

## **Pengaruh Variasi Sudut Inklinasi *Tangential Air Jet Inlets* terhadap Kestabilan Nyala dan Distribusi Temperatur pada Api Difusi *Annulus Jet***

**Slamet Wahyudi & Malik Hizbullah**

Lab. Motor Bakar & Pembakaran, Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang  
Email: [slamet\\_w72@yahoo.co.id](mailto:slamet_w72@yahoo.co.id)

### **Abstraksi**

*Kestabilan nyala dan distribusi temperatur api jet dapat ditingkatkan dengan meningkatkan intensitas turbulensi sehingga proses pencampuran reaktan menjadi homogen. Oleh karena itu diperlukan suatu modifikasi untuk membangkitkan turbulensi. Modifikasi tersebut salah satunya adalah memperbesar gradien tekanan pada burner exit plane dengan memvariasikan sudut inklinasi tangential air jet inlets*

*Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi sudut inklinasi tangential air jet inlets pada annulus udara yang paling optimal sebagai usaha peningkatan kestabilan nyala dan distribusi temperatur api difusi jet. Variasi sudut inklinasi tangential air jet inlets :  $0^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$  dan  $60^{\circ}$ , kecepatan aliran udara aksial pada  $1,158 [m.s^{-1}]$ , kecepatan udara tangensial divariasikan dari  $1 \div 20 [m.s^{-1}]$  dan kecepatan aliran bahan bakar divariasikan antara  $1 \div 20 [m.s^{-1}]$ . Data yang diperoleh adalah kestabilan nyala dan distribusi temperatur. Analisis data menggunakan analisa grafik.*

*Hasil penelitian menunjukkan semakin besar sudut inklinasi tangential air jet inlets yang dipasang pada annulus udara meningkatkan kestabilan nyala pada api difusi annulus jet dan distribusi temperatur semakin merata ke arah horisontal. Daerah kestabilan api difusi terbesar dan distribusi temperatur ke arah horisontal yang paling baik diperoleh pada pemasangan tangential air jet inlets dengan sudut inklinasi  $60^{\circ}$ .*

*Kata-kata kunci : Sudut Inklinasi Tangential Air Jet Inlets, Kestabilan Nyala, Distribusi Temperatur Api Difusi Annulus Jet.*

### **Pendahuluan**

Dalam beberapa tahun terakhir, peran pembakaran belum tergantikan oleh proses apapun karena pemakaiannya yang sangat luas. Dengan alat yang relatif sederhana, suatu proses pembakaran dapat menghasilkan densitas daya yang tinggi dalam waktu yang sangat singkat. Salah satu bentuk aplikasi dari pembakaran difusi adalah membuat pusan aliran dengan menggunakan sejumlah udara melalui kombinasi antara udara aksial dan udara tangensial. Metode ini bertujuan untuk meningkatkan intensitas turbulensi sehingga proses pencampuran (*mixing*) reaktan menjadi lebih baik. Akan tetapi sejumlah udara yang besar harus digunakan untuk mencapai proses pencampuran yang baik, dimana pada kondisi ini terjadi aliran resirkulasi, akibatnya temperatur pembakaran maksimum tidak dapat tercapai. Untuk mengatasi permasalahan ini, maka diperlukan suatu modifikasi yang bertujuan untuk mencapai aliran resirkulasi dengan mengurangi jumlah udara berlebih (*excess air*) yang digunakan. Cara tersebut salah satunya adalah dengan memperbesar gradien tekanan pada *burner exit plane*. Dengan menggunakan metode ini akan didapatkan dua macam keuntungan yaitu tercapainya temperatur pembakaran maksimum sebagai akibat adanya aliran resirkulasi, dan peningkatan efisiensi total sistem pembakaran, karena dengan mengurangi jumlah udara berlebih (*excess air*) berarti juga mengurangi energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan peralatan penyuplai udara.

### **Tinjauan Pustaka**

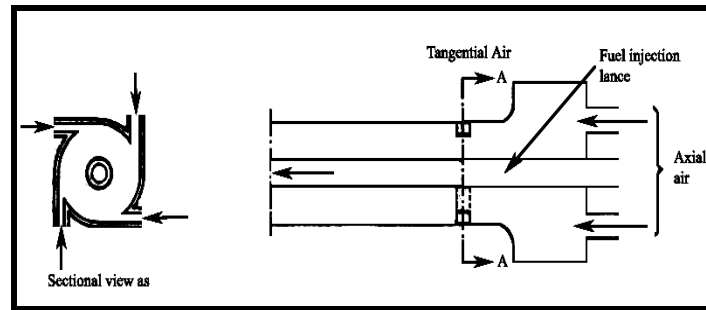
#### **Kestabilan Api Nyala dengan *Tangential Air Jet Inlets***

Prinsip kestabilan dengan fluida berputar di saluran keluar *burner* mirip dengan prinsip kestabilan dengan penghalang. Ide dasarnya adalah menciptakan daerah *downstream* bertekanan rendah sepanjang sumbu *burner*. Daerah bertekanan rendah terbentuk dengan memaksakan pembakaran udara dan bahan bakar yang memungkinkan untuk berputar disekitar sumbu dalam kombinasinya dengan aliran udara aksial dan tangensial (Monnot, 1995: 91).

Fluida mulai berputar biasanya melibatkan udara pembakaran, baik seluruhnya maupun sebagian. Kenyataannya jika bahan bakar yang digunakan adalah cair atau bahan bakar yang

teratomisasi maka hanya udara yang memiliki energi kinetik saja yang biasanya diubah menjadi energi putar. Jika bahan bakar adalah berupa gas maka biasanya dilengkapi dengan pengatur tekanan pada instalasi pipanya, penambahan tersebut menghemat penggunaan energi yang digunakan untuk mengatur pola aliran fluida.

Gambar 1. Diagram *burner* dengan udara berputar menggunakan *tangential air*



Perputaran udara dalam tabung *burner* dimulai adanya energi potensial dari tekanan *upstream*. Energi tekanan tersebut diubah menjadi energi kinetik yaitu berupa kecepatan baik dalam arah tangensial ataupun secara melingkar. Aliran berputar akan mengembang dan udara pembakaran akan terkumpul di batas lingkaran akibat gaya sentrifugal.

Pemasangan *tangential air jet inlets* yang ditunjukkan oleh gambar 1 pada saluran udara akan menyebabkan terjadinya aliran *swirl*. Dengan adanya zona resirkulasi yang ditimbulkan oleh aliran *swirl*, akibatnya ada perbedaan kecepatan dan arah gerakan udara yang menyebabkan adanya batas gesekan (*shear layer*) antara aliran resirkulasi dengan daerah utama, dimana pada permukaan gesekan tersebut terjadi perpindahan panas dari gas panas (campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar) ke gas dingin (bahan bakar), sehingga bahan bakar akan mengalami pemanasan awal.

Dengan variasi sudut inklinasi *tangential air jet inlets* maka diharapkan akan didapatkan aliran udara yang berekspansi ke arah tangensial atau ke arah keluar sehingga meningkatkan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi yang semakin besar mengakibatkan kecepatan aksial yang menurun pada zona resirkulasi yang memungkinkan kecepatan reaksi dan kecepatan aliran dapat seimbang atau bahkan kecepatan reaksinya justru menjadi lebih besar. Akan tetapi hal ini bisa terjadi sebaliknya karena terlalu besar kecepatan tangensial yang ditimbulkan maka akan terjadi penurunan kecepatan aksial yang cukup besar sehingga membawa aliran udara tangensial menuju ke arah keluar dan memungkinkan penurunan kecepatan reaksi pembakaran serta menurunkan proses difusi yang terjadi antara bahan bakar dan udara. Ketika pencampuran antara bahan bakar dan udara semakin baik maka *damkohler number* menjadi lebih besar, yang berarti waktu yang tersedia untuk melakukan reaksi mencukupi (*characteristic chemical time*) dibandingkan waktu untuk mengalir (*characteristic flow time*).

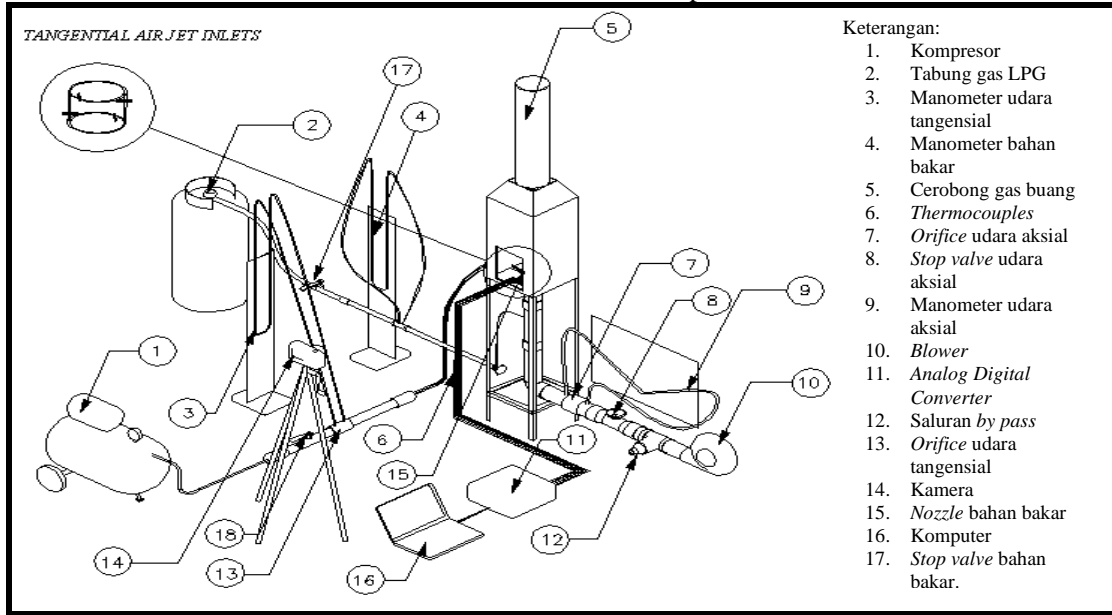
### Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimental nyata. Ada dua variabel yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu :

1. Variabel bebas :
  - Sudut inklinasi *tangential air jet inlets* ( $\theta$ ) :  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  dan  $60^\circ$
  - Kecepatan aliran bahan bakar ( $V$ ) :  $1 \div 20$  [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
  - Kecepatan aliran udara tangensial ( $W$ ) :  $1 \div 20$  [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
2. Variabel terikat : kestabilan nyala dan distribusi temperatur pada api difusi *annulus jet*.

Susunan peralatan ditunjukkan pada gambar 2.

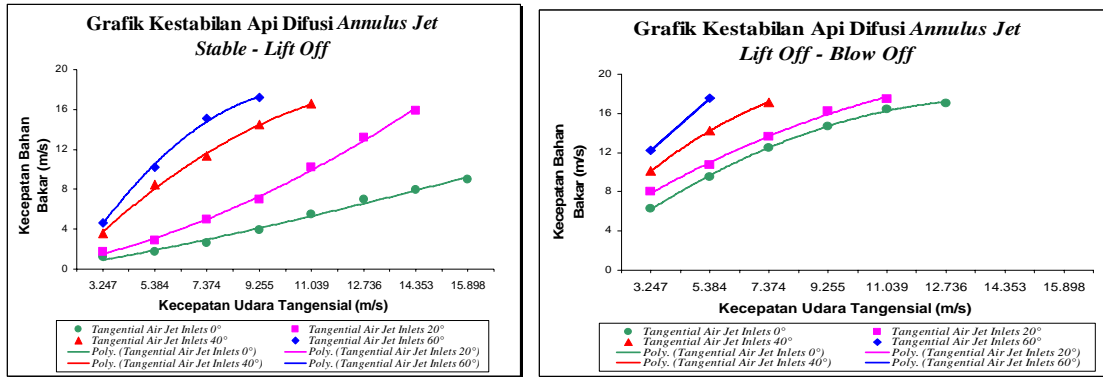
Gambar 2. Skema instalasi penelitian



**Pembahasan**

**Kestabilan Nyala Api Difusi Annulus Jet**

Gambar 3 Grafik kestabilan api difusi *annulus jet* pada berbagai kondisi



(a) *Stable – Lift Off*

(b) *Lift Off – Blow Off*

Gambar 3 (a) dan (b) menampilkan diagram kestabilan api difusi *annulus jet* pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*, yaitu dengan pemasangan *tangential air jet inlets* 0°, 20°, 40° dan 60°. Sumbu horisontal merupakan kecepatan aliran udara tangensial sedangkan sumbu vertikal adalah kecepatan aliran bahan bakar.

Pada gambar 3 (a) dan (b) dapat dilihat bahwa pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi yang divariasikan membuat luasan daerah kestabilan api berubah. Pada grafik kestabilan dengan pemasangan *tangential air jet inlets* sudut inklinasi 0° terlihat bahwa luasan daerah kestabilan cukup kecil karena pada hampir seluruh kecepatan aliran udara tangensial antara 3,247 m.s<sup>-1</sup> sampai dengan 15,898 m.s<sup>-1</sup> terjadi kondisi *lift off* pada setiap penambahan bahan bakar kemudian diikuti kondisi *blow off* apabila bahan bakar terus ditambah. Dan hanya pada kecepatan aliran udara yang tinggi antara 14,353 m.s<sup>-1</sup> sampai dengan 15,898 m.s<sup>-1</sup> tidak terjadi *blow off* melainkan hanya terjadi *lift off*. Pada kondisi lain dengan pemasangan *tangential air jet inlets* sudut inklinasi 20°, 40° dan 60° sehingga semakin besar aliran udara tangensial maka luasan daerah kestabilan menjadi lebih besar begitu juga kondisi *blow off* semakin sulit terjadi walaupun bahan bakar terus ditambah. Hal ini menunjukkan bahwa pada sudut yang kecil belum terlihat pengaruh sudut inklinasi karena aliran *swirl* yang ditimbulkan belum mampu menimbulkan aliran resirkulasi yang cukup berarti untuk meningkatkan proses difusi.

Pada gambar 3 (b) terlihat bahwa pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut

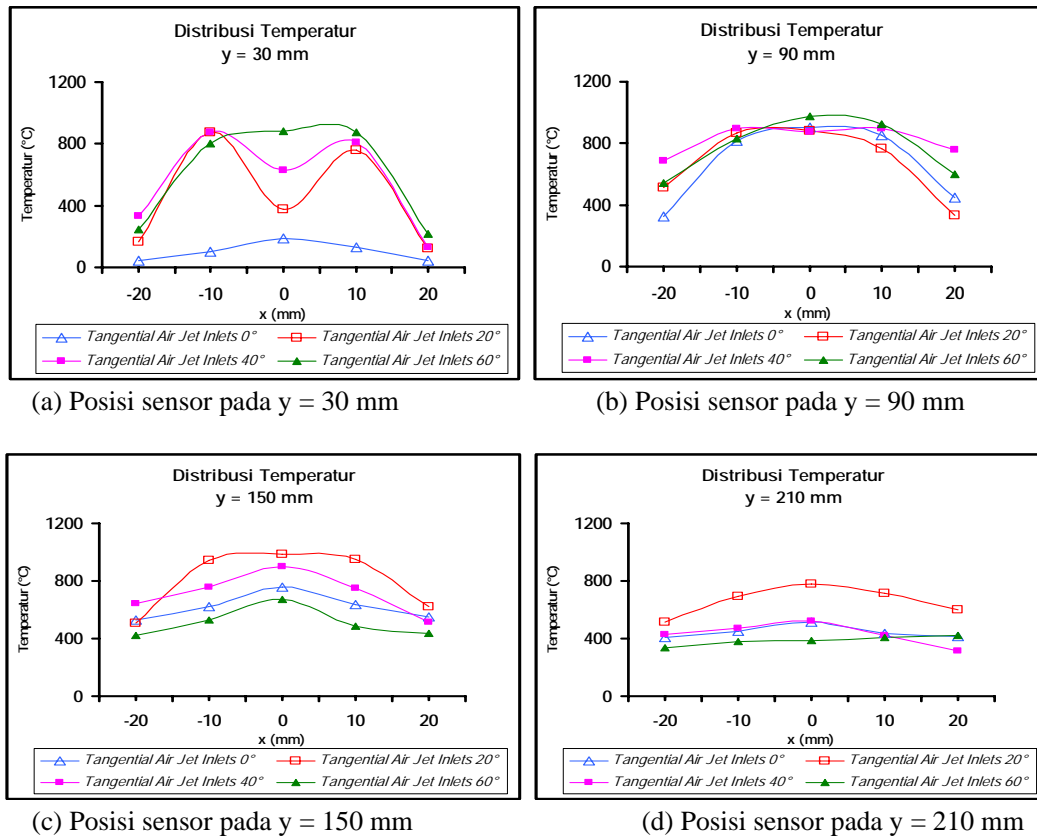
inklinali  $60^{\circ}$  memiliki luasan daerah kestabilan api yang paling luas. Pada kecepatan aliran udara tangensial  $5,384 \text{ m.s}^{-1}$  sampai dengan  $15,898 \text{ m.s}^{-1}$  sudah tidak terlihat adanya *blow off*, sehingga api tetap menyala pada kondisi *lift off* meskipun bahan bakar mengalir pada kondisi maksimum. Hal ini terjadi karena pada kondisi tersebut resirkulasi yang terjadi pada kondisi maksimum, sehingga proses pencampuran antara bahan bakar dan udara pembakaran serta proses perpindahan panas antara campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar ke bahan bakar terjadi pada kondisi yang paling baik. Aliran udara yang mengalami resirkulasi karena pemasangan *tangential air jet inlets* mengakibatkan bahan bakar akan mengalami pemanasan awal. Adanya pemanasan awal mengakibatkan terjadi penambahan energi pada molekul-molekul bahan bakar, selanjutnya energi kinetik molekul-molekul akan meningkat. Hal ini mengakibatkan molekul-molekul yang bereaksi menjadi lebih aktif mengadakan tumbukan, sehingga pembakaran akan semakin baik seperti dinyatakan oleh Kuo (1986) bahwa semakin tinggi temperatur awal maka kecepatan pembakaran juga akan meningkat.

Semakin besar sudut inklinali *tangential air jet inlets* yang digunakan, maka resirkulasi yang terjadi juga semakin besar. Hal ini akan mengakibatkan ketidakstabilan pada aliran yang semakin besar pula. Ketidakstabilan aliran ini akan memperkuat proses pengadukan reaktan serta mengakibatkan aliran turbulen, sehingga pencampuran bahan bakar dan udara lebih homogen akibat aliran *swirl* oleh aliran udara tangensial. Akibatnya pembakaran yang terjadi juga semakin baik dan luasan daerah kestabilan memiliki kecenderungan semakin bertambah. Perbandingan luasan daerah kestabilan api difusi *annulus jet* pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets* ditunjukkan pada gambar 3 (a) dan (b). Secara keseluruhan dengan sudut inklinali *tangential air jet inlets*  $60^{\circ}$  mempunyai luasan daerah kestabilan yang paling luas.

#### Distribusi Temperatur Api Difusi Annulus Jet

Gambar 4 Grafik distribusi temperatur pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*

$$U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}, V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}, W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$$



Gambar 4 menampilkan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*, yaitu pemasangan *tangential air jet inlets* dengan variasi sudut inklinali  $0^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$  dan  $60^{\circ}$  serta dengan variasi peletakan sensor pada sumbu  $y = 30 \text{ mm}$ ,  $y = 90 \text{ mm}$ ,  $y = 150 \text{ mm}$  dan  $y = 210 \text{ mm}$ . Kecepatan aliran udara aksial  $U = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$ ,

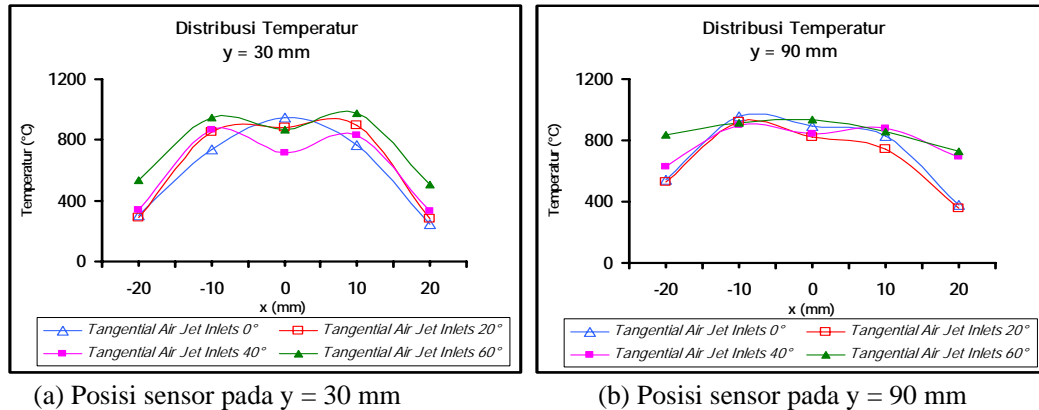
kecepatan aliran bahan bakar  $V = 4,672 \text{ m.s}^{-1}$  dan kecepatan aliran udara tangensial  $W = 5,384 \text{ m.s}^{-1}$ . Sumbu horisontal merupakan posisi peletakan sensor pada sumbu x, sedangkan sumbu vertikal adalah temperatur rata-rata yang terukur pada sensor temperatur.

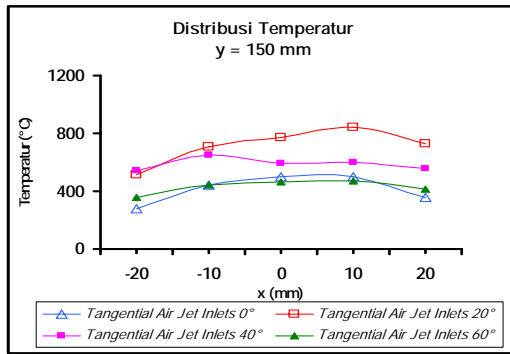
Pada semua kasus terlihat bahwa pada sumbu api ( $x = 0 \text{ mm}$ ) cenderung memiliki temperatur yang paling tinggi. Hal ini dikarenakan pada jarak tersebut *jet* bahan bakar memiliki kecepatan yang paling tinggi, sehingga terdapat banyak aliran massa bahan bakar, akibatnya proses difusi antara bahan bakar dan udara dapat berlangsung secara maksimal. Pada  $x = -20 \text{ mm}$  dan  $x = 20 \text{ mm}$ , rata – rata dihasilkan temperatur yang rendah karena pada jarak tersebut terdapat banyak suplai udara pembakaran, sehingga tidak semua atom-atom dari pengoksidasi bereaksi secara kimia dengan bahan bakar untuk menjadi produk pembakaran, akibatnya sejumlah kalor akan terbuang keluar sebagai akibat adanya pendinginan oleh aliran udara tersebut. Oleh karena itu cenderung terjadi temperatur rendah pada bagian tepi api ( $x = -20 \text{ mm}$  dan  $x = 20 \text{ mm}$ ). Akan tetapi pada grafik distribusi temperatur  $y = 30$  terlihat terjadi yang sebaliknya, hal ini disebabkan adanya efek resirkulasi aliran udara pada daerah terdekat dari *burner exit plane* oleh kecepatan aliran udara tangensial maupun aksial yang cukup besar dan tidak sebanding dengan besarnya kecepatan gas bahan bakar pada sumbu api ( $x = 0 \text{ mm}$ ) yang mempunyai temperatur cukup rendah sehingga proses difusi tidak berlangsung dengan baik, akibatnya ada penurunan temperatur pada sumbu api ( $x = 0$ ). Efek resirkulasi ini mempengaruhi reaktan untuk bergerak ke arah tangensial sehingga terjadi proses difusi yang baik pada posisi  $x = -10 \text{ mm}$  dan  $x = 10 \text{ mm}$ . Efek resirkulasi dari aliran udara tangensial ini juga hanya terjadi pada distribusi temperatur  $y = 30 \text{ mm}$  karena pada grafik distribusi temperatur  $y = 90 \text{ mm}$ ,  $y = 150 \text{ mm}$  dan  $y = 210 \text{ mm}$  terlihat bahwa tidak terjadi penurunan temperatur pada sumbu api ( $x = 0$ ).

Pada gambar 3 dapat dilihat bahwa distribusi temperatur yang terjadi semakin merata. Pada grafik distribusi temperatur  $y = 210 \text{ mm}$  terlihat temperatur terdistribusi dengan merata ke arah horisontal dengan tingkat perubahan temperatur yang relatif rendah dibandingkan dengan distribusi temperatur pada  $y = 30 \text{ mm}$ ,  $y = 90 \text{ mm}$  dan  $y = 150 \text{ mm}$ . Hal ini menunjukkan bahwa pada posisi tersebut terjadi proses pencampuran bahan bakar dan udara yang paling baik, sehingga terjadi pembakaran yang merata pada hampir seluruh daerah pencampuran.

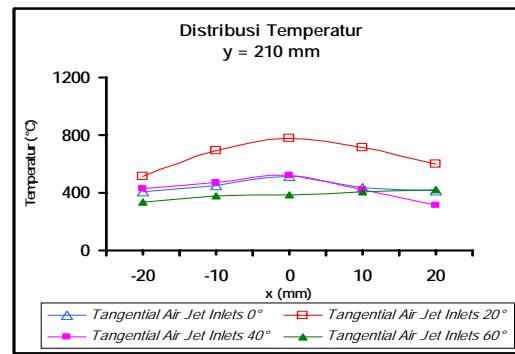
Pada kecepatan aliran udara yang rendah, efek dari pemasangan *tangential air jet inlets* belum begitu terlihat. Hal ini terlihat dari distribusi temperatur yang hampir sama pada berbagai variasi pemasangan *tangential air jet inlets*. Selanjutnya akan dapat diketahui pengaruh dari pemasangan *tangential air jet inlets* dengan menaikkan kecepatan aliran udara tangensial. Hal ini dapat dilihat pada gambar 5.

Gambar 5 Grafik distribusi temperatur pada berbagai jarak aksial  
 $U = 1,160 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $V = 7,121 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $W = 2,265 \text{ m.s}^{-1}$





(c) Posisi sensor pada y = 150 mm



(d) Posisi sensor pada y = 210 mm

Pada kecepatan aliran udara yang tinggi dapat dilihat dengan jelas pengaruh pemasangan *tangential air jet inlets* terhadap distribusi temperatur yang dihasilkan api (Gambar 5). Semakin besar sudut inklinsi *tangential air jet inlets*, temperatur terdistribusi secara merata ke arah horisontal. Hal ini terjadi karena kecepatan aliran udara yang dihasilkan oleh aliran udara tangensial maupun aksial mengakibatkan terjadinya batas gesekan (*shear layer*) yang lebih besar antara aliran resirkulasi dan daerah utama, sehingga banyak terjadi perpindahan panas antara gas panas (campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar) ke gas dingin (bahan bakar). Adanya pemanasan awal mengakibatkan terjadi penambahan energi pada molekul-molekul bahan bakar, selanjutnya energi kinetik molekul-molekul akan meningkat. Hal ini sesuai dengan rumus energi kinetik yaitu  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$  (Resnick, 1986: 772), dengan k adalah konstanta Boltzmann. Dari rumus tersebut terlihat bahwa temperatur sebanding dengan energi kinetik molekul, jadi semakin tinggi energi kinetik dari molekul, maka temperatur juga akan semakin meningkat.

Pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinsi 60° menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata daripada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinsi 0°, 20° dan 40° tetapi temperatur yang terjadi cenderung lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya resirkulasi yang paling tepat pada kondisi tersebut dimana aliran udara tangensial yang dibawa dengan sudut inklinsi 60° bergerak ke arah radial maupun aksial yang sesuai dengan kecepatan gas bahan bakar sehingga proses difusi yang terjadi menjadi lebih baik, maka api akan mengalami pemendekan ke arah vertikal dan penebalan ke arah horisontal. Pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinsi 0°, 20° dan 40° menghasilkan distribusi temperatur yang kurang merata karena aliran udara tangensial yang terjadi cenderung melingkar menjauh ke arah luar dari zona reaksi difusi dan proses transfer panas dari gas panas ke gas dingin yang tidak maksimal. Akibatnya proses difusi yang terjadi kurang merata sehingga temperatur tidak terdistribusi secara merata pula.

Secara keseluruhan dengan menaikkan kecepatan aliran udara tangensial maka akan didapatkan distribusi temperatur yang lebih merata pada beberapa kondisi dengan pemasangan berbagai sudut inklinsi *tangential air jet inlets*. Hal ini disebabkan adanya kecepatan aliran udara aksial yang cukup besar memberikan efek resirkulasi baik itu arah tangensial maupun aksial yang cukup besar bagi reaktan sehingga meningkatkan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi yang semakin besar mengakibatkan kecepatan aksial menurun pada zona resirkulasi, akibatnya pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinsi yang kecil maka kecepatan reaksi dan kecepatan aliran tidak seimbang atau bahkan kecepatan reaksinya justru menjadi menurun. Tetapi dengan pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinsi yang cukup besar, intensitas turbulensi tersebut justru meningkatkan kecepatan aliran yang seimbang antara kecepatan tangensial maupun aksial sehingga meningkatkan kecepatan reaksi dan proses difusi antara bahan bakar dan udara. Akibatnya terjadi pemendekan api ke arah vertikal dan penebalan api ke arah horisontal sehingga distribusi temperatur akan lebih merata.

## Kesimpulan

Dari pembahasan diatas dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- Semakin besar sudut inklinasi *tangential air jet inlets* yang dipasang pada *annulus* udara mengakibatkan kestabilan nyala pada api difusi *annulus jet* semakin meningkat, sehingga daerah kestabilan api terbesar diperoleh pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi  $60^{\circ}$ .
- Temperatur api difusi *annulus jet* semakin terdistribusi merata ke arah horisontal seiring dengan meningkatnya sudut inklinasi *tangential air jet inlets*, sehingga distribusi temperatur ke arah horisontal yang paling merata diperoleh pada pemasangan *tangential air jet inlets* dengan sudut inklinasi  $60^{\circ}$ . Dari data temperatur juga didapatkan hasil bahwa fluktuasi temperatur yang paling kecil cenderung terjadi pada bagian tengah sumbu api

### Saran

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat dilakukan beberapa penelitian lebih lanjut mengenai :

- Variasi sudut inklinasi *tangential air jet inlets* yang lebih besar pada pembakaran api difusi *annulus jet*.
- Karakteristik pola aliran fluida yang terjadi pada kombinasi aliran udara aksial dan aliran udara tangensial pada sebuah *annulus* udara dengan pemasangan *tangential air jet inlets*.
- Pengaruh pemasangan *tangential air jet inlets* dengan jarak dari *burner exit plane* yang bervariasi.
- Studi tentang emisi gas buang hasil pembakaran pada api difusi *annulus jet* dengan pemasangan *tangential air jet inlets*.

### DAFTAR PUSTAKA

- Hedman, Paul O., Flores, D. V. dan Fletcher T. H., 2002, *Observation of Flames Behavior in A Laboratory*, Amsterdam, The Netherlands.
- Kuo, Kenneth K., 1986, *Principles of Combustion*, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Lilley, David G., 1977, *Swirl Flow in Combustion: A Review*, AIAA.
- Masri, A. R., et al., 2000, *Probability Density Function Computation of a Strongly Swirling Non Premixed Flame Stabilized on a New Burner*, Australia: Proceeding of Combustion Institute.
- Monnot, G., et al., 1985, *Principles of Turbulent Fired Heat*, Texas: Gulf Publishing Company.
- Peters, N., 1997, *Four Lectures on Turbulent Combustion*, Ercoftac Summer School, Aachen, Germany.
- Potter, C. P., David, C. W. dan Midhat, Hondzo, 1997, *Mechanics of fluids*, Singapore: Prentice – Hall, Inc.
- Resnick, Halliday., 1986, *Physics for University*, New York: Mc Graw Hill.
- Solero, Giulio., et al., 2000, *Study of Injection typology on Turbulent Homogeneous Mixing in Natural Gas Swirl Burner*, Dipartimento di Energetica-Politecnico di Milano, Italy.
- Takahashi, F., et al., 1996, *Structure of Turbulent Hydrogen Jet Diffusion Flames With or Without Swirl*, Journal of Heat Transfer, ASME.
- Takahashi, F., et al., 1998, *Turbulence Structure of Swirling Hydrogen Jet Diffusion Flames*, Journal of Heat Transfer, ASME.
- Turns, Stephen R., 1996, *An Introduction to Combustion*, New York : McGraw-Hill, Inc
- Widodo, A. S., 2004, *Pengaruh Posisi dan Sudut Kemiringan Swirl Terhadap Kestabilan Pancaran Api Difusi Double Concentric*, Malang: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Vol. 16 No. 2, Lembaga Penelitian Universitas Brawijaya.
- Wijayanti, W., *Variasi Letak Central Fuel Tube Terhadap Concentric Annulus Tube Pada Pergeseran Daerah Kestabilan Api Difusi Dengan Bahan Bakar LPG*, Malang: Jurnal Teknik Vol. X No. 3, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- [www.planetmath.org/encyclopedia/Annulus.html](http://www.planetmath.org/encyclopedia/Annulus.html).