dapat menyebabkan jarak ikatan molekul tersebut merenggang dan mengerut secara electron seperti terlihat pada gambar 2.2. Dengan tambahan sedikit energi dari luar pada saat jarak ikatan atom dalam keadaan merenggang dapat menyebabkan atom-atom dalam molekul

terputus dan bermuatan. Jadi radikal bebas sangat berperan membantu proses reaksi di dalam pembakaran.



Gambar 2.3 Keadaan molekul ketika tertabrak radikal bebas.

Sumber: Wardana (2008:5).

Berdasarkan hukum Newton bahwa besar gaya tarik menarik dua buah masa berbanding terbalik dengan jaraknya. Semakin kecil jarak antar atom maka ikatan antar atomnya semakin kuat, sebaliknya jika jarak antar atom semakin renggang maka ikatan antar atomnya semakin lemah. Ikatan rangkap lebih kuat dari pada ikatan tunggal, dan ikatan tripel lebih kuat dari pada ikatan rangkap dan seterusnya.

2.2.2 Rasio Udara dan Bahan Bakar (AFR)

Dalam suatu proses pembakaran beberapa hal penting yang perlu diperhatikan antara lain bahan bakar, udara (oksigen) kalor, dan reaksi kimia. Selain itu, perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting pula dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran (produk) proses pembakaran.

Rasio udara/bahan bakar (*air-fuel ratio*) dari suatu reaksi dinyatakan seperti pada persamaan berikut, dimana N adalah jumlah mol sedangkan M adalah massa molekul :

$$(AFR)_{\text{stoic}} = \left(\frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{bahan bakar}}} \right)_{\text{stoic}}$$

$$(AFR)_{\text{stoic}} = \left(\frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{bahan bakar}}} \right)_{\text{stoic}}$$

Untuk proses pembakaran LPG (70% propane dan 30% butane) stoikiometri diperoleh rasio udara dan bahan bakar sebagai berikut:

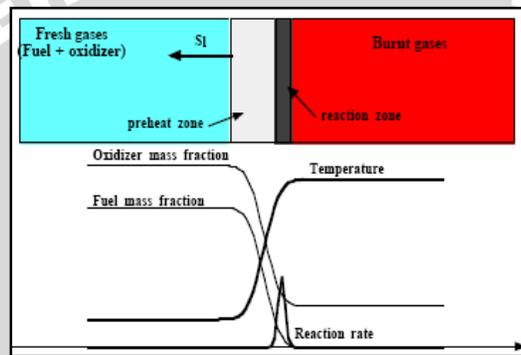


$$AFR = \frac{5,45 (2 \times 16 + 3,76 \times 14 \times 2)}{0,7(12 \times 3 + 8) + 0,3 (4 \times 12 + 10)} = 15,5223 \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}}$$

2.2.3 Kecepatan Pembakaran

Kecepatan pembakaran merupakan gelombang pembakaran (api) menuju reaktan yang terjadi karena adanya gradien temperatur antara produk yang memiliki temperatur tinggi dan reaktan yang memiliki temperatur rendah, sehingga terjadi transfer panas dari produk ke reaktan. Faktor-faktor yang mempengaruhi kecepatan pembakaran diantaranya adalah :

- Turbulensi aliran untuk pengadukkan bahan bakar dan udara.
- Luas daerah kontak reaksi antara bahan bakar dan udara.
- Temperatur pembakaran.
- Katalis



Gambar 2.4 Struktur api pada pembakaran *premixed* laminar
Sumber: Turns (2000:4)

2.2.4 Rasio Equivalen (*Equivalent Ratio, Φ*)

Metode ini termasuk juga metode yang umum digunakan. Rasio equivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio bahan bakar - udara (AFR) aktual sebagai berikut :

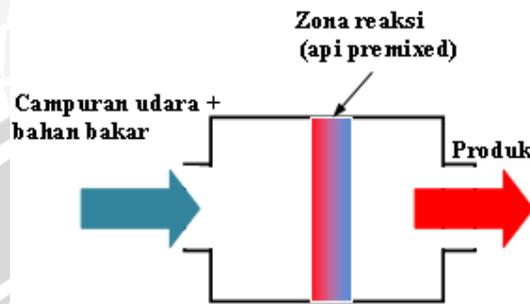
$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a}$$

- $\Phi > 1$ terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*)
- $\Phi < 1$ campurannya disebut sebagai campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*)
- $\Phi = 1$ merupakan campuran stoikiometrik (pembakaran sempurna)

2.2.5 Jenis-Jenis Pembakaran

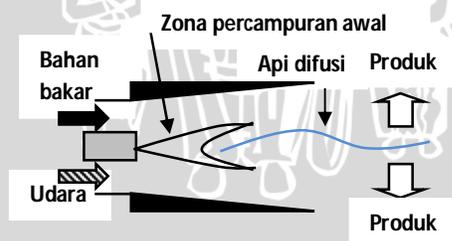
Klasifikasi pembakaran secara umum ditentukan oleh cara reaktan terbakar didalam zona reaksi. Pada karakter pertama jika reaktan (bahan bakar dan udara) bercampur

sebelum masuk ke zona reaksi maka pembakaran tersebut adalah pembakaran *premixed*. Sedangkan apabila reaktan tidak tercampur sebelum terbakar maka pembakaran ini termasuk pembakaran difusi karena pencampuran bahan bakar dan udara yang berlangsung di zona reaksi adalah akibat difusi molekuler.



Gambar 2.5 Cara reaktan terbakar pada pembakaran premix
Sumber: Wardana (2008:149)

Pada gambar 2.5 sebelum masuk ruang bakar, bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen dan udara) telah dicampur secara sempurna kemudian terbakar di zona reaksi. Proses reaksinya berlangsung sangat cepat biasanya pada tekanan tetap. Setelah melewati zona reaksi reaktan menjadi produk. Zona reaksinya sangat tipis yang disebut api *premixed*. Api *premixed* akan merambat menuju ke arah reaktan dengan kecepatan unik. Jika kecepatan reaktan sama dengan kecepatan rambatan api maka api (zona reaksi) akan stasioner. Jadi karakter api *premixed* adalah merambat.



Gambar 2.6 Cara reaktan terbakar pada pembakaran difusi
Sumber: Wardana (2008:149)

Pada pembakaran difusi, bahan bakar dan udara masuk ke dalam ruang bakar melalui saluran yang berbeda dan keluar dalam bentuk produk setelah terbakar di zona reaksi seperti terlihat pada gambar 2.6. Bahan bakar dan udara tersebut bercampur di zona reaksi akibat difusi molekuler dan setelah bercampur secara sempurna kemudian langsung terbakar. Sebelum api difusi terbentuk terlebih dahulu bahan bakar dan udara bercampur di daerah percampuran awal dan terbakar membentuk api *premixed* sebagian. Api

premixed pada sisi bahan bakar menjadi api kaya bahan bakar dan yang di sisi udara menjadi api kaya udara atau miskin bahan bakar. Peran api *premixed* sebagian ini adalah sebagai penyetabil api difusi. Api difusi tidak bisa merambat menuju bahan bakar karena kekurangan oksigen demikian juga sebaliknya.

2.3 Pembakaran *Premixed*

Pada pembakaran *premixed* terjadi pencampuran bahan bakar dan udara (reaktan) dengan perbandingan tertentu (dinyatakan dengan *equivalence ratio* Φ) memasuki ruang bakar dengan kecepatan V_U , dan pembakaran merambat pada arah yang berlawanan dengan kecepatan S_L . Kecepatan rambat api dalam pembakaran *premixed* tergantung pada temperatur reaktan dan temperatur pembakaran, *equivalence ratio* dan tekanan.

Daerah reaksi untuk pembakaran bahan bakar terjadi pada daerah yang sangat sempit ditunjukkan oleh *reaction zone*. Sebelum memasuki daerah reaksi pembakaran, campuran bahan bakar dan udara mengalami pemanasan awal di daerah *preheat zone*, melalui radiasi panas dari nyala api ataupun konduksi melalui dinding ruang bakar.

Pembakaran *premix* mempunyai keuntungan pada efisiensi pembakarannya yang tinggi, karena reaktan telah bercampur sebelum memasuki daerah reaksi pembakaran. Temperatur pembakaran yang memegang peranan penting dalam pembentukan polutan juga dapat dikontrol dengan mudah dengan cara mengatur perbandingan bahan bakar dan udara.

Radikal akan selalu muncul pada zona reaksi sebagai konsekuensi dari reaksi tersebut. Dalam api terjadi gradien temperatur, dimana temperatur produk lebih tinggi dari temperatur reaktan. Oleh karena itu berdasarkan hukum termodinamika maka akan terjadi transfer panas dari produk ke reaktan. Transfer panas yang terus menerus tersebut akan meningkatkan temperatur reaktan. Jika temperatur reaktan meningkat maka daerah pemanasan awal akan bergeser ke kiri, sedangkan zona yang terjadi menjadi zona pemanasan awal temperaturnya akan lebih tinggi sehingga terjadi pembakaran. Peristiwa ini terjadi secara kontinu sehingga api merambat ke arah reaktan. Kecepatan rambatan api tersebut disebut kecepatan pembakaran. Kecepatan pembakaran dalam pembakaran *premixed* biasanya di beri notasi S_L .

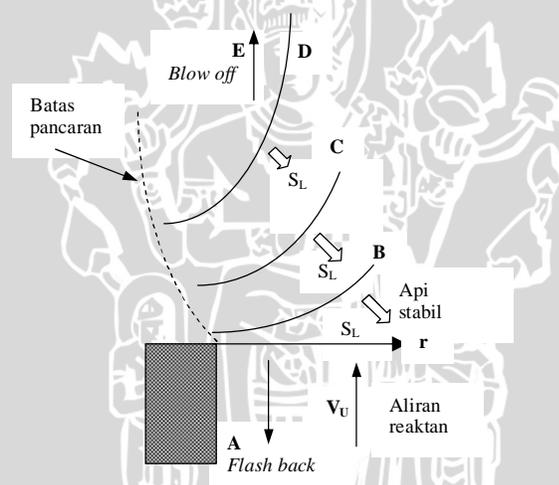
Dan pada karakter yang ketiga ditentukan oleh keadaan fisik awal dari bahan bakar, berupa padat, cair, atau gas.

2.4 Karakteristik Pembakaran

Karakteristik pembakaran yang diamati pada penelitian ini adalah kestabilan api dan *flammability limit*. Yang terpenting dalam *meso-scale combustor* adalah menjaga agar pembakaran berlangsung stabil. Berikut akan dijelaskan mengenai stabilitas api dan *flammability limit*.

2.4.1 Stabilitas Api

Dalam *micro-* dan *meso-scale combustor* kestabilan api merupakan masalah yang krusial. Untuk mendapatkan laju pembangkitan energi yang tinggi dalam ruang bakar berukuran kecil, kecepatan reaktan harus besar. Pada percobaan kali ini pembakaran yang terjadi adalah pembakaran *premixed*. Pada pembakaran *premixed*, api akan stabil bila kecepatan reaktan $V_U =$ kecepatan pembakaran S_L . Bila $V_U < S_L$ akan mengakibatkan terjadinya *flash back*. Tetapi bila $V_U > S_L$ akan mengakibatkan terjadinya *lift-off* atau *blow-off*. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Mekanisme kestabilan api *premixed*
Sumber : Wardana (2008:171)

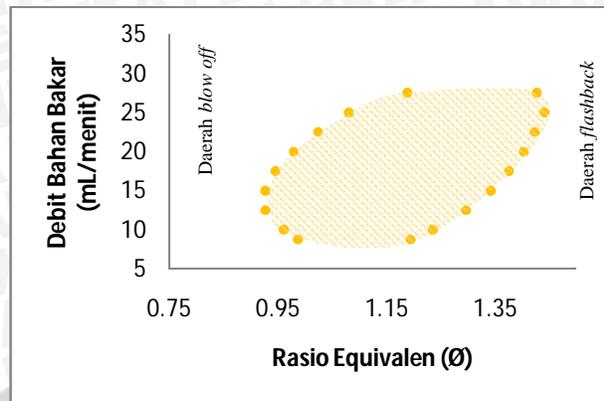
Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, kecepatan pembakaran dapat ditingkatkan dengan menggunakan *external heating* atau katalis. Penggunaan katalis membutuhkan biaya yang relatif tinggi, dan dalam jangka panjang hal tersebut akan berakibat pengelupasan lapisan katalis atau seiring berjalannya waktu permukaan katalis akan terlapisi oleh produk hasil pembakaran. Metode lain dengan menggunakan *external heating* memerlukan energi tambahan untuk pemanas dalam jumlah yang relatif besar. Sehingga diinginkan *meso-scale combustor* dengan api dan pembakaran yang stabil tanpa menggunakan *external heating* dan katalis.

Metode lain untuk meningkatkan stabilitas pembakaran adalah dengan meminimalkan atau manajemen *heat loss*. Hal ini dapat dilakukan dengan resirkulasi panas (*heat recirculation*) dari gas hasil pembakaran ke reaktan. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan *swiss roll combustor* atau *U-tube combustor*. Dalam kedua jenis *combustor* ini, kalor dalam gas hasil pembakaran digunakan untuk pemanasan awal reaktan.

Konduktivitas termal menentukan besarnya perpindahan panas dari *flame* ke dinding *combustor*. Selanjutnya perpindahan kalor dari *flame* ke dinding *combustor* ini mempunyai dua efek yang berlawanan terhadap kestabilan api. Sebagian panas dari dinding *combustor* dikonveksikan ke lingkungan mengakibatkan *heat loss* dari *flame* yang cenderung memadamkan api. Sebagian panas diresirkulasikan ke arah *upstream* secara konduksi untuk pemanasan awal (*preheating*) reaktan yang cenderung menstabilkan api. Terdapat suatu nilai optimum dari konduktivitas termal untuk material *combustor* sehingga diperoleh kestabilan api yang maksimal.

2.4.2 *Flammability Limit*

Seperti telah diuraikan pada bagian sebelumnya, api dapat stabil dalam *micro-* dan *meso-scale combustor* terbatas pada debit/ kecepatan reaktan yang rendah, hal ini berhubungan dengan batas mampu nyala/ *flammability limit* yang sempit pada kecepatan reaktan yang rendah. Diagram kestabilan api dan *flammability limit* pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* ditunjukkan pada gambar 2.8. Pada sebelah kiri di dalam diagram kestabilan api dan *flammability limit* akan terjadi *blow off* apabila debit bahan bakar terus menerus di besarkan yang mengakibatkan kecepatan aliran reaktan lebih besar daripada kecepatan pembakaran. Sedangkan pada sebelah kanan dalam diagram kestabilan api dan *flammability limit* akan terjadi *flashback* apabila kecepatan pembakaran lebih besar daripada kecepatan aliran reaktan. Sehingga arah api cenderung merambat ke arah tangki bahan bakar. Api dapat menyala stabil pada daerah yang diarsir (tidak mengalami *blow off* maupun *flashback*). 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*.



Gambar 2.8 Diagram kestabilan api & *flammability limit* dalam *meso-scale combustor* dengan menggunakan *wire mesh*

2.5 Pengaruh Wire Mesh Terhadap Karakteristik Pembakaran

Wire mesh yang digunakan pada penelitian ini mempunyai spesifikasi 60 *mesh/inch* dengan material yang terbuat dari *stainless steel*. *Wire mesh* mempunyai peranan yang sangat penting karena disekitar *wire mesh*, *flame propagation speed* meningkat karena adanya *heat recirculation* dari api ke reaktan melalui dinding *combustor* dan *wire mesh*. *Wire mesh* juga mencegah terjadinya *flash back*. Pada debit bahan bakar yang terlalu kecil api akan padam di dekat *mesh*, dan api akan stabil di dekat *mesh* pada debit bahan bakar yg lebih besar

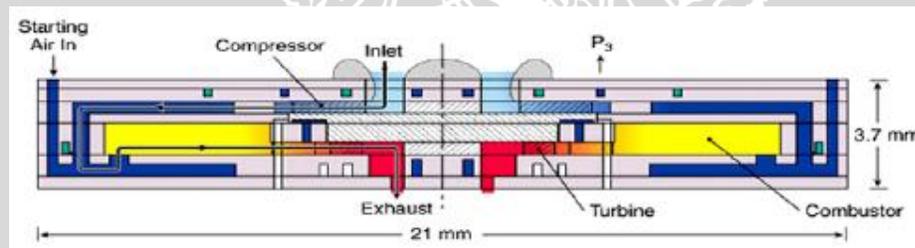
Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Mikami (2012) tampak bahwa api dapat stabil hanya pada debit yang relatif kecil, pada debit yang lebih besar api akan mengalami *blow off*. Padahal, untuk mendapatkan *micro-power generator* dengan densitas daya yang besar, diperlukan laju pembakaran yang besar pula. Oleh karena itu dengan variasi jumlah *wire mesh* diharapkan dapat mencegah terjadinya *blow off*, yaitu suatu kondisi dimana kecepatan pembakaran lebih rendah dari kecepatan reaktan. Dalam *multiple wire mesh*, *mesh* yang terakhir dapat dijadikan penahan untuk api yang menyala pada *downstream mesh* di belakangnya, agar tidak terjadi *blow off* apabila debit bahan bakar diperbesar. *Wire mesh* juga berperan meningkatkan temperatur di daerah di belakang *wire mesh* sehingga temperatur dan kecepatan pembakaran juga akan meningkat. Sehingga api menjadi lebih stabil dalam batas nyala tertentu.

2.6 Pembangkit Tenaga Listrik Mikro (*Micro-Power Generator*)

Beberapa tahun terakhir ini penggunaan peralatan listrik portabel dalam bidang rekayasa telah mengalami perkembangan yang sangat pesat yang mendorong perkembangan pembangkit tenaga listrik mikro atau *micro-power generator*. Baterai sebagai sumber daya untuk berbagai macam *gadget* (handphone, laptop, kamera, ipod ,mp3 player, notebook)

mempunyai peran yang sangat vital dalam menunjang aktifitas terhadap kebutuhan *gadget* yang ada. Baterai saat ini mempunyai densitas energi yang rendah, waktu penggunaan yang relatif pendek dibandingkan dengan waktu isi ulang yang relatif lama. Kebutuhan akan sumber energi dengan densitas energi yang tinggi dan waktu isi ulang yang cepat tidak dapat dipenuhi oleh baterai yang terdapat di pasar. Hal ini mendorong penelitian mengenai *micro-power generator*.

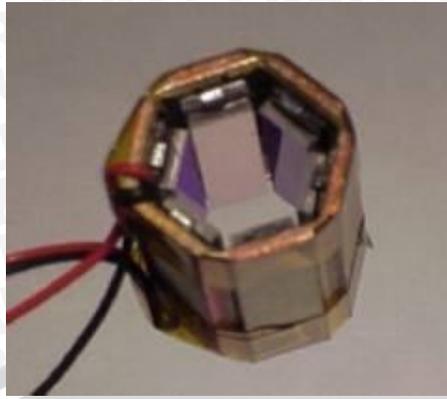
Micro-power generator adalah suatu alat untuk membangkitkan energi dengan skala pembangkit yang relatif kecil. *Micro-power generator* diklasifikasikan menjadi dua kategori. Kategori pertama adalah *micro-power generator* yang beroperasi berdasar siklus daya konvensional, contohnya *micro gas turbine* dan mesin rotari mikro. *Micro-gas turbine* pada gambar 2.9 bekerja dengan cara mengkonversi energi termal menjadi energi mekanik, dan dilanjutkan menjadi energi listrik menggunakan generator listrik. Sistem ini bekerja dengan kecepatan yang sangat tinggi yaitu sebesar 9000 rpm dengan daya keluaran sekitar 3,7 W. Namun efisiensi dari *micro-gas turbine* sangat kecil, yaitu sekitar 0,2 %. Hal ini disebabkan karena rasio kompresi yang rendah akibat masalah pada *balancing* dan *sealing*.



Gambar 2.9 *Micro gas turbine*
Sumber: Fernandez *et al.*, 2002: 10

Kategori yang kedua yaitu sistem dengan pembakaran yang berfungsi sebagai pembangkit/sumber panas yang dihubungkan dengan modul pengkonversi energi untuk merubah energi panas menjadi energi listrik. Contohnya adalah *thermo electric* dan *thermo photo voltaic*. Gambar 2.10 menunjukkan prototip sebuah *micro-power generator* dengan bahan bakar hidrogen dan modul pengkonversi energi *thermo photo voltaic*.

Micro-power generator direncanakan menggunakan bahan bakar fosil yang mempunyai densitas energi sekitar 45 MJ/kg, yaitu sekitar 100 kali lebih besar dari pada densitas energi baterai litium terbaik.



Gambar 2.10 Prototip *micro-power generator*
Sumber: Yang *et al.*, 2009: 2

2.7 Pembakaran pada *Meso-scale Combustor*

Meso-scale combustor merupakan ruang bakar yang mempunyai ukuran yang sangat kecil bila dibandingkan dengan ruang bakar pada umumnya seperti yang kita ketahui selama ini seperti ruang bakar motor bensin maupun motor diesel. Sumber energi dari *micro-power generator* adalah energi termal dari *micro- dan meso-scale combustor* yang nantinya dikonversi menjadi energi listrik.

Ukuran komponen *micro- dan meso-scale combustor* sangat kecil. Hal ini mengakibatkan terjadinya karakteristik yang khusus sehubungan dengan aliran fluida, perpindahan panas, dan proses pembakaran yang ada di dalamnya. Dengan berkurangnya ukuran ruang bakar perbandingan antara luas permukaan terhadap volume ruang bakar menjadi lebih besar. Hal-hal tersebut diatas mengakibatkan perbandingan antara kehilangan kalor (*heat loss*) terhadap kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran (*heat generator*) menjadi lebih besar, menghasilkan penurunan temperatur nyala api dan penurunan kecepatan pembakaran yang pada akhirnya bisa mengakibatkan pemadaman api.

Suatu hal yang sangat penting dalam merancang *meso-scale combustor* adalah mencegah terjadinya *flash back, lift off* dan *blow off*. Hal ini akan menyebabkan pemadaman api. Fenomena *flash back* terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih cepat daripada kecepatan reaktan sehingga nyala api masuk kembali. *Flash back* tidak hanya mengganggu, tetapi juga sangat berbahaya dari sisi keamanan.

Lift off adalah kondisi dimana nyala api tidak menyentuh permukaan nosel pembakar, tetapi agak stabil pada jarak tertentu dari nosel. Apabila kecepatan aliran cukup rendah, ujung bawah nyala api berada sangat dekat dengan ujung nosel dan hal ini dikatakan menempel. Dengan meningkatnya kecepatan aliran, ujung nyala akan meloncat ke posisi dari ujung nosel dan nyala dikatakan terangkat. Kondisi inilah yang dinamakan sebagai *lift off*. Dan jika aliran terus dinaikkan maka akan terjadi pemadaman.

Blow off merupakan suatu keadaan dimana nyala api padam akibat kecepatan reaktan lebih besar daripada kecepatan pembakaran.

Dari uraian diatas, kita mengetahui bahwa tidak mudah untuk mendapatkan pembakaran dan api yang stabil dalam *micro-* dan *meso-scale combustor*. Selain itu pembakaran hanya dapat terjadi untuk debit bahan bakar yang relatif kecil, dimana *fuel residence time* masih relatif besar. Hal ini berarti laju pembangkitan energi pada *micro-* dan *meso-scale combustor* dan densitas energi pada *micro-power generator* juga rendah.

2.8 Hipotesa

Dengan meningkatnya jumlah *wire mesh*, maka zona reaksi pembakaran akan semakin luas, kecepatan pembakaran akan meningkat karena adanya pemanasan awal saat reaktan melewati daerah pembakaran sebelum reaktan terbakar, sehingga akan meningkatkan kecepatan reaktan dimana terjadi api yang stabil, memperluas *flammability limit* dan dihasilkan *combustor* dengan densitas pembangkitan energi panas yang tinggi.

