

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

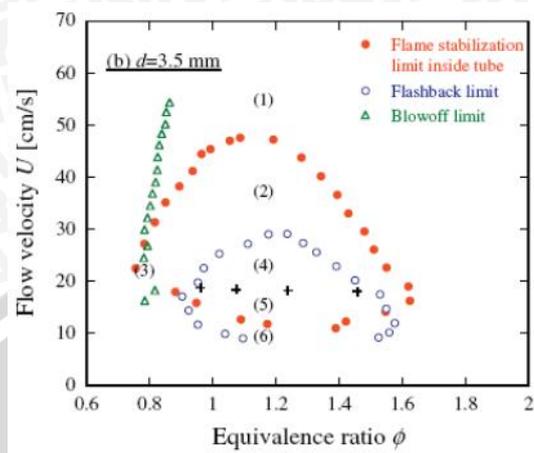
2.1 Penelitian Sebelumnya

Norton, et al, (2003) melakukan penelitian dengan tujuan untuk mengetahui mekanisme kehilangan kalor (*heat loss*) dan pengaruhnya terhadap kestabilan api dalam micro dan *meso-scale combustor*. Dengan hasil bahwa konduktivitas thermal material dari dinding combustor mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap kestabilan api. Itu disebabkan karena konduktivitas thermal menentukan besarnya perpindahan panas dari flame ke dinding combustor.

Dalam penelitian yang dilakukan Miesse et al, (2004) membuktikan bahwa pembakaran dalam ruang bakar mikro (*micro-scale combustor*) bisa terjadi jika komposisi dan struktur material dari dinding combustor dikontrol dengan sebaik-baiknya. Miesse menyimpulkan bahwa ada tiga syarat agar pembakaran dapat terjadi di *micro-scale combustor*, yang pertama adalah material dinding combustor harus dibuat dari material yang dapat mencegah terjadinya radikal *quenching*. Sehingga pembakaran dapat terjadi dengan meminimalisir *heat loss*. Cara kedua, combustor harus dirakit sebaik mungkin terisolasi agar *heat recirculation* dapat terbentuk dengan baik sehingga pembakaran dapat berlangsung di dalam *micro-scale combustor*. Untuk cara yang terakhir yaitu dengan mengontrol pola aliran di dalam combustor sehingga temperatur yang dihasilkan api pada proses pembakaran tidak sampai mencairkan dinding combustor. Dari penelitian tersebut dapat ditunjukkan bahwa pembakaran pada *micro combustor* dapat terjadi dengan memperhatikan desain dan rekayasa dari combustor.

Dalam penelitian berikutnya yang dilakukan oleh Mikami, et al, (2012) diamati pengaruh penggunaan *wire mesh* dalam *meso-scale combustor* terhadap kecepatan pembakaran (*flame propagation*). Dari hasil penelitian ini diketahui bahwa kecepatan pembakaran meningkat di daerah sekitar *wire mesh*. Hal ini terjadi karena *wire mesh* dapat meningkatkan perpindahan panas konduksi dari flame melalui dinding combustor untuk pemanasan awal reaktan, sehingga temperatur dan kecepatan pembakaran juga meningkat. Sehingga api (Yuliati (2012) meneliti mengenai pembakaran bahan bakar gas pada *meso-scale combustor* dengan menggunakan *single wire mesh* yang terbuat dari *stainless steel* yang mana *wire mesh* tersebut disisipkan pada material yang mempunyai konduktivitas termal rendah, yaitu material *quartz glass tube*. Mesh dapat meningkatkan perpindahan panas secara konduksi melalui dinding combustor ke arah reaktan sebagai pemanasan

awal, sehingga mengakibatkan kenaikan kecepatan reaktan, temperatur meningkat dan api yang lebih stabil dalam batas nyala tertentu. pembakaran) menjadi 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, Yuliati, et al, in press 2012)

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 penelitian ini akan diamati karakteristik pembakaran dalam pada *meso-scale combustor* yang terbuat dari material *non homogen* dengan *wire mesh* didalamnya.

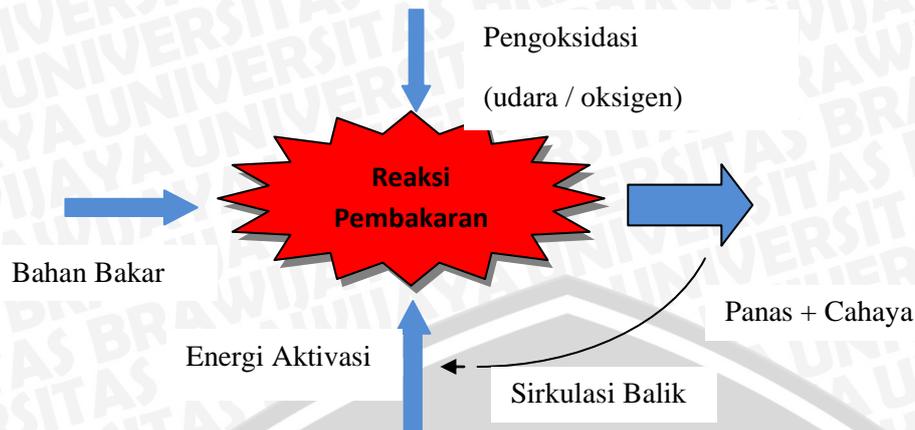
2.2 Proses dan Pengertian Pembakaran

Pembakaran adalah suatu runutan reaksi kimia antara suatu bahan bakar dan suatu oksidan, disertai dengan produksi panas yang kadang disertai cahaya dalam bentuk pendar atau api.

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 dan buruknya 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, maka 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 yang 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 % N₂; 20,99 % O₂; 0,94 % Ar ; 0,03 % CO₂ 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

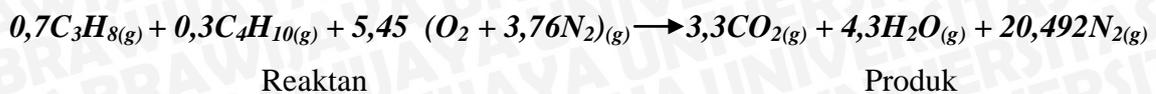
Sumber : Wardana (2008)

Agar lebih memudahkan perhitungan dalam reaksi pembakaran, dapat dipakai asumsi udara terdiri 21 % O₂ dan 79% N₂. Oleh karena itu, pada reaksi pembakaran dengan udara, penggunaan 1 mol O₂ akan melibatkan penggunaan $\left(\frac{79,0}{21,0}\right) = 3,76$ mol N₂. Untuk dapat mencapai pembakaran yang sempurna semua atom C diharapkan dapat terbakar menjadi CO₂ dan semua atom H₂ dapat terbakar menjadi H₂O.

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:

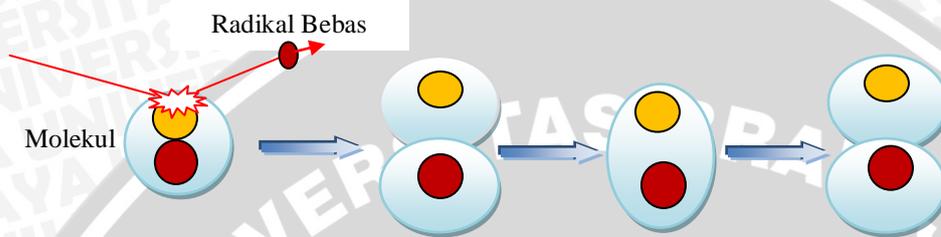


Maka untuk LPG yang terdiri dari 70% propane dan 30% butane (Wardana, 2008:18) dapat dituliskan sebagai berikut:



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).

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 :

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

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

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 Rasio Equivalen (*Equivalent Ratio*, Φ)

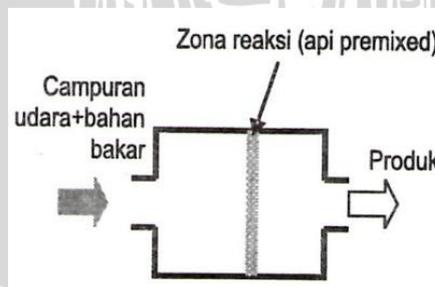
Metode ini termasuk juga metode yang umum digunakan. Rasio equivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio bahan bakar - udara (AFR) aktual sebagai berikut :

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

- $\Phi > 1$ 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).

2.3 Jenis-Jenis Pembakaran

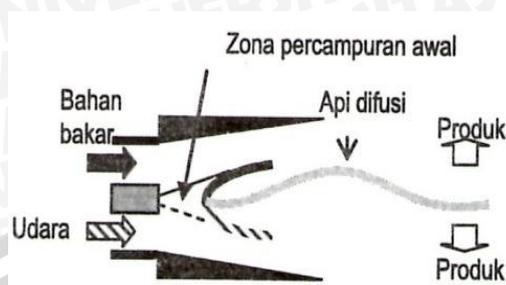
Klasifikasi pembakaran secara umum ditentukan oleh cara reaktan terbakar didalam zona reaksi. Pada karakter pertama jika reaktan (bahan bakar dan udara) bercampur sebelum masuk ke zona reaksi maka pembakaran tersebut adalah pembakaran *premixed*. Sedangkan apabila reaktan tidak tercampur sebelum terbakar maka pembakaran ini termasuk pembakaran difusi karena pencampuran bahan bakar dan udara yang berlangsung di zona reaksi adalah akibat difusi molekul.



Gambar 2.4 Cara reaktan terbakar pada pembakaran premix
Sumber: Wardana (2008:149)

Pada gambar 2.4 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 2.5 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 2.5. Bahan bakar dan udara tersebut bercampur di zona reaksi akibat difusi molekul 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.

2.4 Pembakaran *Premixed*

Pada pembakaran *premixed* terjadi percampuran 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.

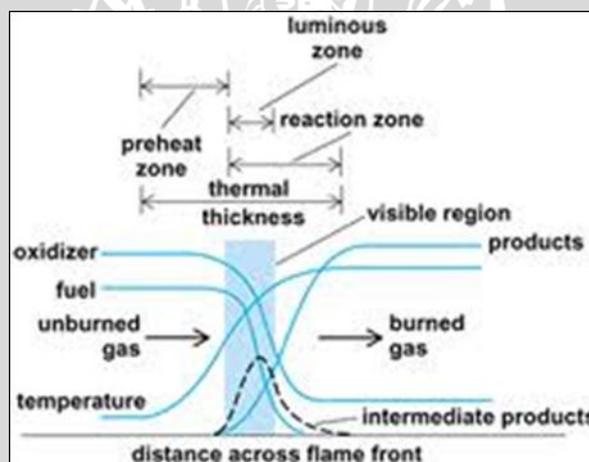
Daerah reaksi untuk pembakaran bahan bakar terjadi pada daerah yang sangat sempit ditunjukkan oleh *reaction zone*. Sebelum memasuki daerah reaksi pembakaran, campuran bahan bakar dan udara mengalami pemanasan awal di daerah *preheat zone*, melalui radiasi panas dari nyala api ataupun konduksi melalui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

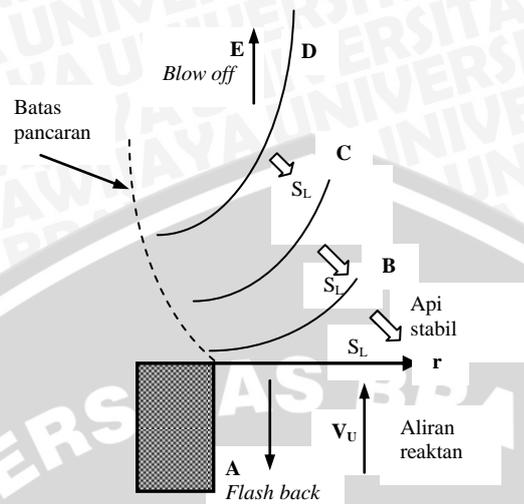


Gambar 2.6 Cara reaktan terbakar pada pembakaran premix
Sumber: Anonymous

Stabilitas Api dan *Flammability Limit*

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 sebaliknya, bila $V_U > S_L$ akan mengakibatkan terjadinya *lift-off* atau *blow-off*. 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. Sebaliknya, besarnya kehilangan panas yang terjadi pada ruang bakar berukuran kecil mengakibatkan terjadinya penurunan temperatur dan kecepatan

pembakaran. Sehingga sangat sulit untuk mencapai kestabilan api dalam *micro-* dan *meso-scale combustor*.



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

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, kecepatan pembakaran dapat ditingkatkan dengan menggunakan *external heating* ataupun dengan menggunakan katalis. Tetapi penggunaan *external heating* memerlukan energi tambahan untuk pemanas dalam jumlah yang relatif besar dan harga katalis sangat mahal. 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.

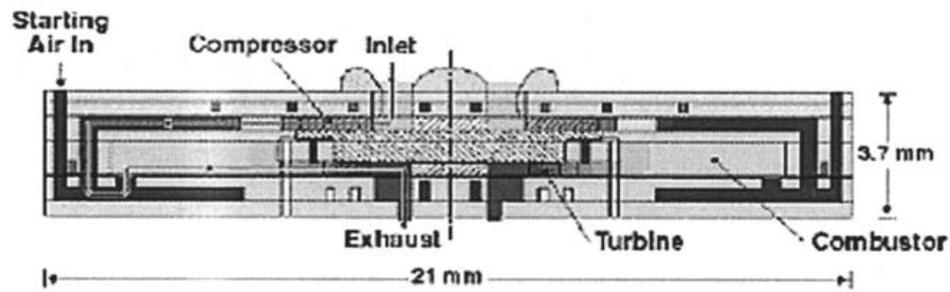
Seperti telah diuraikan pada bagian sebelumnya, api dapat stabil dalam *micro-* dan *meso-scale combustor* terbatas pada debit/ kecepatan reaktan yang rendah, hal ini berhubungan dengan batas mampu nyala/ *flammability limit* yang sempit pada kecepatan reaktan yang rendah. Diagram kestabilan api dan *flammability limit* pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan material *quartz glass tube* dengan *single wire mesh* ditunjukkan pada gambar 2.7. diagram ini menunjukkan bahwa api stabil dalam *combustor* hanya dapat terjadi pada kecepatan reaktan yang relatif rendah, lebih kecil dari 0.5 m/s. Rendahnya kecepatan reaktan dan sempitnya daerah reaksi pembakaran seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya menghasilkan *micro-* dan *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*.

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga 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 2.8 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 2.8 *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 2.9 Prototip *micro-power generator*
Sumber: Yang, *et al*, 2009: 2

2.6 *Micro- dan Meso-Scale Combustor*

Micro- atau meso-scale combustor dengan pembakaran yang stabil merupakan bagian yang sangat penting dalam *micro-power generator*, yang berfungsi untuk merubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas, untuk selanjutnya dikonversikan menjadi energi listrik. Kestabilan api dalam *micro- atau meso-scale combustor* sulit diwujudkan

karena terbatasnya waktu reaksi (pembakaran) bahan bakar dan tingginya *heat loss* yang mengakibatkan pemadaman api. Banyak penelitian telah dilakukan untuk memperbaiki *flammability limit* dan stabilitas api dalam *micro-* dan *meso-scale combustor* dengan bahan bakar gas. Dinding *combustor* berundak digunakan untuk memperbaiki pencampuran udara – bahan bakar dan memperpanjang waktu bahan bakar berada dalam daerah reaksi pembakaran (Yang, et al, 2002). *Swiss-roll combustor* digunakan untuk mengurangi kehilangan kalor dan pemanasan awal reaktan (Kim, et al, 2007). Pemanasan awal bahan bakar atau dinding ruang bakar dilakukan untuk meningkatkan stabilitas api dan memperluas *flammability limit*.

Ukuran *micro-* dan *meso-scale combustor* dan komponen-komponennya yang sangat kecil dibandingkan ruang bakar konvensional mengakibatkan terjadinya karakteristik yang khusus sehubungan dengan aliran fluida, perpindahan panas, dan proses pembakaran yang ada di dalamnya. Panjang karakteristik dalam ruang bakar konvensional biasanya besar, demikian juga dengan *Reynold* dan *Peclet Number* juga mempunyai nilai yang besar. Aliran dalam ruang bakar konvensional bersifat turbulen dan efek viskos serta difusif relatif dapat diabaikan bila dibandingkan dengan efek konvektif. Sebaliknya, panjang karakteristik, *Reynold* dan *Peclet Number* bernilai kecil dalam ruang bakar yang berukuran kecil. Aliran fluidanya bersifat lebih laminar, sehingga efek viskos serta perpindahan massa dan panas secara difusi menjadi dominan. Selain itu, 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 (*flame quenching*).

Pemadaman api juga disebabkan oleh *radical quenching* yang terjadi pada dinding ruang bakar. *Radical quenching* adalah bereaksinya radikal bebas menghasilkan unsur yang stabil ketika berada pada dinding ruang bakar. Berkurangnya jumlah radikal bebas akan menurunkan kecepatan pembakaran. Pada tingkat yang cukup signifikan, hal ini akan menyebabkan pemadaman api.

Agar pembakaran terjadi secara sempurna, waktu bahan bakar berada dalam ruang bakar (*fuel residence time*), τ_f , harus lebih besar dari pada waktu yang diperlukan untuk reaksi pembakaran (*chemical reaction time*) τ_c . Perbandingan antara τ_f dan τ_c dikenal

sebagai *Damkohler Number* (Da), $Da \gg 1$ agar dapat tercapai pembakaran sempurna. Tetapi dalam ruang bakar berukuran kecil nilai Da sering kali menjadi sangat kecil karena *fuel residence time* menjadi kecil sementara *chemical reaction time* menjadi lebih besar. Karena itu pembakaran dalam ruang bakar berukuran kecil sering kali tidak sempurna, bahkan sering kali terjadi pemadaman api.

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. Beberapa penelitian dilakukan untuk mendapatkan pembakaran dan nyala api yang stabil serta untuk mendapatkan laju pembangkitan energi lebih besar. Hasil dari penelitian yang telah dilakukan akan dijelaskan pada bagian berikutnya mengenai “stabilitas api dan *flammability limit*”.

2.7 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, elpiji 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. Rasio antara volume gas bila menguap dengan gas dalam keadaan cair bervariasi tergantung komposisi, tekanan dan temperatur, tetapi biasanya sekitar 250:1.

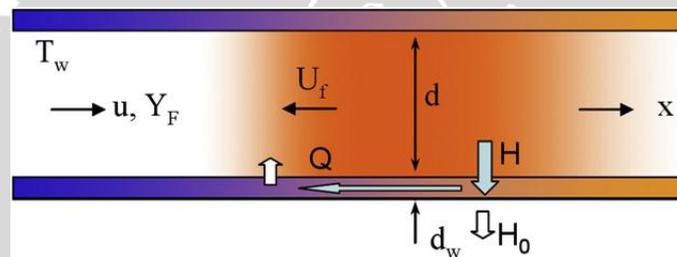
Tekanan di mana *LPG* berbentuk cair, dinamakan tekanan uap-nya, juga bervariasi tergantung komposisi dan temperatur; sebagai contoh, dibutuhkan tekanan sekitar 220 kPa (2.2 bar) bagi butana murni pada 20 °C (68 °F) agar mencair, dan sekitar 2.2 MPa (22 bar) bagi propana murni pada 55 °C (131 °F). Menurut spesifikasinya, *LPG* dibagi menjadi tiga jenis yaitu *LPG* campuran, *LPG* propana dan *LPG* butana.

Sifat *LPG* terutama adalah sebagai berikut:

- Cairan dan gasnya sangat mudah terbakar
- Gas tidak beracun, tidak berwarna dan biasanya berbau menyengat
- Gas dikirimkan sebagai cairan yang bertekanan di dalam tangki atau silinder.
- Cairan dapat menguap jika dilepas dan menyebar dengan cepat.
- Gas ini lebih berat dibanding udara sehingga akan banyak menempati daerah yang rendah.

2.8 Heat loss management dalam micro- dan meso- scale combustor

Micro- dan *meso-scale combustor* mempunyai perbandingan permukaan terhadap volume yang relatif tinggi, menghasilkan laju *heat loss* yang tinggi bila dibandingkan terhadap laju perambangkitan kalor volumetric, yang mengakibatkan pemadaman api. Gambar 4 menunjukkan skema *heat loss* dan *heat recirculation* dalam *micro-* dan *meso-scale combustor* (Maruta, 2011).



Gambar 2.10 Skema perpindahan panas dari nyala api melalui dinding *combustor* ke campuran udara-bahan bakar dan ke lingkungan.

Ruang bakar (*combustor*) berbentuk pipa dengan diameter dalam d dan diameter luar d_w . Campuran bahan bakar dan udara masuk ke daerah reaksi pembakaran dengan kecepatan u dan fraksi bahan bakar Y_F . Pembakaran terjadi di daerah reaksi pembakaran, menghasilkan kalor sebesar Q dan *flame* bergerak dengan kecepatan U_f . Gas hasil pembakaran dibuang ke lingkungan, dinyatakan dengan x . *Heat loss* dari *flame* (nyala api) dinyatakan dengan H . Sebagian dari *heat loss* (H_0), dikonveksikan ke lingkungan, menyatakan fraksi kalor yang hilang dan cenderung mengakibatkan terjadinya *flame quenching*. Sisanya, sebesar Q , dikonduksikan ke arah *upstream* melalui dinding ruang bakar dan digunakan untuk memanasi reaktan (campuran udara-bahan bakar). Pemanasan awal bahan bakar akan meningkatkan kestabilan pembakaran dan mencegah terjadinya *flame quenching*.

Bila $u = U_f$, maka akan menghasilkan pembakaran stabil pada posisi/titik tertentu dalam ruang bakar. Bila $u > U_f$, api akan mengalami *blow off*, sebaliknya bila $u < U_f$, api

akan bergerak ke dalam *combustor* dan akhirnya padam. Phenomena yang disebutkan terakhir disebut *flash back*.

Kestabilan api dapat dicapai bila kecepatan reaktan u dan kecepatan *flame* U_f , mempunyai besar yang relatif sama. Kecepatan *flame* U_f dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti equivalen rasio, temperatur pembakaran, temperatur reaktan, jenis bahan bakar dan lain-lain. Semakin tinggi temperatur reaktan, kecepatan *flame* U_f akan semakin besar. Manajemen *heat loss* dilakukan untuk memaksimalkan fraksi kalor yang dikonduksikan ke arah *upstream* untuk pemanasan awal reaktan (H_0/H) dan meminimalkan fraksi kalor yang hilang ke lingkungan (Q/H).

2.9 Hipotesis

Dengan menggunakan material non-homogen pada dinding *combustor*, diharapkan dapat meningkatkan temperatur pembakaran yang lebih tinggi, api yang lebih stabil dan *flamability limit*. Konduktivitas termal tinggi pada *upstream wire mesh* akan meningkatkan resirkulasi panas ke reaktan, sementara konduktivitas termal yang rendah pada *downstream wire mesh* akan mengurangi *heat loss*, sehingga *combustor* dengan konfigurasi tersebut akan mempunyai api yang lebih stabil dan *flammability limit* yang lebih luas.