

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Data hasil penelitian didapat dari penelitian eksperimental terhadap *meso-scale combustor* dengan oksidator udara murni, oksidator dengan komposisi udara 75 % - oksigen murni 25 % dan oksidator yang terdiri dari 50 % udara – 50 % oksigen. Prosentase oksidator dihitung berdasarkan volume gas. Pengambilan data yang dilakukan antara lain adalah data *flame stability limit*, visualisasi bentuk nyala api, dan temperatur nyala api dan gas hasil pembakaran.

Untuk data *flame stability limit*, data yang diambil merupakan nilai debit oksidator dan debit bahan bakar yang divariasikan selama api di dalam *meso-scale combustor* tetap menyala dengan stabil. Pada pengambilan data, debit bahan bakar (Q_f) dijaga konstan sedangkan nilai debit oksidator (Q_x) divariasikan hingga mencapai nilai minimum dan maksimum dimana api menyala di dalam *combustor*. Untuk setiap pengambilan data, nilai debit bahan bakar (Q_f) dan nilai debit oksigen (Q_o) perlu dilakukan kalibrasi *flowmeter* bahan bakar. Pada pengukuran debit bahan bakar dan oksigen, perlu diadakan kalibrasi karena *flowmeter* yang digunakan untuk mengukur debit bahan bakar (LPG) menggunakan *flowmeter* C_3H_6 sedangkan *flowmeter* untuk mengukur debit oksigen menggunakan *flowmeter* udara. Kalibrasi ini juga dilakukan agar saat pengambilan data dengan oksidator udara 75 % + oksigen 25% dan udara 50 % + oksigen 50 % dapat dipastikan kandungan oksigen pada reaktan sesuai dengan proporsi yang diinginkan.

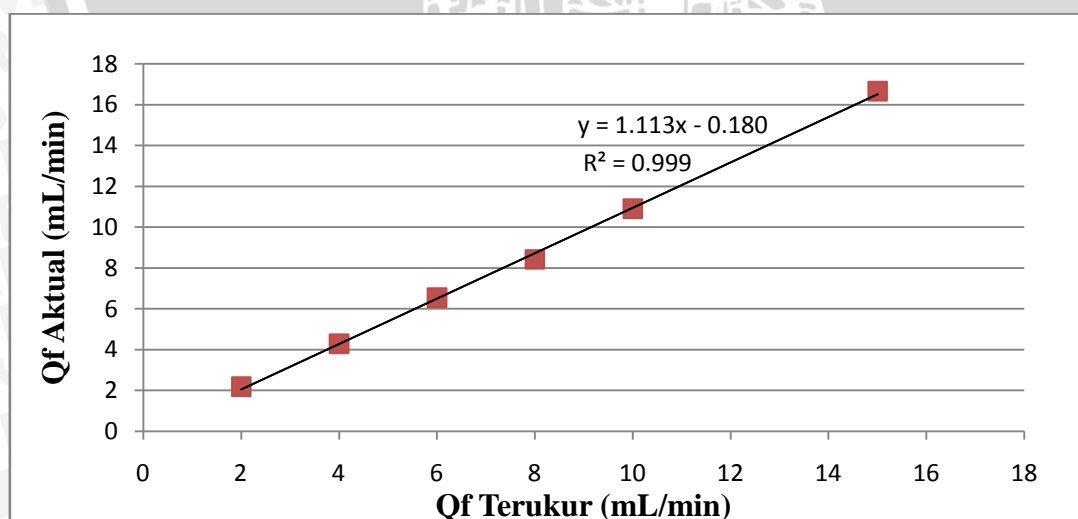
Kalibrasi dilakukan untuk mengetahui hubungan debit aktual yang mengalir dengan debit yang terbaca pada *flowmeter*. Proses kalibrasi *flowmeter* bahan bakar (LPG) dan *flowmeter* Oksigen, dimulai dengan mengisi penuh air bak penampung dan gelas ukur. Gelas ukur yang sudah terisi air diposisikan terbalik, selanjutnya bahan bakar dari tabung LPG dialirkan dengan mengatur debit bahan bakar (LPG) menggunakan *flowmeter* yang terhubung dengan selang. Ujung selang yang dialiri bahan bakar (LPG) tersebut dimasukkan kedalam gelas ukur sampai batas permukaan air dalam gelas ukur. Volume air pada gelas ukur akan terus berkurang, seiring hal tersebut posisi gelas ukur ditarik ke atas, sehingga permukaan air didalam gelas ukur dan diluar gelas ukur dijaga tetap sama. Perbedaan waktu yang terjadi antara waktu teoritis yang terbaca di *flowmeter* dengan waktu sebenarnya untuk pengurangan air dengan volum tertentu pada gelas ukur dicatat.

Selisih dari perbedaan waktu tersebut akan dihitung dan diolah untuk menghasilkan koefisien kalibrasi. Dari nilai koefisien kalibrasi tersebut maka dapat dihitung debit aktual yang mengalir dari *flowmeter*. Prosedur untuk pengkalibrasian *flowmeter* oksigen sama dengan kalibrasi *flowmeter* (LPG) perbedaannya hanya pada fluida yang mengalir adalah oksigen dari tangki oksigen. Data kalibrasi *flowmeter* bahan bakar (LPG) dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut

Tabel 4.1 Data kalibrasi *flowmeter* bahan bakar (LPG)

No	Waktu (detik)	Q _f Terukur (mL/min)	Q _f Aktual (mL/min)
1	60	2	2.18
2	60	4	4.28
3	60	6	6.54
4	60	8	8.42
5	60	10	10.90
6	60	15	16.67

Setelah dihitung nilai Q_f Aktual untuk masing - masing debit bahan bakar selanjutnya nilai - nilai tersebut di plot pada grafik menggunakan aplikasi *microsoft excel 2007* sehingga membentuk Grafik 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Grafik kalibrasi nilai debit bahan bakar (Q_f)

Dari grafik ditarik *Trendline* dan didapat persamaan linear konversi Q_f terukur menjadi Q_f aktual. Persamaannya adalah :

$$y = 1.113x - 0.180 \quad (4-1)$$

Dimana:

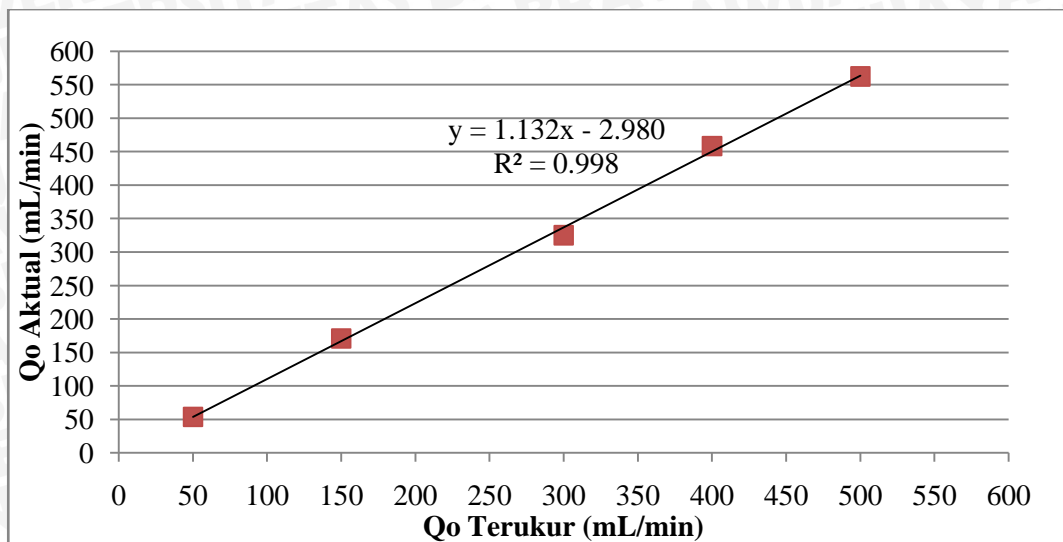
- y = Qf aktual
- x = Qf terbaca
- R^2 = Koefisien determinasi = 0,999

Nilai R^2 merupakan koefisien determinasi yang berfungsi untuk mengukur korelasi antara nilai dari dua variabel dari persamaan regresi dengan cara memberikan proporsi atau persentase yang terletak antara 0 – 1. Suatu persamaan regresi dikatakan semakin akurat apabila nilai R^2 semakin mendekati 1. Setelah didapat persamaan (4-1) seluruh nilai Qf data yang terukur di *flowmeter* bahan bakar harus dikonversi menggunakan persamaan tersebut. Pada pengambilan data dengan oksidator campuran oksigen dan udara, penambahan prosentase oksigen yang ditambahkan pada oksidator berdasarkan pada data udara aktual yang mengalir ke dalam *combustor*. Maka untuk memastikan proporsi udara dan oksigen yang sesuai maka harus dilakukan kalibrasi pada *flowmeter* yang mengukur oksigen. Data kalibrasi *flowmeter* oksigen adalah sebagai berikut :

Tabel 4.2 Data kalibrasi *flowmeter* Oksigen (Q_o)

No	Waktu (detik)	Q_o Terukur (mL/min)	Q_o Aktual (mL/min)
1	60	50	53.89
2	60	150	170.88
3	60	300	325.30
4	60	400	458.59
5	60	500	562.5

Untuk grafik kalibrasinya sebagai berikut :



Gambar 4.2 Grafik kalibrasi nilai debit Oksigen (Q_o)

Maka untuk kalibrasi nilai debit oksigen didapatkan persamaan :

$$y = 1.132x - 2.980 \quad (4-2)$$

Setelah mendapat nilai dari persamaan (4-2) maka untuk memastikan debit aktual oksigen yang masuk reaktan sesuai dengan proporsinya (25 % dan 50 %), setelah mendapat nilai debit actual oksigen yang dibutuhkan pada reaktan nilai tersebut kemudian dibagi persamaan (4-2). Maka didapatkan nilai debit terukur pada flowmeter yang harus diatur agar mendapat debit oksigen aktual yang diinginkan. Data hasil penelitian *flame stability limit* dalam *meso-scale combustor* dapat dilihat pada lampiran 1 – 3.

4.2 Pengolahan Data *Flammability limit*

Pada grafik *flame stability limit* batas kestabilan nyala api dibatasi berdasarkan nilai *rasio ekuivalen* (Φ). Batas tersebut dapat dibagi menjadi dua yaitu batas atas (*upper limit*) dan batas bawah (*lower limit*). Untuk mendapatkan nilai dari *rasio ekuivalen* diperlukan perhitungan rasio udara dan bahan bakar (AFR) stoikiometri terlebih dahulu. AFR stoikiometri sendiri adalah perbandingan campuran udara dan bahan bakar pada kondisi dimana setiap molekul bahan bakar bereaksi seluruhnya dengan molekul oksigen di dalam oksidator. Setelah didapat nilai AFR stoikiometri untuk LPG yang terdiri dari 50 % propana dan 50 % butane dengan menggunakan perbandingan jumlah mol, selanjutnya dapat dilakukan perhitungan *rasio ekuivalen* (Φ). Rumus perhitungan Φ menggunakan rumus (2-3) berikut ini.

$$\Phi = \frac{AFR_{stoic}}{AFR_{aktual}}$$

Keterangan :

- Φ = Rasio ekuivalen.
- AFR_{stoic} = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometri
- AFR_{aktual} = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi aktual

Untuk menghitung nilai AFR aktual dapat dicari dengan menggunakan data aktual perbandingan debit udara dan bahan bakar. Data yang digunakan berdasarkan pada lampiran 1-3 Sebagai contoh berikut adalah perhitungan *rasio ekuivalen* salah satu data dari lampiran 1-3.

4.2.1 Perhitungan Rasio Ekuivalen (Φ)

Diketahui dari data pada lampiran 1 data nomor 1

- AFR_{stoic} = 27,37
- Qf_{actual} = 6,50 ml/min
- Qa_{min} = 143 ml/min
- Qa_{max} = 165 ml/min

- Rasio ekuivalen (Φ)

Perhitungan *rasio ekuivalen* (Φ) menggunakan penurunan rumus *rasio ekuivalen* yaitu persamaan (2-3) berdasarkan lampiran 1 sehingga didapat rumus (4-3) untuk menghitung *lower limit* (Φ_{lower}) dan rumus (4-4) untuk menghitung *upper limit* (Φ_{upper}).

$$a. \Phi_{lower} = \frac{Qf_{act} \times AFR_{stoic}}{Qa_{max \ act}} \quad (4-3)$$

$$\Phi_{lower} = \frac{6.50 \text{ ml/min} \times 27,37}{165 \text{ ml/min}}$$

$$\Phi_{lower} = 1,07$$

$$b. \Phi_{upper} = \frac{Qf_{act} \times AFR_{stoic}}{Qa_{min \ act}} \quad (4-4)$$

$$\Phi_{upper} = \frac{6.49 \text{ ml/min} \times 27,37}{143 \text{ ml/min}}$$

$$\Phi_{upper} = 1,24$$

Untuk data pada lampiran 2 pada data nomor 1 diketahui :

- AFR_{stoic} = 21,97
- Qf_{actual} = 6,50 ml/min

- $Q_a \text{ min} = 130 \text{ ml/min}$
- $Q_a \text{ max} = 175 \text{ ml/min}$
- $Q_o \text{ min} = 43 \text{ ml/min}$
- $Q_o \text{ max} = 58 \text{ ml/min}$
- $Q_x \text{ min} = (130 + 43) \text{ ml/min} = 173 \text{ ml/min}$
- $Q_x \text{ max} = (175+58) \text{ ml/min} = 233 \text{ ml/min}$

- *Rasio ekuivalen (Φ)*

$$a. \Phi_{\text{lower}} = \frac{Q_{f_{act}} \times AFR_{stoic}}{Q_{x \text{ max } act}}$$

$$\Phi_{\text{lower}} = \frac{6.50 \text{ ml/min} \times 21,97}{233 \text{ ml/min}}$$

$$\Phi_{\text{lower}} = 0,61$$

$$b. \Phi_{\text{upper}} = \frac{Q_{f_{act}} \times AFR_{stoic}}{Q_{x \text{ min } act}}$$

$$\Phi_{\text{upper}} = \frac{6.50 \text{ ml/min} \times 21,97}{173 \text{ ml/min}}$$

$$\Phi_{\text{upper}} = 0,82$$

Untuk data pada lampiran 3 pada data nomor 1 diketahui :

- $AFR_{stoic} = 16,55$
- $Q_{f \text{ constant}} = 8,72 \text{ ml/min}$
- $Q_a \text{ min} = 95 \text{ ml/min}$
- $Q_a \text{ max} = 135 \text{ ml/min}$
- $Q_o \text{ min} = 95 \text{ ml/min}$
- $Q_o \text{ max} = 135 \text{ ml/min}$
- $Q_x \text{ min} = (95+95) \text{ ml/min} = 190 \text{ ml/min}$
- $Q_x \text{ max} = (135+135) \text{ ml/min} = 270 \text{ ml/min}$

- *Rasio ekuivalen. (Φ)*

$$a. \Phi_{\text{lower}} = \frac{Q_{f_{act}} \times AFR_{stoic}}{Q_{x \text{ max } act}}$$

$$\Phi_{\text{lower}} = \frac{8,72 \text{ ml/min} \times 16,55}{270 \text{ ml/min}}$$

$$\Phi_{\text{lower}} = 0,53$$

$$b. \Phi_{\text{upper}} = \frac{Q_{f_{act}} \times AFR_{stoic}}{Q_{x \text{ min } act}}$$

$$\Phi_{\text{upper}} = \frac{8,72 \text{ ml/min} \times 16,55}{190 \text{ ml/min}}$$

$$\Phi_{\text{upper}} = 0,76$$

Pengolahan data yang dilakukan selanjutnya adalah menghitung kecepatan aliran total reaktan didalam *meso-scale combustor*. Perhitungan kecepatan reaktan (V_{total}) dilakukan berdasarkan debit total aliran reaktan yang mengalir didalam *combustor*. Berikut adalah perhitungan kecepatan total reaktan berdasarkan pada data debit pada lampiran 1 – 3.

4.2.2 Perhitungan kecepatan reaktan (V_{tot})

Diketahui dari lampiran 1 data nomor 1

- $Q_f = 6,50 \text{ ml/min}$
- $Q_a \text{ min} = 143 \text{ ml/min}$
- $Q_a \text{ max} = 165 \text{ ml/min}$
- \emptyset dalam *combustor* = 3,5 mm ; $r = 1,75 \text{ mm}$

- Kecepatan reaktan minimum ($V_{\text{total min}}$)

$$V_{\text{total min}} = \frac{\left(\frac{Q_a \text{ min} + Q_f}{60} \right)}{\frac{(3,14 \times r^2)}{100}}$$

$$V_{\text{total min}} = \frac{\left(\frac{143 \text{ ml/min} + 6,50 \text{ ml/min}}{60 \text{ s}} \right)}{\frac{(3,14 \times 1,75^2)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$V_{\text{total min}} = 25,91 \text{ cm/s}$$

- Kecepatan reaktan maksimum ($V_{\text{total max}}$)

$$V_{\text{total max}} = \frac{\left(\frac{Q_a \text{ min} + Q_f}{60} \right)}{\frac{(3,14 \times r^2)}{100}}$$

$$V_{\text{total max}} = \frac{\left(\frac{165 \frac{\text{ml}}{\text{min}} + 6,50 \text{ ml/min}}{60 \text{ s}} \right)}{\frac{(3,14 \times 1,75^2)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$V_{\text{total max}} = 29,72 \text{ cm/s}$$

Diketahui dari lampiran 2 data nomor 1

- $Q_f = 6,50 \text{ ml/min}$
- $Q_x \text{ min} = 173 \text{ ml/min}$
- $Q_x \text{ max} = 233 \text{ ml/min}$

- \emptyset dalam *combustor* = 3,5 mm ; r = 1,75 mm

- Kecepatan reaktan minimum ($V_{total \min}$)

$$V_{total \min} = \frac{\left(\frac{Q_x (\min) + Q_f}{60} \right)}{\frac{(3,14 \times r^2)}{100}}$$

$$V_{total \min} = \frac{\left(\frac{173 \text{ ml/min} + 6,50 \text{ ml/min}}{60 \text{ s}} \right)}{\frac{(3,14 \times 1,75^2)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$V_{total \min} = 31,17 \text{ cm/s}$$

- Kecepatan reaktan maksimum ($V_{total \max}$)

$$V_{total \max} = \frac{\left(\frac{Q_x (\min) + Q_f}{60} \right)}{\frac{(3,14 \times r^2)}{100}}$$

$$V_{total \max} = \frac{\left(\frac{218,75 \frac{\text{ml}}{\text{min}} + 6,50 \text{ ml/min}}{60 \text{ s}} \right)}{\frac{(3,14 \times 1,75^2)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$V_{total \max} = 41,57 \text{ cm/s}$$

Diketahui dari data lampiran 3 data nomor 1

- Q_f = 8,72 ml/min
- $Q_x \min$ = 190 ml/min
- $Q_x \max$ = 270 ml/min
- \emptyset dalam *combustor* = 3,5 mm ; r = 1,75 mm

- Kecepatan reaktan minimum ($V_{total \min}$)

$$V_{total \min} = \frac{\left(\frac{Q_x (\min) + Q_f}{60} \right)}{\frac{(3,14 \times r^2)}{100}}$$

$$V_{total \min} = \frac{\left(\frac{190 \text{ ml/min} + 8,72 \text{ ml/min}}{60 \text{ s}} \right)}{\frac{(3,14 \times 1,75^2)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$V_{total \min} = 34,4 \text{ cm/s}$$

- Kecepatan reaktan maksimum ($V_{total \max}$)

$$V_{total \max} = \frac{\left(\frac{Q_x (\min) + Q_f}{60} \right)}{\frac{(3,14 \times r^2)}{100}}$$

$$V_{total \max} = \frac{\left(\frac{270 \frac{\text{ml}}{\text{min}} + 8,72 \text{ ml/min}}{60 \text{ s}} \right)}{\frac{(3,14 \times 1,75^2)}{100} \text{ cm}^2}$$

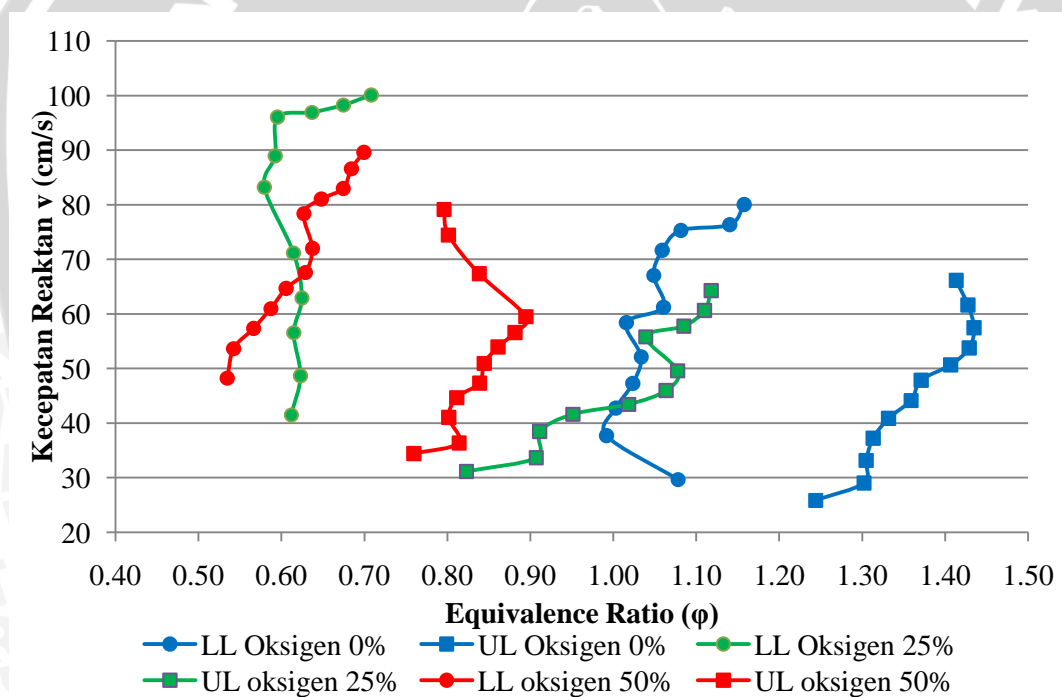
$$V_{\text{total max}} = 48,31 \text{ cm/s}$$

Keseluruhan perhitungan diatas diterapkan ke masing masing data dan hasilnya dapat dilihat pada lampiran 1 sampai lampiran 3. Selanjutnya dilakukan pengeplotan grafik *flame stability limit* berdasarkan nilai *rasio ekuivalen* dan kecepatan reaktan dari data pada lampiran 1 - 3. Sehingga didapat grafik hubungan *rasio ekuivalen* dengan kecepatan reaktan, diagram tersebut yang menjadi dasar analisa *flame stability limit* di dalam *meso-scale combustor*.



4.3 Flame Stability Limit

Pada proses pembakaran, kestabilan api mempunyai peranan yang penting. Api dikatakan stabil jika tetap stasioner pada posisi tertentu. Hal ini dapat terjadi bila kecepatan gas reaktan sama dengan kecepatan rambatan api. Bila kecepatan reaktan tidak sama dengan kecepatan rambatan api maka akan terjadi ketidakstabilan api. Ada 2 peristiwa yang dapat terjadi pada ketidakstabilan api yaitu *blowoff* dan *flashback*. Jika kecepatan api lebih besar dari kecepatan reaktan, maka api akan mendekati mulut nosel dan kemudian akan mati disebut fenomena *flashback*. Sedangkan ketika kecepatan api lebih kecil dari kecepatan reaktan gas, maka api akan bergerak meninggalkan mulut nosel dan api kemudian mati disebut fenomena *blowoff*. Pada pengambilan data *flame stability limit* ini, api dikatakan stabil jika mampu menyala pada *flame holder* yang ada di dalam *meso-scale combustor*.

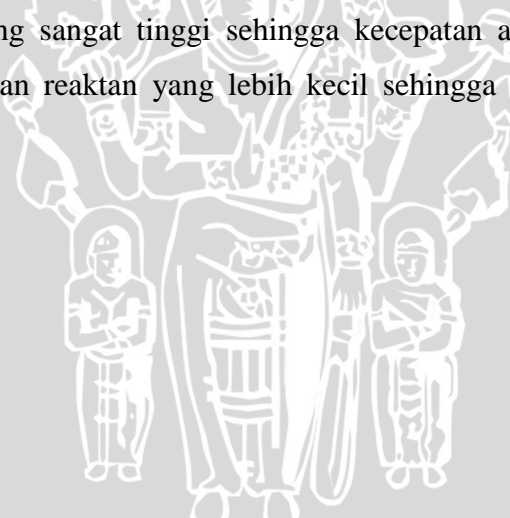


Gambar 4.3 Grafik *flame stability limit* pada *meso-scale combustor* dengan berbagai oksidator

Gambar 4.3 merupakan grafik *flame stability limit* untuk pembakaran bahan bakar LPG pada *meso-scale combustor* menggunakan oksidator dengan penambahan kadar oksigen yang berbeda. Dimana kadar oksidator yang digunakan yaitu udara murni, udara dengan prosentase 75% dan oksigen 25%, serta 50% udara dan 50% oksigen. Pada grafik terlihat kecenderungan bahwa semakin tinggi kadar oksigen pada oksidator maka daerah *flame stability limit* nya bergeser ke arah kiri dimana nilai rasio ekuivalen yang

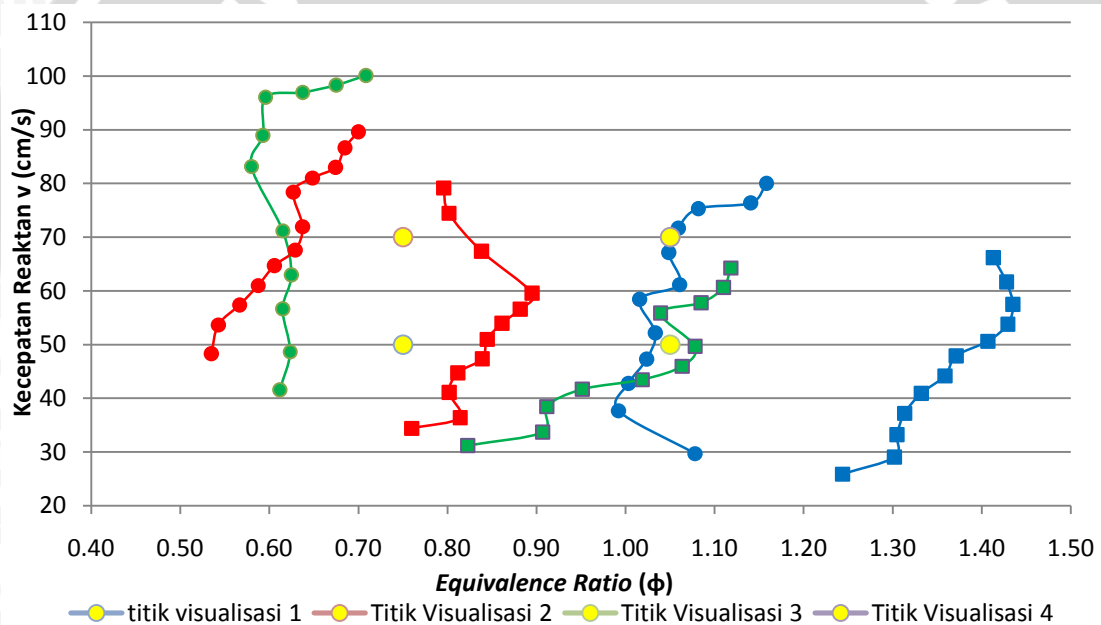
lebih rendah atau ke campuran miskin bahan bakar. Hal ini disebabkan karena dengan meningkatnya jumlah kadar oksigen pada oksidator maka temperatur pembakaran pun semakin tinggi. Kandungan nitrogen pada reaktan pun semakin kecil, sehingga panas yang dihasilkan dari pembakaran tidak terlalu banyak terserap oleh nitrogen. Hal ini membuat temperatur pembakaran semakin tinggi. Dengan meningkatnya temperatur pembakaran maka kecepatan pembakaran pun akan semakin tinggi.

Untuk mendapatkan api yang stabil dimana kecepatan pembakaran atau kecepatan api sama dengan kecepatan reaktan, maka ketika kecepatan pembakaran semakin tinggi maka kecepatan reaktan yang masuk ke zona reaksi pun harus semakin tinggi. Dengan demikian maka energi panas yang dihasilkan pun akan semakin besar. Pada grafik terlihat bahwa pada penambahan oksigen sebesar 50 % persen, luas daerah *flame stability limit* menjadi lebih sempit. Hal ini disebabkan karena pada oksidator dengan penambahan oksigen 50 % karena pada keadaan campuran reaktan mendekati keadaan stokiometri (*equivalence ratio* mendekati 1) terjadi peristiwa dimana api masuk dan melewati *flame holder* dan menyala dengan stabil di belakang *flame holder*. Hal ini disebabkan karena temperatur pembakaran yang sangat tinggi sehingga kecepatan api pun sangat tinggi. Namun akibat dari kecepatan reaktan yang lebih kecil sehingga api menyala stabil di belakang *flame holder*.



4.4 Visualisasi Nyala Api

Berdasarkan grafik *flame stability limit* pada gambar 4.3, maka dapat ditentukan titik - titik yang menjadi acuan untuk mengamati visualisasi dan temperatur nyala api. Untuk melihat pengaruh *kecepatan reaktan*, maka diambil beberapa titik dimana *equivalence ratio* sama dengan kecepatan reaktan berbeda. Sedangkan untuk membandingkan pengaruh *equivalence ratio*, maka diambil beberapa titik pada kecepatan reaktan sama dengan *equivalence ratio* yang berbeda. Titik - titik pengambilan data visualisasi dan temperatur nyala api dapat dilihat pada gambar 4.4 . Tabel dan gambar dibawah ini menunjukkan besar rasio ekuivalen, kecepatan reaktan, debit bahan bakar dan debit udara pada titik - titik tempat pengambilan data visualisasi nyala api dan temperatur nyala api dan gas hasil pembakaran.



Gambar 4.4 Titik - titik pengambilan data visualisasi dan temperatur nyala api

Tabel 4.3 Pengambilan data visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api dengan oksidator udara

No.	ϕ	V reaktan mL/min	Qf mL/min	Qa mL/min
1	1.05	50	10.5	278
2	1.05	70	15	388

Tabel 4.4 Pengambilan data visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api pada oksidator udara 75 % dan oksigen 25 %

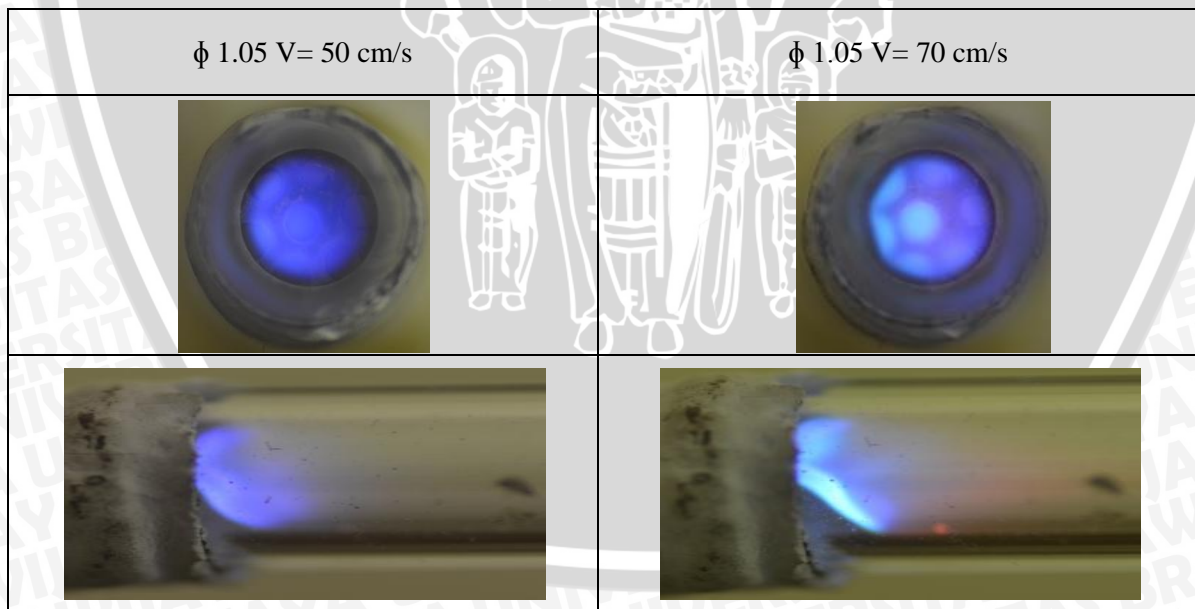
No.	ϕ	V reaktan mL/min	Qf mL/min	Qa mL/min	Qo mL/min
1	0.75	50	9.8	208	70
2	0.75	70	13.8	292	97.5
3	1.05	50	13.8	205	69
4	1.05	70	19.3	288	96

Tabel 4.5 Pengambilan data visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api pada oksidator udara 50 % dan oksigen 50 %

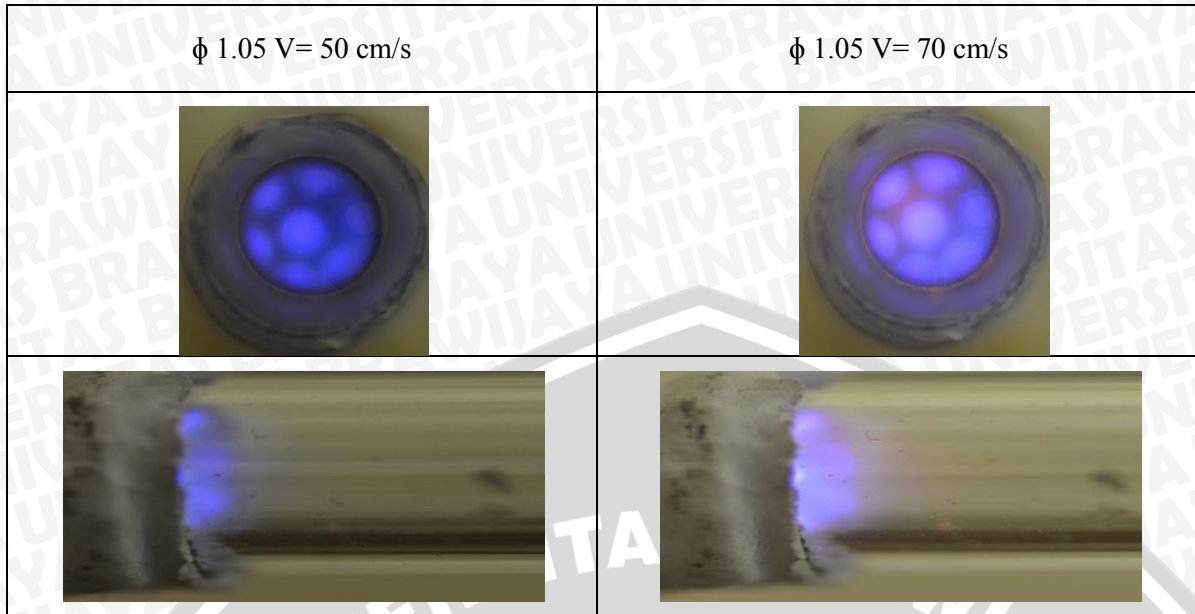
No.	ϕ	V reaktan mL/min	Qf mL/min	Qa mL/min	Qo mL/min
1	0.75	50	13	138	138
2	0.75	70	188	193	193

4.5 Data Visualisasi Nyala Api

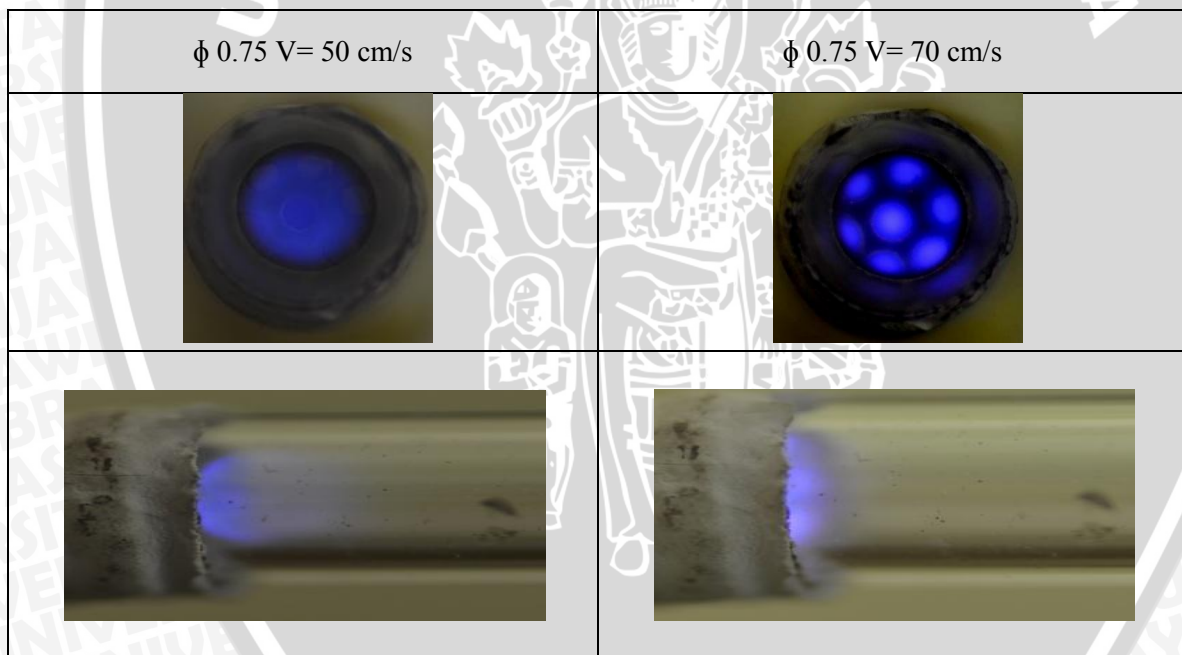
Dari tabel 4.3 – 4.5, maka didapat titik-titik acuan yang digunakan dalam pengambilan visualisasi nyala api pada combustor dengan berbagai oksidator. Visualisasi nyala api didapat dengan menggunakan kamera D5100 dengan lensa *macro* dan hasilnya dapat diamati pada Gambar 4.4 – Gambar 4.7



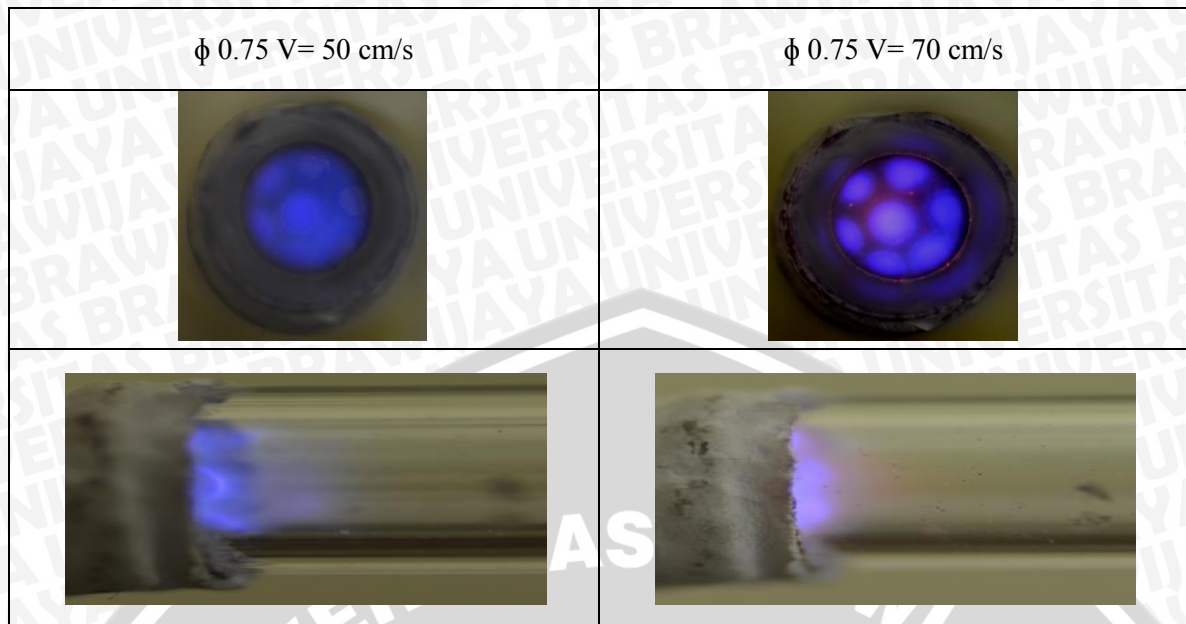
Gambar 4.5 Visualisasi nyala api pada meso-scale combustor dengan oksidator udara pada equivalence ratio 1.05 dan variasi kecepatan reaktan



Gambar 4.6 Visualisasi bentuk nyala api pada *meso-scale combustor* dengan oksidator udara 75% dan Oksigen 25% pada *equivalence ratio* 1.05 dan variasi kecepatan reaktan



Gambar 4.7 Visualisasi bentuk nyala api pada *meso-scale combustor* dengan oksidator udara 75% dan Oksigen 25% pada *equivalence ratio* 0.75 dan variasi kecepatan reaktan



Gambar 4.8 Visualisasi bentuk nyala api pada *meso-scale combustor* dengan oksidator udara 50 % dan Oksigen 50 % pada *equivalence ratio* 0.75 dan variasi kecepatan reaktan

Gambar 4.5 menunjukkan visualisasi bentuk nyala api dari depan dan samping *combustor* dengan oksidator udara pada kondisi *equivalence ratio* 1.05 dengan kecepatan reaktan 50 cm/s dan 70 cm/s sedangkan pada Gambar 4.6 menunjukkan visualisasi bentuk nyala api dengan oksidator 75% udara dan 25 % oksigen pada kondisi yang sama. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa warna nyala api pada kedua gambar adalah biru hal ini dikarenakan pada kondisi mendekati stoikiometri reaksi pembakaran akan menghasilkan emisi CO_2 . Emisi CO_2 disini tereksitasi sebagai radikal yang menghasilkan spektrum dengan panjang gelombang antara 300 nm sampai 600 nm. Spektrum dengan panjang gelombang pada nilai tersebut kemudian ditangkap oleh mata sebagai warna biru. Oleh karena itu api hasil pembakaran pada kondisi stoikiometri tampak berwarna biru terang. Pada gambar visualisasi api 4.5 tampak samping terlihat bahwa pada oksidator udara posisi api cenderung *lifted* dan tidak sepenuhnya menempel pada *flame holder* dibandingkan dengan gambar 4.6. Hal ini dikarenakan temperatur pembakaran yang lebih kecil sehingga kecepatan pembakarannya yang pun lebih kecil dari kecepatan reaktan, sehingga api cenderung terangkat dari *flame holder*.

Dari Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 dapat dilihat juga bahwa semakin tinggi kecepatan reaktan maka nyala api akan semakin terang hal ini disebabkan karena semakin tinggi kecepatan reaktan maka banyaknya bahan bakar yang terbakar semakin tinggi sehingga energi panas dan cahaya yang dihasilkan semakin tinggi. Warna nyala api pada

pembakaran dengan oksidator udara memiliki warna api biru yang lebih redup, dan diameter api yang lebih kecil bila dibandingkan dengan oksidator 75% udara dan 25 % oksigen. Pada visualisasi nyala api oksidator 75% udara dan 25 % oksigen diameter api terlihat lebih besar disebabkan jarak antara api dengan dinding combustor lebih kecil. Jarak ini terjadi karena adanya perbedaan temperatur dari titik pusat api ke dinding yang akhirnya menyebabkan daerah sekitar api yang dekat dengan dinding memiliki suhu yang lebih rendah karena transfer panas ke dinding combustor yang lebih dingin. Untuk membuat api dapat menyala secara stabil maka temperatur pada zona reaksi pembakaran harus cukup tinggi dibandingkan *heat transfer* ke dinding combustor. Hal ini agar temperatur api yang berada dekat dinding tetap lebih tinggi dibandingkan dengan transfer panas ke dinding sehingga api dapat merambat. Pada reaktan dengan oksidator 75 % udara dan 25 % oksigen, terdapat unsur nitrogen yang lebih kecil pada reaktan. Akibatnya temperatur pada zona reaksi pada oksidator 25 % oksigen lebih tinggi. Dengan lebih tingginya suhu pada zona reaksi maka temperatur pada api yang dekat dengan dinding *combustor* pun lebih tinggi. Dimana dengan semakin tingginya temperatur api dekat dinding maka api dapat merambat lebih dekat ke dinding combustor. Sehingga dengan semakin dekatnya api ke dinding membuat jarak ini pun semakin kecil. Hal ini lah yang membuat diameter api pada oksidator 75 % oksigen + 25 % oksigen terlihat lebih besar .

Pada gambar 4.7 dapat dilihat visualisasi nyala api dengan 75% udara dan 25 % oksigen dengan *equivalence ratio* 0.75. Dengan membandingkan gambar 4.6 dan gambar 4.7 dapat dilihat bahwa pada *equivalence ratio* 1.05 memiliki warna nyala api biru yang lebih terang dibandingkan dengan *equivalence ratio* 0.75. Hal ini disebabkan pada kondisi *equivalence ratio* 1.05, bahan bakar yang terdapat dalam reaktan yang terbakar lebih banyak sehingga energi yang dihasilkan lebih besar. Dengan membandingkan gambar 4.6 dan gambar 4.7 juga dapat dilihat bahwa reaktan dengan nilai *equivalence ratio* mendekati 1 memiliki diameter api yang lebih besar. Hal ini dikarenakan temperatur pembakaran pada *equivalence ratio* 1.05 memiliki temperatur yang lebih tinggi. Pada gambar 4.7 tampak samping dengan kecepatan reaktan 50 cm/terlihat bahwa api tidak sepenuhnya menempel pada *flame holder*, hal ini disebabkan karena temperatur pembakaran yang lebih kecil dengan kecepatan reaktan yang membuat posisi api cenderung *lifted*.

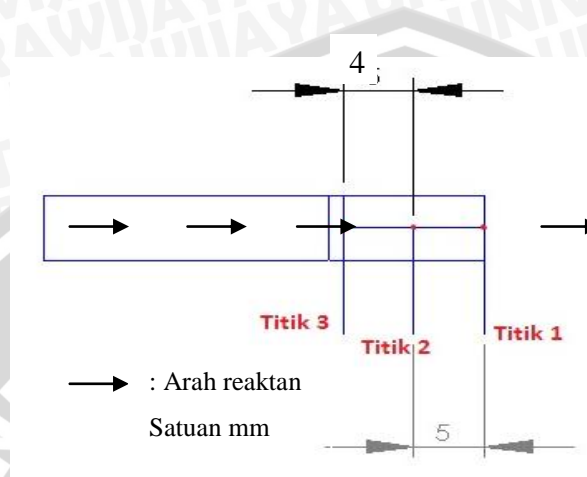
Pada gambar 4.8 menampilkan visualisasi nyala api dari oksidator oksigen 50% dengan *equivalence ratio* 0.75 pada kecepatan reaktan 50 cm/s dan 70 cm/s. Dapat dilihat dari gambar 4.8 bahwa semakin tinggi nilai kecepatan reaktan maka nyala api biru

berwarna lebih terang. Hal ini disebabkan karena pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi maka kecepatan pembakaran yang terjadi pun lebih tinggi akibatnya reaktan yang terbakar pun semakin cepat dan energy yang dihasilkan lebih tinggi. Dari gambar 4.7 dan gambar 4.8 dapat dilihat bahwa semakin tinggi nya kecepatan reaktan membuat diameter api semakin besar. Ini dikarenakan karena kecepatan reaktan yang tinggi dapat dicapai karena kecepatan pembakaran yang tinggi. Seiring dengan kenaikan kecepatan pembakaran maka temperatur pembakaran pun semakin tinggi. Karena temperatur pembakaran yang lebih tinggi ini lah jarak api ke dinding menjadi lebih kecil dan menyebabkan reaktan dengan kecepatan reaktan yang lebih tinggi memiliki diameter api yang lebih besar. Dengan membandingkan gambar 4.7 dan 4.8 juga dapat dilihat bahwa oksidator dengan kadar oksigen 50 % udara dan 50 % oksigen memiliki nyala api biru yang lebih terang karena temperatur pembakaran yang dimiliki lebih tinggi akibat berkurangnya unsur N_2 pada reaktan.

4.6 Temperatur Nyala Api dan Gas Sisa Hasil Pembakaran

Pengambilan data temperatur nyala api dan gas hasil pembakaran dilakukan pada titik yang sama dengan pengambilan data visualisasi bentuk nyala api berdasarkan data

dari Tabel 4.3 – Tabel 4.5. Dalam pengambilan data temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* diambil 3 titik pengambilan dari *outlet combustor*. Titik 1 berada pada *outlet combustor*, titik 2 berada 5 mm dari titik 1 dan selanjutnya titik 3 berada 9 mm dari *outlet combustor* pada arah *upstream*. Berikut ini merupakan gambar titik pengukuran dan data temperatur nyala api dan gas sisa hasil pembakaran .



Gambar 4.9 Titik Pengukuran temperatur nyala api dengan termokopel

Tabel 4.6 Data temperatur nyala api dan gas sisa hasil pembakaran dengan oksidator udara

No.	ϕ	V reaktan (mL/min)	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)		
			Titik 1	Titik 2	Titik 3
1	1.05	50	242.1	556.1	696.6
2	1.05	70	364.8	621.6	771

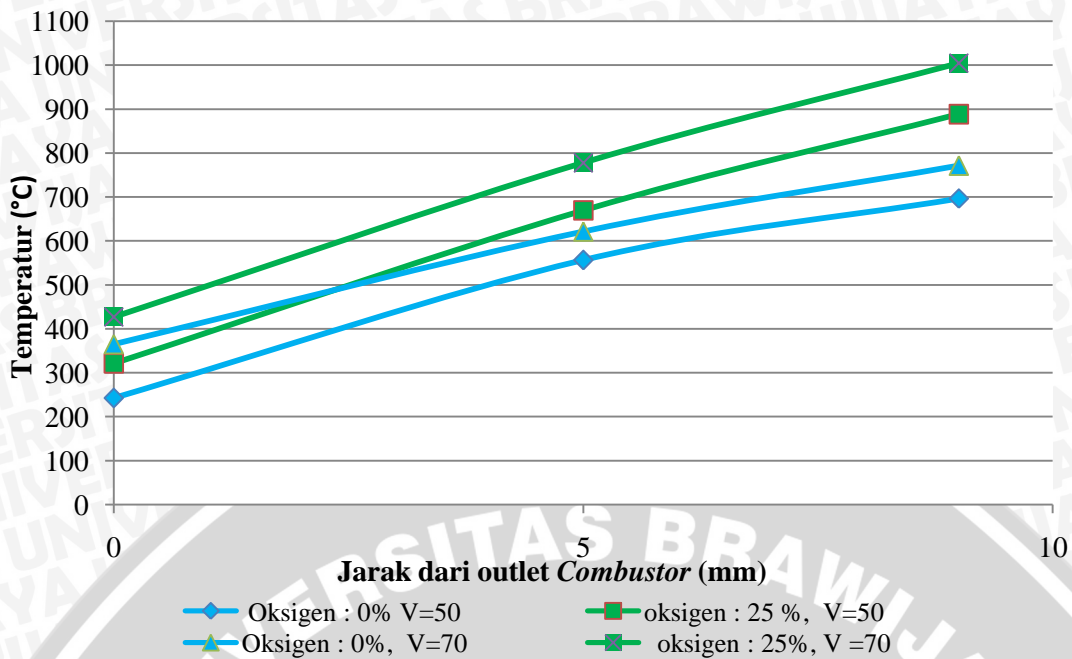
Tabel 4.7 Data temperatur nyala api dan gas sisa hasil pembakaran dengan oksidator 75 udara dan 25 % oksigen

No.	ϕ	V reaktan (mL/min)	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)		
			Titik 1	Titik 2	Titik 3
1	0.75	50	317.3	548.7	716.6
2	0.75	70	333.2	647.8	849.7
3	1.05	50	321	669.4	888.4
4	1.05	70	427	777.7	1004.4

Tabel 4.8 Data temperatur nyala api dan gas sisa hasil pembakaran dengan oksidator 50 % udara dan 50 % oksigen

No.	ϕ	V reaktan (mL/min)	Temperatur (°C)		
			Titik 1	Titik 2	Titik 3
1	0.75	50	404.9	648.9	769.4
2	0.75	70	421.8	724.6	887.9





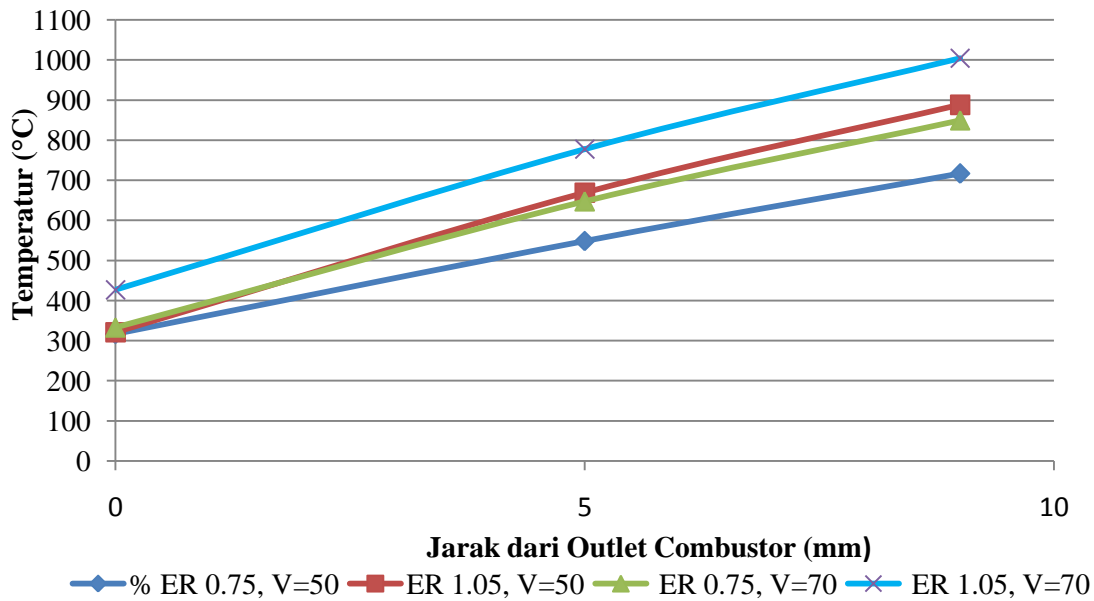
Gambar 4.10 Temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* dengan oksidator udara dan udara 50 % dan Oksigen 50 % pada *equivalence ratio* 1.05 dan variasi kecepatan reaktan 50 cm/s & 70 cm/s

Gambar 4.10 menunjukkan pengaruh kecepatan reaktan pada *equivalence ratio* 1.05 dengan oksidator udara dan udara 75 % dan udara 25 %. Dari gambar terlihat bahwa titik 3 memiliki temperature yang paling tinggi ini dikarenakan letak pengambilan temperatur yang lebih dekat dengan api. Sedangkan pada titik 1 merupakan temperatur dari gas sisa hasil pembakaran. Pada gambar ini dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan reaktan maka temperature nyala api yang dihasilkan pun menjadi lebih tinggi, hal ini dikarenakan seiring dengan bertambahnya kecepatan reaktan maka reaktan yang masuk dan dibakar di zona reaksi pun semakin banyak sehingga energi panas yang dihasilkan pun lebih besar.

Pada temperatur nyala api dengan oksidator 25 % oksigen memiliki temperatur api tertinggi pada titik 3 dengan kecepatan reaktan 70 cm/s yang bisa mencapai suhu 1004.4°C. Sedangkan pada pembakaran menggunakan oksidator udara dengan kondisi sama memiliki temperature api yang lebih rendah yaitu 771°C. Hal ini disebabkan lebih kecilnya prosentase unsure gas nitrogen pada proses pembakaran yang dapat menjadi inhibitor. Akibatnya dengan adanya N₂ pada hasil pembakaran maka panas hasil pembakaran tersebut akan terserap. Sehingga temperatur nyala api yang dihasilkan akan lebih rendah seiring dengan meningkatnya molekul N₂. Menurut perhitungan stokiometri, pada oksidator 25 % oksigen, kandungan gas N₂ yang berada

pada reaktan mengalami penurunan karena turunnya debit udara yang mengalir pada reaktan sehingga temperature nyala api yang dicapai pun lebih tinggi bila dibandingkan dengan oksidator udara.

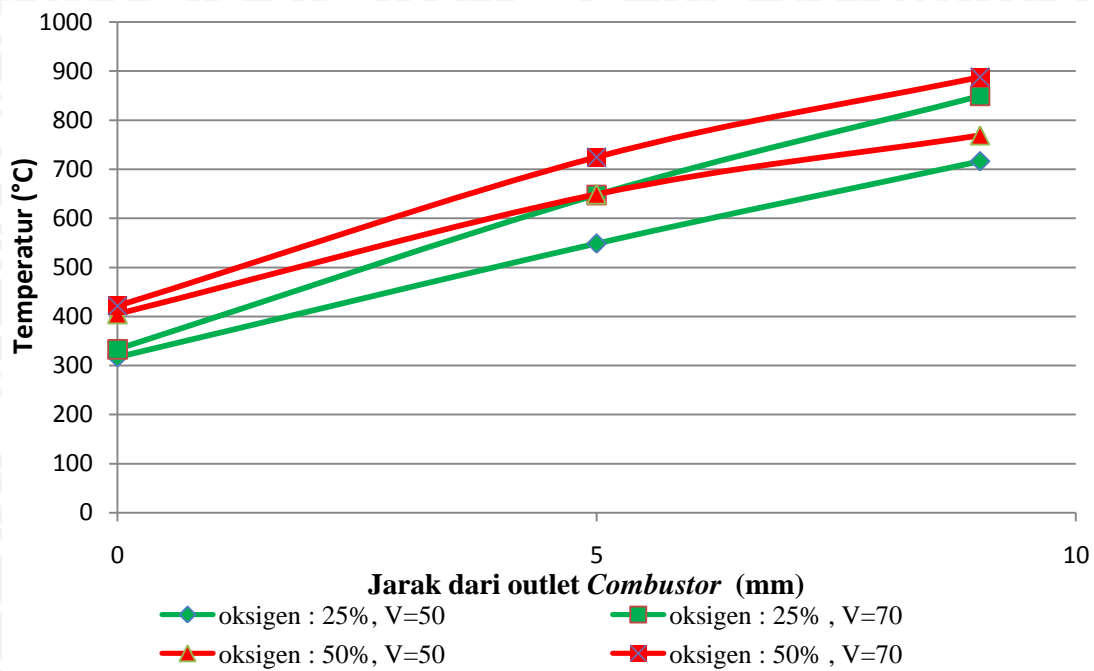




Gambar 4.11 Temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* dengan oksidator udara 75% dan Oksigen 25 % pada *equivalence ratio* 1.05 dan 0.75 dan variasi kecepatan reaktan 50 cm/s & 70 cm/s

Gambar 4.11 menunjukkan pengaruh *equivalence ratio* terhadap temperatur nyala api pada kecepatan reaktan 50 cm/s dan 70 cm/s pada *combustor* dengan oksidator udara 75 % dan Oksigen 25 %. Dari gambar terlihat bahwa temperatur nyala api tertinggi didapat titik 3 dengan kondisi *equivalence ratio* 1.05 dengan kecepatan reaktan 70 cm/s yaitu sebesar 1004.4 °C. Sedangkan temperatur terendah didapat dari kondisi *equivalence ratio* 0.75 dan kecepatan reaktan 50 cm/s.

Dapat dilihat dari gambar 4.11 bahwa reaktan dengan nilai *equivalence ratio* 1.05 dan kecepatan 50 & 70 cm/s cenderung memiliki temperatur nyala api yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan reaktan dengan *equivalence ratio* 0.75. Hal ini disebabkan bila nilai dari *equivalence ratio* semakin mendekati nilai 1 dimana kandungan bahan bakar dan oksigen yang tersedia pada proporsi yang sesuai untuk saling bereaksi maka temperature nyala api yang dihasilkan akan semakin tinggi. Pada *equivalence ratio* 0.75 dikategorikan menjadi campuran reaktan miskin bahan bakar ($\phi < 1$) akibatnya prosentase oksidator yang terdapat pada reaktan lebih banyak dibandingkan prosentase bahan bahan bakar. Dengan lebih banyak oksidator yang ada maka jumlah nitrogen yang terkandung pada reaktan pun lebih banyak. Akibatnya pada debit bahan bakar yang sama temperature pembakaran dengan *equivalence ratio* 0.75 memiliki temperatur api yang lebih rendah.



Gambar 4.12 Temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* dengan oksidator udara 50 % dan oksigen 50 % dan udara 75 % Oksigen 25 % pada *equivalence ratio* 1.05 dan variasi kecepatan reaktan 50 cm/s & 70 cm/s

Gambar 4.12 menunjukkan temperatur nyala api pada *combustor* dengan oksidator 50% oksigen dan 25 % oksigen pada *equivalence ratio* 0.75 dengan kecepatan reaktan 50 cm/s dan 70 cm/s. Dari grafik terlihat bahwa semakin tingginya kecepatan reaktan temperature nyala api yang dimiliki pun semakin tinggi. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya kecepatan reaktan karena kecepatan pembakaran yang dimiliki tinggi sehingga bahan bakar yang terbakar pun lebih banyak. Sehingga energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran pun semakin besar.

Pada gambar 4.12 terlihat bahwa temperature nyala api tertinggi didapatkan dari pembakaran dengan oksidator 50 % udara - 50 % oksigen pada titik 3 dengan kecepatan reaktan 70 cm/s yang mencapai suhu 887.9°C. Sedangkan pada pembakaran dengan oksidator 75 % udara – 25 % oksigen pada kondisi sama memiliki temperature nyala api yang lebih rendah yaitu 769.4°C. Hal ini terjadi karena pada oksidator 75 % udara – 25 % oksigen, unsur N₂ yang ada pada reaktan lebih tinggi sehingga panas hasil pembakaran terserap oleh nitrogen yang mengakibatkan temperatur pembakaran yang lebih rendah. Pada gambar ini juga dapat dilihat bahwa semakin tingginya kecepatan reaktan maka temperature nyala api yang dihasilkan pun lebih tinggi.

