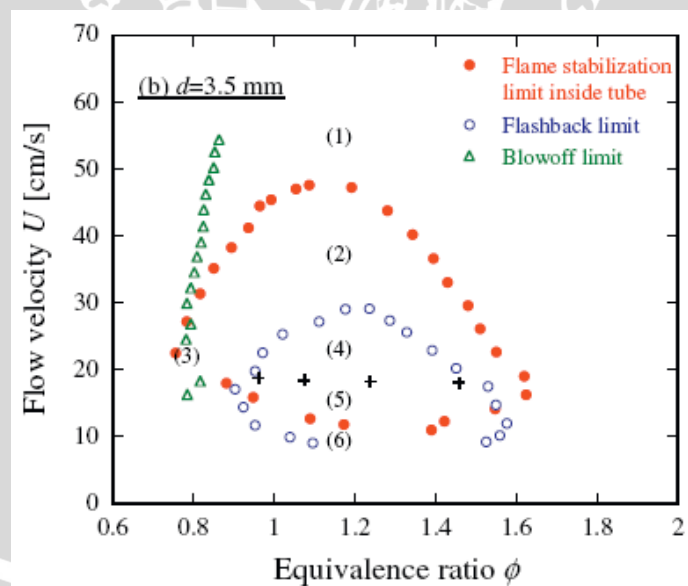


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Mikami, et al, 2013 melakukan penelitian tentang penggunaan *wire mesh* pada *meso-scale combustor* terhadap kestabilan api dan kecepatan pembakaran (*flame propagation speed*). Dari hasil penelitian tersebut diketahui bahwa dengan menyisipkan sebuah *wire mesh* yang terbuat dari material yang memiliki nilai konduktivitas termal yang tinggi yakni *stainless steel*, dapat mestabilkan pembakaran dalam *meso-scale combustor* yang terbuat dari material yang terbuat dari bahan yang memiliki nilai konduktivitas termal rendah yakni *quartz glass tube*. Itu disebabkan karena *wire mesh* memiliki peranan sebagai *flame holder* yang mengakibatkan terjadinya perpindahan panas (*heat recirculation*) dari *flame* ke reaktan sehingga terjadi pembakaran yang stabil dalam *meso-scale combustor*. *Stable flame* terjadi pada *downstream mesh*. Tanpa *mesh*, *stable flame* hanya terjadi pada ujung pipa. Batas *flash back* dan *blow off* pada *combustor* tanpa *wire mesh* dan batas nyala api dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram kestabilan api & *flammability limit* dalam *meso-scale combustor*
Sumber : (Mikami, et al, 2013)

Dari penelitian ini juga diketahui bahwa kecepatan pembakaran (*flame propagation speed*) meningkat di daerah sekitar *wire mesh*. Hal ini terjadi karena *wire mesh* dapat meningkatkan perpindahan panas konduksi dari *flame* melalui dinding

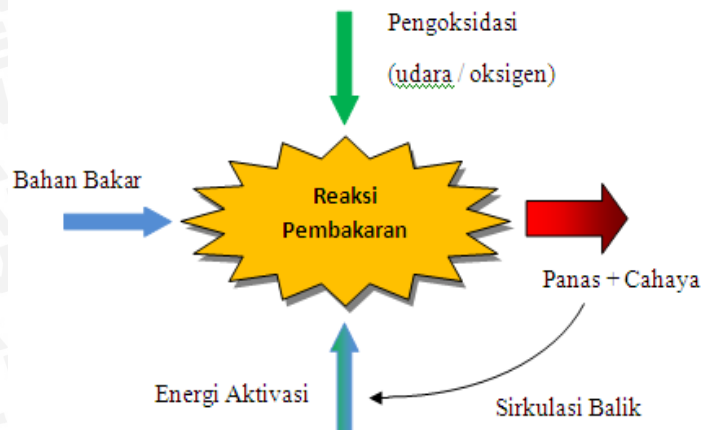
combustor untuk pemanasan awal reaktan, sehingga temperatur dan kecepatan pembakaran juga meningkat. Sehingga api (pembakaran) menjadi lebih stabil dalam batas nyala tertentu seperti yang ditunjukkan pada diagram.

Yuliati, 2013 melakukan penelitian untuk meningkatkan laju pembangkitan energi yang tinggi pada *meso-scale combustor* dengan menggunakan *single* dan *double wire mesh*. Dimana *mesh* yang kedua berperan sebagai penahan untuk api yang menyala pada *downstream mesh* yang pertama agar api tidak mengalami *blow-off* pada kecepatan reaktan yang relatif besar. Karena untuk mendapatkan *meso-scale combustor* yang memiliki laju pembangkitan energi yang besar diperlukan kecepatan reaktan yang besar pula. Pada penelitian tersebut dikatakan bahwa *combustor* yang menggunakan *single wire mesh* api dapat stabil hingga mencapai V_{total} reaktan 43cm/s sedangkan untuk *combustor* dengan *double wire mesh* api stabil pada V_{total} reaktan mencapai 57 cm/s, sehingga dengan menggunakan *double wire mesh* pada *meso-scale combustor* didapatkan daerah *flammability limit* yang lebih luas dengan kecepatan total reaktan yang lebih tinggi dibanding dengan *single wire mesh*.

Dalam penelitian ini akan diamati pengaruh penggunaan *double fuel inlet* dan *triple wire mesh* pada *meso-scale combustor* terhadap karakteristik pembakaran yang meliputi *flammability limit* dan visualisasi api.

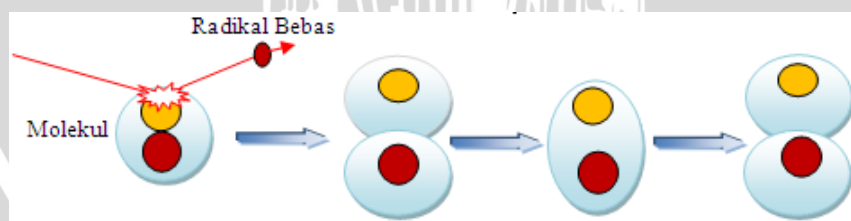
2.2 Proses Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia yang cepat antara pengoksidasi (udara atau oksigen) dan bahan bakar yang dapat terbakar, 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 dibutuhkan untuk mengaktifkan molekul-molekul bahan bakar. Jumlah energi yang dibutuhkan untuk memutuskan satu mol ikatan kimia bahan bakar disebut energi disosiasi (kJ/mol). Gambar 2.2 menggambarkan hubungan antara bahan bakar, pengoksidasi dan energi aktivasi.



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

Agar reaksi pembakaran bisa berlangsung maka molekul – molekul bahan bakar dibuat bermuatan dengan cara memutus ikatan kimia suatu bahan bakar menjadi molekul bermuatan yang disebut ion. Molekul bermuatan akibat pemutusan ikatan molekul – molekul disebut radikal bebas. Radikal bebas ini jika menghantam (menumbuk) molekul lain dapat menyebabkan ikatan molekul tersebut merenggang dan mengerut secara periodik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Dengan tambahan sedikit energi dari luar pada saat jarak ikatan atom dalam keadaan merenggang dapat menyebabkan atom – atom dalam molekul terputus dan bermuatan. Jadi peranan radikal bebas sangat berpengaruh dalam 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 pada ikatan rangkap dan seterusnya.

2.2.1 Reaksi Kimia dan Proses Pembakaran

Dalam proses pembakaran sering kali ditemui istilah pembakaran stoikiometri atau biasa disebut dengan pembakaran sempurna, merupakan pembakaran yang mana semua atom dari bahan bakar dan pengoksidasi bereaksi seluruhnya (sempurna) menghasilkan berbagai produk seperti CO_2 , H_2O , dan N_2 .

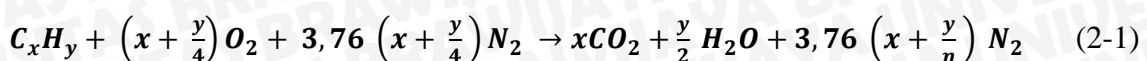
Biasanya udara yang dipakai untuk mengoksidasi bahan bakar mengandung Oksigen (O_2), Nitrogen (N_2), Argon (Ar), Karbon dioksida (CO_2), Uap air (H_2O), dan sejumlah gas dalam bagian yang cukup kecil. Udara yang normal merupakan campuran gas-gas meliputi 78,03 % N_2 ; 20,99 % O_2 ; 0,94 % Ar ; 0,03 %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

Tabel 2.1 komposisi gas dalam udara kering

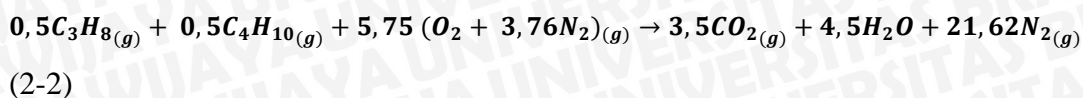
Udara	Proporsi Volume %		Proporsi masa %	
	Aktual	Penggunaan	Aktual	Penggunaan
Nitrogen	78,03	79	75,45	76,8
Oksigen	20,99	21	23,20	23,2
Argon	0,94	0	1,30	0
CO_2	0,03	0	0,05	0
Gas lainnya	0,01	0	-	0

Sumber : Wallace J.M dan Peter V.H (2006)

Agar lebih memudahkan perhitungan dalam reaksi pembakaran, dapat dipakai asumsi udara terdiri 21 % volume O_2 dan 79% volume 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 (2-1):



Setelah mengetahui persamaan reaksi pembakaran stoikiometrik, maka untuk LPG yang terdiri dari 50% propane dan 50% butane dapat dituliskan dengan persamaan (2-2) :



Reaktan

Produk

2.2.2 Air Fuel Ratio (AFR) dan Equivalen Ratio (Φ)

Faktor lainnya yang sangat berdampak bagi proses pembakaran adalah perbandingan campuran udara dan bahan bakar (AFR). Rasio udara/bahan bakar (*air-fuel ratio*) dari suatu reaksi pada kondisi stoikiometri dinyatakan dengan persamaan berikut, dimana N adalah jumlah mol sedangkan M adalah massa molekul:

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

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

(Wardana, 2008:58-59)

Sehingga perhitungan AFR C_3H_8 dan C_4H_{10} berdasarkan koefisien reaksi atau jumlah mol pada persamaan (2-2), menjadi

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

$$(AFR)_{stoic} = \left(\frac{5,75(1+3,76)}{(0,5+0,5)} \right)_{stoic} = 27,37 \frac{Mol_{udara}}{Mol_{bahan\ bakar}}$$

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

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

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

Menurut hukum Avogadro, gas-gas yang memiliki volume yang sama, pada temperatur dan tekanan yang sama, memiliki jumlah partikel (jumlah mol) yang sama pula. Sehingga dapat menghitung AFR stoikiometri LPG bila dinyatakan dalam perbandingan volume, berdasarkan densitasnya.

Diketahui :

- Massa jenis udara pada 27° C adalah 0,0012 gr/cm³.
- Massa jenis propana 0,00183 gr/cm³ dan massa jenis butana 0.00248 gr/cm³
- Massa jenis LPG (50% propana dan 50% butana) adalah 0,002155 gr/cm³

Berdasarkan data yang diketahui diatas maka dengan persamaan $\rho = \frac{m}{V}$ kita dapat menghitung volume menggunakan persamaan $V = \frac{m}{\rho}$.

$$\begin{aligned} \bullet \quad V_{\text{udara}} &= \frac{m}{\rho} & V_{\text{bahan bakar}} &= \frac{m}{\rho} \\ &= \frac{789,36}{0,0012} & &= \frac{51}{0,002155} \\ &= 657.800 \text{ cm}^3 & &= 23.665,89 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Sehingga perbandingan volume antara bahan bakar dan udara dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_{\text{udara}} &: & V_{\text{bahanbakar}} \\ 657.800 \text{ cm}^3 &: & 23.665,89 \text{ cm}^3 \\ \mathbf{27,57} &: & \mathbf{1} \end{aligned}$$

Rasio ekuivalen dapat didefenisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio bahan bakar dan udara (AFR) aktual, dituliskan dengan persamaan (2-5) :

$$\Phi = \frac{(AFR)_{\text{stoikio}}}{(AFR)_{\text{aktual}}} \quad (2-5)$$

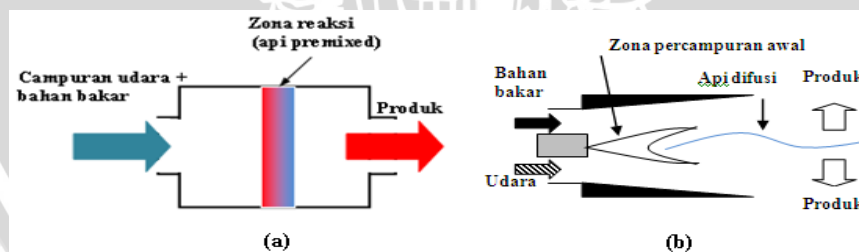
(Wardana, 2008:65)

$AFR_{stoikio}$ didapat dari perhitungan AFR_{stoic} LPG berdasarkan mol atau volume sebesar 27,37 sedangkan AFR_{aktual} adalah perhitungan AFR yang didapat dari hasil penelitian yaitu membagi debit udara aktual dengan debit bahan bakar aktual. Rasio ekuivalen adalah rasio kesetaraan yang menyatakan suatu pembakaran itu kaya bahan bakar, miskin bahan bakar, atau campuran stoikiometri.

- $\Phi > 1$ 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 stoikiometri

2.2.3 Klasifikasi Pembakaran

Pada dasarnya klasifikasi pembakaran secara umum ditentukan dari beberapa cara, yang pertama ditentukan oleh cara reaktan terbakar didalam zona reaksi. Pada cara ini 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 2.4 menunjukkan perbedaan pembakaran *premixed* dengan pembakaran difusi.



Gambar 2.4 Klasifikasi pembakaran (a) Pembakaran *Premixed*; (b) Pembakaran difusi

Sumber: Wardana (2008:149)

Pada Gambar 2.4 (a) bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen atau udara) telah dicampur secara sempurna sebelum masuk ke ruang bakar 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. Sedangkan pada Gambar 2.4 (b) yaitu pembakaran difusi. Pembakaran jenis ini merupakan pembakaran yang terjadi dimana bahan bakar dan oksidator bercampur pada saat keluar dari ujung burner, sehingga sebelumnya tidak tercampur antara bahan bakar dengan oksidator. Pembakaran difusi memiliki karakteristik yang berbeda dengan pembakaran *premixed*, yaitu laju pembakaran ditentukan oleh laju bahan bakar dan oksidator dialirkan dalam ukuran yang tetap untuk bereaksi. Sedangkan untuk pembakaran *premixed* ditentukan oleh laju pelepasan energi dan laju reaksi oksidasi yang telah tercampur sebelumnya antara bahan bakar dengan oksidator.

Karakter yang kedua ditentukan berdasarkan karakter aliran reaktan yaitu aliran laminar atau aliran turbulen. Pada pembakaran dengan aliran laminar semua proses pencampuran dan proses penjalaran reaktan maupun panas terjadi secara molekuler. Dan pada pembakaran dengan aliran turbulen semua proses pencampuran dan penjalaran di bantu oleh gerakan – gerakan pusaran turbulen.

2.3 Pembakaran *Premixed*

Nyala api *premixed* terjadi jika bahan bakar dan oksidator sudah tercampur sebelum masuk ke dalam daerah reaksi, sedangkan nyala api difusi terbentuk karena bahan bakar dan oksidator saat memasuki daerah reaksi belum tercampur. Nyala api *premixed* memiliki daerah terang, hal ini menunjukkan tempat terbentuknya reaksi dan energi panas dilepaskan ke daerah reaksi (*reaction zona*) yang mempunyai ketebalan ± 1 mm. Warna terang ini dapat berubah-ubah tergantung rasio udara dan bahan bakar. 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, dimana pada daerah *preheat zone* merupakan daerah transisi terjadinya perubahan molekul gas bahan bakar menjadi gas yang siap bereaksi.

Dibanding dengan pembakaran difusi, pembakaran *premixed* 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.

2.3.1 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 :

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

2.3.2 *Flammability Limit* dan Kestabilan api

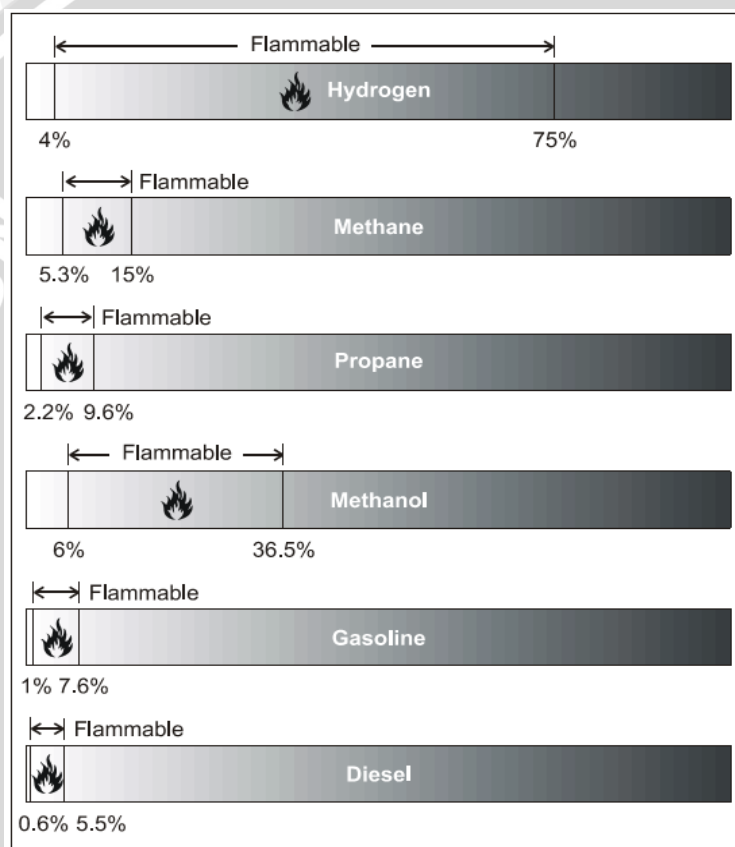
Dalam kenyataannya nyala api dapat terjadi jika terdapat campuran antara oksidator dan bahan bakar yang mendukung. Dalam *flammability limit* terdapat kisaran (*flammability range*) campuran bahan bakar dan oksidator yang menyebabkan terjadinya nyala api. Kisaran (*flammability range*) itu dapat didefinisikan sebagai kisaran batas bawah mampu nyala dan kisaran batas atas mampu nyala atau yang lebih dikenal sebagai *lower flammability limit* (LFL) dan *upper flammability limit* (UFL).

Lower flammability limit (LFL) adalah suatu kondisi atau daerah dimana api dapat menyala stabil pada campuran udara dengan konsentrasi gas terendah. Bilamana konsentrasi suatu campuran reaktan berada di bawah *lower flammability limit* (LFL), nyala api tidak akan terbentuk dikarenakan kandungan bahan bakar tidak akan cukup untuk proses pembakaran. *Upper flammability limit* (UFL) adalah suatu kondisi atau daerah dimana api dapat menyala stabil pada campuran udara dengan konsentrasi gas tertinggi. Bilamana konsentrasi suatu campuran reaktan berada di atas *upper flammability limit* (UFL), nyala api tidak akan terbentuk dikarenakan kandungan oksigen tidak akan cukup untuk proses pembakaran. Antara dua batas LFL dan UFL 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 rasio yang tepat yang dibutuhkan untuk membuat reaksi pembakaran. Untuk besaran LFL dan UFL biasanya digunakan prosentase % terhadap volume campuran. Sebagai contoh gas propana, nyala api hanya akan terbentuk pada kisaran campuran gas

propana terhadap volume campuran sebesar LFL 2.2 % dan UFL 9.6 % . Nilai ini tentu berbeda dengan nilai LFL dan UFL untuk bahan bakar yang lainnya. Nilai LFL dan UFL untuk setiap bahan bakar dipengaruhi oleh berbagai faktor. Faktor dapat mempengaruhi karakteristik nyala api, diantaranya adalah variabel-variabel fisik yang meliputi temperatur dan tekanan, sedangkan variabel kimia meliputi rasio campuran, penambahan *innert* dan struktur hidrokarbon.

Dengan adanya faktor yang mempengaruhi pada setiap campuran bahan bakar akan mempengaruhi juga nilai LFL dan UFL. Gambar 2.5 menjelaskan perbandingan nilai LFL dan UFL tiap bahan bakar pada tekanan dan temperatur atmosfer.

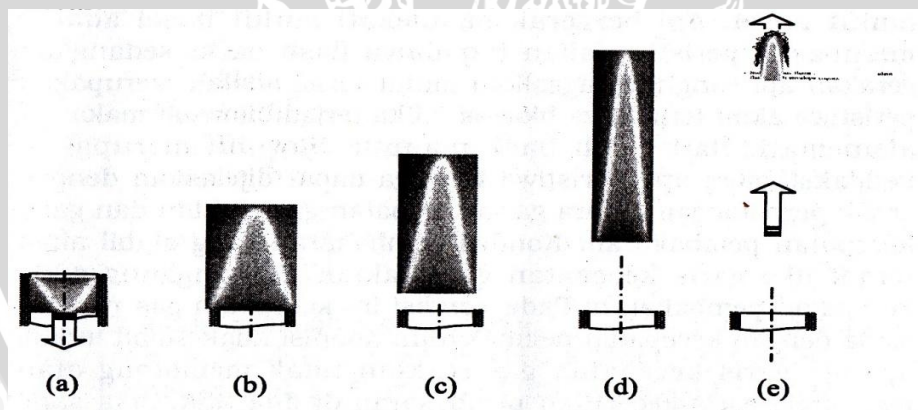


Gambar 2.5 *Flammability range* tiap bahan bakar pada suhu atmosfer
Sumber : Lanz (2001:1-20)

Api akan stabil bila konsentrasi campuran bahan bakar dengan oksidator berada pada komposisi yang tepat, hal ini terjadi bila kecepatan reaktan (V_U) sama dengan kecepatan rambat api (S_L) ($V_U = S_L$). Namun bila kecepatan reaktan lebih besar daripada kecepatan rambat api ($V_U > S_L$) mengakibatkan terjadinya *lifted* atau *blow-off*. Beda halnya bila dijumpai kecepatan reaktan lebih rendah daripada kecepatan rambat api ($V_U < S_L$) maka akan mengakibatkan terjadinya *flashback*.

Flashback merupakan suatu fenomena dimana nyala api bergerak masuk ke dalam *combustor* dan terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih besar daripada kecepatan campuran udara-bahan bakar, sehingga nyala api masuk ke saluran campuran reaktan menuju tabung bahan bakar (sumber bahan bakar), dapat juga disebut sebagai *back fire* atau *light back*. *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. 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 disimak Gambar 2.6



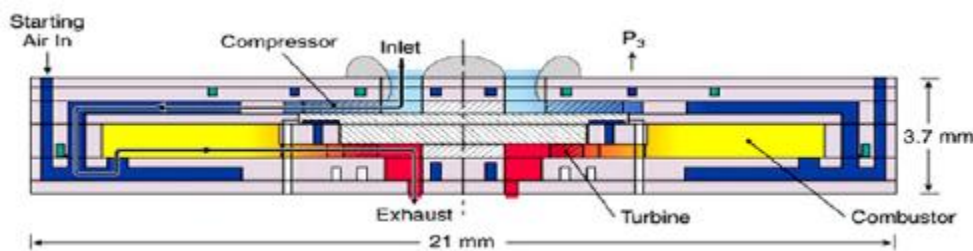
Gambar 2.6 : (a) *flashback*, (b) *stabil*, (c) *lift-off*, (d) *lifted* dan (e) *blow-off*
Sumber: Wardana (2008:169)

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 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro (*Micro-power Generator*)

Tingginya densitas energi yang terkandung dalam bahan bakar hidrokarbon mendorong beberapa penelitian guna mengembangkan sumber energi khususnya pengembangan energi dalam ukuran mikro (*micro-power generator*), seperti halnya pada penggunaan, kendaraan mikro tidak berawak, *micro-satellite thrusters*, *micro chemical reactors and sensors* dan yang terakhir peralatan listrik *portable*. Khusus pada peralatan listrik *portable* seperti (handphone, laptop, kamera, ipod, mp3 player, notebook) atau biasa disebut *gadget* memiliki sumber daya yang tersimpan dalam baterai. Baterai tersebut mempunyai peranan yang sangat signifikan dalam membantu aktifitas manusia berdasarkan fungsi *gadget* yang ada. Namun pada saat ini baterai yang beredar di pasaran 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 yang melatar belakangi diadakannya penelitian mengenai *micro-power generator*.

Micro-power generator adalah suatu alat untuk membangkitkan energi dengan skala pembangkit yang berukuran 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*, *micro gas turbine* merupakan pengembangan dari beberapa mesin turbin jenis turbin gas untuk pembangkit energi listrik dengan menggunakan *silicon* berbasis *micro-fabrication technology*. Dilaporkan bahwa desain sebuah generator pada *micro gas turbine* mampu memproduksi hingga 50 W daya listrik dengan mengkonsumsi 7g bahan bakar jet /jam. *Micro-gas turbine* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 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. Namun efisiensi dari *micro-gas turbine* sangat kecil, yaitu sekitar 2 %. Hal ini disebabkan karena rasio kompresi yang rendah akibat masalah pada *balancing* dan *sealing*.

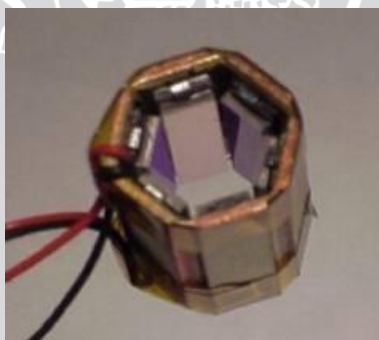


Gambar 2.7 *Micro gas turbine*

Sumber: Ju, Maruta (2011: 10)

Berikutnya 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 2.8 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 2.8 Prototip *micro-power generator*

Sumber: Chou (2011: 2)

2.5 *Micro dan Meso-Scale Combustor*

Meso- dan micro-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. Dari sumber yang terkait seperti yang dikatakan oleh Ju dan Maruta (2011), didapatkan bahwa penentuan *micro* atau *meso* dibedakan berdasarkan tiga kategori yang berbeda. Kategori pertama ditentukan berdasarkan ukuran absolut *combustor*. Sehingga *combustor* yang dikategorikan menjadi *micro-scale combustor* adalah *combustor* yang hanya memiliki ukuran kurang dari 1 mm sedangkan *combustor* yang masuk dalam *meso-scale combustor* memiliki ukuran yang cenderung lebih besar dari *micro-scale* yaitu sebesar 1-10 mm. Kategori yang kedua ditentukan berdasarkan *quenching diameter* bahan bakar. *Micro-scale combustor* adalah *combustor* dengan ukuran diameter lebih kecil dari *quenching distance* dari suatu bahan bakar dan *meso-scale combustor* berarti *combustor* dengan ukuran diameternya lebih besar daripada *quenching distance* bahan bakar. Kategori yang terakhir berdasarkan perbandingan *combustor* terhadap peralatan konvensional yang akan menggunakan *combustor* tersebut. Baik *micro* dan *meso scale combustor* kedua *combustor* tersebut memiliki pengertian yang berbeda pada setiap bidang atau peralatan yang digunakan.

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*, *lift off* dan *blow off* telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya.

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.

2.6 LPG (*Liquified Petroleum Gass*)

LPG merupakan bahan bakar berupa gas yang dicairkan (*Liquified Petroleum Gasses*) 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 eEnd*). 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 ketahun 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 elpiji digunakan sebagai pengganti *freon, aerosol, refrigerant / cooling agent*, kosmetik dan dapat pula digunakan sebagai bahan baku produk khusus.

2.6.1 Jenis LPG

Sesuai dengan penggunaannya sebagai bahan bakar elpiji dibedakan atas:

1. LPG Mix

LPG yang digunakan dalam penelitian ini adalah produk lokal PT. Pertamina Indonesia dengan komposisi 50% propana dan 50% butana berdasarkan fraksi massa yang memiliki nilai kalori sebesar 11.254,61 Kcal/Kg atau 47.118247 MJ/kg.

2. LPG propane dan Elpiji butana.

Adalah LPG yang masing-masing mengandung propana 95 % dan butana 97,5 % volume dan diberi odorant (mercaptant), umumnya digunakan untuk keperluan industri.

2.6.2 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. Agar api kompor berwarna biru, maka komposisi campuran propana dan butana harus minimum 97,5%. Sebaliknya jika LPG mengandung fraksi C_5^+ (C_6 heavier) lebih dari maksimumnya yaitu 2,0% maka nyala api kompor agak kemerah-merahan. Jadi agar syarat pembakaran menjadi baik maka komposisi C_2 harus maksimum 0,2% vol, C_3 dan C_4 minimum 97,5% vol serta kandungan C_5^+ (C_6 heavier) maksimum 2,0% vol.

2. Syarat penguapan

Kemampuan menguap adalah sifat penting dalam penggunaan, LPG harus cukup mudah menguap agar mudah dinyalakan diwaktu 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 keselamatan

Dalam pemakaiannya sebagai bahan bakar rumah tangga, jika terjadi kebocoran maka LPG harus cepat dapat dideteksi dengan diberi bau yang khas, agar baunya cepat dikenali saat terjadi kebocoran, maka pada LPG diberi campuran Ethyl atau Buthyl mercaptan sebanyak 50/100 AG.

Saat masih di pabrik, jika terjadi kebocoran LPG di malam hari akan sangat berbahaya, karena specific gravity LPG sama dengan atau lebih besar dari SG udara, maka LPG akan terdistribusi merata di atas tanah pada malam hari. Untuk menjaga agar cairan LPG tidak merusak tabung gas dalam penyimpanan atau merusak kompor dalam penggunaannya dengan terjadinya proses pengkaratan

maka harus ada persyaratan pemeriksaan Copper strip pada 100°F selama 1 jam dengan nilai maksimum No. 1.

4. Syarat kebersihan

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

2.6.3 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 kebawah.
4. LPG tidak mengandung racun.
5. Daya pemanasannya cukup tinggi, namun tidak meninggalkan debu dan abu (sisa pembakaran).
6. Cara penggunaannya cukup mudah dan praktis

2.7 Hipotesa

Dengan adanya *double fuel inlet* dan *triple wire mesh*, maka akan terbentuk *double flame* pada satu ruang *combustor*, interaksi antara *double flame* tersebut akan dapat meningkatkan *flammability limit* ke arah kecepatan reaktan yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan kenaikan laju pembangkitan energi setiap satu satuan volume. Dengan meningkatnya laju pembangkitan energi dalam *meso-scale combustor*, diharapkan nantinya dapat menghasilkan *micro power generator* yang memiliki densitas energi yang tinggi.

