

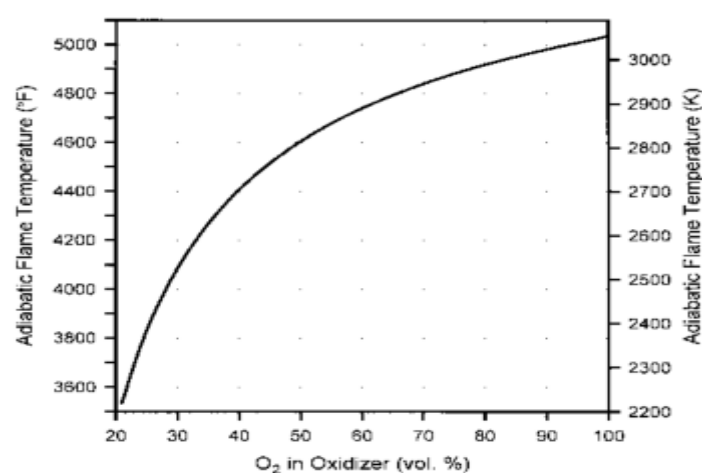
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Sebelumnya

Masalah utama yang terjadi pada proses pembakaran di dalam *meso-scale combustor* adalah kecilnya waktu *residence time* akibat dari kecilnya ukuran ruang bakar. Dengan kecilnya waktu *residence time* dan ukuran ruang bakar maka *heat loss* yang terjadi semakin besar. Dengan terjadinya *heat loss* yang besar, maka untuk menstabilkan api di dalam *meso-scale combustor* pun menjadi semakin sulit. Menurut Fernandez-Pello (2002) salah satu cara untuk menstabilkan api pada *mesoscale-combustor* adalah dengan membuat waktu yang dibutuhkan untuk proses pembakaran (*reaction time*) sekecil mungkin. Dengan begitu proses pembakaran dapat terjadi secara sempurna meskipun dengan *residence time* yang kecil.

Salah satu cara mengurangi waktu *reaction time* adalah dengan memastikan proses pembakaran terjadi pada temperatur yang tinggi. Baukal pada tahun 1998 melakukan penelitian tentang proses pembakaran dengan menggunakan bahan bakar metana dengan oksidator udara dengan penambahan oksigen berbeda. Dari penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa pembakaran dengan semakin tingginya kandungan oksigen pada oksidator dapat meningkatkan temperatur api adiabatik, meningkatkan efisiensi thermal, dan didapatkan daerah *flame stability limit* yang lebih luas.



Gambar 2.1 Grafik hubungan temperatur api adiabatik dengan kandungan oksigen pada oksidator pada pembakaran gas metana.

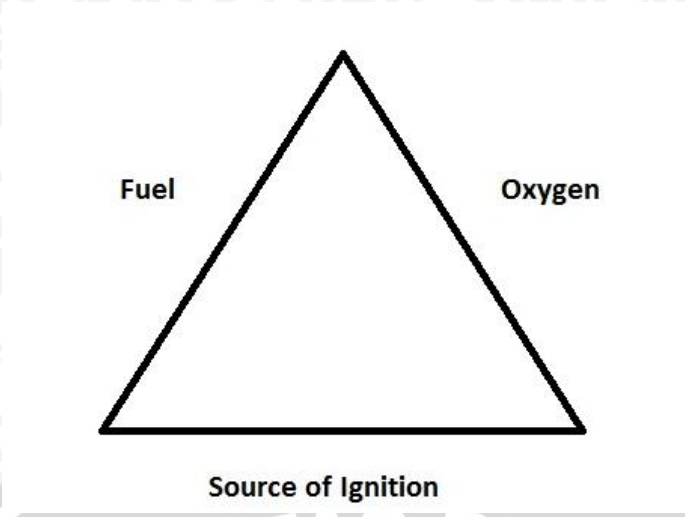
Sumber : Baukal (1998:24)

J.Li (2007) melakukan penelitian terhadap pengaruh material *combustor* dan masa alir terhadap *heat loss* di dalam pembakaran pada *micro-tube combustor* dengan menggunakan campuran oksigen dan gas metan sebagai reaktan dan *combustor* dengan 2 jenis material berbeda yaitu *stainless steel* dan keramik. Dari penelitian ini menunjukkan bahwa *masa alir* reaktan dan material *combustor* mempengaruhi *heat loss* yang terjadi pada *micro-tube combustor*. Dimana dengan meningkatnya masa alir reaktan maka *heat loss* yang dihasilkan semakin besar sedangkan *combustor* dengan material keramik memiliki *heat loss* yang lebih kecil dibandingkan dengan material *stainless steel*. Hal ini disebabkan emisivitas termal dari material keramik lebih kecil daripada *stainless steel* sehingga menurunkan laju radiasi panas dari *combustor* ke lingkungan. Penelitian ini pun menunjukkan pembakaran dengan menggunakan oksidator oksigen dapat terjadi secara stabil di dalam *micro-tube combustor*.

2.2 Pembakaran

Pembakaran merupakan salah satu sumber energi yang sangat penting dan masih umum digunakan saat ini. Ini disebabkan karena pada pembakaran, energi hasil pembakaran dapat diperoleh dengan cepat, dan densitas daya yang dihasilkan tinggi. Pembakaran sendiri merupakan proses reaksi kinetika kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen atau udara) yang menghasilkan panas dan cahaya. Syarat terjadinya pembakaran adalah adanya bahan bakar, oksidator (oksigen) serta energi aktivasi berupa panas. Reaksi pembakaran menghasilkan produk berupa energi termal (panas) yang seringkali disertai dengan perpendaran cahaya berupa api. Bahan bakar pada reaksi pembakaran dapat berupa senyawa organik maupun anorganik, akan tetapi senyawa tersebut harus memiliki struktur dasar hidrokarbon (C_xH_y).

Energi aktivasi yang digunakan pada proses pembakaran umumnya berupa panas, panas tersebut akan mengaktifkan molekul penyusun bahan bakar, sehingga molekul tersebut akan melepaskan elektron pada kulit terluarnya dan berikatan membentuk molekul baru dengan oksidator. Pada proses pembakaran kontinyu, energi panas, umumnya energi aktivasi didapat dari panas hasil pembakaran secara radiasi maupun konveksi (sirkulasi balik). Energi aktivasi ini juga bisa diperoleh dengan penggunaan pemantik seperti fungsi busi pada motor bakar. Secara sederhana seperti itulah reaksi pembakaran terjadi, ilustrasi secara sederhana yang menjelaskan syarat terjadinya proses pembakaran tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Segitiga Pembakaran
 Sumber : Baukal (1998:22)

2.2.1 Reaksi Kimia pada Proses Pembakaran

Komponen penyusun reaksi kimia pembakaran dibagi menjadi tiga yaitu bahan bakar, oksigen dan energi aktivasi. Tiga komponen ini sangat menentukan kesempurnaan dari suatu proses pembakaran. Pembakaran sempurna umumnya 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 bebas yang kering dan bersih terdiri atas berbagai gas seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1

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 apabila kandungan gas - gas lain diabaikan karena persentasenya terlalu kecil, maka dapat diasumsikan udara hanya terdiri dari 79% Nitrogen (N_2) dan 21% Oksigen (O_2) saja. Maka untuk setiap penggunaan 1 mol O_2 yang terkandung di udara pada suatu reaksi pembakaran, secara otomatis akan mencakup penggunaan $\left(\frac{79}{21}\right) = 3,76$ mol N_2 . Perbedaan kadar komposisi pada masing - masing komponen pada proses pembakaran berpengaruh pada bagaimana reaksi kimia pembakaran terjadi. Reaksi kimia yang terjadi pada proses pembakaran juga membawa dampak pada fenomena fisiknya seperti perpindahan panas dan perpindahan massa.

Suatu kondisi dimana campuran bahan bakar dan udara berada pada jumlah yang tepat untuk beraksi secara keseluruhan disebut kondisi stoikiometri. Pada reaksi pembakaran hidrokarbon, kondisi stoikiometri dapat dicapai apabila seluruh atom C dan H pada hidrokarbon berikatan seluruhnya dengan O_2 membentuk CO_2 dan H_2O . Berdasarkan pada perhitungan di paragraf sebelumnya maka rumus stoikiometri pembakaran hidrokarbon dan udara secara teoritis dapat dituliskan sebagai berikut.

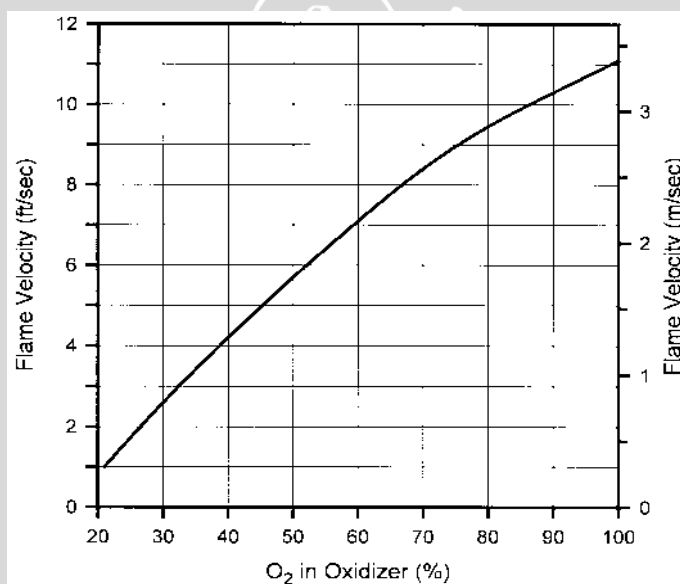


Namun pada kenyataannya suatu reaksi pembakaran tidak selalu berlangsung seperti rumus diatas, kebanyakan reaksi pembakaran justru menghasilkan gas - gas buang seperti NO_x (Nitrogen oksida) atau CO (karbon monoksida) sebagai produknya. Pembentukan gas - gas tersebut bisa berpengaruh pada penurunan efisiensi pembakaran serta berpotensi menyebabkan polusi udara. NO_x baik berupa NO (Nitrogen Monoksida) maupun NO_2 (Nitrogen Dioksida) dapat terbentuk karena kelebihan oksigen pada reaksi pembakaran sehingga oksigen sisa yang tidak berikatan dengan atom C (karbon) terikat pada molekul nitrogen yang teraktivasi karena suhu pembakaran yang tinggi. Sebaliknya molekul CO terbentuk karena kurangnya oksigen pada reaksi pembakaran sehingga mengakibatkan setiap atom C hanya berikatan dengan satu atom oksigen saja. Dengan menggunakan oksidator oksigen murni reaksi pembakaran dapat dengan lebih sempurna dibanding menggunakan udara karena tidak adanya potensi terbentuknya gas NO_2 pada produk pembakaran.

2.2.2 Pembakaran Menggunakan oksidator dengan penambahan Oksigen

Kurang lebih 21% dari udara yang kita hirup adalah oksigen. Oksigen adalah molekul gas diatomik yang tak berwarna dan berbau pada keadaan standar (STP). Oksigen merupakan oksidan kuat yang berarti bukan zat yang mudah terbakar namun dapat mempercepat proses pembakaran. Oksigen inilah yang dibutuhkan pada proses pembakaran. Dengan pembakaran menggunakan penambahan oksigen, ada beberapa keuntungan dibanding dengan menggunakan oksidator udara saja, yaitu sebagai berikut:

1. Meningkatkan temperatur pembakaran.
2. Mengurangi jumlah energi aktivasi yang dibutuhkan.
3. Meningkatkan kecepatan pembakaran.
4. Memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi.
5. Mengurangi volume gas buang



Gambar 2.3 Grafik hubungan kandungan Oksigen pada oksidator terhadap Kecepatan pembakaran gas metan

Sumber : Baukal (1998:30)

Namun pembakaran menggunakan oksigen pun memiliki beberapa kerugian, yaitu:

1. Suhu tinggi karena proses pembakaran dengan oksigen bisa merusak material dari ruang bakar.
2. Lebih mudah terjadi *flashback* karena kecepatan pembakaran yang tinggi
3. Biaya yang dibutuhkan lebih besar dibanding dengan menggunakan oksidator udara

2.2.3 Air Fuel Ratio (AFR)

Pada reaksi pembakaran AFR memegang peranan penting dalam menentukan jalannya proses pembakaran dimana *Air Fuel Ratio* (AFR) adalah rasio perbandingan antara massa atau mol udara dan bahan bakar yang terjadi dalam suatu reaksi. AFR sangat berpengaruh terhadap pembentukan nyala api dan hasil gas buang dari proses pembakaran yang berlangsung. Persamaan AFR pada campuran stoikiometrik dituliskan dalam rumus sebagai berikut :

$$(AFR)_{stoic} = \left(\frac{N_{udara}}{N_{bahan bakar}} \right)_{stoic} \quad 2-1$$

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

(Wardana, 2008:58-59)

Keterangan :

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

Persamaan reaksi stokiometrik pembakaran untuk bahan bakar LPG dimana komposisinya adalah propana (C_3H_8) 50% dan Butana (C_4H_{10}) 50% dengan oksidator udara pada kondisi stoikiometrik, adalah sebagai berikut:



- Massa atom relatif (Ar)

$$C = 12 ; H = 1 ; O = 16 ; N = 14$$

Sehingga perhitungan AFR LPG berdasarkan koefisien reaksi atau jumlah mol dari persamaan (2-1), menjadi :

$$AFR = \frac{N_{udara}}{N_{bahan bakar}}$$

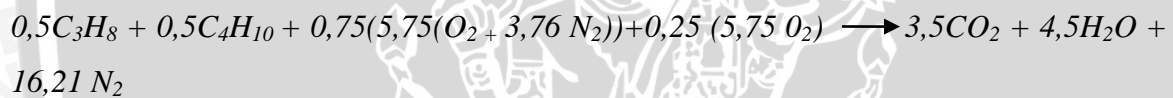
$$AFR = \frac{5,75 \times (1+3,76)}{(0,5+0,5)} = 27,37 \frac{\text{Mol udara}}{\text{Mol bahan bakar}}$$

AFR dapat juga dinyatakan dengan dasar perbandingan massa dengan menggunakan persamaan (2-2), sehingga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$AFR = \frac{M \text{ udara}}{M \text{ bahan bakar}}$$

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

Karena oksidator yang digunakan pada penelitian ini adalah udara, Udara 75 % - Oksigen 25%, dan udara 50 % - Oksigen 50 % maka diperlukan adanya perhitungan AFR untuk oksidator udara 75% - oksigen 25 % dan udara 50 % - oksigen 50 %. Persamaan reaksi stoikiometrik pembakaran untuk bahan bakar LPG dengan oksidator udara 75 % - oksigen 25 % pada kondisi stoikiometrik, adalah sebagai berikut:

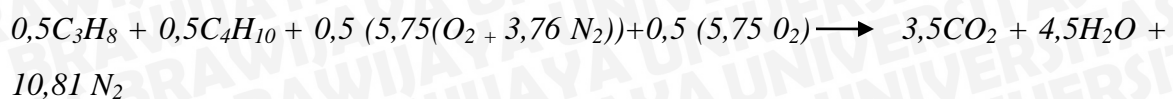


Sehingga perhitungan AFR LPG berdasarkan koefisien reaksi atau jumlah mol dari persamaan (2-1), menjadi :

$$AFR = \frac{N \text{ oksidator}}{N \text{ bahan bakar}}$$

$$AFR = \frac{0,75(5,75(1+3,76)) + 0,25(5,75(1))}{(0,5+0,5)} = 21,97 \frac{\text{Mol udara}}{\text{Mol bahan bakar}}$$

Untuk oksidator udara 50 % - oksigen 50 & pada kondisi stoikiometrik, persamaannya adalah sebagai berikut:



Sehingga perhitungan AFR nya menjadi :

$$AFR = \frac{N \text{ oksidator}}{N \text{ bahan bakar}}$$

$$AFR = \frac{0,5(5,75(1+3,76))+0,5(5,75(1))}{(0,5+0,5)} = 16,55 \frac{\text{Mol udara}}{\text{Mol bahan bakar}}$$

2.2.4 Rasio Ekuivalen (ϕ)

Pengertian dari rasio ekuivalen (ϕ) atau bisa juga disebut *equivalence ratio* adalah perbandingan dari rasio udara-bahan bakar untuk pembakaran dalam kondisi teoritis terhadap rasio udara-bahan bakar pada kondisi aktual, rumus rasio ekuivalen dituliskan sebagai berikut.

$$\phi = \frac{(AFR)_{stoic}}{(AFR)_{aktual}} \quad 2-3$$

(Wardana, 2008:65)

Keterangan :

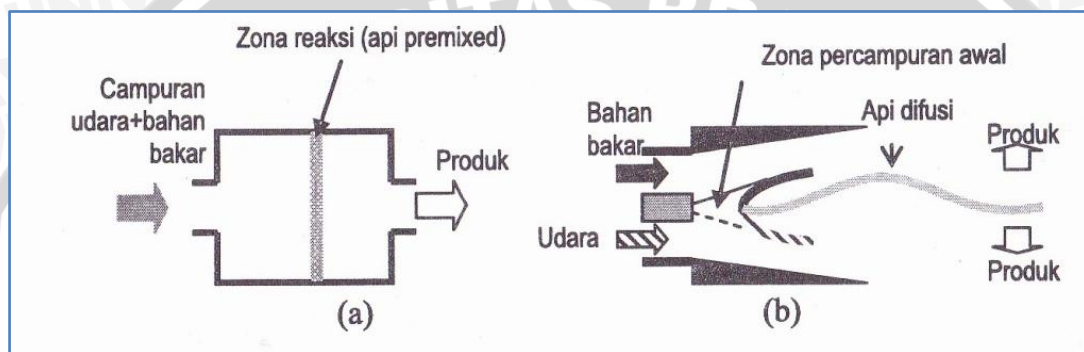
- ϕ = Rasio ekuivalen
- AFR_{stoic} = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik
- AFR_{aktual} = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi aktual

Perhitungan rasio ekuivalen berfungsi untuk menentukan jenis campuran udara dan bahan bakar yang terjadi pada reaksi pembakaran. Jenis campuran udara dan bahan bakar dapat dibagi 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 tersedia 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

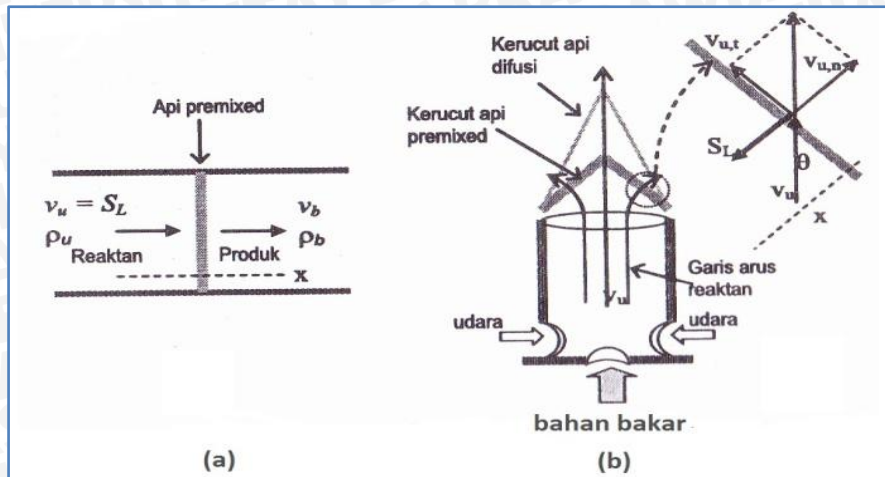
Proses pembakaran apabila diklasifikasikan menurut cara terbakarnya reaktan di zona reaksi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu pembakaran difusi dan pembakaran *premixed*. Pembakaran *premixed* merupakan proses pembakaran dimana udara dan bahan bakar bercampur terlebih dahulu secara mekanik sebelum dibangkitkan reaksinya oleh energi aktivasi (Gambar 2.4a). Sedangkan pada pembakaran difusi bahan bakar dialirkan ke ruang yang dipenuhi udara, lalu pada saat yang bersamaan diberikan energi aktivasi untuk mengaktifkan reaksi, sehingga proses pembakaran berlangsung bersamaan dengan pencampuran udara dan bahan bakar (Gambar 2.4b). Pada penelitian ini proses pembakaran yang digunakan pada *meso-scale combustor* adalah pembakaran *premixed*.



Gambar 2.4 (a) Pembakaran *premixed* (b) Pembakaran difusi
Sumber : Wardana, (2008:149)

2.3.1 Pembakaran *Premixed*

Menurut jenis alirannya api *premixed* dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu api *premixed* laminar dan api *premixed* turbulen. Pada penelitian ini akan lebih dibahas mengenai api *premixed* laminar karena api *premixed* laminar yang digunakan pada saat penelitian. 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 2.5 berikut.



Gambar 2.5 (a) Pembakaran *premixed* pada tube (b) Pembakaran bunsen
Sumber : Wardana, (2008:152)

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, 2008:153).

Pada gambar 2.5 (a) 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 terjadi perubahan densitas gas dan mengalir ke luar tegak lurus dengan permukaan api. Penurunan densitas gas yang terjadi bisa mencapai 10 kali lipat lebih rendah akibat kenaikan suhu yang cukup tinggi. 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 2.5 (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. Pada teoritisnya pembakaran pada kondisi stoikiometri membuat bahan bakar bereaksi seluruhnya sehingga tidak ada bahan bakar yang terbentuk pada produk hasil pembakaran. Namun pada kenyataannya, pada proses pembakaran yang dilakukan biasanya menggunakan *excess air* atau udara lebih. Peran dari *excess air* ini untuk memastikan tersedianya oksigen yang cukup untuk bereaksi dengan bahan bakar sehingga pembakaran dapat terjadi dengan sempurna.

2.3.2 Kestabilan pada Api *Premixed*

Pada penelitian yang telah dilakukan tentang pembakaran dapat diketahui bahwa api dapat menyala dengan stabil dan merambat jika campuran reaktan berada di dalam interval pada *flame stability limit*. *Flame stability limit* ini memiliki 2 batas yaitu batas bawah dan kisaran batas atas atau yang lebih dikenal sebagai *lower limit* dan *upper limit*. *Lower Limit* adalah campuran reaktan termiskin bahan bakar yang masih memungkinkan untuk api dapat menyala dan merambat dengan stabil. Sedangkan *Upper limit* adalah campuran reaktan terkaya bahan bakar yang masih memungkinkan untuk api dapat menyala dan merambat dengan stabil. Bilamana konsentrasi suatu bahan bakar berada diatas *upper limit*, kandungan oksigen tidak akan cukup untuk mendukung proses pembakaran. Pada dua batas *lower* dan *upper limit* ini merupakan kondisi rentang mudah terbakar pada suatu gas, dimana gas dan udara dalam komposisi yang tepat untuk dibakar saat dinyalakan.

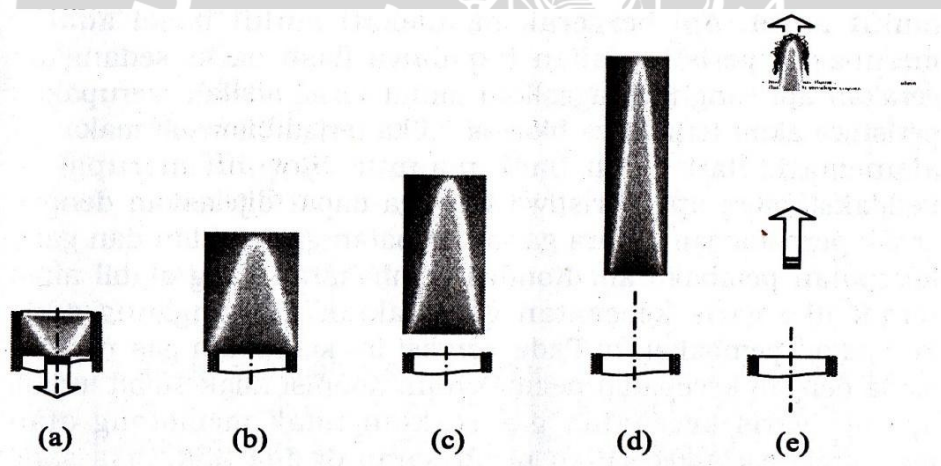
Campuran *stoikiometri* terjadi ketika oksigen dan molekul bahan bakar berada dalam proporsi yang tepat yang dibutuhkan untuk menyelesaikan reaksi pembakaran. Untuk besaran *lower* dan *upper limit* ini biasanya digunakan prosentase bahan bakar terhadap volume reaktan total. Nilai *lower* dan *upper limit* untuk setiap bahan bakar berbeda-beda. Hal ini dipengaruhi oleh berbagai faktor. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi karakteristik nyala api, diantaranya adalah variabel-variabel fisik yang meliputi temperatur dan tekanan, sedangkan variabel kimia meliputi rasio campuran, penambahan *inert* dan struktur hidrokarbon. Dengan adanya faktor yang mempengaruhi pada setiap campuran bahan bakar akan mempengaruhi juga nilai *lower* dan *Upper limit*nya. Kisaran dari nilai *lower* dan *upper limit* inilah yang menjadi parameter daerah kestabilan api.

Selain dari komposisi konsentrasi campuran bahan bakar dan oksidator, terdapat hal lain yang sangat mempengaruhi kestabilan api pada pembakaran api *premixed* yaitu kecepatan reaktan dan juga kecepatan rambat api. Api dapat stabil jika kecepatan reaktan (V_U) sama dengan kecepatan rambat api (S_L) ($V_U = S_L$). Ada dua fenomena yang dapat terjadi pada pembakaran api *premixed* jika kecepatan reaktan tidak sama dengan kecepatan api. Fenomena tersebut adalah *flashback* dan juga *lift-off*.

Flashback terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih besar daripada kecepatan campuran udara-bahan bakar ($V_U < S_L$), sehingga nyala api masuk ke saluran campuran reaktan menuju tabung bahan bakar (sumber bahan bakar). *Flashback* tidak hanya

mengganggu proses pembakaran, tetapi juga dari sisi keamanan bisa menjadi berbahaya karena bisa mengakibatkan terjadinya kebakaran dan ledakan.

Lift-off adalah kondisi dimana nyala api tidak menyentuh permukaan mulut tabung pembakar, tetapi stabil pada jarak tertentu dari ujung tabung pembakar. Peristiwa ini disebabkan karena kecepatan reaktan yang lebih besar daripada kecepatan pembakaran ($V_u > S_L$). 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 pada mulut tabung pembakaran. Peningkatan kecepatan reaktan secara terus menerus akan menyebabkan hulu api meloncat ke posisi jauh dari mulut pembakaran dan nyala dikatakan terangkat. Kondisi nyala terangkat inilah yang dikatakan dengan *lifted* dan bila kecepatan reaktan terus ditingkatkan kembali maka akan terjadi *blow-off* (padam). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 : (a) *flashback*, (b) *stabil*, (c) *liftoff*, (d) *lifted*, (e) *blowoff*
Sumber: Wardana (2008:169)

Untuk mendapatkan densitas energi panas yang tinggi pada pembakaran di dalam *combustor* maka kecepatan pembakaran yang tinggi harus tercapai sehingga api tetap stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi dan memperluas daerah reaksi dalam *combustor*.

2.4 LPG (*Liquified Petroleum Gasses*)

LPG adalah bahan bakar berupa gas yang dicairkan (*Liquified Petroleum*

Gasses).LPG merupakan produk minyak bumi yang diperoleh dari proses distilasi bertekanan tinggi. Fraksi yang digunakan sebagai umpan dapat berasal dari beberapa sumber yaitu dari gas alam maupun gas hasil dari pengolahan minyak bumi (*light End*). Komponen utama LPG terdiri dari hidrokarbon ringan berupa Propana (C_3H_8) dan Butana (C_4H_{10}), serta sejumlah kecil Etana (C_2H_6), dan Pentana (C_5H_{12}), LPG digunakan sebagai bahan bakar untuk rumah tangga dan industri. LPG terutama digunakan oleh semua lapisan masyarakat yang kebutuhannya semakin meningkat dari tahun ke tahun karena termasuk bahan bakar yang ramah lingkungan. Sebagai bahan bakar untuk keperluan rumah tangga, LPG harus memenuhi beberapa persyaratan khusus dengan tujuan agar aman dipakai dalam arti tidak membahayakan bagi si pemakai dan tidak merusak peralatan yang digunakan serta efisien dalam pemakaiannya.

Oleh sebab itu untuk menjaga faktor keselamatan, LPG dimasukkan ke dalam tabung yang tahan terhadap tekanan yang terbuat dari besi baja dan dilengkapi dengan suatu pengatur tekanan. Disamping itu untuk mendeteksi terjadinya kebocoran LPG, maka LPG sebelum dipasarkan terlebih dahulu ditambahkan zat pembau (*odor*) sehingga apabila terjadi kebocoran segera dapat diketahui. Pembau yang ditambahkan harus melarut sempurna dalam LPG, tidak boleh mengendap. Untuk maksud itu digunakan etil merkaptan (C_2H_5SH) atau butil merkaptan (C_4H_9SH). Sedangkan dibidang industri produk LPG digunakan sebagai pengganti *freon, aerosol, refrigerant/cooling agent*, kosmetik dan dapat pula digunakan sebagai bahan baku produk khusus.

2.4.1 Jenis LPG

Sesuai dengan penggunaannya sebagai bahan bakar elpiji dibedakan atas:

1. LPG Mix

Adalah campuran propane dan butana dengan komposisi antara 50 % volume propana dan 50 % volume butana serta diberi zat pembau (*odor*) dan umumnya digunakan untuk bahan bakar rumah tangga dan dijual di pasaran.

2. LPG propana dan LPG butana.

Adalah elpiji yang masing-masing mengandung propane 95% dan butane 97,5% volume dan diberi odorant (*mercaptant*), umumnya digunakan untuk keperluan industri.

2.4.2 Persyaratan LPG

Syarat-syarat utama dalam pemakaian LPG adalah harus dipenuhinya:

1. Syarat pembakaran

Pada saat digunakan sebagai bahan bakar untuk kompor LPG harus memberi warna api kompor yang biru dan tidak memberi asap.

2. Syarat penguapan

Kemampuan menguap pada bahan bakar LPG merupakan hal yang penting. LPG harus cukup mudah menguap agar mudah dinyalakan di waktu dingin. Seperti diketahui saat dalam tabung gas LPG adalah berbentuk cair, namun saat dipakai dalam kompor (pada tekanan atmosfer) dengan cepat LPG berubah menjadi gas. Untuk memenuhi persyaratan penguapan maka tekanan uap LPG tidak boleh lebih dari 120 psig.

3. Syarat kebersihan

Syarat kebersihan adalah dibatasinya kandungan air dan kandungan belerang, dimaksudkan agar pada penggunaannya LPG tidak memberikan kotoran.

4. Syarat keselamatan

Karena pemakaiannya sebagai bahan bakar rumah tangga, jika terjadi kebocoran maka LPG harus cepat dapat dideteksi maka dari itu LPG diberi zat pembau yang khas. Sehingga dengan adanya zat pembau tersebut kebocoran pun mudah untuk dideteksi. Zat pembau yang digunakan pada LPG adalah campuran Ethyl atau Buthyl mercaptan.

2.4.3 Sifat LPG

Perlu diketahui, gas LPG bersifat *flammable* (mudah terbakar). Dalam batas *flammability*, LPG adalah sumber api yang terbuka. Sehingga letupan (percikan api) yang sekecil apapun dapat segera menyambar gas LPG. Maka untuk menjaga keamanan pastikan bahwa bau gas LPG telah hilang sama sekali dari dalam rumah, walaupun membutuhkan waktu yang agak lama. Hal ini karena sifat gas LPG yang sangat lamban berputar di udara.

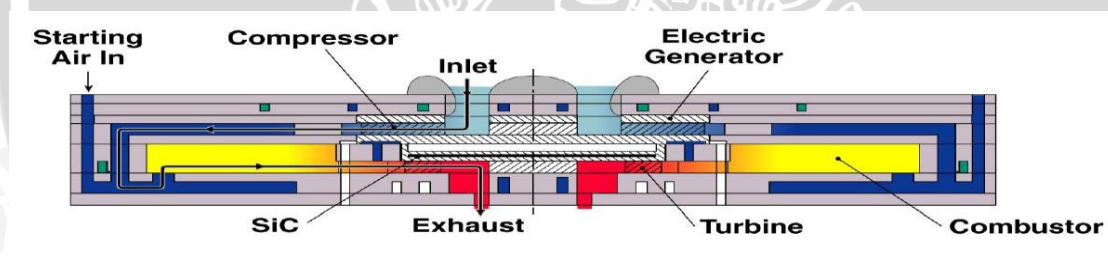
Sebagai bahan bakar, gas LPG mudah terbakar apabila terjadi persenyawaan di udara. Untuk mencegah hal-hal yang tidak diinginkan perlu diketahui beberapa sifat khususnya.

1. Tekanan gas LPG cukup besar, sehingga bila terjadi kebocoran LPG akan membentuk gas secara cepat, memuai dan sangat mudah terbakar.

2. LPG menghambur di udara secara perlahan sehingga sukar mengetahuinya secara dini.
3. Berat jenis LPG lebih besar dari pada udara sehingga cenderung bergerak ke bawah.
4. LPG tidak beracun.

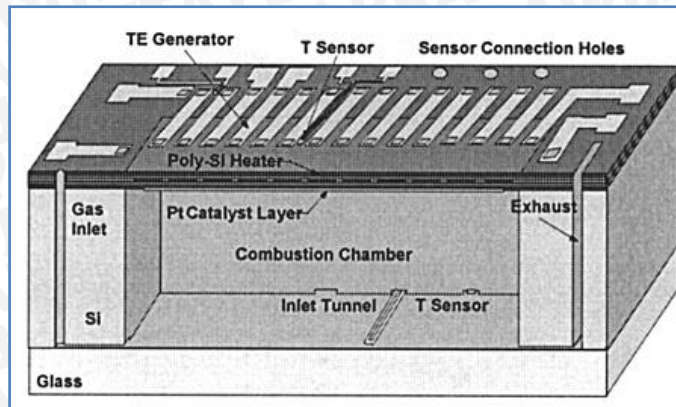
2.5 Micropower Generator dan Micro-/Meso-Scale Combustor

Micropower generator adalah sumber energi berskala mikro yang memanfaatkan prinsip pembakaran dalam pembangkitan energinya. *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 2.7 *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 energy foton cahaya melalui emitter dan kemudian energi foton ini dikonversi menjadi energi listrik menggunakan sel *photovoltaic* (PV).



Gambar 2.8 *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*. *Microcombustion* merupakan proses pembakaran pada suatu *combustor* (ruang bakar) yang memiliki panjang karakteristik relatif mendekati *quenching distance* atau lebar minimal suatu ruang bakar agar dapat terjadi pembakaran di dalamnya. Suatu *combustor* yang dimensinya mendekati *quenching distance* disebut *microcombustor* (Maruta, 2010). *Microcombustor* terbagi menjadi berbagai macam jenis dan ukuran yang ada. Namun secara garis besar *microcombustor* diklasifikasikan secara sederhana menjadi dua golongan yaitu *micro-scale combustor* dan *meso-scale combustor*. Pengklasifikasian tersebut berdasarkan 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, namun karakteristik pembakaran masih menyerupai *microcombustion* (Maruta, 2010).

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 Hipotesa

Proses pembakaran bahan bakar gas LPG pada *meso-scale combustor* menggunakan oksidator dengan kadar oksigen yang semakin tinggi membuat api akan lebih stabil dan menghasilkan temperatur nyala api yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan oksidator udara. Hal ini disebabkan pada pembakaran dengan menggunakan oksidator udara terdapat unsur nitrogen yang lebih banyak dimana nitrogen bisa berperan sebagai inhibitor dan mengganggu proses pembakaran maka dari itu diharapkan dengan semakin tingginya kadar oksigen pada oksidator maka api di dalam *meso-scale combustor* lebih stabil dan temperatur nyala api yang dihasilkan lebih tinggi.

