

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Sanudin Edi (2003) melakukan penelitian tentang pengaruh jumlah sudu *swirl vanes* daya motor suzuki shogun R FD 110. *Swirl vane* yang digunakan memiliki jumlah sudu 4, 6, dan 8 dengan masing masing kemiringan sudu 45° . Pada penelitian ini *swirl vanes* dipasang pada saluran penghubung antara karburator dengan katup pemasukan ruang bakar dimaksudkan untuk menambah efek pusaran fluida yang optimal pada ruang bakar (Hamidi 2003:77). Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa jumlah sudu *swirl vane* sangat berpengaruh terhadap turbulensi aliran bahan bakar. Jumlah sudu yang terlalu banyak akan menghambat laju aliran bahan bakar sehingga akan mengurangi volume bahan bakar yang masuk ke ruang bakar, sehingga akan mengurangi daya motor dan dari hasil penelitian ini juga didapatkan jumlah sudu *swirl vane* yang paling bagus adalah 6 buah

Javareskhian (2010) melakukan penelitian tentang pengaruh aliran oksidator yang di berikan *swirl vane* terhadap pembakaran *non-premixed* gas propana. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan lebih lanjut terhadap stabilitas pembakaran *non-premixed* gas propana dengan penambahan *swirl vanes* yang memiliki variasi sudut 30° , 45° , dan 60° . Pada penelitian ini, oksigen yang diarahkan beserta bahan bakar yang tidak diarahkan dengan *swirl* memasuki ruang pembakaran secara bersama. Bahan bakar gas yang diinjeksikan ke mulut *burner* diletakkan ditengah-tengah *burner*. Oksigen yang memasuki ruang bahan dirotasikan oleh *swirl vanes* dengan variasi sudut 30° , 45° , dan 60° . Untuk mengetahui distribusi temperatur digunakan 3 thermocouple tipe K dengan temperatur operasi maksimal 1260°C . Sementara untuk visualisasi api sendiri divisualisasikan dengan kamera digital. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa sudut *swirl* mempengaruhi kadar dari CO dan CxHy. Terjadi peningkatan kadar CO dan CxHy pada sudut swirl 30° ke 45° . Namun terjadi penurunan kadar CO dan CxHy dari sudut swirl 45° ke 60° . Hal itu berarti *swirl* mempengaruhi proses pencampuran bahan bakar dan oksidator sehingga terjadi perbedaan konsentrasi CO dan CxHy pada proses penelitian ini.

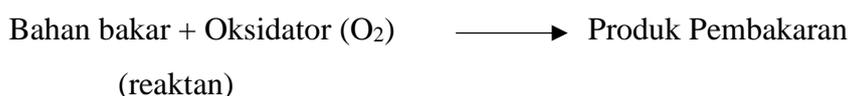
Radissa (2016) melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan jumlah sudu *swirl vanes* terhadap visualisasi dan temperatur distribusi temperatur api difusi. Dalam penelitian ini digunakan variasi jumlah sudu 4,6, dan 8 dengan kemiringan masing-masing sudu 30° . Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan dengan cara menggunakan kamera untuk

mendokumentasikan visualisasi dari api. Data temperatur diukur dengan menggunakan *thermocouple* tipe K yang ditransmisikan oleh *datalogger* ke laptop. Untuk melihat kontur distribusi temperatur pada api difusi menggunakan *software originLab* yang disajikan dalam bentuk *plotting*. Pengambilan data temperatur dilakukan dengan jarak tiap 1 cm ke arah *horizontal* dan ke arah vertikal dengan menggunakan plat khusus untuk peletakan *thermocouple*. Dengan memvariasikan kecepatan udara dan bahan bakar maka dari hasil penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa semakin banyak jumlah sudu menunjukkan visualisasi tinggi api akan cenderung semakin menurun dan distribusi temperatur rata-rata yang semakin tinggi dari jumlah sudu *swirl vanes* 4,6, dan 8 berturut-turut yaitu $324,5^{\circ}$, $360,8^{\circ}$, dan $448,9^{\circ}$ C.

2.2 Pembakaran

Pembakaran merupakan sebuah proses merubah energi kimia dari bahan bakar menjadi kalor yang akan dilepaskan ke lingkungan. Karena ini pembakaran termasuk proses oksidasi eksotermis (Wardana, 2008:56). Proses pembakaran sendiri hanya akan terjadi apabila terdapat bahan bakar, pengoksidasi (oksigen/udara), energi aktivasi. Dalam proses pembakaran fenomena – fenomena yang terjadi antara lain interaksi proses-proses kimia dan fisika, pelepasan panas yang berasal dari energi ikatan-ikatan kimia, proses perpindahan panas, proses perpindahan massa, dan gerakan fluida.

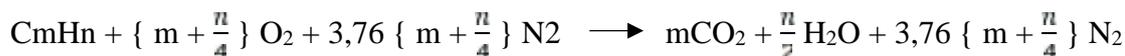
Persamaan reaksi pembakaran secara umum dituliskan sebagai berikut :



Gambar 2.1 Segitiga Api
Sumber : Wardana (2003:1)

Seperti telah diuraikan sebelumnya proses pembakaran akan terjadi jika unsur-unsur bahan bakar teroksidasi. Proses ini akan menghasilkan panas sehingga akan disebut sebagai proses oksidasi eksotermis. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran

diperoleh dari udara, di mana udara terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen, maka reaksi stoikiometri pembakaran hidrokarbon murni C_mH_n dapat ditulis dengan persamaan.

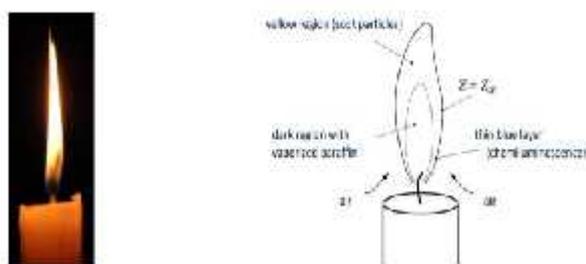


Persamaan ini telah disederhanakan karena cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Jika terjadi pembakaran tidak sempurna, maka hasil persamaan diatas CO_2 dan H_2O tidak akan terjadi, akan tetapi terbentuk hasil oksidasi parsial berupa CO , CO_2 , dan H_2O . Juga sering terbentuk hidrokarbon tak jenuh, formaldehida dan kadang-kadang didapat juga karbon.

Pada temperatur yang sangat tinggi gas-gas pecah atau terdioksidasi menjadi gas-gas yang tak sederhana, dan molekul-molekul dari gas dasar akan terpecah menjadi atom-atom yang membutuhkan panas dan menyebabkan kenaikan temperatur. Reaksi akan bersifat endotermik dan disosiasi tergantung pada temperatur dan waktu kontak.

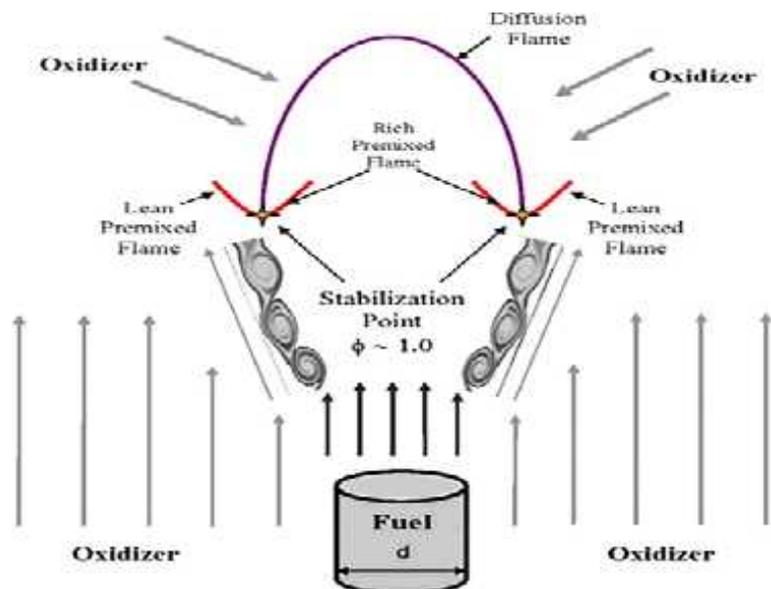
2.3 Pembakaran Difusi

Pembakaran difusi merupakan proses pembakaran di mana bahan bakar dan pengoksidasi (udara) tidak bercampur langsung secara mekanik, melainkan bercampur di zona reaksi akibat difusi molekul secara alami. Produk pembakaran dihasilkan dari api yang menyebar pada kedua sisi, dimana oksigen dan bahan bakar akan berdifusi pada aliran tersebut supaya tercampur. Pemunculan dari nyala api akan bergantung pada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar terhadap udara di sekitarnya.



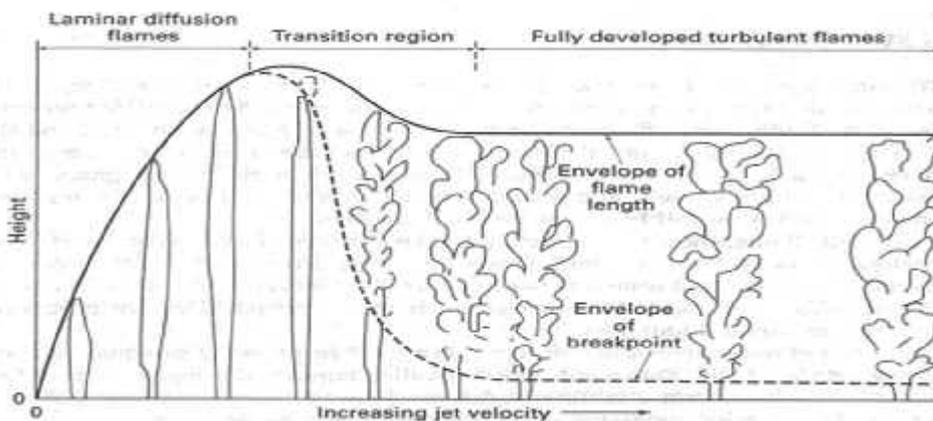
Gambar 2.2 Contoh api difusi pada lilin
Sumber : Pitsch.H (2014:4)

Perhitungan yang dapat digunakan mengenai api dari proses pembakaran difusi adalah dengan melakukan perhitungan pada visualisasi tinggi api. Tinggi api sendiri dapat didefinisikan sebagai suatu jarak aksial nyala api dari mulut tabung pembakar sampai pada suatu titik dimana ujung nyala api tersebut mencapai garis sumbunya.



Gambar 2.3 Struktur api difusi
Sumber : El-Mahallawy (2002:531)

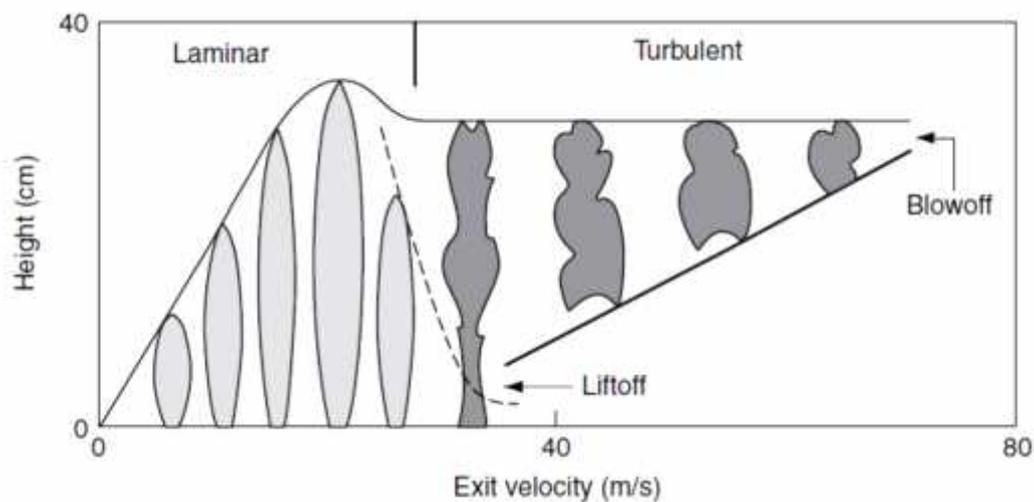
Proses pembakaran menggunakan pembakaran difusi memiliki keuntungan, yaitu dapat mengontrol api hasil pembakarannya sehingga pembakaran difusi banyak diterapkan pada pembakaran di industri. Pada api difusi terdapat api difusi laminar dan api difusi turbulen, dengan ilustrasi yang dapat dilihat pada gambar 2.3



Gambar 2.4 Transisi api laminar ke api turbulen
Sumber : El-Mahallawy (2002:567)

Gambar 2.4 menjelaskan tentang perubahan api difusi jet laminar menuju ke api difusi jet turbulen. Perubahan karakter api tersebut dikarenakan meningkatnya kecepatan aliran dan juga pemanjangan api. Pada kecepatan aliran yang rendah akan membentuk struktur aliran api yang laminar. Panjang aliran api laminar akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan dari kecepatannya, di mana sampai pada waktu tertentu aliran akan

berubah menjadi aliran turbulen. Semakin tinggi kecepatan aliran, panjang api laminar akan menurun sedangkan panjang api turbulen akan mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan aliran yang bertambah. Kecepatan pengadukan api sangat berpengaruh pada jenjang api total, di mana kecepatan pengadukan api yang turbulen akan menyebabkan penurunan panjang total api. Kecepatan jet akan menjadi salah satu faktor untuk menentukan panjang api tidak akan berpengaruh ketika api pada kondisi turbulen yang sangat stabil.

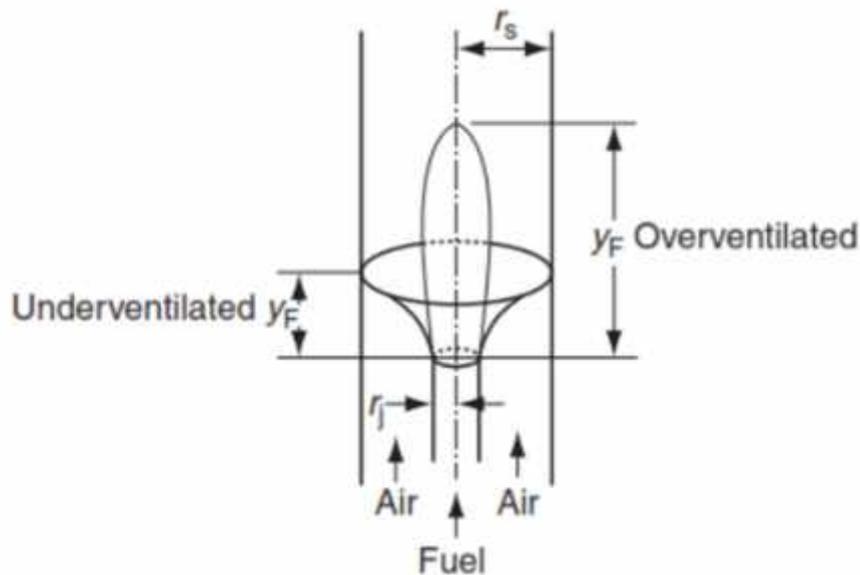


Gambar 2.5 Transisi api difusi yang mengalami *liftoff* dan *blowoff*
 Sumber : El-Mahallawy (2002:665)

Gambar 2.5 merupakan penjelasan lanjutan dari api difusi saat *liftoff* menuju *blowoff* (padam). Ketika kecepatan aliran terus meningkat maka akan menyebabkan peristiwa *liftoff* pada struktur api. *Liftoff* sendiri merupakan fenomena adanya jarak antara titik nyala api dengan mulut burner yang diakibatkan karena kecepatan aliran gas reaktan lebih tinggi dibandingkan kecepatan reaksi pembakarannya. Ketika api difusi telah melewati titik kritis *liftoff* maka akan terjadi peristiwa *blowoff* dimana hal ini berarti kecepatan gas reaktan lebih besar daripada kecepatan reaksi pembakaran maksimum sehingga api tidak dapat menyala walaupun dalam batas mampu nyala pada pembakaran.

2.3.1 Nyala Api Difusi Laminar

Api difusi laminar diperoleh pada aliran kecepatan bahan bakar yang rendah. Bentuk api difusi laminar dari segi visualisasi dibedakan menjadi dua macam berdasarkan perbandingan diameter nosel pembawa udara.



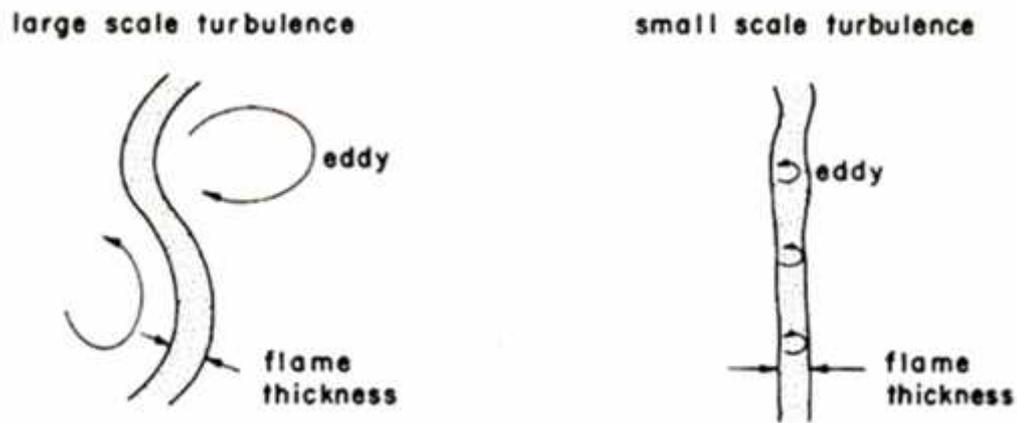
Gambar 2.6 Over ventilated dan under ventilated api difusi
Sumber : Glassman (2000:311)

Pada gambar 2.6 ditunjukkan bahwa semakin besar diameter nosel maka akan terbentuk *overventilated flame* dimana batas nyala akan konvergen terhadap sumbu dari nosel, karena semakin banyak udara yang digunakan untuk pembakaran yang sempurna. Sebaliknya jika diameter nosel udara terlalu kecil maka akan terbentuk *underventilated flame* yaitu kondisi permukaan nyala akan membesar dan menyentuh permukaan dalam nosel pembawa udara, karena tidak dapat mensuplai udara yang cukup untuk pembakaran yang sempurna.

2.3.2 Nyala Api Difusi Turbulen

Pada aliran turbulen pencampuran reaktan disebabkan oleh *vortex* atau olakan aliran. Munculnya aliran turbulen akibat olakan tersebut pada ujung nyala api akan menyebabkan tinggi nyala api berkurang dan meningkatkan laju aliran. Partikel-partikel fluida akan bergerak secara fluktuatif dikarenakan partikel tersebut bergerak pada lintasan yang tidak teratur, sehingga terjadi tumbukan dengan masing-masing partikel fluida.

Kecepatan yang fluktuatif tersebut disebabkan oleh tiga hal yaitu kecepatan aliran yang tinggi, gesekan antar partikel fluida, dan adanya hambatan pada aliran. Turbulensi akan meningkatkan efisiensi proses perpindahan (kalor dan senyawa reaksi) sebagai hasil dari permukaan nyala (*flame front*). Dengan demikian kecepatan pembakaran pada campuran reaktan semakin tinggi.



Gambar 2.7 Efek olakan pada aliran turbulen pada permukaan nyala api difusi
Sumber : Kuo (2005:519)

Pada gambar 2.7 ditunjukkan bahwa aliran *small eddies* memiliki ukuran pusaran yang terlihat kecil dibandingkan *large eddies*. Hal ini akan meningkatkan proses transport massa dalam gelombang pembakaran. Pada *large eddies* ukuran pusaran lebih besar dibandingkan ketebalan permukaan nyala. *Large eddies* tidak meningkatkan difusivitas seperti yang terjadi pada *small eddies*, tetapi aliran ini akan menyebabkan lipatan pada permukaan nyala. Pergerakan *small eddies* inilah yang akan mempengaruhi olakan pada *large eddies*.

2.4 Kestabilan Api

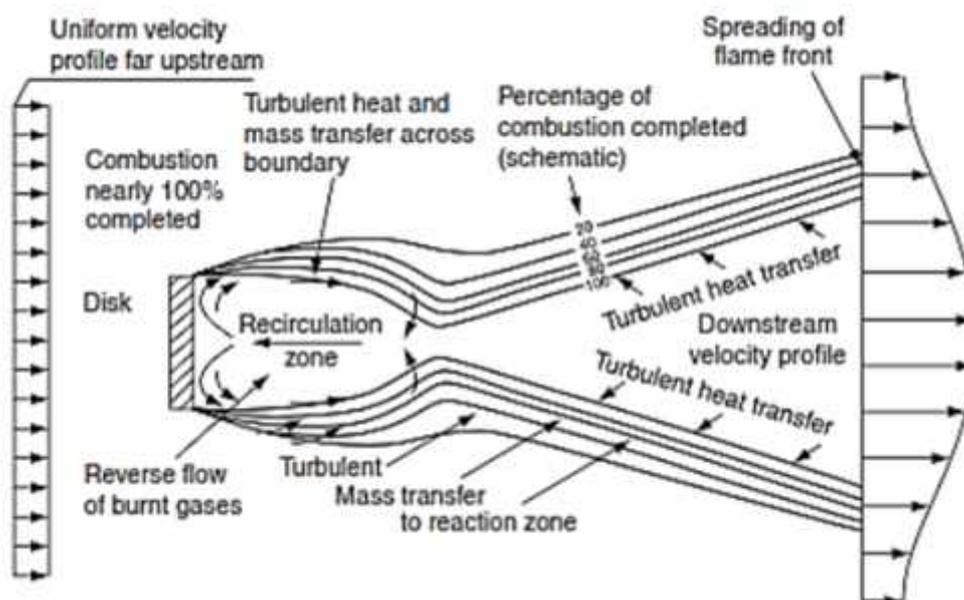
Salah satu karakteristik api difusi adalah kestabilan api. Batas kestabilan api umumnya menjelaskan batas operasional sistem pembakaran yang dinyatakan pada dua kondisi aliran yaitu *lift off* dan *blow out*. Untuk mendapatkan produk pembakaran yang baik maka membutuhkan aliran yang stabil pada suatu *burner*. Maka dari itu *burner* harus mampu menstabilkan hasil pembakaran. Batas kestabilan api merupakan faktor paling penting yang harus dikontrol ketika membuat desain suatu *burner*. Bunsen *burner* tidak dapat menstabilkan api yang turbulen, maka banyak penelitian untuk memperbaiki stabilitas dari *burner* dengan menciptakan resirkulasi.

Batas kestabilan api menjelaskan batas operasional dari sistem pembakaran yang berhubungan dengan kestabilan api yaitu *lift off* dan *blow out*. Apabila kecepatan reaktan lebih kecil dari kecepatan produk maka api akan bergerak menuju mulut nosel, kejadian ini disebut *flash back*. Jika kecepatan reaktan lebih besar dari kecepatan produk maka api akan bergerak menjauh dari mulut nosel dan kejadian ini disebut *lift off*. Kondisi kritis kestabilan ini sangat bergantung pada konfigurasi aliran. Kemudian bila kecepatan aliran ditingkatkan, aliran akan berada dalam kondisi turbulen. Api akan mengalami *lift off* dari

posisi burnernya bila kecepatan produk tinggi. Panjang *lift off*, yaitu jarak antara mulut burner dan pangkal api, akan meningkat seiring dengan penambahan kecepatannya sampai api mengalami *blow out* (padam).

2.5 Resirkulasi

Untuk mendapatkan kestabilan api maka diciptakan suatu resirkulasi. Resirkulasi dibagi menjadi dua yaitu *inner recirculation* dan *outer recirculation*. *Inner recirculation* dapat dicapai menggunakan dua metode yaitu secara mekanik atau aerodinamik.



Gambar 2.8 Zona resirkulasi dan daerah pancaran api
Sumber : Glassman (2002:243)

Pada gambar 2.8 terlihat zona resirkulasi pada daerah pancaran api. Ketika *bluff body* diletakkan pada mulut *burner*, maka akan terjadi *inner recirculation*. Selain itu *inner recirculation* juga dapat dicapai dengan memasang sudu pada mulut *burner*, hal ini termasuk *inner recirculation* aerodinamik. Semua jenis resirkulasi pada intinya akan menghasilkan aliran gas api kembali pada mulut burner untuk membantu menstabilkan pembakaran. Adanya zona resirkulasi dari aliran gas api yang kembali pada mulut burner menyebabkan adanya batas gesekan karena terdapat perbedaan kecepatan. Pada batas gesekan terjadi perpindahan panas dari aliran api yang sudah terbakar menuju aliran bahan bakar, sehingga bahan bakar akan mengalami pemanasan awal. Pemanasan awal inilah

yang dapat menstabilkan api difusi karena energi kinetik dari molekul bahan bakar akan meningkat dan menghasilkan tumbukan yang lebih banyak.

Pada praktiknya kestabilan api dicapai dengan menghasilkan produk hasil pembakaran bersirkulasi. Dengan adanya resirkulasi maka api akan terus menerus memantik campuran bahan bakar.

Pada penelitian ini pemasangan *swirl vanes* pada aliran udara akan menghasilkan suatu aliran yang bersirkulasi, sehingga akan berpengaruh terhadap kecepatan udara reaktan. Hal ini akan merubah rambatan gelombang pembakaran stasioner dari *laminar* menjadi turbulen sehingga bidang kontak antar reaktan menjadi semakin luas, semakin besar aliran yang bersirkulasi maka reaksi yang terjadi antara bahan bakar dan udara juga semakin baik, akibatnya luasan daerah kestabilan api juga semakin bertambah atau bisa dikatakan kestabilan api mengalami peningkatan dan akan mempengaruhi visualisasi dari bahan bakar.

2.6 *Swirl vanes*

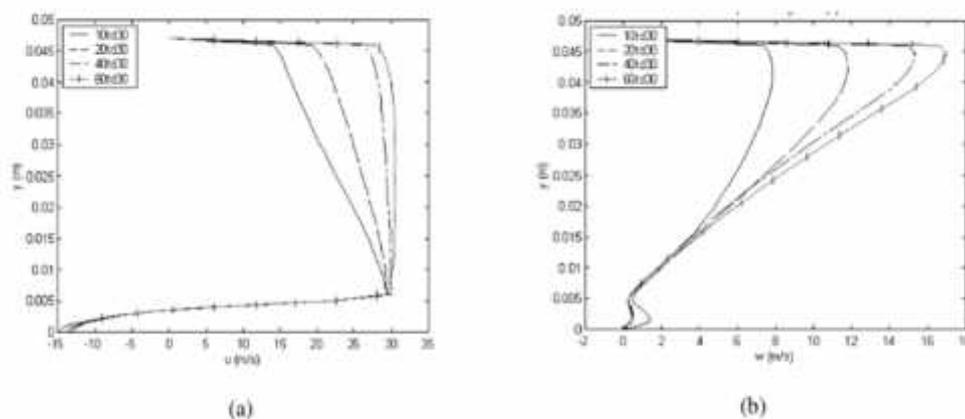
Swirl vanes adalah suatu alat yang terdiri dari sudu-sudu putar statis yang digunakan untuk menimbulkan pusaran pada aliran campuran bahan bakar dan udara yang melewatinya”. (Hamidi 2003). Prinsip kerja dari *swirling vane* ini berkebalikan dengan prinsip kerja baling-baling (kipas angin). Pada kipas angin sudu-sudunya berputar karena digerakkan oleh motor listrik untuk memutar udara disekitarnya. Namun pada *swirling vane*, sudu-sudunya diam campuran bahan bakar dan udara dari karburator yang mempunyai kecepatan ketika melewati sudu-sudu yang diam tersebut akan membelok sesuai arah sudu dan akhirnya timbul pusaran. Pusaran inilah yang membantu terciptanya homogenitas campuran bahan bakar dan udara.



Gambar 2.9 *Swirl Vanes* Sudu 6
Sumber : Dokumentasi Pribadi

Seperti telah diketahui sebelumnya bahwa adanya *swirl vanes* sebagai hambatan pada aliran udara akan menyebabkan terjadinya aliran turbulen. Aliran turbulen sendiri terjadi dikarenakan adanya resirkulasi yang terjadi pada produk hasil pembakaran. Karena udara melewati *swirl vanes* maka akan terjadi perbedaan kecepatan udara ketika sebelum dan sesudah melewati *swirl vanes* yang telah di nyatakan dengan persamaan kontinuitas. Sebelum melewati *swirl vanes*, udara memiliki kecepatan normal, kemudian udara akan menabrak *swirl vanes* dan akan mengalami penurunan kecepatan pada *swirl vanes* seiring dengan kenaikan tekanan, dan setelah udara melewati *swirl vanes* maka kecepatannya akan meningkat seiring dengan penurunan tekanan.

Parwatha (2005) melakukan penelitian tentang simulasi pengaruh jumlah *swirl vanes* pada sisi masukan ruang pembakaran. Pada penelitiannya digunakan empat variasi jumlah *swirl* yaitu 10, 20, 40, dan 60 . Simulasi dilakukan dengan meletakkan *swirl* diujung daripada tabung pembakaran. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa semakin bertambahnya jumlah *swirl* maka akan meningkatkan kecepatan *swirl* dan juga kecepatan aksial. Dan peningkatan ini nilainya naik secara teratur.



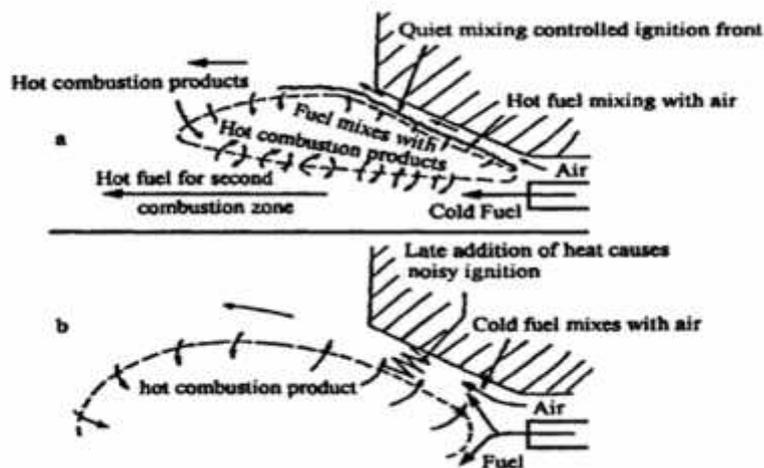
Gambar 2.10 Pengaruh jumlah *vanes* pada kecepatan aksial dan *swirl* , (a) kecepatan aksial
(b) kecepatan *swirl*
Sumber : Parwatha (2005:43)

Ketika aliran udara memiliki kecepatan yang lebih tinggi dengan tekanan yang lebih rendah, maka aliran bahan bakar yang pada mulanya memiliki tekanan tinggi akan mengalami perbedaan tekanan yang signifikan dengan aliran udara. Perbedaan gradien tekanan ini akan menyebabkan transport fenomena dari tekanan tinggi menuju tekanan rendah. Pada kondisi ini aliran gas akan kembali ke arah burner inlet, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11 sehingga, gas yang keluar dari burner akan mengalami

pemanasan awal yang menyebabkan energi kinetik molekul bergerak menjadi lebih cepat sehingga pencampuran reaktan menjadi lebih baik dan didapatkan produk pembakaran yang lebih baik.



Gambar 2.11 Aliran resirkulasi yang disebabkan oleh beda tekanan
Sumber : Lilley (2011:12)



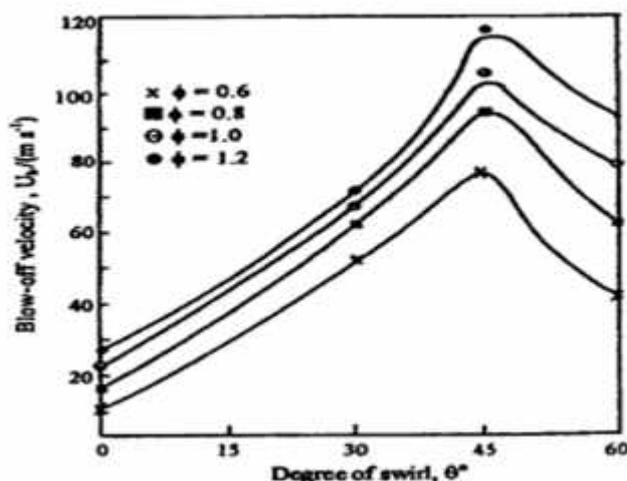
Gambar 2.12 Hasil campuran bahan bakar, udara dan produk pembakaran api difusi
Sumber : El Mahallawy (2003:449)

Gambar 2.12 merupakan hasil pencampuran bahan bakar dan udara. Pada gambar (a) intensitas *swirl* dan momentumnya tinggi. Sehingga terjadi perpindahan massa antara central jet dan bercampur kemudian kembali bersirkulasi. Sehingga bahan bakar panas bercampur dengan udara yang baru dan terbakar dengan perlahan. Dan juga produk

pembakaran yang panas akan masuk melalui aliran yang terbalik menuju aliran bahan bakar.

Yuasa et al (1986) mempelajari pengaruh *swirl* terhadap kestabilan api difusi dengan menggunakan dua *swirl* pembakaran (untuk udara dan bahan bakar). Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah kecepatan aliran udara, injeksi bahan bakar hydrogen, intensitas *swirl* bahan bakar, dan intensitas *swirl* aliran udara. Dari penelitian ini disimpulkan kestabilan api meningkat dengan adanya *swirl* baik udara dan bahan bakar yang memiliki aliran arah yang sama.

El-Mahallawy et al (2002) menginvestigasi pengaruh *swirl* dan posisi *swirl* terhadap kestabilan api difusi. Dengan menggunakan *burner* vertikal, yang terdiri dari dua saluran. Saluran pertama untuk udara dan saluran yang satunya untuk bahan bakar butane. Dengan menggunakan 4 macam *swirl* yang terdiri dari 0° , 30° , 45° , dan 60° . Posisi *swirl* diletakkan diantara 0 mm dan 7 mm di dalam saluran udara.



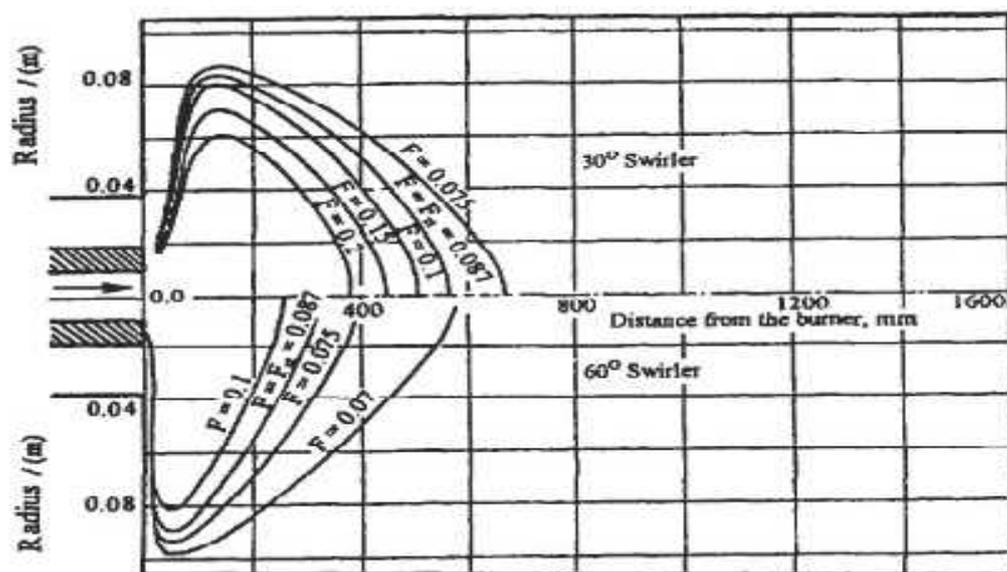
Gambar 2.13 Pengaruh sudut *swirl* terhadap kecepatan *blow-off*
Sumber : Mahallawy (2002:459)

Pada gambar 2.13 ditunjukkan bahwa, mengarahkan aliran udara akan meningkatkan kecepatan *blow-off* karena pengaruh dari zona resirkulasi. Intensitas dari zona resirkulasi ini sangat dipengaruhi oleh perubahan sudut *swirl*. Dimana pencampuran bahan bakar dan udara yang baik akan mempengaruhi peningkatan kecepatan pembakaran dan kecepatan *blow-off* api difusi. Kecepatan *blow-off* akan semakin meningkat dan mencapai nilai maksimal pada saat menggunakan *swirl* dengan sudut 45° . Pada sudut 60° terjadi penurunan kecepatan *blow-off* yang mana dipengaruhi oleh gerakan udara ketika melewati *swirl*.

2.6.1 Visualisasi Api

Liley (1997) menyatakan bahwa adanya *swirl vanes* akan mempengaruhi visualisasi api dimana tekanan ke arah radial akan menjauhi mulut nosel, sehingga zona resirkulasi akan bergeser dan mendekati mulut nosel sehingga api akan mengalami pemanjangan ke arah radial dan pemendekan ke arah aksial.

El Mahallawy juga melakukan penelitian untuk melihat pengaruh angka *swirl* terhadap visualisasi api. Seperti yang terlihat pada gambar 2.14 menunjukkan bahwa *swirl* dengan sudut yang berbeda memberikan visualisasi yang berbeda pula. Dan semakin tinggi angka *swirl* maka akan meningkatkan pemanjangan api ke arah radial dan pemendekan ke arah aksial.

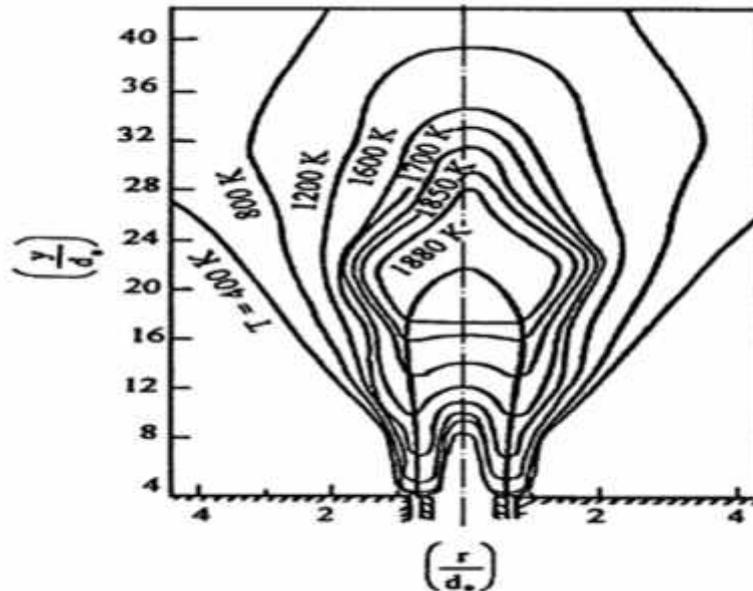


Gambar 2.14 Visualisasi api dengan penambahan *swirl* sudut 30° dan 60°
Sumber : El Mahallawy (2002:449)

2.6.2 Distribusi Temperatur

Adanya *swirl vanes* akan meningkatkan kecepatan tangensial aliran, sehingga akan meningkatkan *shear flow*. Peningkatan *shear flow* akan meningkatkan intensitas turbulensi namun juga mengurangi kecepatan aksial. Hal ini akan menyeimbangkan kecepatan reaksi dan juga dapat memperbesar kecepatan reaksi.

Gambar 2.15 menunjukkan distribusi temperatur pada api. Pada gambar tersebut terdapat grafik hubungan ketinggian api dan lebar api dan distribusi suhu di setiap bagiannya.



Gambar 2.15 Distribusi temperatur pada burner dengan diameter $d_0 = 12,65$ mm dan $Re = 12130$

Sumber : Mahallawy (2002:356)

Pada Gambar tersebut dapat dilihat bahwa distribusi temperatur api difusi turbulen berbeda-beda pada tiap titiknya. Titik yang paling panas berada di tengah-tengah burner dikarenakan bahan bakar dan udara pertama kali terbakar pada daerah tersebut, dan pada titik itulah pencampuran bahan bakar dan udara tercampur secara maksimal.

2.7 Air Fuel Ratio dan Equivalence Ratio

Rasio udara/bahan bakar (*air-fuel ratio*) merupakan perbandingan antara massa udara dengan massa bahan bakar atau mol udara dengan mol bahan bakar. Dalam proses pembakaran perbandingan campuran bahan bakar dengan udara tersebut mempunyai peranan yang sangat penting dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri. Persamaan AFR untuk campuran stoikiometrik dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$(AFR)_{stoic} = \left(\frac{N}{N} \frac{s}{ha} \frac{b}{b} \frac{s}{s} \right)_{stoic}$$

$$(AFR)_{aktual} = \left(\frac{N}{N} \frac{a}{ha} \frac{a}{b} \frac{a}{a} \right)_{aktual}$$

Dengan $(AFR)_{stoic}$: Rasio udara dan bahan bakar pada kondisi stoikiometrik

- N_{udara} : Jumlah mol udara
- $N_{bahan\ bakar}$: Jumlah mol bahan bakar
- M_{udara} : Massa molekul udara
- $M_{bahan\ bakar}$: Massa molekul bahan bakar

Sehingga perhitungan AFR CH₄ berdasarkan mol dari persamaan (2-3), menjadi :

$$(AFR)_{stoic} = \left(\frac{N}{N_{ha} b} \right) stoic$$

$$(AFR)_{stoic} = \left(\frac{2(1+3,7)}{(1)} \right) stoic = 9,52 \frac{m u}{M b b}$$

AFR udara – CH₄ dinyatakan dalam perbandingan massa adalah sebagai berikut :

$$AFR = \left(\frac{2(2 + 3,7)}{(1 + 4)} \right) = 17,1 \frac{K u}{K b b}$$

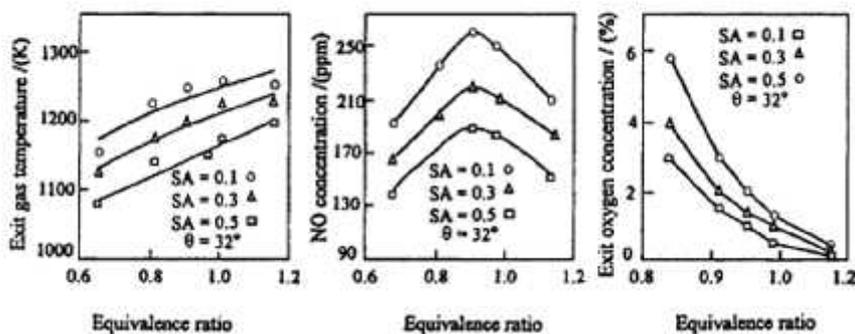
Rasio equivalen () merupakan perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual. Metode ini merupakan metode yang umum digunakan untuk mendefinisikan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau.

Rasio equivalen ini ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$= \frac{(A / F)St}{(A / f)a}$$

Dengan :

-) > 1 : Terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran kaya bahan bakar (*rich fuel mixture*)
-) = 1 : Merupakan campuran stoikiometrik
-) < 1 : Campurannya disebut sebagai campuran miskin bahan bakar (*lean fuel mixture*)



Gambar 2.16 Pengaruh *equivalence ratio* terhadap temperatur, konsentrasi NO dan O₂
 Sumber : Mahallawy (2002:459)

Dasoky et al (644) mempelajari rasio udara dan *equivalence ratio* terhadap pembakaran pada turbin gas. Pada percobaan tersebut didapatkan bahwa terjadi

peningkatan temperatur yang keluar dari bahan bakar turbin gas seiring dengan meningkatnya nilai dari *equivalence ratio*, dan mencapai temperatur maksimum pada *equivalence ratio* = 1.2. Selain temperatur yang terus meningkat, nilai konsentrasi O₂ juga semakin kecil seiring dengan meningkatnya nilai *equivalence ratio*. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa semakin meningkatnya nilai *equivalence ratio* akan berpengaruh terhadap peningkatan temperatur dikarenakan pembakaran yang terjadi semakin sempurna hal itu ditandai dengan nilai kandungan O₂ yang semakin kecil

2.8 *Transport Phenomena*

Transport fenomena adalah suatu fenomena yang berhubungan dengan kecenderungan temperatur, konsentrasi dan kecepatan suatu partikel untuk berubah sehingga mencapai nilai yang sama pada suatu sistem. Tiga hal pokok yang dipelajari pada tranport fenomena antara lain :

1. Mekanika Fluida
2. Perpindahan Panas
3. Transfer Massa

Mekanika fluida berhubungan dengan perpindahan momentum pada suatu fluida. Pada skala molekular, molekul akan bertumbukan dengan molekul lain sehingga terdapat perpindahan momentum antar molekul, pada skala yang lebih besar tumbukan antar molekul akan menunjukkan bagaimana aliran fluida tersebut apakah *laminar* atau turbulen. Perpindahan panas berhubungan dengan panas yang berpindah dari suatu fluida yang memiliki temperatur lebih tinggi menuju temperatur yang lebih rendah dan transfer massa berhubungan dengan perpindahan massa pada suatu fluida karena perbedaan konsentrasi dari suatu fluida. Ketiga hal pokok pada *transport fenomena* memiliki suatu kesamaan yaitu sama sama sama mentransferkan sesuatu hal pada fluida yaitu momentum, temperatur, dan massa yang lebih tinggi menuju yang lebih rendah.

Persamaan pada pembakaran pada umumnya dinyatakan dengan persamaan *transport fenomena* yang menyangkut persamaan kontinuitas, momentum, dan perpindahan panas yang ditunjukkan pada persamaan 2-1 2-2, dan 2-3. Pada pembakaran difusi terdapat beberapa *fenomena transport* yang terjadi, yaitu perpindahan massa, energi, dan gerak fluida.

Rumus matematik dari transport fenomena didasarkan pada dua hal yaitu laju perpindahan dari fluida sebanding dengan *driving force* yang diberikan pada suatu fluida

serta massa dan energi tidak dapat dimusnahkan. Hukum dari *transport fenomena* didapatkan pertama dari hukum setiap hal pokok pada *transport fenomena* yaitu :

) Hukum Newton, Mekanika Fluida

$$\mu \frac{d}{dx} = \quad (2-1)$$

μ = Viskositas fluida

U_x = Kecepatan fluida

= tegangan geser fluida

) Hukum Fourier, Perpindahan Panas

$$-kA \left(\frac{dT}{dx} \right) = q \quad (2-2)$$

Dengan :

k = Konduktifitas termal

A = luasan daerah perpindahan panas

T = temperatur

q = laju perpindahan panas per waktu

) Hukum Fick , Transfer Massa

$$-D_{AB} \left(\frac{dC_A}{dx} \right) = J_A \quad (2-3)$$

Dengan :

D_{AB} = difusitas A ke B

C_A = konsentrasi A

J_A = Flux molar dengan kecepatan molar rata-rata

2.9 Karakteristik CH₄

Methana merupakan gas hidrokarbon paling sederhana dan paling ringan di alam, menjadi komponen dasar dari gas alam (natural gas). Propertinya sangatlah spesifik, gas alam tidak mencair pada suhu ruang dan pada tekanan beberapa bar di atas tekanan atmosfer. Adapun beberapa sifat metana yang dituliskan oleh wardana (2008) adalah sebagai berikut.

) Densitas pada kondisi standar	: 0,7168 gr/dm ³
) Berat jenis spesifik dibandingkan air	: 0,554
) Nilai kalor tinggi	: 9510 kcal/m ³
) Nilai kalor rendah	: 8570 kcal/m ³
) Temperatur adiabatik pada kondisi stokiometrik	: 1952 °C

pada kondisi 25 °C

-) Batas konsentrasi mampu bakar diudara tertinggi terendah adalah : 15%
-) Temperatur penyalaan : 580 °C
-) Kecepatan rambat api pada campuran stoikiometrik pada 25°C : 43,4 cm/detik

Kandungan CH₄ di dalam natural gas sebesar 96%. Nilai kalor bahan bakar gas dalam basis volume adalah sebesar 9.000-11.000 kcal/m³ pada tekanan 1 atm dan temperatur 25°

2.10 Nitrogen (N₂)

Nitrogen adalah salah satu unsur dalam golongan VA pada tabel periodik yang memiliki simbol N. Nitrogen merupakan unsur yang paling banyak terkandung dalam udara bebas dengan kadar 78%. Nitrogen merupakan gas tanpa warna, tanpa bau, tanpa rasa, dan gas diatomik stabil yang sulit bereaksi dengan unsur atau senyawa lain sehingga nitrogen juga biasa disebut dengan gas inert. Pada tabel 2.1 dapat dilihat properti kimia dari nitrogen.

Tabel 2.1 Properti kimia nitrogen

Rumus Molekul	N ₂
Wujud	Gas
Warna	Tidak berwarna
Massa Molar	14.007 kg/mol
Titik Didih	-346 °F (-210 °C) pada 1 atm
Titik Uap	-320.4 °F (-195.8 °C) pada 1 atm
Massa Jenis	1.251 g/L

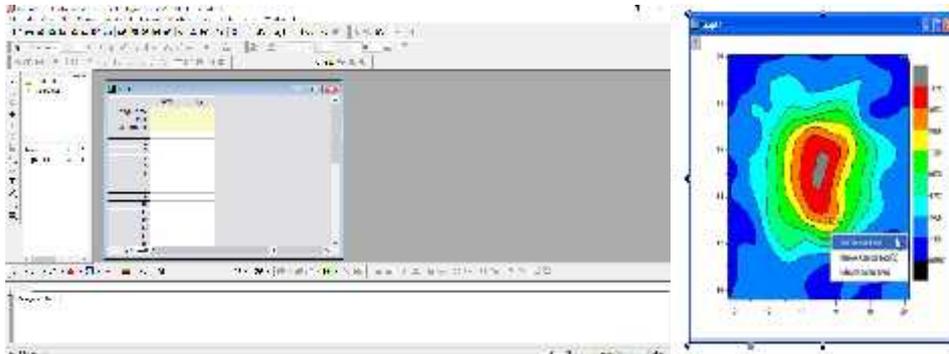
Sumber : Tjokroawidjojo (1986 : 65)

Pada suhu yang rendah yaitu 25°C atau suhu lingkungan, nitrogen sulit bereaksi dengan unsur lain kecuali lithium, pada suhu tinggi diatas 1500°C, nitrogen dapat bereaksi dengan logam alkali dan alkali tanah selain itu juga dengan unsur non logam seperti oksigen dan nitrogen. Pada penelitian ini nitrogen digunakan untuk menjaga reaksi difusi antara bahan bakar dan udara tidak terganggu dari udara di lingkungan.

Penggunaan nitrogen pada penelitian ini dikarenakan ketersediaan gas nitrogen sendiri yang berlimpah pada udara bebas. Selain nitrogen sebenarnya CO₂ atau argon juga dapat digunakan sebagai gas inert namun apabila dibandingkan dengan gas nitrogen, CO₂ memiliki sifat yang lebih reaktif dan ketersediaan gas argon tidak cukup melimpah.

2.11 Origin Lab

Origin Lab merupakan salah satu *software* analisis data dan *scientific graphic*. Data yang dapat diolah dengan *software origin* antara lain *ASCII text*, *Excel*, *NITDM*, *DIAem*, *NetCDF*, *SPC*, dll. Kemudian input data dapat diubah menjadi *JPEG*, *GIF*, *EPS*, *TIFF*, dll.



Gambar 2.17 Worksheet *origin pro* dan tampilan *plotting* range dari excel menjadi grafik 2D

Sumber : *Origin Pro 8* (2017)

Pada penelitian ini *software origin* yang digunakan merupakan *Origin Pro 8.0*. Data yang diinput berupa data *excel* temperatur dari api difusi. Data temperatur tersebut kemudian diubah menjadi grafik 2D seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.17, sehingga distribusi temperatur yang terlihat pada jarak x dan y dapat divisualisasikan selain itu untuk memperjelas distribusi temperatur pada api difusi selain menggunakan grafik juga dapat dinyatakan dengan perbedaan warna yang mewakili setiap range temperatur menjadi grafik 2D yang ditunjukkan pada gambar 2.17. Warna biru pada *plotting* menunjukkan suhu rendah dan semakin merah warna pada *plotting* menunjukkan bahwa suhu semakin tinggi.

2.12 Hipotesa

Berdasarkan penelitian sebelumnya dan landasan teori yang ada dapat diambil sebuah hipotesa sementara dari penelitian ini. Pemasangan *swirl vanes* dengan jumlah sudu tertentu dan penambahan nilai ekuivalen rasio berpengaruh terhadap laju aliran, ukuran dan bentuk dari zona resirkulasi sehingga akan mempengaruhi visualisasi dan distribusi api difusi.

Seiring dengan penambahan jumlah sudu *swirl* maka hambatan pada aliran akan semakin besar dan hambatan tersebut akan menyebabkan terjadinya zona resirkulasi. Zona resirkulasi inilah yang nanti akan menyebabkan bahan bakar dan udara tercampur kembali karena adanya tekanan yang ditimbulkan dari olakan-olakan sehingga kecepatan tangensial

udara akan membuat kecepatan aksial menurun. Sementara itu seiring dengan bertambahnya ekuivalen rasio maka kecepatan bahan bakar akan semakin bertambah dimana jumlah mol atau massa bahan bakar semakin meningkat sehingga ukuran pencampuran zona inti antara bahan bakar dan udara menjadi lebih besar.

Dengan demikian, bertambahnya sudu pada *swirl* akan menyebabkan penurunan ketinggian api, akan tetapi akan menyebabkan distribusi temperatur menjadi lebih merata pada proses pembakaran. Sedangkan dengan bertambahnya ekuivalen rasio maka tinggi api akan mengalami peningkatan diikuti dengan peningkatan temperatur.