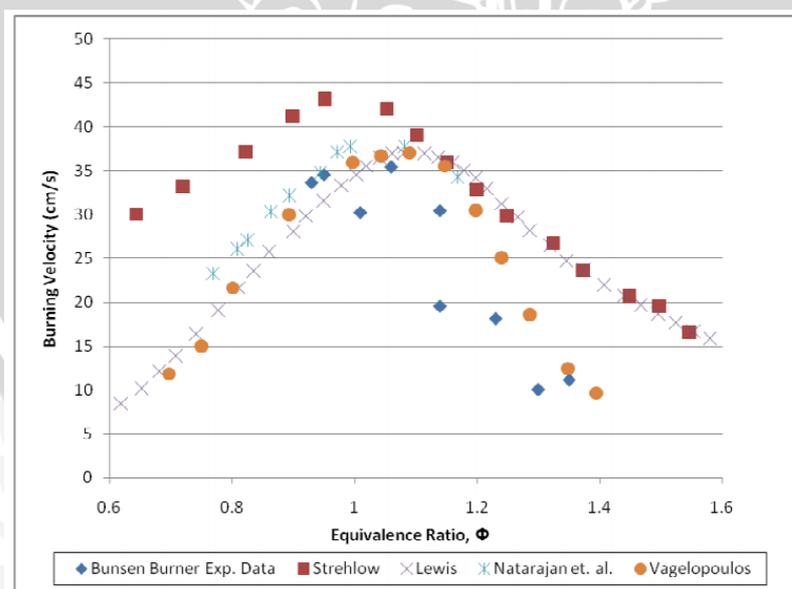


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

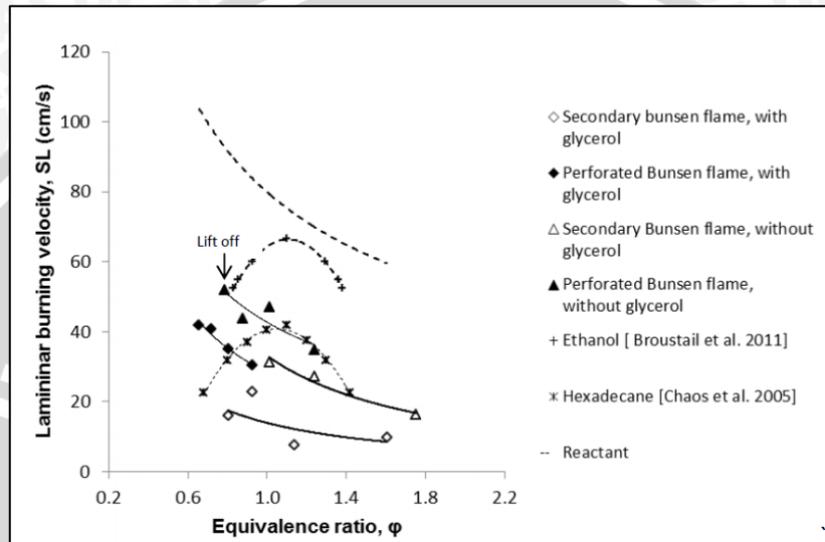
Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengetahui karakteristik api. Buffam dan Cox (2008) melakukan penelitian mengenai pengukuran kecepatan pembakaran laminer campuran metana dan udara dengan *bunsen burner* dan *slot burner*. Tujuan utama dari proyek ini adalah untuk merancang dua apparatus pembakaran untuk mengevaluasi kecepatan pembakaran laminer dengan berbagai ukuran api. *Slot burner* menggunakan tiga ukuran slot yang berbeda dan memberikan hasil yang memuaskan bila dibandingkan dengan data yang diterbitkan sebelumnya. Kecepatan yang diperoleh dengan menggunakan pembakar slot yang jauh lebih tinggi dari data yang diterbitkan sebelumnya. Hal ini bisa disebabkan oleh terbawanya udara dari sisi-sisi api yang mendinginkan suhu api dan mempengaruhi kecepatan pembakarannya. Kelompok ini juga mengalami masalah turbulensi dengan apparatus ini. Data *bunsen burner* cukup akurat dimana kecepatan pembakaran laminer tertinggi terjadi ketika *equivalence ratio* hampir mendekati 1 dimana campuran bahan bakar dan udara sama dengan kondisi stoikiometrinya.



Gambar 2.1 Diagram hasil pengujian eksperimental kecepatan pembakaran laminer pada *bunsen burner*.

Sumber : (Buffam & Cox, 2008)

Wirawan (2013) dalam penelitiannya yang berjudul pembakaran *premixed* minyak kelapa pada *perforated burner* melakukan penelitian kecepatan pembakaran laminer dengan *perforated burner* yang terbuat dari baja, terdiri dari 19 lubang dengan diameter setiap lubang 2.5 mm dan jarak antar lubang 3.75 mm. Dari hasil penelitian diketahui bahwa pada campuran paling miskin api terjadi di setiap lubang *perforated* dan mencapai kecepatan pembakaran laminer tertinggi.



Gambar 2.2 Diagram hasil pengujian eksperimental kecepatan pembakaran laminer pada *perforated burner*.

Sumber : (Wirawan, 2013)

Pranoto (2013) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi *air fuel ratio* terhadap karakteristik api pembakaran *premixed* minyak kapur pada *perforated burner*. Dari hasil penelitian diketahui bahwa kecepatan api dan temperatur api meningkat seiring dengan bertambahnya nilai *air fuel ratio*. Sedangkan tinggi api semakin besar hingga AFR tertentu dikarenakan semakin besar AFR maka debit aliran udara yang menuju nozzle semakin besar dengan debit bahan bakar yang tetap, sehingga fraksi massa juga akan bertambah. Kemudian tinggi api semakin berkurang hingga AFR terbesar karena pembakaran yang terjadi semakin mendekati sempurna dimana sisa bahan bakar yang belum terbakar lalu terbakar secara difusi dengan udara sekitar mengalami penurunan.

Dharma (2013) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi *equivalence ratio* terhadap karakteristik api pembakaran *premixed* minyak jarak pada *perforated burner*. Berdasarkan data hasil penelitian didapatkan bahwa penambahan ekivalen rasio

memperlambat kecepatan pembakaran dari 182.3626466 cm/dt pada ekivalen rasio 0.90524 sampai pada 12.7051049 cm/dt pada ekivalen rasio 6.97514. Peningkatan nilai ekivalen rasio juga mempengaruhi ketinggian api mulai dari rasio ekivalen 0.90524 sampai pada rasio ekivalen 6.97514 dengan tinggi api yang beragam dari yang terendah yaitu sebesar 1.4613 cm sampai yang tertinggi yaitu 5.9073 cm hingga api *lift off* lalu padam.

Antoni (2013) melakukan penelitian mengenai pengaruh kecepatan reaktan terhadap *air fuel ratio* dan karakteristik api pada pembakaran *premixed* minyak kelapa pada *perforated burner*. Dari penelitian didapat bahwa semakin tinggi kecepatan reaktan maka jumlah udara lebih banyak sehingga AFR meningkat dan kecepatan pembakaran akan semakin tinggi dimulai dari 95,5957 cm/s sampai 186,2451 cm/s. Kemudian kecepatan reaktan juga mempengaruhi tinggi api, dimana tinggi api mengalami penurunan seiring peningkatan kecepatan reaktan sampai terjadi *lift off* dimana terjadi peningkatan tinggi api, kemudian *blow off*.

2.2 *Liquified Petroleum Gas (LPG)*



Gambar 2.3 LPG
Sumber: Anonymous 1, 2014

Liquified petroleum gas (LPG) atau yang biasa kita kenal dengan sebutan elpiji secara harafiah dapat diartikan gas minyak bumi yang dicairkan. LPG adalah campuran dari berbagai unsur hidrokarbon yang berasal dari gas alam atau dari minyak mentah. Dari gas alam selain dihasilkan LNG juga dihasilkan LPG, sedangkan dari pengolahan minyak mentah sebagian besar produk ringan dapat menghasilkan LPG dengan proses fraksionasi, *nafta reforming*, *thermal/catalytic cracking*.

Dengan menambah tekanan dan menurunkan suhunya, gas berubah menjadi cair. Komponennya didominasi propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}). Elpiji 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 elpiji dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Karena itu elpiji dipasarkan dalam bentuk cair dalam tabung-tabung logam bertekanan. Untuk memungkinkan terjadinya ekspansi panas (*thermal expansion*) dari cairan yang dikandungnya, tabung elpiji 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.

LPG yang diproduksi dan dipasarkan di Indonesia oleh PT. Pertamina terdapat tiga jenis, yaitu:

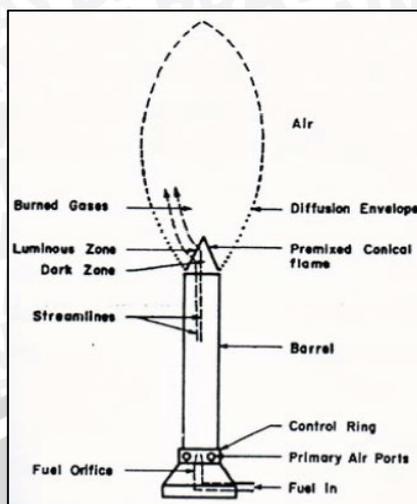
- Bahan bakar gas LPG propana yang biasanya digunakan untuk kebutuhan khusus dan komersial.
- Bahan bakar gas LPG butana yang biasanya digunakan untuk keperluan komersial.
- Bahan bakar gas LPG campuran propana dan butana yang disebut LPG campuran. LPG ini banyak digunakan untuk kebutuhan rumah tangga, industri dan komersial.

Spesifikasi LPG produksi PT. Pertamina berdasarkan komponen-komponen yang terdapat di dalamnya menurut klasifikasi Direktorat Jendral Minyak dan Gas Bumi NO. 26525.K/10/DJM.T/2009, dimana untuk LPG campuran terdiri dari 50% propana (C_3H_8) dan 50% butana (C_4H_{10}).

2.3 *Bunsen Burner*

Pada sekitar tahun 1855 pembakaran api *premixed* dikenalkan oleh Bunsen. Sebelumnya tipe sederhana pada api yakni api difusi dimana jenis ini sudah digunakan sebelumnya. Api difusi memiliki efektifitas termal yang sangat rendah dibandingkan dengan api *premixed* dari pembakaran Bunsen yang relatif bersih dan memiliki efektifitas termal yang lebih tinggi.

Pada pembakaran Bunsen terlihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.4 Bunsen burner
Sumber: Kuo, (1992:190)

Bunsen burner merupakan pengembangan dari Robert Bunsen (1811-1899) yang memiliki prinsip kerja menggunakan pengaturan aliran udara campuran udara dan bahan bakar gas secara kontinyu. Skema *bunsen burner* ditunjukkan pada gambar diatas. Bahan bakar gas masuk kedalam burner melalui pipa saluran masuk didasar burner, dimana ujung pipa berbentuk *nozzle* agar bahan bakar gas dapat langsung bercampur baik dengan udara yang masuk secara radial lewat *control ring*. Selama melewati tabung pembakar (*barrel*), udara dan bahan bakar gas akan bercampur dengan baik dan mengalir keluar dari ujung tabung pembakar secara kontinyu.

Saat aliran campuran udara dan bahan bakar diberi energi panas yang cukup (*minimum ignition energi*), maka campuran dengan konsentrasi atau disebut dengan kualitas campuran tertentu akan mulai bereaksi dan seterusnya menyala dengan menghasilkan cahaya luminous yang dapat terlihat sebagai nyala api (*flames*). Selama laju perubahan reaksi konsentrasi reaktan (*rate of reaction*) serta laju aliran udara dan bahan bakar dipertahankan konstan, maka nyala api *premixed* akan tetap stabil.

Pada daerah luminous terjadi reaksi dan pelepasan energi panas (*eksoterm*) sebagai entalpi gas yang terbakar, sedangkan dibawahnya terdapat daerah gelap (*dark zone*), yaitu tempat dimana molekul gas yang belum terbakar berubah alirannya dari arah sejajar sumbu tabung pembakar kearah luar tegak lurus permukaan batas daerah gelap. Selanjutnya gas yang belum terbakar mendapat energi panas sepanjang daerah pemanasan awal (*preheating zone*: η_0) sampai temperatur nyala (*ignition temperature*: T_i) tercapai dan kemudian bereaksi dengan cepat sepanjang tebal daerah (*reaction zone*: η_R), disertai pelepasan energi panas yang lebih besar hingga mencapai temperature

nyala api (*flame temperature*: T_F). Warna daerah luminous biasanya berubah menurut rasio udara dan bahan bakar. Jika rasio campuran kurus, maka warna kerucut nyala api luminous adalah ungu, menandakan banyak dihasilkan CH radikal. Jika rasio campuran kaya bahan bakar maka permukaan kerucut nyala api luminous mendekati kebiruan yang menandakan banyaknya konsentrasi C_2 .

2.4 Proses Pembakaran

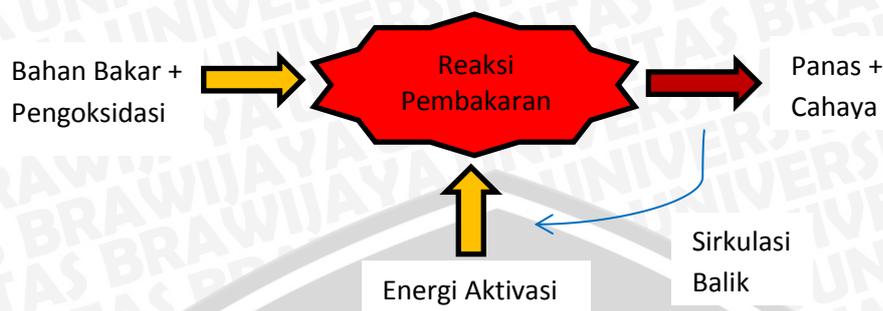
Pembakaran adalah reaksi kimia yang cepat antara pengoksidasi (udara atau oksigen) dan bahan yang dapat terbakar, disertai timbulnya cahaya dan menghasilkan kalor. Syarat terjadinya pembakaran adalah ada bahan bakar, pengoksidasi (udara atau oksigen), dan energi aktivasi. Energi aktivasi adalah energi 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). Pembakaran spontan adalah pembakaran dimana bahan mengalami oksidasi perlahan-lahan sehingga kalor yang dihasilkan tidak dilepaskan, akan tetapi dipakai untuk menaikkan suhu bahan bakar secara perlahan hingga mencapai suhu nyalanya. Pembakaran sempurna adalah pembakaran dimana semua bahan yang dapat terbakar di dalam di dalam bahan bakar membentuk gas CO_2 , air (H_2O) dan gas N_2 . Sehingga tidak ada lagi bahan yang dapat terbakar tersisa.

Penentuan perbandingan udara dan bahan bakar sangatlah penting untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna. Di dalam reaksi pembakaran untuk menghasilkan panas dibutuhkan oksigen, sehingga pembakaran udara bebas yang telah dipanaskan terlebih dahulu akan meningkatkan efisiensi. Adanya kandungan nitrogen dalam udara sebesar 79% dapat mengurangi efisiensi pembakaran karena:

- Menyerap panas dari pembakaran bahan bakar
- Mengurangi transfer panas pada permukaan gas buang
- Meningkatkan volume hasil samping pembakaran
- Pada suhu pembakaran yang tinggi, nitrogen dapat bereaksi dengan oksigen untuk membentuk senyawa nitroksida (NO_x) yang merupakan gas yang beracun.

Panas atau energi yang dipakai untuk mengaktifkan molekul-molekul bahan bakar disebut sebagai energi aktivasi. Energi aktivasi didapat dari percikan busi atau bisa juga diambil dari proses pembakaran kontinyu. Pada proses pembakaran kontinyu, umumnya

energi diambil dari panas pembakaran secara radiasi atau cara konveksi (sirkulasi balik) seperti terlihat pada gambar dibawah ini.

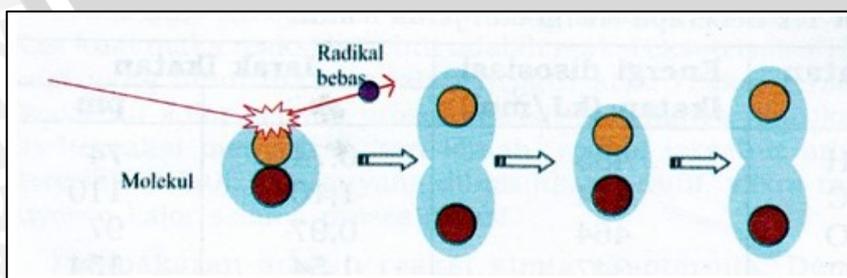


Gambar 2.5 Ilustrasi Proses Pembakaran
Sumber: Wardana (2009:3)

2.5 Reaksi Kimia 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 stoikiometrik, maka pembakaran stoikiometrik 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 .

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 periodik seperti terlihat pada gambar 2.6. 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 dalam membantu proses reaksi dalam pembakaran.



Gambar 2.6 Keadaan Molekul Ketika Tertabrak Radikal Bebas
Sumber: Wardana (2008:5)

Berdasarkan hukum Newton bahwa besar gaya tarik menarik dua buah massa 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 daripada ikatan tunggal, dan ikatan tripel lebih kuat daripada ikatan rangkap dan seterusnya.

Ada beberapa cara untuk memutuskan ikatan atom dalam molekul atau membuat molekul bermuatan diantaranya adalah:

1. Dengan pemanasan, gerakan molekul-molekul bahan bakar dan pengoksidasi menjadi lebih cepat dan tumbukan molekul menjadi sangat keras. Akibatnya beberapa atom dengan ikatan lemah lepas.
2. Merangsang elektron yang mengikat atom-atom dalam molekul dengan katalis sehingga ikatan atom akan putus atau elektron dirangsang oleh katalis supaya meninggalkan molekul sehingga molekul tersebut menjadi pecah dan bermuatan.
3. Mengganggu elektron dengan medan magnet sehingga tidak lagi mengorbit pada inti atom dan meninggalkan molekul sehingga ikatan atom dalam molekul lepas dan molekul menjadi bermuatan.

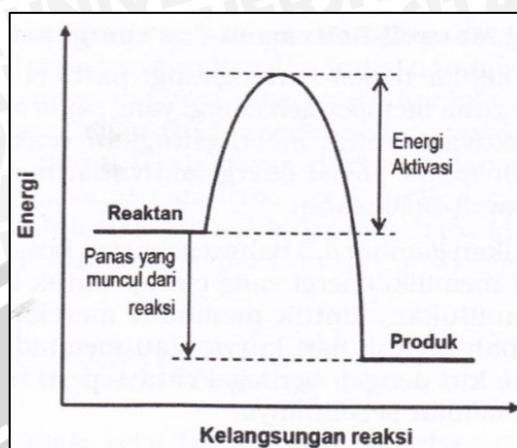
Cara-cara elektrik ini akan secara langsung mengganggu elektron yang merupakan pengikat molekul. Jika elektron-elektron meninggalkan molekul maka molekul tersebut akan bermuatan dan bahkan pecah menjadi beberapa molekul atau atom yang bermuatan.

2.6 Energi Aktivasi

Energi aktivasi adalah energi minimum yang diperlukan untuk melangsungkan terjadinya suatu reaksi (Wardana, 2008:104). Jika molekul-molekul bertabrakan dengan energi yang lebih rendah dari energi aktivasi maka reaksi tidak akan terjadi. Molekul-molekul yang bergerak tadi akan kembali pada keadaannya semula. Kita dapat membayangkan energi aktivasi sebagai tembok dari reaksi. Jadi reaksi dapat berlangsung jika tumbukan memiliki energi aktivasi yang sama atau lebih besar dari energi aktivasinya.

Di dalam reaksi kimia, ikatan-ikatan diputus dengan sejumlah energi (membutuhkan energi) dan membentuk ikatan-ikatan baru yang melepaskan sejumlah energi. Umumnya, ikatan-ikatan harus diputuskan sebelum ikatan yang baru terbentuk. Energi aktivasi dilibatkan dalam pemutusan beberapa ikatan-ikatan tersebut. Ketika

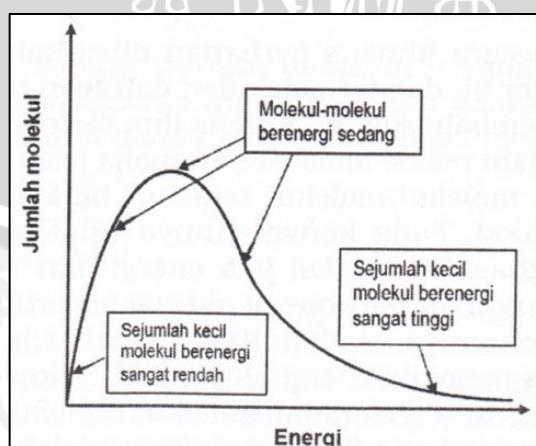
tabrakan-tabrakan antar molekul relatif lemah, dan tidak cukup energi untuk memulai proses pemutusan ikatan mengakibatkan molekul-molekul tersebut tidak bereaksi.



Gambar 2.7 Peran energi aktivasi dalam proses reaksi
Sumber: Wardhana (2008:105)

Karena energi aktivasi memegang peranan penting dalam menentukan suatu tumbukan menghasilkan reaksi, hal ini sangat berguna untuk menentukan bagaimana kondisi keberadaan molekul-molekul untuk mendapatkan energi yang cukup ketika mereka bertumbukan.

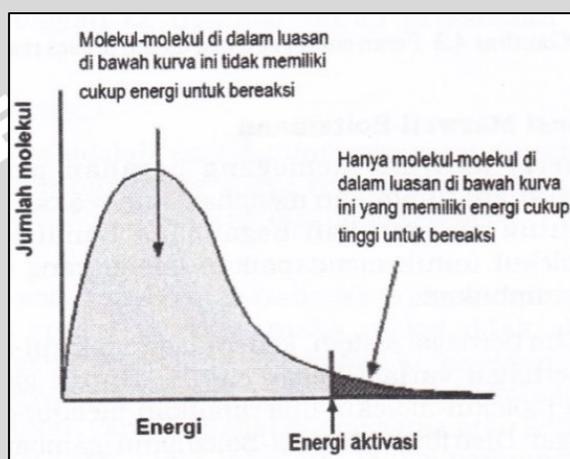
Di dalam berbagai sistem, keberadaan molekul-molekul akan memiliki berbagai variasi besar energi. Untuk gas, distribusi energi pada molekul-molekul diperlihatkan melalui diagram yang disebut dengan Distribusi Maxwell-Boltzmann dimana setiap kumpulan beberapa molekul memiliki energinya masing-masing. Luas dibawah kurva merupakan ukuran banyaknya molekul.



Gambar 2.8 Distribusi Maxwell-Boltzman
Sumber: Wardhana (2008:105)

Ketika reaksi berlangsung, partikel-partikel harus bertumbukan guna memperoleh energi yang sama atau lebih besar dari energi aktivasi untuk melangsungkan reaksi. Kita dapat mengetahui dimana posisi energi aktivasi berlangsung dari distribusi Maxwell-Boltzmann.

Perhatikan gambar 2.9 bahwa sebagian besar dari molekul-molekul tidak memiliki energi yang cukup untuk bereaksi ketika mereka bertumbukan. Untuk membuat mereka bereaksi kita dapat mengubah bentuk dari kurva atau memindahkan aktivasi energi lebih ke kiri dengan berbagai cara seperti telah dijelaskan sebelumnya.



Gambar 2.9 Posisi energi aktivasi dalam distribusi Maxwell-Boltzmann
Sumber: Wardhana (2008:106)

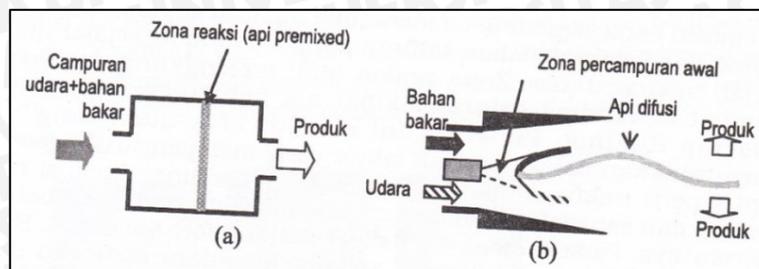
2.7 Energi Disosiasi

Energi disosiasi adalah energi yang digunakan untuk memisahkan atom-atom penyusun molekul. Setiap molekul memiliki energi ikatan yang berbeda-beda. Menurut hukum Newton bahwa gaya tarik menarik antar dua massa yang berbanding terbalik dengan jarak antar massa tersebut. Semakin kecil jarak antar massa maka gaya tarik menariknya akan semakin besar, sehingga jika suatu molekul memiliki jarak atom yang kecil memiliki energi disosiasi yang besar, begitu pula sebaliknya.

2.8 Klasifikasi Pembakaran

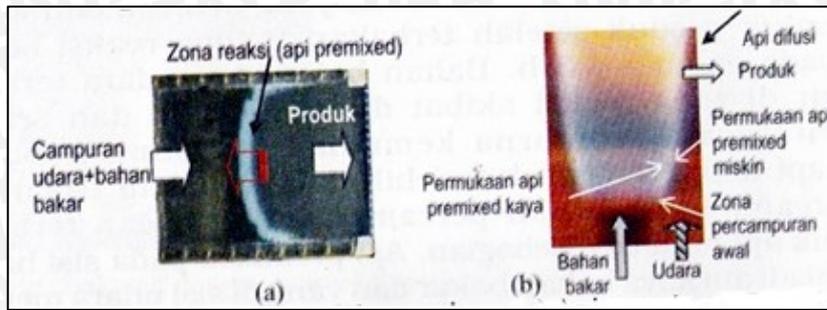
Umumnya pembakaran digambarkan dengan tiga karakter. Karakter yang pertama ditentukan oleh cara reaktan terbakar di dalam zona reaksi. Jika reaktan (bahan bakar dan udara) bercampur sebelum masuk zona reaksi maka pembakaran tersebut adalah pembakaran *premixed*. Jika reaktan tidak bercampur sebelum terbakar maka pembakaran termasuk pembakaran difusi karena pencampuran bahan bakar dan udara

yang berlangsung di zona reaksi adalah akibat difusi molekuler. Gambar berikut memberikan ilustrasi pembakaran *premixed* dan pembakaran difusi secara bagan.



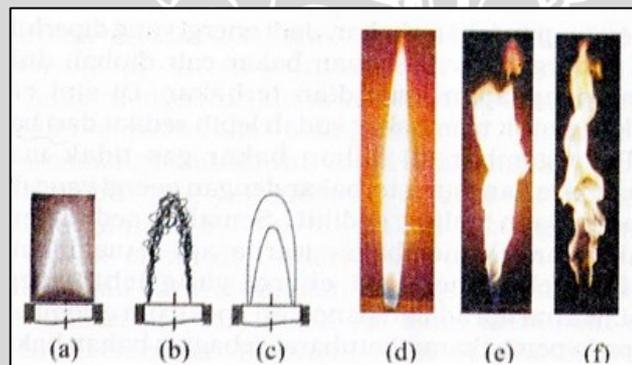
Gambar 2.10 Cara reaktan terbakar. (a) Pembakaran *premixed*; (b) Pembakaran difusi. Sumber: Wardhana (2008:149)

Pada gambar 2.10 (a) sebelum masuk ke ruang bakar, bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen atau 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. 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 2.10 (b). 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 pencampuran 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 api miskin bahan bakar. Peran api *premixed* sebagian ini adalah sebagai penstabil api difusi, Api difusi tidak bisa merambat menuju ke bahan bakar karena kekurangan oksigen demikian juga sebaliknya tidak bisa merambat ke udara karena kekurangan bahan bakar. Jadi posisi api difusi adalah pada daerah campuran udara dan bahan bakar stoikiometrik. Sebetulnya api difusi juga merambat ke arah pencampuran stoikiometrik dengan kondisi yang tepat untuk terbakar. Dengan demikian api adalah rambatan zona pembakaran lokal pada kecepatan subsonik yang mendapatkan energi gerak dari dirinya sendiri.



Gambar 2.11 Foto api di laboratorium. (a) api *premixed*; (b) api difusi.
 Sumber: Wardana (2008:150)

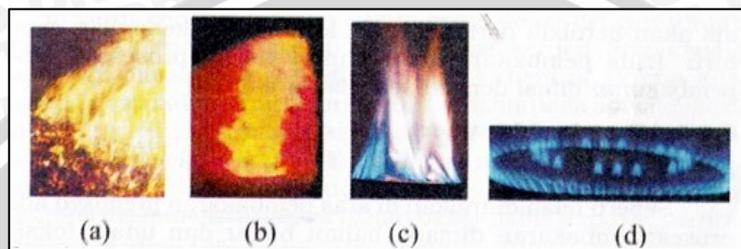
Gambar diatas adalah foto api hasil uji laboratorium. Api *premixed* pada gambar 2.11 (a) merambat menuju ke campuran bahan bakar dan udara di dalam saluran antara 2 dinding sejajar dengan celah sekitar 1 cm. Zona reaksi (api) melengkung dan sangat lambat di dinding saluran akibat api kehilangan energi yang diserap dinding. Peristiwa ini disebut efek *quenching*. Ini menunjukkan bahwa banyak faktor yang mempengaruhi geometri api seperti waktu difusi, waktu reaksi, *quenching*, dimensi ruang bakar, dan sebagainya. Pada gambar 2.11 (b) diperlihatkan foto api difusi. Bahan bakar dialirkan melalui nosel sedangkan udara dialirkan diluar nosel. Nampak api *premixed* berwarna agak putih terbentuk di mulut nosel kemudian disusul api difusi di sebelah hilirnya.



Gambar 2.12 Api laminar dan turbulen. (a) api *premixed* laminar; (b) api *premixed* turbulen; (c) gabungan image api *premixed* turbulen yang direkam dengan *shuter speed* tinggi; (d) api difusi laminar; (e) api difusi turbulen; (f) api difusi turbulen direkam dengan *shuter speed* tinggi.
 Sumber: Wardana (2008:151)

Karakter pembakaran yang kedua ditentukan oleh perilaku aliran (aerodinamika) reaktan saat melintasi zona reaksi yakni apakah alirannya laminar atau turbulen. Pada pembakaran laminar semua proses pencampuran dan proses penjalaran reaktan maupun panas terjadi secara molekuler. Bentuk api pada kondisi laminar ditunjukkan oleh

gambar 2.12 (a) untuk api premixed dan 2.12 (d) untuk api difusi. Pada pembakaran turbulen semua proses pencampuran maupun proses penjalaran dibantu oleh gerakan pusaran-pusaran aliran makro turbulen. Nampak jelas bahwa permukaan api diaduk oleh pusaran turbulensi. Jadi dengan penambahan turbulen maka proses pembakaran yang sudah rumit menjadi lebih rumit. Turbulensi akan membantu meningkatkan kecepatan api atau kecepatan reaksi pembakaran.



Gambar 2.13 Foto pembakaran bahan bakar padat: (a) biomassa dan (b) batubara; bahan bakar cair: (c) minyak jarak; dan bahan bakar gas: (d) LPG.
Sumber: Wardana (2008:151)

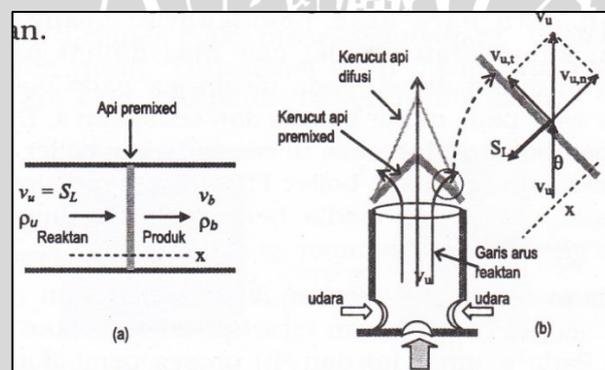
Karakter pembakaran yang ketiga ditentukan oleh keadaan fisik awal dari bahan bakar, apakah berbentuk padat, cair, atau gas. Pembakaran partikel padat bisa dilihat dari proses pembakaran batu bara atau pembakaran arang di udara. Pembakaran kabut atau droplet cair bisa dilihat pada proses pembakaran di mesin diesel, pada mesin jet, pada boiler dengan bahan bakar cair, pada motor bensin dan sebagainya. Di bawah ini adalah api pembakaran biomassa di ruang bakar boiler (a); serbuk batubara pada ruang bakar boiler PLTU (b); pembakaran bahan bakar minyak jarak pada media berpori dari alumina (c); dan pembakaran gas LPG pada kompor gas (d).

Perbedaan warna api menunjukkan perbedaan radiasi dari api. Namun semua pembakaran tersebut dikendalikan oleh difusi dan reaksi. Pada gambar (a) dan (b) proses pembakaran sangat panjang yakni dari padat menjadi cair kemudian menjadi gas lewat proses penguapan lalu terbakar. Jadi energi yang diperlukan sangat banyak. Pada gambar (c) bahan bakar cair diubah dulu menjadi gas lewat penguapan kemudian terbakar. Disini energi yang dibutuhkan untuk membakar sudah lebih sedikit dari bahan bakar padat. Pada gambar (d) bahan bakar gas tidak memerlukan perubahan fase, langsung terbakar dengan energi yang dibutuhkan untuk penyalaan paling sedikit. Semakin sedikit energi yang dibutuhkan untuk membakar warna api semakin biru karena molekul-molekul memiliki energi yang lebih tinggi untuk berdifusi. Warna api adalah pancaran spektrum gelombang radikal. Artinya pada pembakaran batubara,

sebagian bahan bakar berubah menjadi jelaga akibat kekurangan energi dan terhalangnya suplai oksigen sehingga warna api menjadi merah dan suhunya rendah. Artinya pembakaran dibatasi oleh difusi karena suhunya rendah. Jika pembakaran semakin sempurna difusinya semakin cepat sehingga menghasilkan warna yang semakin biru karena jumlah jelaga semakin sedikit. Semakin sedikit jumlah jelaga di api, warna api akan berubah dari merah ke kuning kemudian menjadi biru. Pada pembakaran di kompor gas (d) prosesnya adalah pembakaran difusi dengan sebagian *premixed*.

2.9 Api *Premixed Laminer*

Seperti sudah dijelaskan bahwa pembakaran *premixed* adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan udara (oksigen) dicampur terlebih dahulu secara mekanik, kemudian dibakar. Contoh pembakaran jenis ini bisa dilihat pada proses pembakaran motor bensin, las karbit, pembakaran roket. Pada pembakaran *premixed*, terjadi perambatan gelombang pembakaran yang disebut dengan flame (api). Gelombang pembakaran merambat ke arah reaktan. Di belakang gelombang pembakaran terbentuk produk pembakaran.



Gambar 2.14 Struktur api *premixed*: (a) di dalam tabung pembakar; (b) pada *bunsen burner*

Sumber: Wardana (2008:152)

Bentuk api *premixed* laminar yang paling khas adalah api dari *bunsen burner* dan api *premixed* yang merambat di dalam tabung pembakar. Adapun struktur api untuk masing-masing pembakar tersebut adalah seperti terlihat pada gambar 2.14. Secara sederhana rambatan gelombang pembakaran dapat dibayangkan pada proses perambatan gelombang pembakaran di dalam tabung seperti terlihat dalam gambar 2.14 (a). Ke dalam tabung dimasukkan campuran bahan bakar dan udara atau oksigen yang disebut

reaktan. Jika salah satu ujung dari tabung (dalam hal ini ujung sebelah kiri) diberi penyala, maka api akan merambat dari kiri ke kanan. Di sebelah kiri api akan terbentuk produk sedangkan di sebelah kanan api adalah reaktan.

Di dalam tabung api *premixed* 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 *premixed*. Kerucut pada api *premixed* ada dua yaitu kerucut sebelah dalam (yang dekat dengan mulut nosel) adalah kerucut api *premixed* sedangkan kerucut luar adalah kerucut api difusi. Kerucut sebelah luar terbentuk karena ada sebagian bahan bakar yang belum terbakar habis pada api *premixed* (yakni CO dan H₂) bercampur kembali dengan udara di sekitarnya secara difusi molekuler kemudian terbakar membentuk api difusi. Secara ideal api difusi atau kerucut sebelah luar ini dianggap tidak ada karena diasumsikan bahwa bahan bakar habis terbakar secara sempurna di zona reaksi *premixed*. Bentuk kerucut api *premixed* pada nosel *bunsen* terjadi karena distribusi kecepatan reaktan di mulut nosel mengikuti hukum poesoil yang berbentuk parabola dengan kecepatan maksimum diporos nosel.

Vektor kecepatan rambatan api *premixed* S_L di dalam tabung (gambar 2.14 (a)) sejajar dengan vektor kecepatan yang lainnya yakni vektor kecepatan reaktan v_u dan vektor kecepatan produk v_b . Pada api *premixed bunsen*, garis arus reaktan membelok di dekat api akibat perubahan densitas gas dan mengalir ke luar tegak lurus dengan permukaan api. Karena sifat fluida yang cenderung mengalir ke kerapatan lebih rendah maka gas berbelok menuju ke api secara tegak lurus. Dengan demikian maka penguraian komponen vektor kecepatan gas reaktan v_u pada api adalah seperti nampak pada detail gambar 2.14 (b).

Dalam gelombang pembakaran terdapat dua zona yaitu:

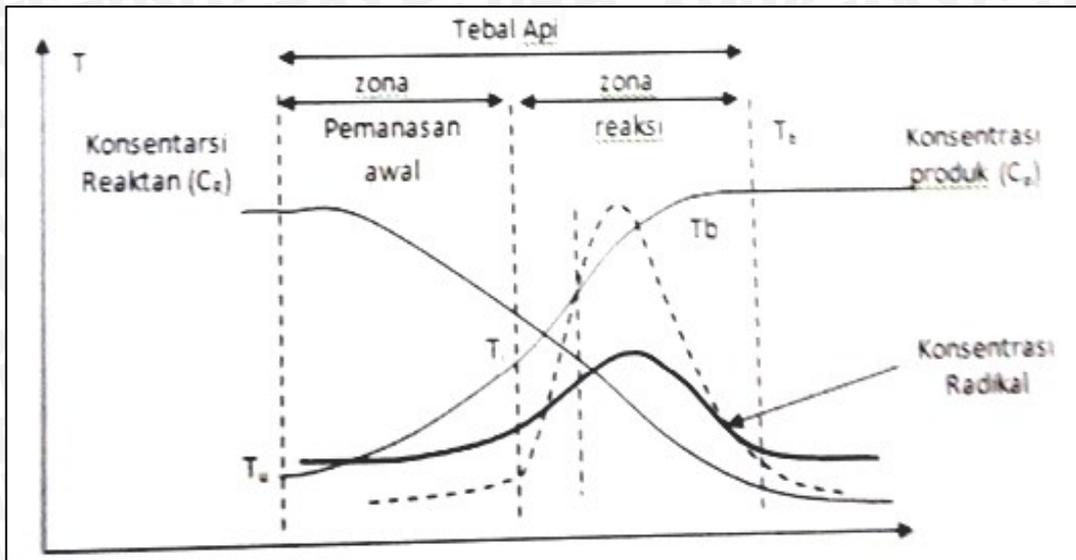
1. Zona pemanasan awal (*preheat zone*)

Daerah dimana sedikit panas dilupakan dan masih banyak bahan bakar yang belum terbakar.

2. Zona reaksi (*reaction zone*)

Daerah dimana sebagian besar energi kimia dilepaskan.

Seperti terlihat pada gambar 2.15 berikut.



Gambar 2.15 Detail struktur di dalam api *premixed*
 Sumber: Wardana (2008:155)

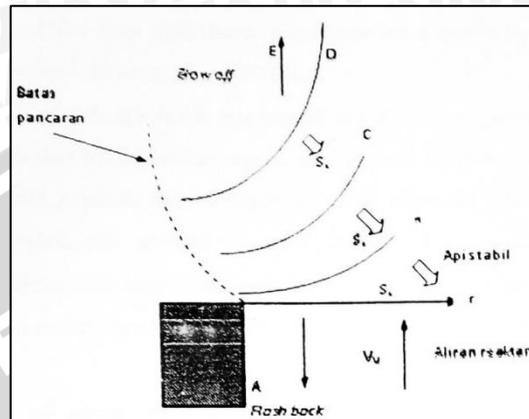
Keterangan gambar:

- C_R = konsentrasi reaktan
- C_P = konsentrasi produk
- T = distribusi temperatur
- T_u = temperatur reaktan
- T_i = temperatur intermediate
- T_b = temperatur produk
- U = distribusi kecepatan gas

Distribusi konsentrasi reaktan, konsentrasi produk, konsentrasi radikal, temperatur dan kecepatan gas seperti terlihat pada gambar 2.15. 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 lebih tinggi sehingga terjadi pembakaran. Peristiwa ini terjadi secara kontinyu sehingga api merambat ke arah reaktan. Kecepatan rambatan api tersebut disebut kecepatan pembakaran.

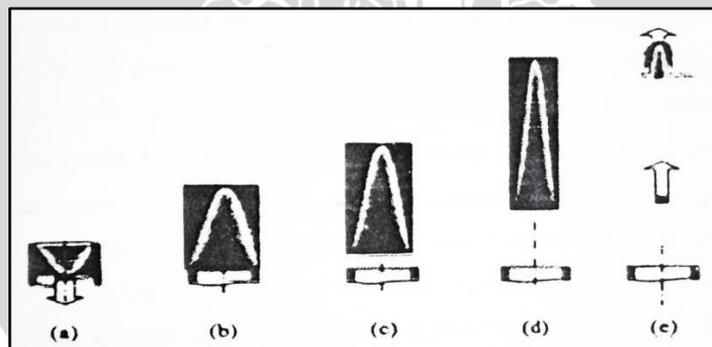
2.10 Kestabilan Nyala Api

Dalam proses pembakaran, kestabilan nyala api memegang peranan yang sangat penting. Api dikatakan stabil jika tetap stasioner pada posisi tertentu. Kestabilan nyala api bisa terjadi apabila kecepatan reaktan (v) sama dengan kecepatan pembakaran (S_L).



Gambar 2.16 Mekanisme kestabilan api *premixed*
Sumber : Wardana (2008:152)

Tingkat kestabilan nyala api sangat berhubungan dengan fenomena flashback, lift off, dan blow off seperti terlihat pada gambar 2.16 dimana mekanisme kestabilan api juga berkaitan erat dengan kecepatan reaktan dan kecepatan pembakaran laminar. Oleh karena itu, perencanaan dalam proses pembakaran gas menjadi sangat penting.



Gambar 2.17 (a) *flashback*, (b) stabil, (c) *lift off*, (d) *lifted*, (e) *blow off*
Sumber: Wardana (2008:169)

Flashback adalah api masuk dan merambat kembali ke dalam tabung pembakar seperti terlihat pada Gambar 2.17 (a). *Flashback* terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih cepat dari kecepatan reaktan ($S_L > v$) sehingga nyala api merambat kembali ke dalam tabung pembakar. Fenomena ini dinamakan *back fire* atau *light back*. *Flashback* tidak hanya mengganggu, tetapi juga dari sisi keamanan bisa menjadi berbahaya.

Lift off adalah api tidak menyentuh mulut burner pembakar, tapi stabil pada beberapa jarak dari mulut burner seperti terlihat pada Gambar 2.17 (c). Kondisi ini sangat tergantung pada keadaan api setempat dan sifat aliran di dekat mulut burner. Pada kecepatan rendah, api mendekati mulut burner dan menyentuhnya. Peningkatan kecepatan reaktan lebih lanjut menyebabkan meningginya bagian hulu api ke posisi hilir yang jauh dari mulut burner yang disebut terangkat (*lifted*).

Blow off adalah suatu keadaan dimana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran ($S_L < v$). Kondisi seperti ini pada kenyataan di lapangan harus dihindari, karena untuk bahan bakar tertentu, kecepatan *blow off* meningkat seiring dengan bertambahnya diameter pancarannya.

2.11 Pembakaran Stoikiometri

Pembakaran stoikiometri adalah pembakaran dimana semua atom dari pengoksidasian beraksi secara kimia untuk menjadi produk, pengoksidasian yang paling lazim adalah campuran 21% oksigen dan 79% nitrogen (fraksi mol atau volume). Persamaan reaksi pembakaran stoikiometri dari LPG campuran (50% propana dan 50% butana) dengan udara ditunjukkan pada persamaan (2-1) berikut:



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) dan sejumlah gas dalam bagian yang cukup kecil. Udara yang normal merupakan campuran gas-gas meliputi 78% N_2 , 20% O_2 , 0,94% Ar , 0,03% CO_2 sedangkan gas-gas lainnya sangat kecil konsentrasinya.

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 $(79/21) = 3,76$ 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 .

2.12 Campuran Udara-Bahan Bakar

Dalam suatu proses pembakaran beberapa hal yang perlu diperhatikan antara lain bahan bakar, udara (oksigen), kalor, dan reaksi kimia. Selain itu, perbandingan campuran udara dan bahan bakar 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.

Beberapa metode yang digunakan untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*air-fuel ratio*) dan *equivalence ratio* (ϕ).

2.13 Air-Fuel Ratio (AFR)

Rasio ini merupakan parameter yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau. AFR dapat dihitung dengan persamaan berikut:

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

Dengan:

Mudara : massa molekul udara

Mbahan bakar : massa molekul bahan bakar

Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR stoikiometrik, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan campuran miskin bahan bakar. Sedangkan apabila nilai aktual lebih kecil dari AFR stoikiometrik maka tidak terdapat cukup udara pada sistem dan dikatakan campuran kaya bahan bakar. AFR stoikiometrik pada proses pembakaran LPG dengan kandungan 50% propana (C_3H_8) dan 50% butana (C_4H_{10}) adalah:

$$\begin{aligned} (\text{AFR})_{\text{stoic}} &= \left(\frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{bahan bakar}}} \right)_{\text{stoic}} \\ &= \frac{5,75 (O_2 + 3,76N_2)}{C_{3,5}H_9} = \frac{5,75 (32 + (3,76 \cdot 28))}{12 \cdot 3,5 + 9} \\ &= 15,48 \text{ kg udara/ kg bahan bakar} \end{aligned}$$

2.14 Equivalence Ratio

Rasio ini juga termasuk rasio yang umum digunakan. *Equivalence ratio* adalah perbandingan antara rasio campuran bahan bakar dan udara stoikiometrik terhadap rasio campuran bahan bakar dan udara aktual. Keuntungan dari penggunaan *equivalence ratio* adalah mudah untuk dikenali orang awam dimana rasio lebih besar dari satu selalu mewakili kelebihan bahan bakar campuran bahan bakar-oksidator daripada yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna (reaksi stoikiometri) terlepas dari bahan bakar dan oksidator yang digunakan, sedangkan rasio kurang dari satu mewakili kekurangan

bahan bakar atau kelebihan oksidator dalam campuran. Persamaannya adalah sebagai berikut:

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

Dimana nilai AFR stoikiometrik dapat ditentukan dengan persamaan 2.1. Sedangkan AFR aktual adalah perhitungan AFR yang didapat dari hasil penelitian yaitu membagi massa alir udara dengan massa alir bahan bakar. Massa alir udara didapat dari debit aliran udara dikali densitas udara, sedangkan massa alir bahan bakar didapat dari debit aliran bahan bakar dikali densitas bahan bakar. Dimana apabila:

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

2.15 Kecepatan Pembakaran Laminer

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.

Jika aliran yang dihasilkan dari tumbukan molekul udara dengan bahan bakar semakin turbulen, maka udara dengan bahan bakar akan lebih tercampur sempurna. Dengan campuran yang lebih sempurna maka proses pembakaran akan berlangsung cepat.

- b. Luas daerah kontak reaksi antara bahan bakar dan udara.

Ketika luas daerah kontak antara udara dengan bahan bakar semakin kecil, maka aliran yang dihasilkan akan semakin turbulen. Dengan semakin kecilnya ruang kontak udara dengan bahan bakar, maka intensitas tumbukan molekul udara dengan bahan bakar akan semakin sering sehingga aliran akan menjadi turbulen. Dengan aliran yang turbulen maka pembakaran akan berlangsung lebih cepat.

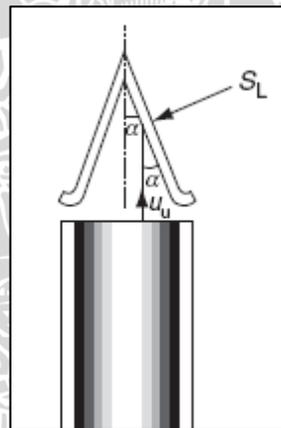
c. Temperatur pembakaran.

Dengan temperatur pembakaran yang tinggi, maka temperatur reaktan akan meningkat. Karena adanya peningkatan temperatur reaktan, maka energi panas dari reaktan akan semakin besar. Dengan semakin besarnya temperatur reaktan, maka pembakaran yang terjadi juga akan semakin meningkat.

d. Katalis.

Katalis berperan penting dalam proses pembakaran. Apabila dalam pembakaran tidak ada katalis yang digunakan, pembakaran bisa tetap terjadi tetapi akan berjalan lambat. Hal ini dikarenakan tidak adanya energi tambahan untuk memecah molekul bahan bakar. Ketika katalis ditambahkan, maka molekul bahan bakar akan lebih cepat pecah dan pembakaran akan berlangsung lebih cepat.

2.16 Pengukuran Kecepatan Pembakaran Laminer



Gambar 2.18 Vektor kecepatan api *bunsen burner*
 Sumber: Glassman (2008:181)

Pada metode ini campuran *premixed* mengalir ke atas dalam sebuah selubung tabung silindris yang cukup panjang. Gas terbakar pada ujung tabung, dan bentuk kerucut *bunsen* dicatat dan direkam dengan berbagai sarana dan cara. Sudut yang terbentuk pada kerucut bunsen inilah yang perlu diketahui, sehingga kecepatan pembakaran laminer pada metode *bunsen burner* dapat dihitung dengan persamaan:

$$S_L = v \cdot \sin \alpha \quad (2-4)$$

Dengan:

S_L = kecepatan pembakaran laminer (cm/s)

v = kecepatan reaktan (cm/s)

α = sudut api yang terbentuk ($^{\circ}$)

Nilai dari kecepatan reaktan sendiri dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$v = \frac{Q_{fuel} + Q_{air}}{A_b} \quad (2-5)$$

Dengan:

$Q_{bahan\ bakar}$ = debit aliran bahan bakar (cm^3/s)

Q_{udara} = debit aliran udara (cm^3/s)

A_b = luas bagian melintang burner (cm^2)

2.17 Hipotesis

Variasi jumlah lubang akan mempengaruhi kecepatan pembakaran laminar dan tinggi api. Urutan kecepatan pembakaran laminar terbesar hingga terendah terjadi pada *perforated* 37 lubang, 19 lubang, 7 lubang, lalu *bunsen burner*. Hal ini dikarenakan secara umum temperatur reaktan pada *perforated burner* dipengaruhi oleh dinding dan *perforated plate*, sedangkan pada *bunsen burner* hanya dipengaruhi dinding *burner*. Campuran bahan bakar yang mengalir pada *perforated* 37 lubang akan terbagi-bagi menjadi lebih kecil dari 19 lubang dan 19 lubang lebih kecil dari 7 lubang, sehingga pembakaran lebih mudah terjadi pada *perforated* 37 lubang disusul 19 lubang lalu 7 lubang. Sedangkan urutan tinggi api terbesar hingga terendah terjadi pada *perforated burner* 37 lubang, 19 lubang, 7 lubang, lalu *bunsen burner*. Hal ini dikarenakan *perforated burner* 37 mengalami perubahan kecepatan yang paling besar, disusul 19 lubang, 7 lubang, lalu *bunsen burner*.