

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

Dari penelitian yang telah dilaksanakan, didapatkan data kecepatan udara primer yang diukur dengan *orifice* udara dan kecepatan udara sekunder yang diukur dengan anemometer, serta kecepatan aliran bahan bakar yang diukur dengan orifis bahan bakar. Data kecepatan aliran udara primer maupun sekunder dan kecepatan aliran bahan bakar diplot dalam diagram kestabilan api. Selain data tersebut, juga didapatkan visualisasi dari api itu sendiri yang diambil menggunakan metode optik dengan *direct photograph*.

Dari data-data visualisasi dapat diplot dalam diagram *lift off* maupun *blow off*, dengan tujuan mengetahui karakteristik api pada berbagai kondisi sehingga dapat diketahui fenomena yang terjadi pada api difusi *double concentric jet flow*.

4.1.1 Kestabilan Nyala Api Difusi *Double Concentric Jet Flow*

4.1.1.1 Pengolahan Data

Data yang diperoleh merupakan nilai rata-rata setelah dilakukan pengulangan pengambilan data sebanyak 4 (empat) kali, sehingga bisa mewakili fluktuasi dari data yang diperoleh. Data yang diperoleh dari hasil penelitian kemudian diolah untuk mendapatkan kecepatan bahan bakar (v_{bb}), udara primer (v_{up}), dan massa alir pada berbagai macam pemasangan sudut luar maupun sudut dalam *central fuel tube* yang divariasikan dan tanpa variasi sudut (0°).

A. Perhitungan Kecepatan Aliran Bahan Bakar

Data yang telah diketahui:

- a. ρ_{bb} = Massa Jenis bahan bakar ($2,009 \text{ kg/m}^3$)
- b. ρ_a = Massa Jenis Air pada 27°C ($996,512 \text{ kg/m}^3$)
- c. g = Percepatan gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}$)
- d. D_{bb} = Diameter pipa bahan bakar ($0,007 \text{ m}$)
- e. d_{bb} = Diameter pipa orifis bahan bakar ($0,0035 \text{ m}$)
- f. d_{nosel} = Diameter nosel bahan bakar ($0,0025 \text{ m}$)
- g. Δh = Beda ketinggian pada manometer (mm)

Contoh perhitungan data bahan bakar sudut 0° dengan $\Delta h = 1,2 \text{ mm}$:

- $\beta = \frac{d_{bb}}{D_{bb}} = \frac{0,0035}{0,007} = 0,5$

- Luas Pipa dan Nosel Bahan Bakar :

$$A_{pipa} = \frac{\pi}{4} (d_{pipa})^2 = \frac{3,14}{4} (0,007)^2 = 0,000038465 \text{ m}^2$$

$$A_{nosel} = \frac{\pi}{4} (d_{nosel})^2 = \frac{3,14}{4} (0,0025)^2 = 0,00000490625 \text{ m}^2$$

- Kecepatan Bahan Bakar Pada Pipa:

$$v_{bb} = C \cdot \frac{d_{bb}^2}{D_{bb}^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a \cdot g \cdot \Delta h)}{\rho_{bb} \cdot (1 - \beta^4)}}$$

$$v_{bb} = (0,9) \cdot \left(\frac{0,0035^2}{0,007^2}\right) \sqrt{\frac{2 \cdot (996,512 \cdot 9,81 \cdot 0,0012)}{2,009 \cdot (1 - 0,5^4)}}$$

$$v_{bb} = 0,794 \text{ m/s}$$

- Massa Alir Bahan Bakar pada pipa:

$$\dot{m}_{bb} = \rho_{bb} \cdot A_{pipa} \cdot v_{bb}$$

$$\dot{m}_{bb} = 2,009 \cdot 0,000038465 \cdot 0,794$$

$$\dot{m}_{bb} = 0,00006136 \text{ kg/s}$$

- Maka dengan persamaan kontinuitas didapatkan kecepatan bahan bakar pada nosel:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\rho_1 \cdot Q_1 = \rho_2 \cdot Q_2$$

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2$$

Sehingga didapatkan :

$$\rho_{bb} \cdot A_{pipa} \cdot v_{pipa} = \rho_{bb} \cdot A_{nosel} \cdot v_{nosel}$$

$$2,009 \cdot 0,000038465 \cdot 0,794 = 2,009 \cdot 0,00000490625 \cdot v_{nosel}$$

$$v_{nosel} = 6,23 \text{ m/s}$$

B. Perhitungan Kecepatan Aliran Udara Primer

Data yang diketahui:

- ρ_{up} = Massa jenis udara ($1,2 \text{ kg/m}^3$)
- ρ_a = Massa Jenis Air pada 27°C ($996,512 \text{ kg/m}^3$)
- g = Percepatan gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- β = Rasio diameter orifis dan diameter saluran
- D_{up} = Diameter pipa udara primer ($0,0254 \text{ m}$)
- d_{up} = Diameter pipa orifis udara primer ($0,012 \text{ m}$)
- Δh = Beda ketinggian pada manometer (mm)

Contoh perhitungan data untuk sudut 0° dengan $\Delta h = 2 \text{ mm}$:

- $$\beta = \frac{d_{up}}{D_{up}} = \frac{0,012}{0,0254} = 0,473$$

- Luas Pipa Udara Primer dan Luas *Central Fuel Tube*:

$$A_{\text{pipa up}} = \frac{\pi}{4} (d_{\text{pipa}})^2 = \frac{3,14}{4} (0,0254)^2 = 0,000506451 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{central Fuel Tube}} = \frac{\pi}{4} (d_{\text{central fuel tube}})^2 = \frac{3,14}{4} (0,015)^2 = 0,000176625 \text{ m}^2$$

- Kecepatan Udara Primer pada Pipa :

$$v_{\text{pipaup}} = C \cdot \frac{d_{up}^2}{D_{up}^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a \cdot g \cdot \Delta h)}{\rho_{up} \cdot (1 - \beta^4)}}$$

$$v_{\text{pipaup}} = (0,78) \cdot \left(\frac{0,012^2}{0,0254^2} \right) \sqrt{\frac{2 \cdot (996,512 \cdot 9,81 \cdot 0,002)}{1,2 \cdot (1 - 0,473^4)}}$$

$$v_{\text{pipaup}} = 1,012 \text{ m/s}$$

- Massa Alir Udara Primer pada Pipa:

$$\dot{m}_{up} = \rho_{up} \cdot A_{\text{pipaup}} \cdot v_{\text{pipaup}}$$

$$\dot{m}_{up} = 1,2 \cdot 0,000506451 \cdot 1,012$$

$$\dot{m}_{up} = 0,000613439 \text{ kg/s}$$

- Untuk menghitung kecepatan udara primer (v_{up}) yang keluar ke ruang bakar dengan menggunakan persamaan kontinuitas, terlebih dahulu dihitung luas permukaan yang dilalui udara primer yakni, $A_{\text{pipa up}} - A_{\text{central fuel tube}}$.

$$A_{\text{pipa up}} - A_{\text{central Fuel Tube}} = A_{\text{nosel up}}$$

$$0,000506451 - 0,000176625 = 0,000329826 \text{ m}^2$$

Maka dengan persamaan kontinuitas didapatkan kecepatan bahan bakar pada nosel:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\rho_1 \cdot Q_1 = \rho_2 \cdot Q_2$$

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2$$

Sehingga didapatkan :

$$\rho_{up} \cdot A_{\text{pipaup}} \cdot v_{\text{pipaup}} = \rho_{up} \cdot A_{\text{noselup}} \cdot v_{\text{noselup}}$$

$$1,2 \cdot 0,000506451 \cdot 1,012 = 1,2 \cdot 0,000329826 \cdot v_{\text{noselup}}$$

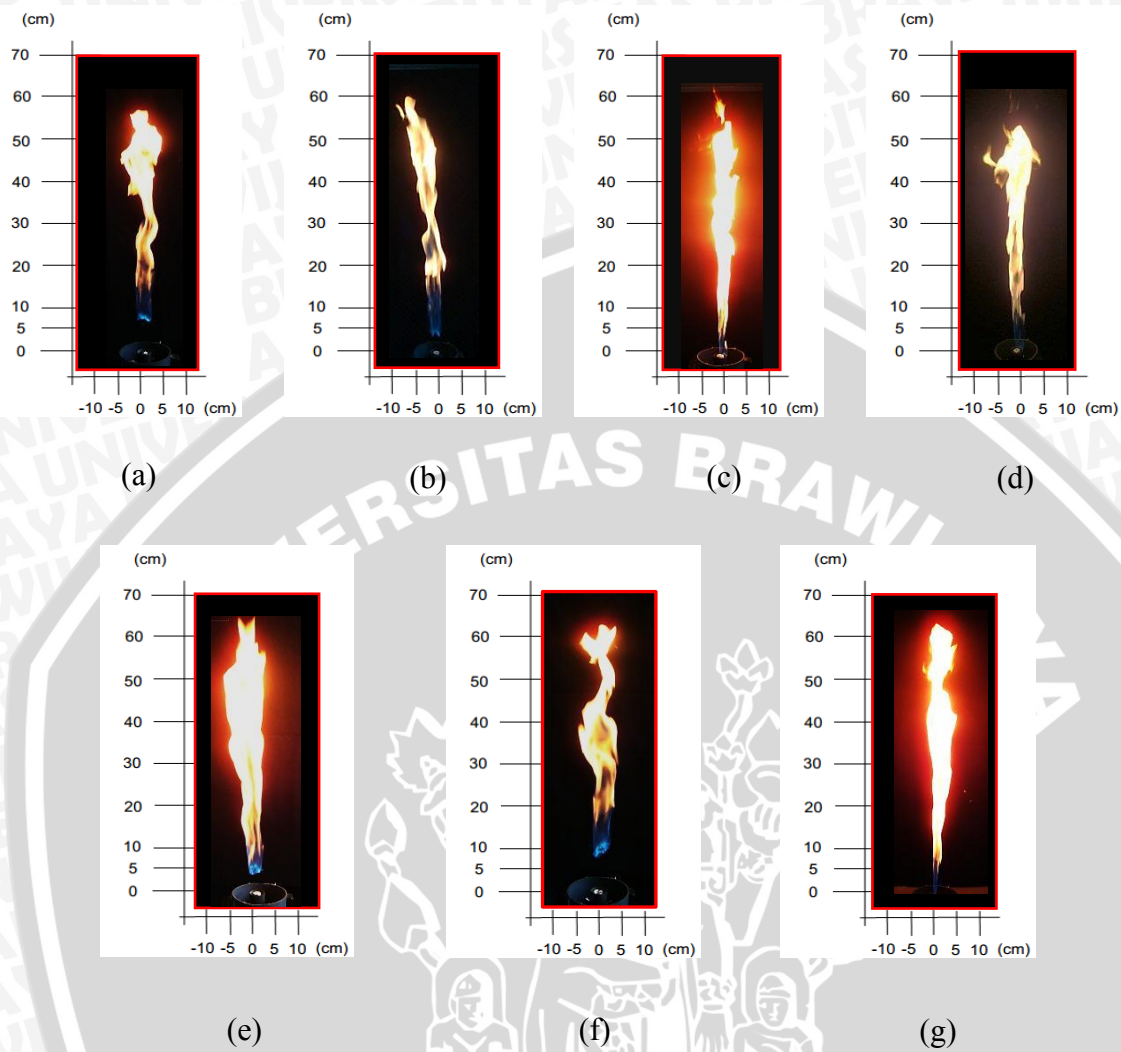
$$v_{\text{noselup}} = 1,550 \text{ m/s}$$

Dengan cara yang sama didapatkan data kecepatan dan massa alir dari bahan bakar dan udara primer seperti pada lampiran 1 sampai 7.

4.1.1.2 Visualisasi Api Difusi *Double Concentric Jet Flow*

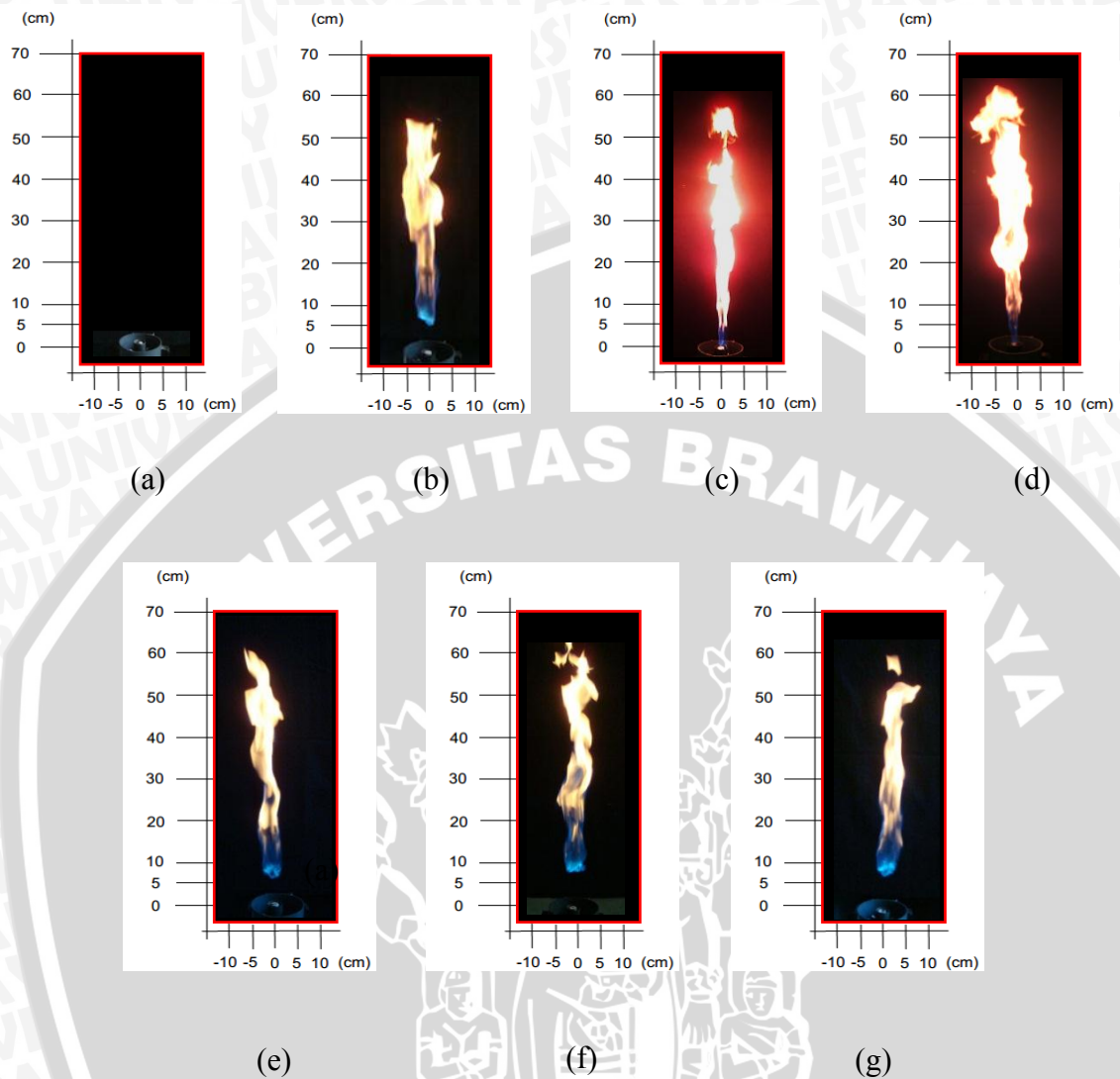
Visualisasi ini digunakan untuk mengetahui karakter api pada berbagai kondisi, sehingga dapat diketahui fenomena yang terjadi pada api difusi dan untuk mengetahui ketidakstabilan api difusi (*lift off*). Selain itu visualisasi ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan densitas di dalam ruang bakar dan *mixing* aliran.

Dari penelitian yang telah dilaksanakan maka diperoleh visualisasi api difusi *double concentric jet flow* sebagai berikut:



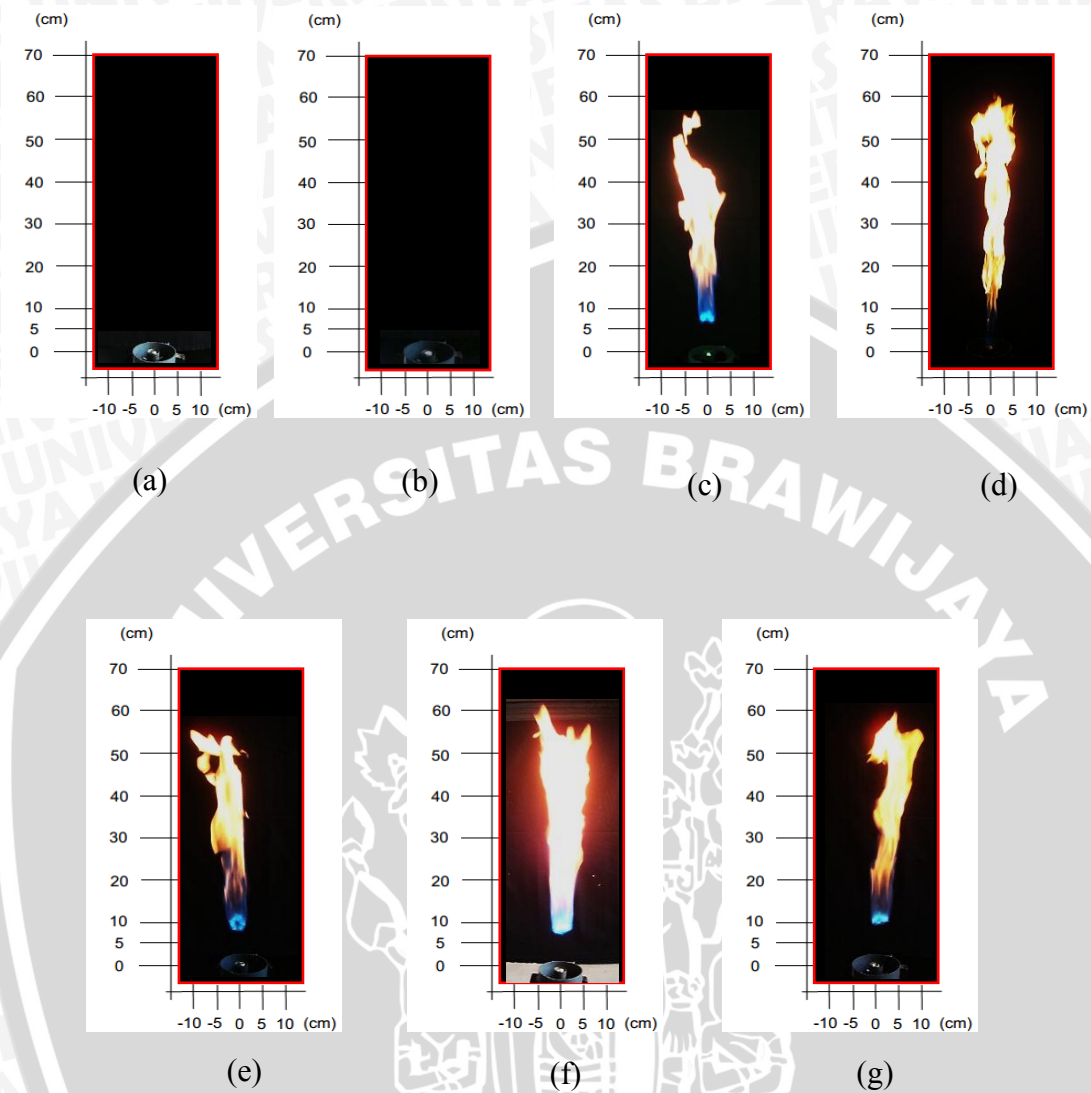
Gambar 4.1 Visualisasi api pada berbagai macam variasi sudut luar dan dalam *central fuel tube* pada $v_{us} = 0,3 \text{ m/s}$, $v_{up} = 1,550 \text{ m/s}$, $v_{bb} = 12,06 \text{ m/s}$

- (a) Sudut 0°
- (b) Sudut Luar 30°
- (c) Sudut Luar 45°
- (d) Sudut Dalam 30°
- (e) Sudut Dalam 45°
- (f) Sudut Dalam 60°
- (g) Sudut Luar 60°



Gambar 4.2 Visualisasi api pada berbagai macam variasi sudut luar dan dalam *central fuel tube* pada $v_{us} = 0,3 \text{ m/s}$, $v_{up} = 2,191 \text{ m/s}$, $v_{bb} = 17,052 \text{ m/s}$

- (a) Sudut 0°
- (b) Sudut Luar 30°
- (c) Sudut Luar 45°
- (d) Sudut Dalam 30°
- (e) Sudut Dalam 45°
- (f) Sudut Dalam 60°
- (g) Sudut Luar 60°



Gambar 4.3 Visualisasi api pada berbagai macam variasi sudut luar dan dalam *central fuel tube* pada $v_{us} = 0,3 \text{ m/s}$, $v_{up} = 2,684 \text{ m/s}$, $v_{bb} = 20,9 \text{ m/s}$

- (a) Sudut 0°
- (b) Sudut Luar 30°
- (c) Sudut Luar 45°
- (d) Sudut Dalam 30°
- (e) Sudut Dalam 45°
- (f) Sudut Dalam 60°
- (g) Sudut Luar 60°

4.1.2 Distribusi Temperatur Api Difusi *Double Concentric Jet Flow*

4.1.2.1 Data Penelitian

Data temperatur hasil percobaan diolah menjadi grafik untuk kemudian dilakukan analisa. Grafik distribusi temperatur dengan variasi sudut luar dan sudut dalam *central fuel tube* dibuat dengan menggunakan hubungan antara distribusi temperatur dengan posisi peletakan sensor temperatur baik arah vertikal maupun horizontal. Kondisi api saat pengambilan data temperatur adalah kondisi stabil untuk semua kasus, yakni pada kecepatan udara sekunder (v_{us}) 0,3 m/s, udara primer (v_{up}) 1,094 m/s dan kecepatan bahan bakar (v_{bb}) 4,5472 m/s.

Data yang diperoleh merupakan nilai rata-rata setelah dilakukan pengulangan pengambilan data sebanyak 4 (empat) kali, sehingga bisa mewakili fluktuasi dari data yang diperoleh. Data distribusi temperatur api difusi *double concentric jet flow* dengan sudut luar maupun sudut dalam *central fuel tube* yang divariasikan dan tanpa variasi sudut.

Tabel 4.1 Distribusi temperatur sudut 0° pada titik tinjau vertikal dan horizontal

| 0° | | | |
|---------------|-----------------|-----|-----|
| Titik Tinjau | | | |
| Vertikal (mm) | Horizontal (mm) | | |
| | -10 | 0 | 10 |
| 25 | 138 | 149 | 144 |
| 50 | 636 | 673 | 649 |
| 100 | 745 | 759 | 722 |
| 150 | 718 | 750 | 714 |

Tabel 4.2 Distribusi temperatur sudut luar 30° pada titik tinjau vertikal dan horizontal

| Sudut Luar 30° | | | |
|-----------------------|-----------------|-----|-----|
| Titik Tinjau | | | |
| Vertikal (mm) | Horizontal (mm) | | |
| | -10 | 0 | 10 |
| 25 | 289 | 340 | 280 |
| 50 | 690 | 775 | 678 |
| 100 | 726 | 765 | 742 |
| 150 | 739 | 825 | 724 |

Tabel 4.3 Distribusi temperatur sudut luar 45° pada titik tinjau vertikal dan horizontal

| Sudut Luar 45° | | | |
|----------------|-----------------|-----|-----|
| Titik Tinjau | | | |
| Vertikal (mm) | Horizontal (mm) | | |
| | -10 | 0 | 10 |
| 25 | 285 | 315 | 276 |
| 50 | 733 | 757 | 711 |
| 100 | 847 | 829 | 834 |
| 150 | 835 | 876 | 842 |

Tabel 4.4 Distribusi temperatur sudut luar 60° pada titik tinjau vertikal dan horizontal

| Sudut Luar 60° | | | |
|----------------|-----------------|-----|-----|
| Titik Tinjau | | | |
| Vertikal (mm) | Horizontal (mm) | | |
| | -10 | 0 | 10 |
| 25 | 340 | 387 | 355 |
| 50 | 745 | 793 | 721 |
| 100 | 834 | 875 | 824 |
| 150 | 867 | 925 | 875 |

Tabel 4.5 Distribusi temperatur sudut dalam 30° pada titik tinjau vertikal dan horizontal

| Sudut Dalam 30° | | | |
|-----------------|-----------------|-----|-----|
| Titik Tinjau | | | |
| Vertikal (mm) | Horizontal (mm) | | |
| | -10 | 0 | 10 |
| 25 | 211 | 242 | 228 |
| 50 | 522 | 561 | 519 |
| 100 | 823 | 853 | 817 |
| 150 | 679 | 758 | 685 |

Tabel 4.6 Distribusi temperatur sudut dalam 45° pada titik tinjau vertikal dan horizontal

| Sudut Dalam 45° | | | |
|-----------------|-----------------|-----|-----|
| Titik Tinjau | | | |
| Vertikal (mm) | Horizontal (mm) | | |
| | -10 | 0 | 10 |
| 25 | 180 | 254 | 223 |
| 50 | 587 | 655 | 593 |
| 100 | 779 | 820 | 756 |
| 150 | 824 | 854 | 832 |

Tabel 4.7 Distribusi temperatur sudut dalam 60° pada titik tinjau vertikal dan horizontal

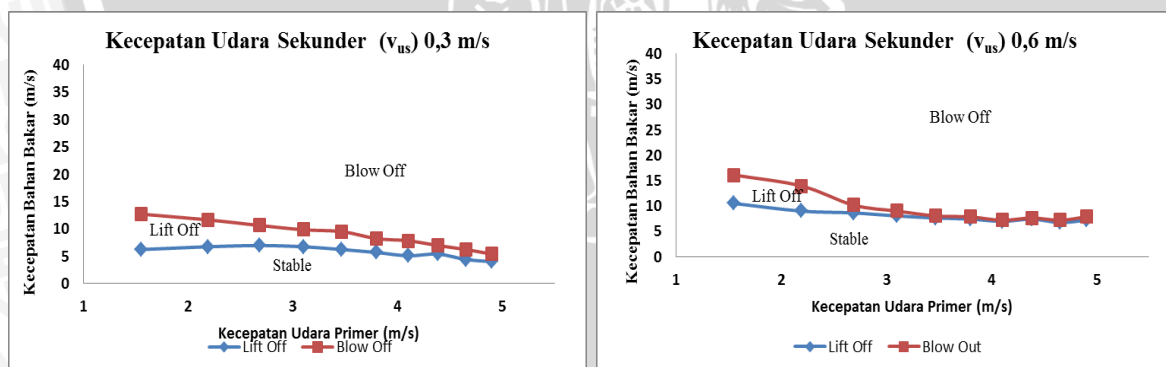
| Sudut Dalam 60° | | | |
|-----------------|-----------------|-----|-----|
| Titik Tinjau | | | |
| Vertikal (mm) | Horizontal (mm) | | |
| | -10 | 0 | 10 |
| 25 | 359 | 388 | 334 |
| 50 | 680 | 750 | 691 |
| 100 | 732 | 789 | 738 |
| 150 | 855 | 895 | 863 |

4.2 Pembahasan

4.2.1 Diagram kestabilan api difusi *double concentric jet flow*

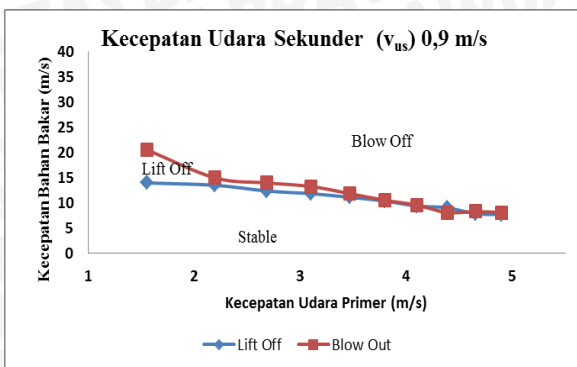
Diagram kestabilan api difusi dibuat dengan menjelaskan hubungan antara kecepatan aliran udara primer (v_{up}) dengan kecepatan aliran bahan bakar (v_{bb}) pada variasi kecepatan udara sekunder (v_{us}) yang berbeda. Pada masing-masing variasi sudut baik luar maupun dalam, diagram kestabilan api difusi dibagi menjadi 3 bagian dengan melihat kecenderungan batas yang terjadi yakni api stabil (*stable*), daerah api *lift off* dan daerah api *blow off*.

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, diagram kestabilan yang terbentuk adalah sebagai berikut:



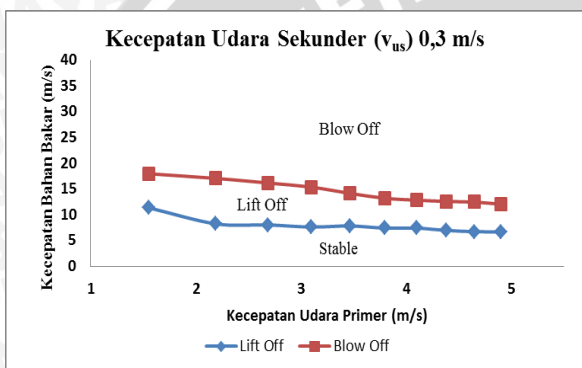
(a)

(b)

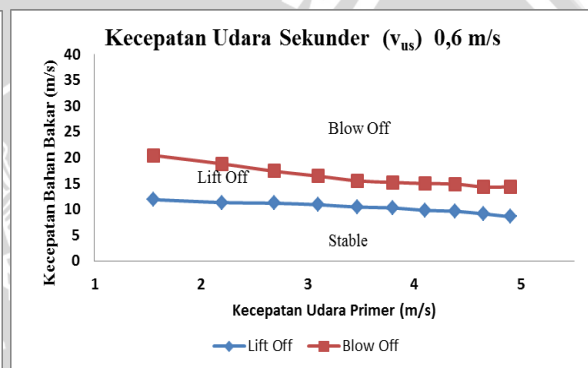


(c)

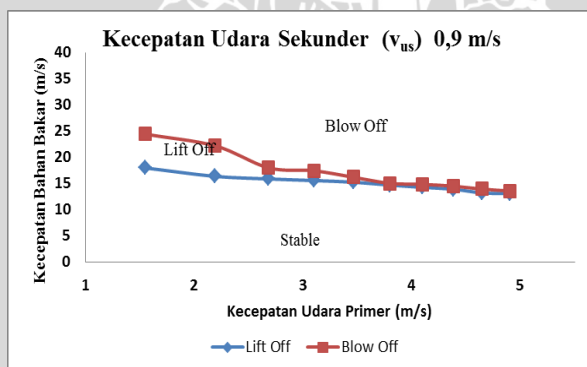
Gambar 4.4 Diagram kestabilan api difusi pada sudut 0° dengan variasi kecepatan udara sekunder.



(a)

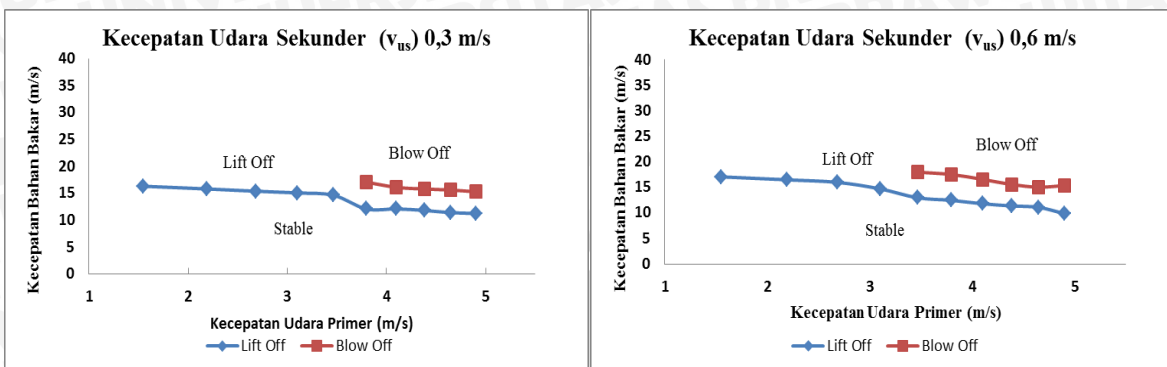


(b)



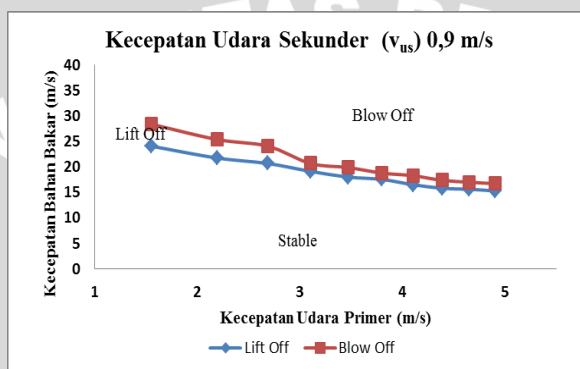
(c)

Gambar 4.5 Diagram kestabilan api difusi pada sudut luar 30° dengan variasi kecepatan udara sekunder.



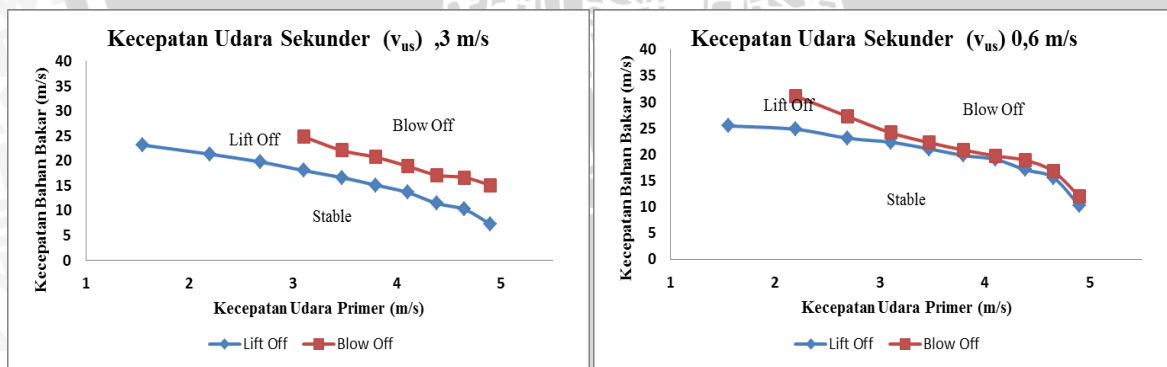
(a)

(b)



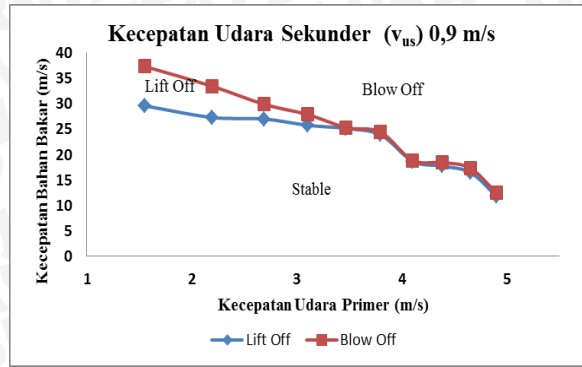
(c)

Gambar 4.6 Diagram kestabilan api difusi pada sudut luar 45° dengan variasi kecepatan udara sekunder.



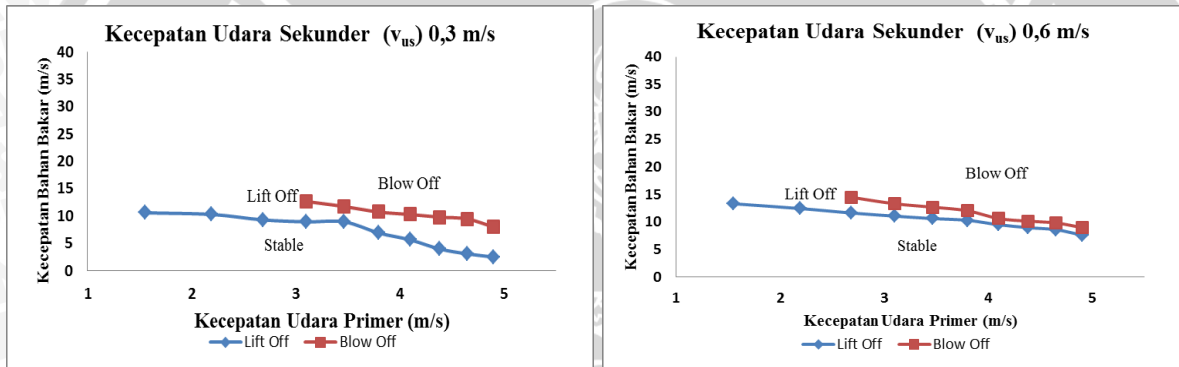
(a)

(b)



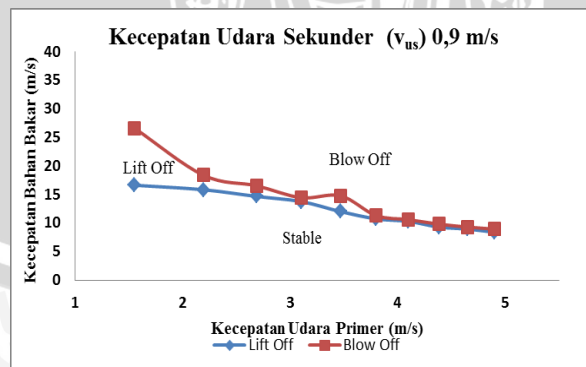
(c)

Gambar 4.7 Diagram kestabilan api difusi pada sudut luar 60° dengan variasi kecepatan udara sekunder.



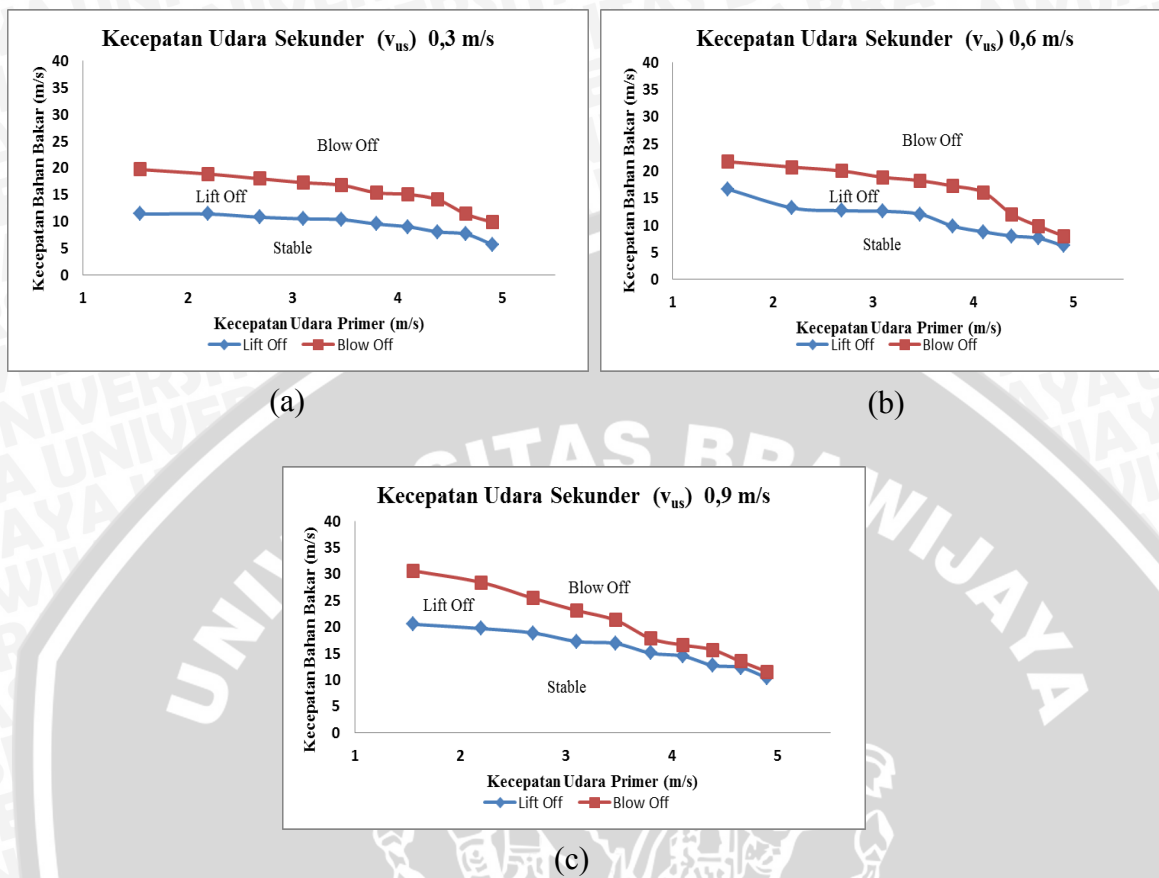
(a)

(b)

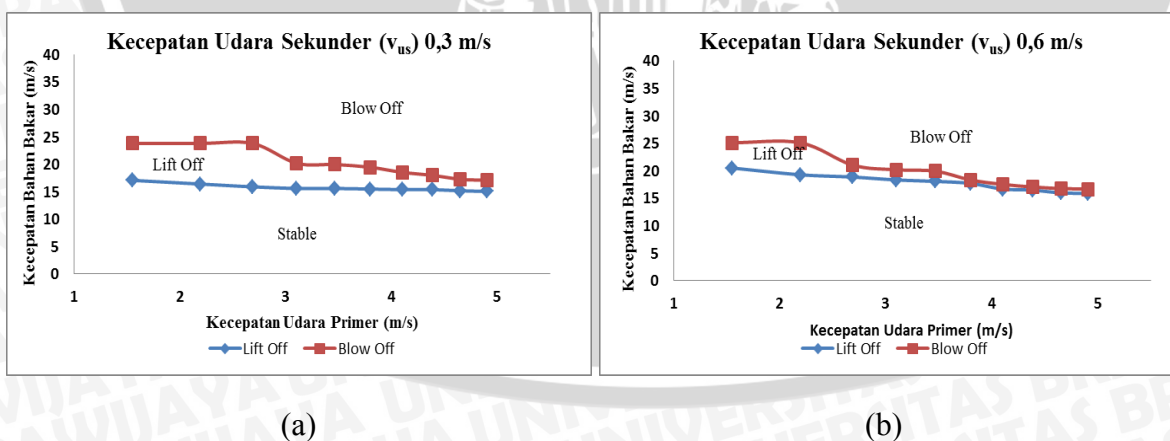


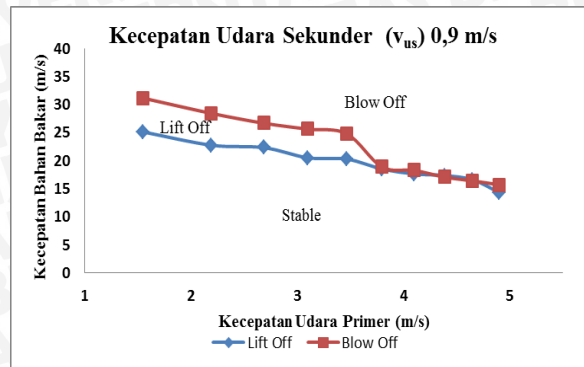
(c)

Gambar 4.8 Diagram kestabilan api difusi pada sudut dalam 30° dengan variasi kecepatan udara Sekunder.



Gambar 4.9 Diagram kestabilan api difusi pada sudut dalam 45° dengan variasi kecepatan udara sekunder.

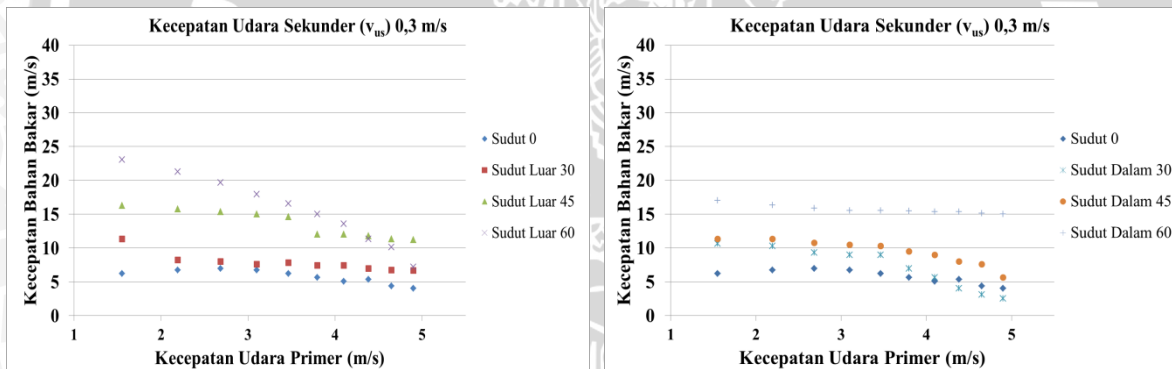




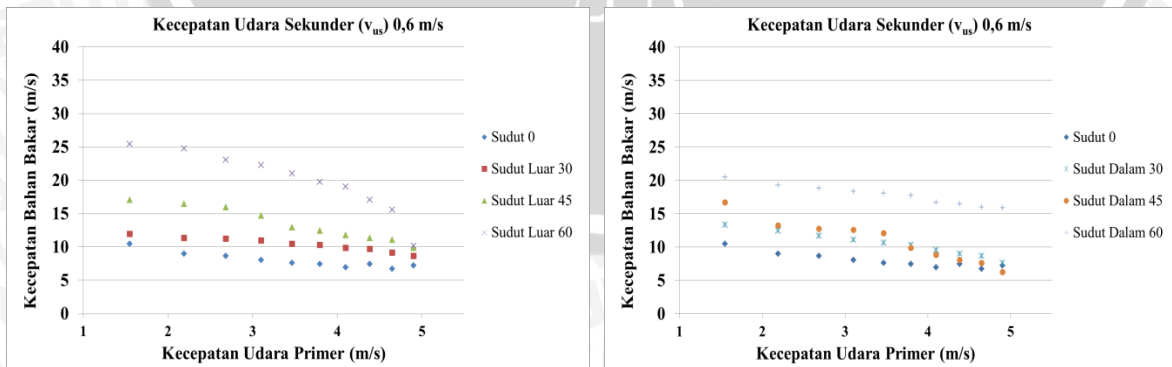
(c)

Gambar 4.10 Diagram kestabilan api difusi pada sudut dalam 60° dengan variasi kecepatan udara sekunder.

A. Diagram Gabungan Stable - Lift Off

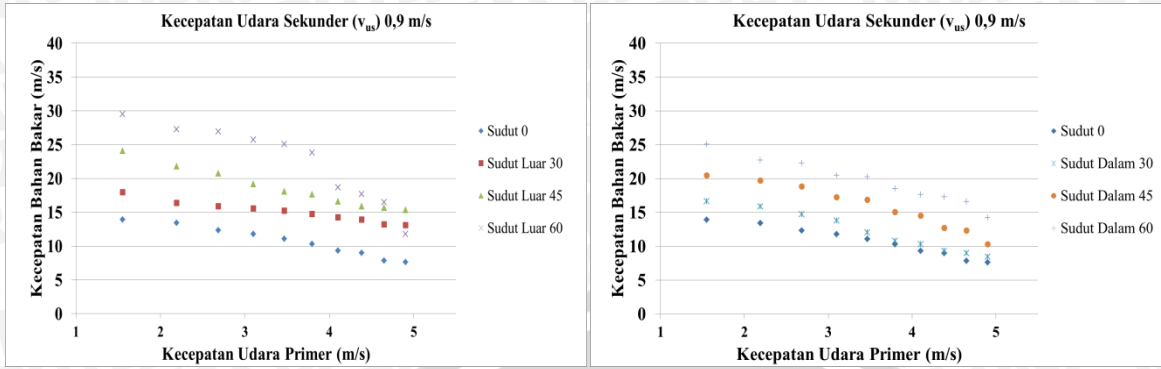


(a)



(b)

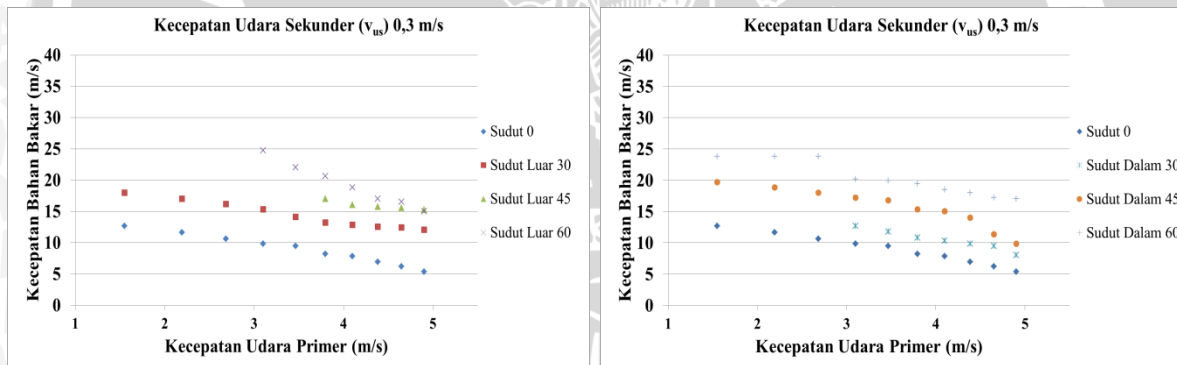




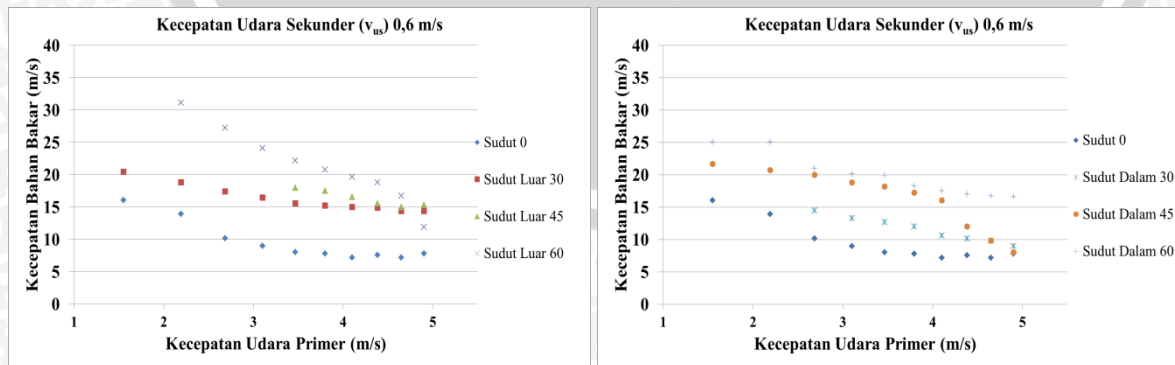
(c)

Gambar 4.11 Diagram gabungan *stable-lift off* dengan variasi sudut luar dan sudut dalam *central fuel tube* pada udara sekunder yang bervariasi.

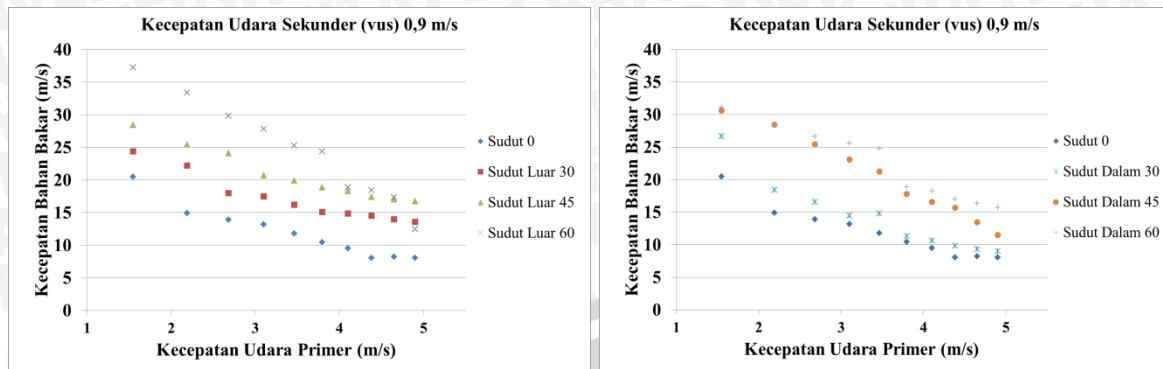
B. Diagram Gabungan *Blow Off*



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.12 Diagram gabungan *blow off* dengan variasi sudut luar dan sudut dalam *central fuel tube* pada udara sekunder yang bervariasi.

a. Diagram kestabilan api sudut 0°

Pada gambar 4.4, 4.11, dan 4.12 *lift off* dan *blow off* terjadi secara hampir bersamaan. Hal ini terjadi karena kurangnya pembangkit turbulensi yang dapat membuat campuran antara udara dan bahan bakar menjadi lebih homogen. Karena tidak adanya pencampuran yang baik, maka waktu untuk bereaksi menjadi lebih lama jika dibandingkan dengan waktu untuk mengalir, sehingga api menjadi *blow off*.

Pada $v_{us} = 0,3$ m/s dengan $v_{up} = 1,550$ m/s, *lift off* terjadi pada $v_{bb} = 6,23$ m/s. Masih dalam v_{up} yang sama, namun pada $v_{us} = 0,6$ m/s, *lift off* terjadi pada $v_{bb} = 10,48$ m/s, Selanjutnya masih pada v_{up} yang sama, namun pada $v_{us} = 0,9$ m/s *lift off* terjadi pada v_{bb} yang cukup tinggi, yakni 13,92 m/s. Dari keadaan ini jelas bahwa kenaikan kecepatan udara sekunder sangat mempengaruhi kestabilan api, yaitu memperluas daerah kestabilan api.

Terjadinya *lift off* karena adanya pangkal api terjadi ketidakseimbangan antara kecepatan aliran bahan bakar pada pangkal api dan kecepatan penyalaan dalam proses pencampuran antara aliran *jet* bahan bakar dengan udara pengoksidasi. Semakin besar aliran udara maka *lift off* dan *blow off* memiliki kecenderungan semakin lambat terjadi. Hal ini dikarenakan semakin banyak udara yang bereaksi dengan bahan bakar sehingga membuat reaksi pembakaran mendekati sempurna. Selain itu udara berperan memperbesar intensitas turbulensi yang menyebabkan pencampuran antara bahan bakar dan udara menjadi semakin homogen.

b. Diagram kestabilan api sudut luar 30°, 45°, dan 60°.

Pada gambar 4.5, 4.6, 4.7, 4.11 dan 4.12 terlihat bahwa pemasangan *central fuel tube* dengan sudut luar yang divariasikan membuat luasan daerah kestabilan api berubah. Semakin besar sudut luar yang digunakan, maka luasan daerah kestabilan memiliki kecenderungan semakin bertambah. Pada variasi sudut luar, luasan terbesar dimiliki oleh sudut luar 60°. Dengan semakin besarnya sudut luar, intensitas turbulensi dan zona resirkulasi yang terbentuk juga semakin besar, sehingga pencampuran udara dan bahan bakar menjadi semakin homogen dan pembakaran dapat semakin mendekati sempurna. selain itu pencampuran udara dan bahan bakar akan menyebabkan proses pemanasan awal pada reaktan, dimana hal ini juga ikut mempengaruhi reaksi pembakaran yang semakin baik.

Profil dari tiap-tiap Diagram kestabilan cenderung sama, yakni mempunyai batas *blow off* yang relatif tinggi pada kecepatan udara yang rendah, yaitu pada $v_{up} = 1,550$ m/s – 3,100 m/s. sedangkan untuk batas *lift off* pada semua kasus variasi sudut luar mengalami penurunan yang relatif kecil seiring dengan bertambahnya laju aliran udara. Hal ini terjadi dikarenakan semakin cepat aliran udara, maka proses pencampuran antara bahan bakar dan udara juga semakin cepat, akibatnya *Damkohler number* (Da) menjadi semakin kecil, yang berarti waktu yang tersedia untuk melakukan reaksi (*characteristic chemical time*) tidak mencukupi dibandingkan dengan waktu mengalirnya reaktan (*characteristic flow time*). Sehingga api mengalami *blow off* meskipun campuran antara bahan bakar dan udara masih dalam batas mampu nyala. Pada variasi sudut luar, luasan terbesar dimiliki oleh sudut luar 60°.

c. Diagram kestabilan api sudut dalam 30°, 45°, dan 60°.

Pada gambar 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 dan 4.12 terlihat bahwa pemasangan *central fuel tube* dengan sudut dalam yang divariasikan membuat luasan daerah kestabilan api berubah. Dari Diagram terlihat bahwa udara sekunder tidak berpengaruh secara signifikan terhadap karakteristik *lift off* nya, dan terjadi pada v_{up} dan v_{bb} yang cenderung memiliki kenaikan sedikit.

Namun dari diagram juga dapat dilihat bahwa semakin besar sudut dalam yang digunakan, maka luasan daerah kestabilan memiliki kecenderungan semakin bertambah. Pada variasi sudut dalam, luasan terbesar dimiliki oleh sudut dalam 60°. Dengan semakin besarnya sudut dalam, intensitas turbulensi semakin besar, sehingga pencampuran udara

dan bahan bakar menjadi semakin homogen dan pembakaran dapat semakin mendekati sempurna.

Profil dari tiap-tiap Diagram kestabilan cenderung sama, yakni mempunyai batas *blow off* yang relatif tinggi pada kecepatan udara yang rendah, yaitu pada $v_{up} = 1,550$ m/s – 3,100 m/s. sedangkan untuk batas *lift off* pada semua kasus variasi sudut luar mengalami penurunan yang relatif kecil seiring dengan bertambahnya laju aliran udara. Hal ini terjadi dikarenakan semakin cepat aliran udara, maka proses pencampuran antara bahan bakar dan udara juga semakin cepat, akibatnya *Damkohler number* (Da) menjadi semakin kecil, yang berarti waktu yang tersedia untuk melakukan reaksi (*characteristic chemical time*) tidak mencukupi dibandingkan dengan waktu mengalirnya reaktan (*characteristic flow time*). Sehingga api mengalami *blow off* meskipun campuran antara bahan bakar dan udara masih dalam batas mampu nyala. Pada variasi sudut dalam, luasan terbesar dimiliki oleh sudut dalam 60° kemudian dilanjutkan sudut dalam 45° dan sudut dalam 30° .

4.2.2 Visualisasi Api Difusi *Double Concentric Jet Flow*

Pada gambar 4.1 hingga gambar 4.3 terlihat visualisasi api pada berbagai variasi sudut luar dan sudut dalam dengan kecepatan udara sekunder (v_{us}) yang sama, yakni 0,3 m/s, namun dengan kecepatan udara primer dan bahan bakar yang berbeda. Dimana pada gambar 4.1 kecepatan udara primer (v_{up}) 1,550 m/s, dan kecepatan bahan bakar (v_{bb}) 12,06 m/s. Sedangkan pada gambar 4.2 kecepatan udara primer (v_{up}) 2,191 m/s, dan kecepatan bahan bakar (v_{bb}) 17,052 m/s. Kemudian pada gambar 4.3 menggunakan kecepatan udara primer (v_{up}) 2,684 m/s dan kecepatan bahan bakar (v_{bb}) 20,9 m/s.

Pada gambar 4.1 hingga gambar 4.3 semakin besar sudut luar maka api akan semakin stabil, namun api cenderung lebih pendek dan bentuknya memanjang. Sedangkan dengan semakin besarnya sudut luar *central fuel tube*, pada kecepatan udara yang semakin tinggi api mengalami fenomena *lift off* lebih cepat daripada dengan menggunakan sudut luar namun bentuk api cenderung lebih panjang dan melebar. Berbeda halnya pada sudut 0° , pada gambar 4.1 api lebih pendek dari sudut luar 30° dan sudut luar 45° , namun lebih panjang daripada sudut luar 60° . Selain itu pada sudut 0° dan luar 30° api juga sudah mengalami *lift off* dibandingkan dengan variasi sudut luar 45° dan 60° yang masih tetap dalam kondisi stabil. Kemudian pada gambar 4.2 dan 4.3 pada sudut 0° api sudah mengalami *blow off* diikuti oleh sudut luar 30° pada gambar 4.3. Hal ini dikarenakan

semakin besar sudut luar, maka kecepatan radial udara juga semakin besar sehingga akan meningkatkan *shear flow*. Peningkatan *shear flow* juga meningkatkan intensitas turbulensi yang semakin besar mengakibatkan kecepatan aksial menurun pada area resirkulasi, sehingga api mengalami pemendekan. Namun pada kasus sudut 0° dan 30° resirkulasi udara primer kurang efektif sehingga menyebabkan api pendek dan lebih cepat mengalami *lift off* daripada variasi sudut luar maupun sudut dalam lainnya.

Pada gambar 4.1 visualisasi api dengan variasi sudut dalam dengan kecepatan udara dan bahan bakar yang paling rendah sudah mengalami *lift off* pada sudut dalam 30° dan 45° , namun untuk sudut dalam 60° belum mengalami *lift off*. Hal ini dikarenakan dengan sudut dalam 60° pada saat kecepatan bahan bakar dan udara primer yang rendah, resirkulasi masih dapat berjalan dengan baik dimana kesesuaian antara kecepatan reaksi di daerah reaksi dan kecepatan aliran massa akibat difusi menuju daerah reaksi masih sebanding atau *Damkohler Number* (Da) = 1.

Secara umum pada hampir semua kasus, warna api hampir didominasi seluruhnya oleh warna kuning yang disebabkan oleh reaksi pembentukan jelaga yang hampir selalu terjadi pada pembakaran difusi. Pada kondisi kecepatan udara primer yang rendah, api cenderung berada pada kondisi aliran yang seragam, karena sudut luar maupun sudut dalam nosel kurang berfungsi pada kecepatan udara yang rendah. Ketika kecepatan udara tinggi, kondisi api yang terbentuk adalah turbulen akan tetapi pangkal api tetap berada pada keadaan yang seragam. Ketika kecepatan bahan bakar dinaikkan maka turbulensi akan meningkat, sehingga pencampuran antara bahan bakar dan udara semakin homogen dan didapatkan pembakaran difusi yang baik. Pangkal api didominasi oleh warna biru, dimana warna ini merupakan pancaran ion dari beberapa unsur seperti C_2 dan CH .

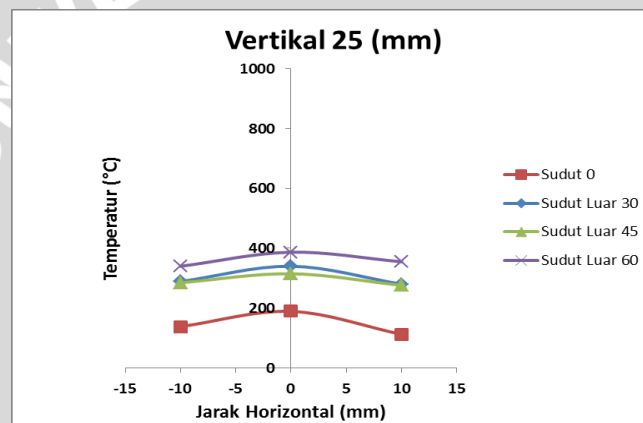
Ketika kecepatan bahan bakar dan udara primer dinaikkan lagi, maka akan terjadi *lift off* (gambar 4.2 dan gambar 4.3). saat kondisi *lift off*, kondisi api akan turbulen daripada saat kondisi stabil. Pangkal api masih berbentuk lingkaran dengan pangkal berbentuk cincin dan dominasi warna biru mulai berkurang. Hal ini dikarenakan kecepatan aliran bahan bakar yang meningkat, sehingga angka *Reynold* (Re) juga meningkat, akibatnya api menjadi turbulen. Namun hal ini tidak terjadi sama sekali pada sudut luar 60° , mulai kecepatan udara primer (v_{up}) 1,550 m/s, dan bahan bakar (v_{bb}) 12,06 m/s hingga kecepatan udara primer (v_{up}) 2,684 m/s dan kecepatan bahan bakar (v_{bb}) 20,9 m/s. api sama sekali tidak mengalami *blow off* dan warna api semakin putih. Hal ini menunjukkan bahwa sudut

luar 60° merupakan yang terbaik pada penelitian ini, dimana didapatkan tingkat turbulensi yang tinggi dan temperatur yang paling tinggi pula sehingga mengindikasikan proses pembakaran difusi yang baik.

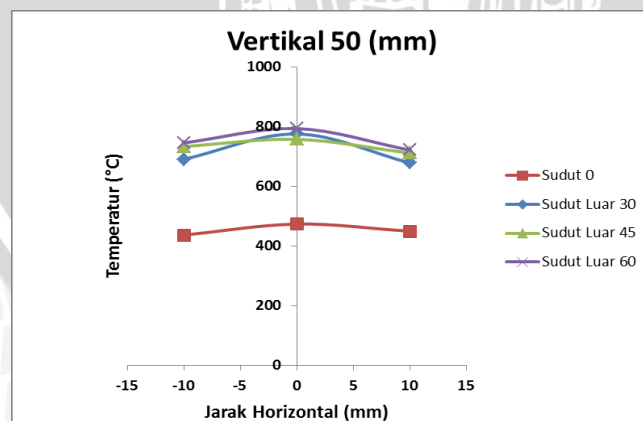
4.2.3 Distribusi Temperatur Api Difusi *Double Concentric Jet flow*

4.2.3.1 Profil Temperatur berdasarkan jarak vertikal

Profil temperatur ini menunjukkan rata-rata temperatur pada tiap-tiap titik tinjau dengan cara membandingkan temperatur di jarak horizontal pada jarak vertikal yang sama dengan variasi sudut luar dan sudut dalam *central fuel tube*. Dengan demikian dapat diketahui perubahan profil temperatur pada setiap variabel bebas. Titik tinjau pada pengukuran vertikal adalah 25, 50, 100, dan 150 mm, kemudian horizontal adalah -10, 0, dan 10 mm.



Gambar 4.13 Distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 25 mm dengan variasi sudut luar *central fuel tube*



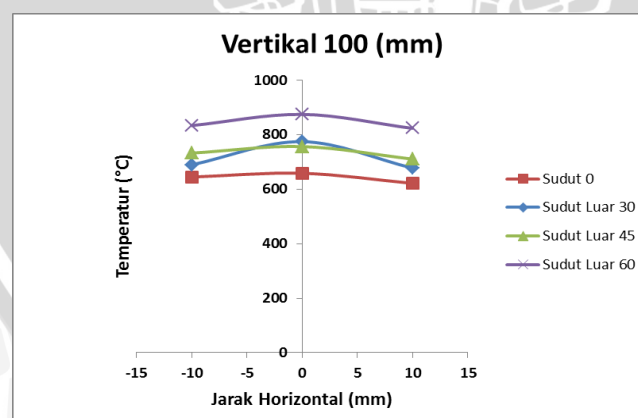
Gambar 4.14 Distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 50 mm dengan variasi sudut luar *central fuel tube*

a. Profil temperatur pada jarak vertikal 25 mm

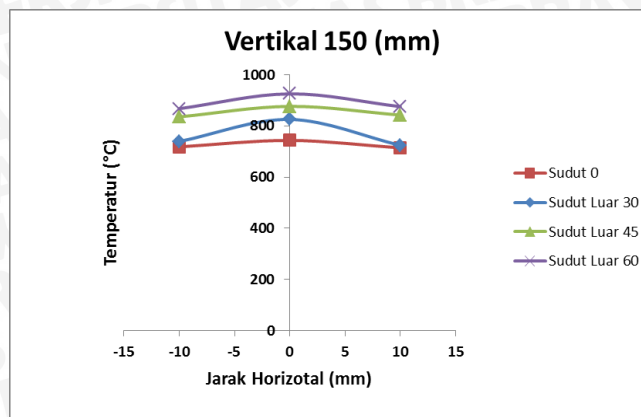
Gambar 4.13 menunjukkan profil temperatur pada jarak vertikal terbawah, yakni 25 mm dari nosel ke arah vertikal. Pada jarak 25 mm terlihat bahwa temperatur tertinggi dihasilkan pada jarak 0 mm untuk sudut luar 60° . Pada jarak ini, temperatur teringgi berada di horizontal 0 mm atau daerah tengah api. Pada sudut luar 30° dan sudut luar 45° temperatur cenderung berhimpit, Sedangkan temperatur terendah dihasilkan oleh sudut 0° pada jarak horizontal 10 mm. Dari gambar dapat terlihat bahwa kecenderungan urutan temperatur tertinggi adalah pada sudut luar 60° , sudut luar 45° , sudut luar 30° , dan terakhir adalah sudut 0° . Akan tetapi untuk daerah terluas, artinya daerah yang mempunyai temperatur seimbang pada hampir semua titik pengukuran adalah sudut luar 45° .

b. Profil temperatur pada jarak vertikal 50 mm.

Pada jarak vertikal 50 mm temperatur tertinggi untuk semua variasi sudut luar, berada pada jarak horizontal 0° . Temperatur terendah ada pada sudut 0° yang terjadi di semua titik pengukuran horizontal. Dari gambar 4.14 terlihat bahwa untuk variasi sudut luar temperatur tertinggi dimiliki oleh sudut luar 60° , kemudian diikuti oleh sudut luar 30° dan sudut luar 45° . Akan tetapi untuk daerah terluas, artinya daerah yang mempunyai temperatur seimbang pada hampir semua titik pengukuran adalah sudut luar 45° .



Gambar 4.15 Distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 100 mm dengan variasi sudut luar *central fuel tube*



Gambar 4.16 Distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 150 mm dengan variasi sudut luar *central fuel tube*

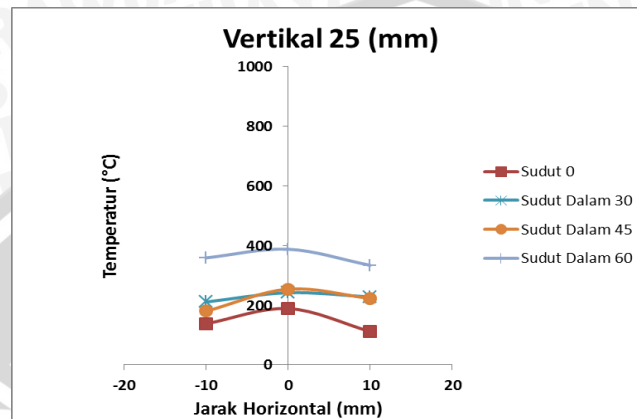
c. Profil temperatur pada jarak vertikal 100 mm

Gambar 4.15 menunjukkan profil temperatur pada jarak vertikal 100 mm, Pada jarak ini temperatur tertinggi terletak pada jarak 0 mm untuk sudut luar 60°. Baik sudut luar maupun sudut dalam, temperatur tertinggi berada di horizontal 0 mm atau daerah tengah api. Pada sudut luar 30° dan sudut luar 45° temperatur cenderung berhimpit, sedangkan temperatur terendah dihasilkan oleh sudut 0° pada jarak horizontal 10 mm. Dari gambar dapat terlihat bahwa kecenderungan urutan temperatur tertinggi adalah pada sudut luar 60°, sudut luar 30°, sudut luar 45°, dan terakhir adalah sudut 0°. Akan tetapi untuk daerah luas, artinya daerah yang mempunyai temperatur seimbang pada hampir semua titik pengukuran adalah sudut luar 45°. Pada sudut luar 30° cenderung mengalami penurunan temperatur pada jarak -10 mm dan 10 mm.

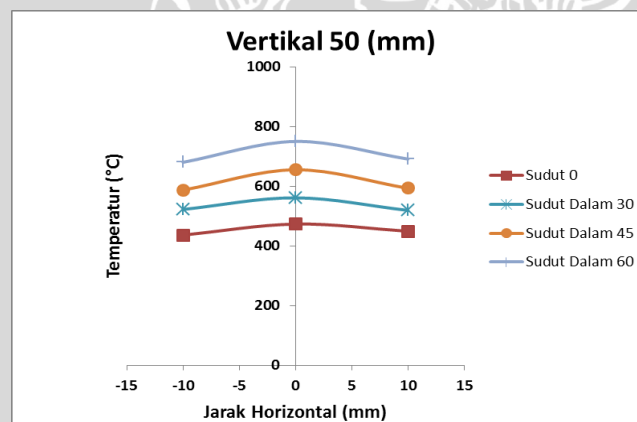
d. Profil temperatur pada jarak vertikal 150 mm.

Pada jarak vertikal 150 mm, temperatur tertinggi untuk semua variasi sudut luar, berada pada jarak horizontal 0°. Temperatur terendah ada pada sudut 0° yang terjadi di semua titik pengukuran horizontal. Dari gambar 4.16 terlihat bahwa untuk temperatur tertinggi dimiliki oleh sudut luar 60°, kemudian diikuti oleh sudut sudut luar 45°, sudut luar 30°, dan terakhir sudut 0°. Akan tetapi untuk daerah luas, artinya daerah yang mempunyai temperatur seimbang pada hampir semua titik pengukuran adalah semua variasi sudut, kecuali sudut luar 30°. Pada sudut luar 30° cenderung mengalami penurunan temperatur pada jarak -10 mm dan 10 mm.

Rata-rata temperatur tertinggi berada pada jarak vertikal 100 mm dan 150 mm, karena pada daerah ketinggian tersebut reaksi pembakaran semakin baik karena reaktan telah mengalami pemanasan awal pada daerah dibawahnya. Temperatur tinggi merupakan indikasi bahwa daerah tersebut adalah daerah terjadinya reaksi.



Gambar 4.17 Distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 25 mm dengan variasi sudut dalam *central fuel tube*



Gambar 4.18 Distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 50 mm dengan variasi sudut dalam *central fuel tube*

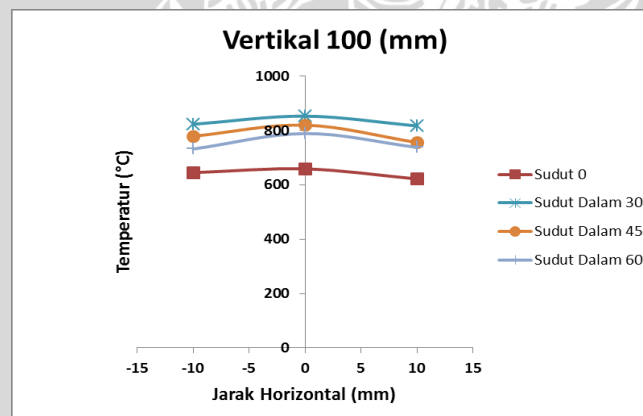
e. Profil temperatur pada jarak vertikal 25 mm

Gambar 4.17 menunjukkan profil temperatur pada jarak vertikal terbawah, yakni 25 mm dari nosel ke arah vertikal. Pada jarak 25 mm terlihat bahwa temperatur tertinggi dihasilkan pada jarak 0 mm untuk sudut dalam 60°. Untuk semua variasi sudut dalam temperatur tertinggi berada di horizontal 0 mm atau daerah tengah api. Pada sudut dalam 30° dan sudut dalam 45° temperatur

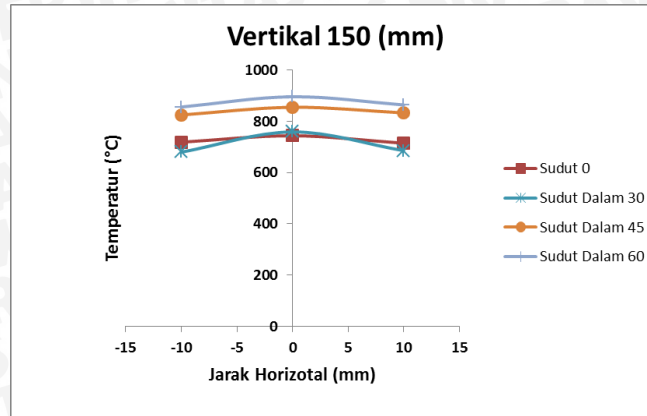
cenderung berhimpit, sedangkan temperatur terendah dihasilkan oleh sudut 0° pada jarak horizontal 10 mm. Dari gambar dapat terlihat bahwa kecenderungan urutan temperatur tertinggi adalah pada sudut dalam 60° , sudut dalam 45° , sudut dalam 30° , dan terakhir adalah sudut 0° . Akan tetapi untuk daerah terluas, artinya daerah yang mempunyai temperatur seimbang pada hampir semua titik pengukuran adalah sudut dalam 30° .

f. Profil temperatur pada jarak vertikal 50 mm.

Pada jarak vertikal 50 mm, temperatur tertinggi untuk semua variasi sudut dalam, berada pada jarak horizontal 0° . Temperatur terendah ada pada sudut 0° yang terjadi di semua titik pengukuran horizontal. Dari gambar 4.18 terlihat bahwa untuk variasi sudut luar dalam temperatur tertinggi dimiliki oleh sudut dalam 60° , kemudian diikuti oleh sudut luar 30° , sudut luar 45° , sudut dalam 60° , sudut dalam 45° , dan terakhir sudut dalam 30° . Untuk persebaran daerah luasan cenderung merata pada sudut dalam 30° , dalam 45° , dalam 60° dan sudut 0° .



Gambar 4.19 Distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 100 mm dengan variasi sudut dalam *central fuel tube*



Gambar 4.20 Distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 150 mm dengan variasi sudut dalam *central fuel tube*

g. Profil temperatur pada jarak vertikal 100 mm

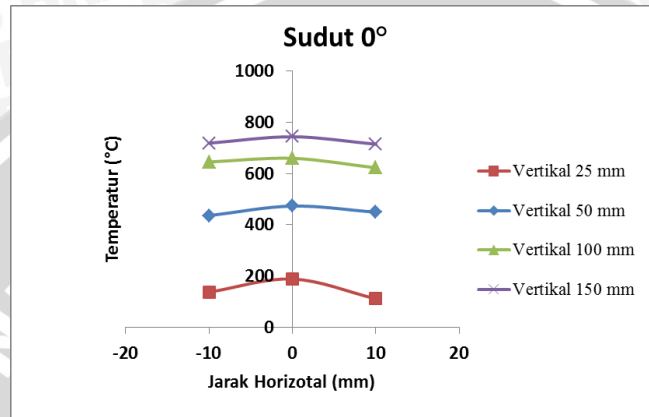
Gambar 4.19 menunjukkan profil temperatur pada jarak vertikal 100 mm, Pada jarak ini temperatur tertinggi terletak pada jarak 0 mm untuk sudut dalam 60°. Baik sudut luar maupun sudut dalam, temperatur tertinggi berada di horizontal 0 mm atau daerah tengah api. Sedangkan temperatur terendah dihasilkan oleh sudut 0° pada jarak horizontal 10 mm. Untuk persebaran daerah luasan cenderung merata pada sudut dalam 30°, dalam 45°, dalam 60° dan sudut 0°. Dari gambar dapat terlihat bahwa kecenderungan urutan temperatur tertinggi adalah pada sudut dalam 60°, sudut dalam 45°, sudut dalam 30°, terakhir adalah sudut 0°.

h. Profil temperatur pada jarak vertikal 150 mm.

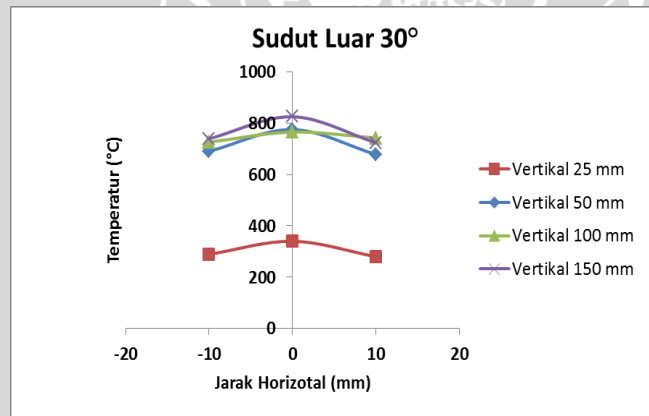
Pada jarak vertikal 150 mm, temperatur tertinggi untuk semua variasi sudut dalam, berada pada jarak horizontal 0°. Temperatur terendah ada pada sudut dalam 30° yang terjadi pada jarak horizontal -10 mm dan 10 mm. Dari gambar 4.20 terlihat bahwa temperatur tertinggi dimiliki oleh sudut dalam 60°, kemudian diikuti oleh sudut dalam 60°, sudut dalam 45°, sudut 0° dan terakhir sudut dalam 30°. Akan tetapi untuk daerah luas, artinya daerah yang mempunyai temperatur seimbang pada hampir semua titik pengukuran adalah semua variasi sudut, kecuali sudut dalam 30°. Pada sudut dalam 30° cenderung mengalami penurunan temperatur pada jarak -10 mm dan 10 mm.

4.2.3.2 Distribusi Temperatur Berdasarkan Sudut *Central Fuel Tube*

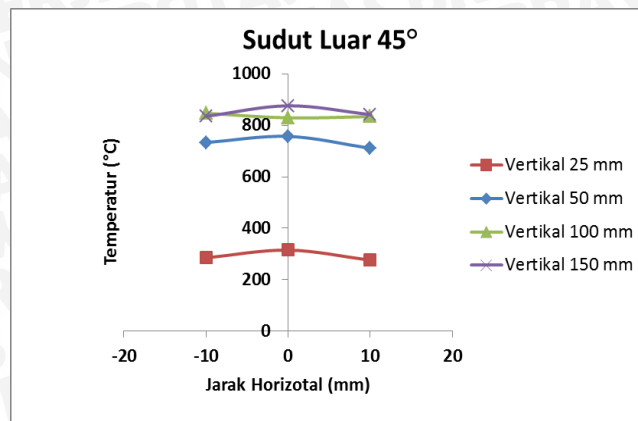
Profil temperatur ini merupakan temperatur rata-rata pada tiap titik pengukuran di semua titik horizontal yang diamati dan membandingkan untuk semua jarak vertikal yang ada pada *central fuel tube* yang sama. Titik tinjau pada pengukuran vertikal adalah 25, 50, 100, dan 150 mm, kemudian horizontal adalah -10, 0, dan 10 mm.



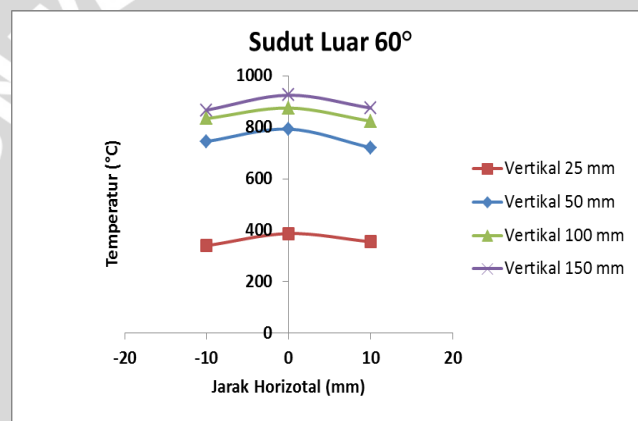
Gambar 4.21 Distribusi temperatur api difusi pada sudut 0° dengan variasi titik tinjau vertikal dan horizontal



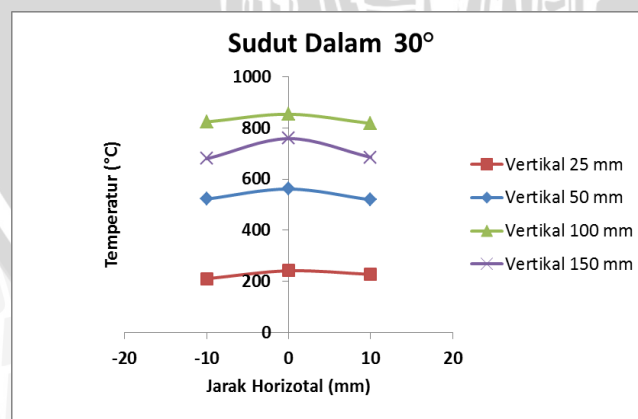
Gambar 4.22 Distribusi temperatur api difusi pada sudut luar 30° dengan variasi Titik tinjau vertikal dan horizontal



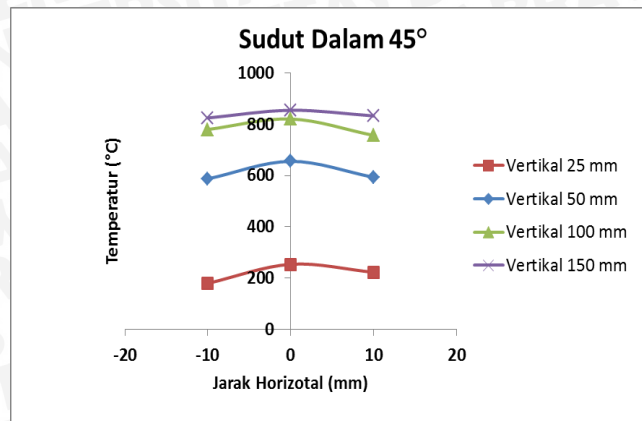
Gambar 4.23 Distribusi temperatur api difusi pada sudut luar 45° dengan variasi titik tinjau vertikal dan horizontal



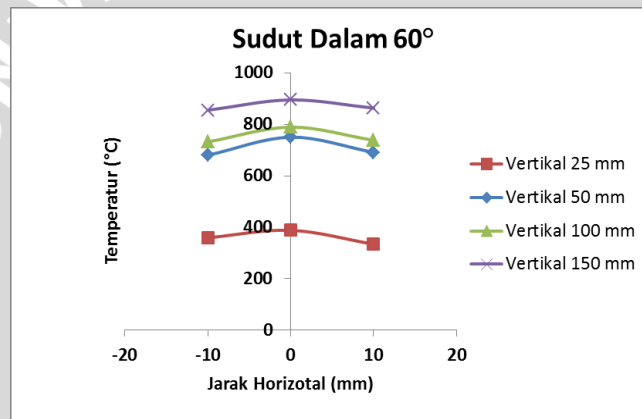
Gambar 4.24 Distribusi temperatur api difusi pada sudut luar 60° dengan variasi titik tinjau vertikal dan horizontal



Gambar 4.25 Distribusi temperatur api difusi pada sudut dalam 30° dengan variasi titik tinjau vertikal dan horizontal



Gambar 4.26 Distribusi temperatur api difusi pada sudut dalam 45° dengan variasi titik tinjau vertikal dan horizontal



Gambar 4.27 Distribusi temperatur api difusi pada sudut dalam 60° dengan variasi titik tinjau vertikal dan horizontal

a. Profil temperatur untuk sudut 0°

Gambar 4.21 menunjukkan profil api untuk sudut 0°. Luasan temperatur pada jarak vertikal 100 mm dan 150 mm cenderung sama. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi jarak vertikal, maka turbulensi antara bahan bakar dan udara semakin tinggi, sehingga temperatur dapat terbagi secara merata baik pada jarak horizontal -10 mm maupun 10 mm. Temperatur tertinggi pada masing-masing jarak vertikal terletak pada 0 mm. Sedangkan temperatur terendah terletak pada jarak vertikal 25 mm dengan titik vertikal 10 mm.

b. Profil temperatur untuk sudut luar 30°

Gambar 4.22 adalah profil api untuk sudut luar 30°. Terlihat jelas terjadi peningkatan temperatur jika dibandingkan dengan sudut 0°. Hal ini diindikasikan dengan naiknya temperatur pada tiap-tiap jarak vertikal. Temperatur tertinggi jarak vertikal 25 mm juga mengalami kenaikan jika dibandingkan dengan sudut 0°. Profil api masih identik dengan sudut 0°, yaitu temperatur terluas terletak pada jarak vertikal 100 mm. Yang menarik disini yakni temperatur tertinggi setelah jarak vertikal 150 mm, bukanlah jarak vertikal 100 mm, melainkan jarak vertikal 50 mm pada titik vertikal 0 mm. Hal ini kemungkinan terjadi karena turbulensi pada titik 0 dengan jarak vertikal 50 mm lebih tinggi daripada 100 mm. Sehingga pencampuran antara bahan bakar dan udara semakin homogen dan menyebabkan temperatur lebih tinggi dari titik yang sama pada jarak vertikal 100 mm. Pada kasus ini temperatur tertinggi (secara keseluruhan) berada pada jarak vertikal 150 mm, kemudian secara berurutan diikuti oleh jarak vertikal 100 mm, 50 mm, dan 25 mm.

c. Profil temperatur untuk sudut luar 45°

Gambar 4.23 adalah profil api untuk sudut luar 45°. Terlihat jelas terjadi peningkatan temperatur jika dibandingkan dengan sudut 30°. Hal ini diindikasikan dengan naiknya temperatur pada tiap-tiap jarak vertikal. Pada kasus ini terlihat pada jarak vertikal 100 mm. Panas sudah melebar ke samping dan tidak lagi mengumpul di tengah, hal ini menunjukkan karena semakin besar sudut luar yang digunakan menyebabkan meningkatnya turbulensi, Sehingga pencampuran antara bahan bakar dan udara semakin homogen. Pada jarak vertikal 100 mm, temperatur tertinggi berada pada jarak horizontal -10 mm. Profil api masih identik dengan sudut 30°, yaitu temperatur terluas terletak pada jarak vertikal 100 mm, sehingga temperatur dapat melebihi jarak 100 mm. Pada kasus ini temperatur tertinggi (secara keseluruhan) berada pada jarak vertikal 150 mm, kemudian secara berurutan diikuti oleh jarak vertikal 100 mm, 50 mm, dan 25 mm.

d. Profil temperatur untuk sudut luar 60°

Gambar 4.24 adalah profil api untuk sudut luar 60°. Pada jarak vertikal 25 mm, 100 mm, dan 150 mm mempunyai profil temperatur yang identik, yaitu panas yang merata pada jarak horizontal -10 mm, 0 mm, dan 10 mm. Berbeda dengan yang terjadi pada jarak vertikal 50 mm, pada titik ini panas yang didistribusikan

pada jarak -10 mm dan 10 mm cenderung mengalami penurunan lebih banyak dibandingkan yang lainnya, pada jarak ini pencampuran antara gas panas dan gas dingin kurang merata. Pada kasus ini temperatur tertinggi (secara keseluruhan) berada pada jarak vertikal 150 mm, kemudian secara berurutan diikuti oleh jarak vertikal 100 mm, 50 mm, dan 25 mm.

e. Profil temperatur untuk sudut dalam 30°

Gambar 4.25 adalah profil api untuk sudut dalam 30°. Pada jarak vertikal 25 mm, 100 mm, dan 150 mm mempunyai profil temperatur yang identik, yaitu panas yang merata pada jarak horizontal -10 mm, 0 mm, dan 10 mm. Berbeda dengan yang terjadi pada jarak vertikal 50 mm, pada titik ini panas yang didistribusikan pada jarak -10 mm dan 10 mm cenderung mengalami penurunan lebih banyak dibandingkan yang lainnya, pada jarak ini pencampuran antara gas panas dan gas dingin kurang merata. Pada kasus ini temperatur tertinggi (secara keseluruhan) berada pada jarak vertikal 150 mm, kemudian secara berurutan diikuti oleh jarak vertikal 100 mm, 50 mm, dan 25 mm.

f. Profil temperatur untuk sudut dalam 45°

Gambar 4.26 adalah profil api untuk sudut dalam 45°. Pada kasus ini terlihat bahwa distribusi panas pada jarak aksial 100 mm dan 50 mm hampir sama dan berhimpit. Hal ini mungkin disebabkan karena adanya tingkat turbulensi yang sama pada jarak ini, sehingga pencampuran bahan bakar dan udara semakin homogen dan menimbulkan panas yang merata baik pada jarak horizontal -10 mm, 0 mm, dan 10 mm. Namun pada jarak vertikal 150 mm daerah luasan lebih baik daripada jarak vertikal 100 mm. Hal ini terlihat dari penurunan temperatur yang cukup banyak pada jarak horizontal 10 mm. Temperatur terendah dimiliki oleh jarak aksial 25 mm pada jarak horizontal – 10 mm. Secara keseluruhan, daerah horizontal 0 mm memiliki temperatur tertinggi pada tiap titik pengukuran vertikal.

g. Profil temperatur untuk sudut dalam 60°

Gambar 4.27 menunjukkan profil api untuk sudut dalam 60°. Luasan temperatur pada jarak vertikal 100 mm dan 150 mm cenderung sama. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi jarak vertikal, maka turbulensi antara bahan bakar dan udara semakin tinggi, sehingga temperatur dapat terbagi secara

merata baik pada jarak horizontal -10 mm maupun 10 mm. Temperatur tertinggi pada masing-masing jarak vertikal terletak pada 0 mm. Sedangkan temperatur terendah terletak pada jarak vertikal 25 mm dengan titik vertikal 10 mm. Pada kasus ini terlihat bahwa distribusi panas pada jarak aksial 100 mm dan 50 mm hampir sama dan berhimpit. Hal ini disebabkan karena adanya tingkat turbulensi yang sama pada jarak ini, sehingga pencampuran bahan bakar dan udara semakin homogen dan menimbulkan panas yang merata baik pada jarak horizontal -10 mm, 0 mm, dan 10 mm.

