

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Data hasil penelitian didapat dari penelitian eksperimental terhadap *meso-scale combustor* dengan *preheated multiple fuel inlet*. Dimana data yang telah diambil akan digunakan sebagai acuan analisa karakteristik pembakaran bahan bakar cair (heksana) di dalam *meso-scale combustor*. Pengambilan data yang dilakukan antara lain adalah data *flammability limit*, gambar visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api.

Untuk data *flammability limit*, data yang diambil merupakan nilai debit udara dan debit bahan bakar yang divariasikan kombinasinya hingga nyala api di dalam *meso-scale combustor* mencapai batas kestabilannya. Pengambilan data dilakukan dua kali dengan perbedaan variasi debit. Pada pengambilan data, debit udara (Q_a) ditentukan nilainya dan dijaga konstan sedangkan nilai debit bahan bakar (Q_f) divariasikan hingga api mencapai batas kestabilannya. Selanjutnya data hasil penelitian *flammability limit* terhadap *meso-scale combustor* dengan *preheated multiple fuel inlet* dibentuk menjadi Tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Pengambilan data *flammability limit* untuk Q_a konstan

Q_a constant (ml/min)	Q_f min (ml/hr)	Q_f max (ml/hr)
100	1,41	1,57
110	1,46	1,75
120	1,45	2,2
130	1,55	2,2
140	1,6	2,4
150	1,85	2,5
155	1,92	2,5
160	1,9	2,55
165	1,95	2,55
170	1,95	2,56
180	2,5	2,6

Untuk setiap nilai debit bahan bakar (Q_f) pada tabel diatas perlu dilakukan konversi dikarenakan pengaruh kalibrasi *syringe pump*. Data kalibrasi *syringe pump* dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.

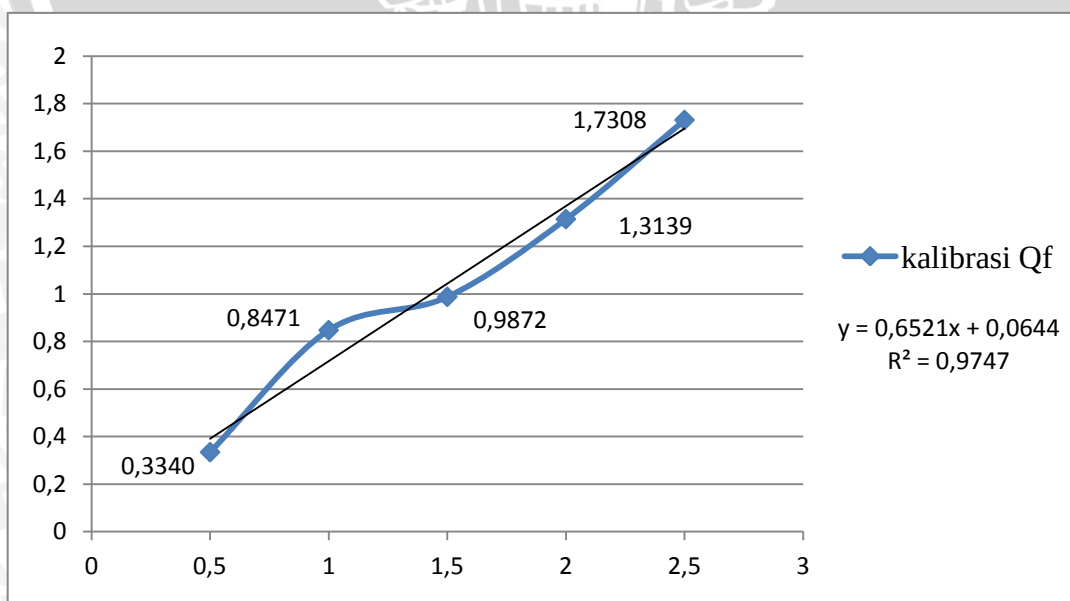
Tabel 4.2 Data kalibrasi *syringe pump*

Q_f Terbaca (ml/hr)	Waktu aktual (detik)	Q_f Aktual (ml/hr)
0,5	5390	0,3339
1	4250	0,8471
1,5	5470	0,9872
2	5480	1,3138
2,5	5200	1,7307

Dari data kalibrasi diatas dihitung nilai Q_f Aktual untuk masing - masing debit bahan bakar dengan menggunakan rumus berikut.

$$Q_f \text{ Terbaca} = \frac{Q_f \text{ Aktual}}{\text{Waktu aktual}} \times 3600 \quad (4-1)$$

Setelah didapat 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 terbaca menjadi Q_f aktual. Persamaannya adalah

$$y = 0,6521 x + 0,0644 \quad (4-2)$$

Dimana:

- $y = Q_f$ aktual
- $x = Q_f$ terbaca
- $R^2 = \text{Koefisien determinasi} = 0,9747$

R^2 merupakan koefisien determinasi yang berfungsi untuk mengukur keakuratan suatu persamaan regresi dengan cara memberikan proporsi atau persentase yang terletak antara 0 – 1. Keakuratan suatu persamaan regresi dikatakan semakin akurat apabila nilai R^2 semakin mendekati 1. Setelah didapat persamaan (4-2) seluruh nilai Q_f pada Tabel 4.1 dikonversi menggunakan persamaan tersebut. Kemudian hasil konversinya dituliskan pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Data *flammability limit* untuk Q_a konstan (Setelah konversi Q_f)

Q_a constant (ml/min)	Q_f min (ml/hr)	Q_f max (ml/hr)
100	0,9839	1,0882
110	1,0165	1,2056
120	1,0099	1,4990
130	1,0751	1,4990
140	1,1078	1,6294
150	1,2707	1,6946
155	1,3164	1,6946
160	1,3033	1,7272
165	1,3359	1,7272
170	1,3359	1,7338
180	1,6946	1,7599

4.2 Pengolahan Data *Flammability limit*

Dalam grafik *flammability limit* batas - batas kestabilan nyala api ditentukan dari batas rasio ekuivalen (Φ). Batas tersebut dibagi menjadi dua yaitu batas atas (*upper limit*) dan batas bawah (*lower limit*). *upper limit* adalah kondisi dimana api masih dapat menyala dengan stabil didalam *meso-scale combustor* pada debit udara tertentu dan debit bahan bakar maksimal. Sebaliknya *lower limit* adalah kondisi dimana api masih dapat menyala dengan stabil didalam *meso-scale combustor* pada debit udara tertentu dan debit bahan bakar minimal.

Untuk melakukan perhitungan rasio ekuivalen sebelumnya harus dilakukan perhitungan rasio udara dan bahan bakar (AFR) stoikiometri terlebih dahulu. AFR stoikiometri sendiri adalah rasio campuran udara dan bahan bakar pada kondisi dimana setiap molekul bahan bakar bereaksi seluruhnya dengan molekul *oxydizer* (udara). Berikut adalah perhitungan AFR stoikiometri untuk bahan bakar heksana.



- Massa atom relatif (Ar)

$$C = 12 ; H = 1 ; O = 16 ; N = 14$$

- Sesuai rumus (2-2) perhitungan stoikiometri heksana (C_6H_{14}) berdasarkan perbandingan massa adalah sebagai berikut

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

$$(AFR)_{stoic} = \frac{9,5 \times ((2 \times 16) + (3,76 \times 14 \times 2))}{(12 \times 6) + (14 \times 1)}$$

$$(AFR)_{stoic} = \frac{1304,16}{86}$$

$$(AFR)_{stoic} = 15,1646 \frac{gr\ udara}{gr\ bahan\ bakar}$$

Keterangan :

- $(AFR)_{stoic}$ = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik
- M_{udara} = Massa udara ($Mr\ udara \times jumlah\ mol$)
- $M_{bahan\ bakar}$ = Massa bahan bakar ($Mr\ bahan\ bakar \times jumlah\ mol$)

Setelah didapat nilai AFR stoikiometri untuk bahan bakar heksana maka selanjutnya dapat dilakukan perhitungan rasio ekuivalen (Φ). Rumus perhitungan Φ menggunakan rumus (2-4) berikut ini.

$$\Phi = \frac{(AFR)_{stoic}}{(AFR)_{aktual}}$$

Keterangan :

- Φ = Rasio ekuivalen
- AFR_{stoic} = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik
- 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 Tabel 4.3. Akan tetapi karena fase dari bahan bakar dan udara yang digunakan berbeda maka sebelumnya data - data debit tersebut harus dirubah dulu menjadi massa alir ($\dot{m}$) dengan cara dikalikan masing - masing densitasnya. Sebagai contoh berikut perhitungan rasio ekuivalen salah satu data dari masing - masing tabel diatas.

1. Perhitungan rasio ekuivalen data Tabel 4.3 kolom nomor 1 diketahui :

- AFR_{stoic} = 15,1646
- $Q_a \text{ constant}$ = 100 ml/min
- $Q_f \text{ min}$ = 0,9839 ml/hr = 0,9839/60 ml/min = 0,0164 ml/min
- $Q_f \text{ max}$ = 1,0882 ml/hr = 1,0882/60 ml/min = 0,0181 ml/min
- $\rho_{\text{heksana(l)}}$ = 0,659 gr/ml
- ρ_{udara} = 0,001185 gr/ml

perhitungan:

- Massa alir ($\dot{m}$)

$$\dot{m}_{f \text{ min}} = \rho_{\text{heksana(l)}} \times Q_f \text{ min} = 0,659 \text{ gr/ml} \times 0,0164 \text{ ml/min} = 0,0108 \text{ gr/min}$$

$$\dot{m}_{f \text{ max}} = \rho_{\text{heksana(l)}} \times Q_f \text{ max} = 0,659 \text{ gr/ml} \times 0,0181 \text{ ml/min} = 0,0120 \text{ gr/min}$$

$$\dot{m}_a = \rho_{\text{udara}} \times Q_a = 0,001185 \text{ gr/ml} \times 100 \text{ ml/min} = 0,1185 \text{ gr/min}$$

- Rasio ekuivalen (Φ)

Perhitungan rasio ekuivalen (Φ) menggunakan penurunan rumus rasio ekuivalen (2-4) berdasarkan Tabel 4.3 sehingga didapat rumus (4-3) untuk menghitung *lower limit* (Φ_{lower}) dan rumus (4-4) untuk menghitung *upper limit* (Φ_{upper}).

$$\text{a. } \Phi_{\text{lower}} = \frac{\dot{m}_{f \min} \times AFR_{\text{stoic}}}{\dot{m}_a} \quad (4-3)$$

$$\Phi_{\text{lower}} = \frac{0,0108 \text{ gr/min} \times 15,1646}{0,1185 \text{ gr/min}}$$

$$\Phi_{\text{lower}} = 1,3829$$

$$\text{b. } \Phi_{\text{upper}} = \frac{\dot{m}_{f \max} \times AFR_{\text{stoic}}}{\dot{m}_a} \quad (4-4)$$

$$\Phi_{\text{upper}} = \frac{0,0120 \text{ gr/min} \times 15,1646}{0,1185 \text{ gr/min}}$$

$$\Phi_{\text{upper}} = 1,5295$$

Pengolahan data yang dilakukan selanjutnya adalah menghitung kecepatan aliran total reaktan didalam *meso-scale combustor*. Fungsi dilakukan perhitungan tersebut adalah untuk memberikan acuan pembanding nilai rasio ekuivalen pada diagram hubungan rasio ekuivalen dengan kecepatan reaktan dalam *meso-scale combustor* berbahan bakar cair. Perhitungan kecepatan reaktan (v_{total}) dilakukan berdasarkan debit total aliran reaktan yang mengalir didalam *combustor*. Karena fase bahan bakar dan udara berbeda maka terlebih dahulu dihitung nilai debit bahan bakar pada fase uapnya ($Q_f (\text{vapor})$) dengan cara membagi nilai massa alir bahan bakar ($\dot{m}_f$) dengan densitas heksana pada fase uap ($\rho_{\text{heksana(g)}}$). Berikut adalah perhitungan interpolasi untuk mencari nilai densitas uap heksana dan juga perhitungan kecepatan total reaktan berdasar pada data debit di Tabel 4.3.

1. Perhitungan interpolasi $\rho_{\text{heksana(g)}}$

diketahui:

suhu didih heksana $68,7^\circ\text{C} = 155,7^\circ\text{F}$

Tabel 4.4 Nilai densitas uap heksana

SATURATED VAPOR DENSITY	
Temperature (degrees F)	Pounds per cubic foot
0	0.00545
10	0.00750
20	0.01016
30	0.01355
40	0.01781
50	0.02308
60	0.02955
70	0.03740
80	0.04681
90	0.05799
100	0.07116
110	0.08656
120	0.10440
130	0.12490
140	0.14840
150	0.17510
160	0.20520
170	0.23890

sumber : Anonymous 5

metode *Linear Interpolation*

	<i>Y</i>
X_1	M_1
X	$M = ?$
X_2	M_2

$$M = \left(\frac{X_2 - X}{X_2 - X_1} \right) M_1 + \left(\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} \right) M_2$$

$$M = \left(\frac{160 - 155,7}{160 - 150} \right) 0,17510 + \left(\frac{155,7 - 150}{160 - 150} \right) 0,20520$$

$$M = 0,075293 + 0,116964$$

$$M = 0,1922 \text{ lb/ft}^3$$

$$\rho \text{ heksana(g)} = 0,0031 \text{ gr/ml}$$

2. Perhitungan kecepatan reaktan data Tabel 4.3 kolom nomor 1 diketahui:

- Q_a = 100 ml/min
- $\dot{m}_f \text{ min}$ = 0,0108 gr/min
- $\dot{m}_f \text{ max}$ = 0,0120 gr/min
- $\rho \text{ heksana(g)} = 0,0031 \text{ gr/ml}$

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

- Debit uap heksana ($Q_{f(vapor)}$)

$$Q_{f(vapor)(min)} = \frac{\dot{m}_{fmin}}{\rho_{heksana(g)}} = \frac{0,0108 \text{ gr/min}}{0,0031 \text{ gr/ml}} = 3,4858 \text{ ml/min}$$

$$Q_{f(vapor)(max)} = \frac{\dot{m}_{fmax}}{\rho_{heksana(g)}} = \frac{0,0120 \text{ gr/min}}{0,0031 \text{ gr/ml}} = 3,8555 \text{ ml/min}$$

- Kecepatan reaktan minimum ($v_{total(min)}$)

$$v_{reaktan(min)} = \frac{\left(\frac{Q_{f(vapor)(min)} + Q_A}{60} \right)}{\frac{(3,16 \times r^2)}{100}}$$

$$v_{reaktan(min)} = \frac{\left(\frac{3,4858 \text{ ml/min} + 100 \text{ ml/min}}{60 \text{ s}} \right)}{\frac{(3,16 \times 1,75^2)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$v_{reaktan(min)} = 17,9359 \text{ cm/s}$$

- Kecepatan reaktan maksimum ($v_{total(max)}$)

$$v_{reaktan(max)} = \frac{\left(\frac{Q_{f(vapor)(max)} + Q_A}{60} \right)}{\frac{(3,16 \times r^2)}{100}}$$

$$v_{reaktan(max)} = \frac{\left(\frac{3,8555 \text{ ml/min} + 100 \text{ ml/min}}{60 \text{ s}} \right)}{\frac{(3,16 \times 1,75^2)}{100} \text{ cm}^2}$$

$$v_{reaktan(max)} = 18 \text{ cm/s}$$

Keseluruhan perhitungan diatas diterapkan ke masing masing data pada Tabel 4.3. Hasil keseluruhan perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.5 dibawah ini.

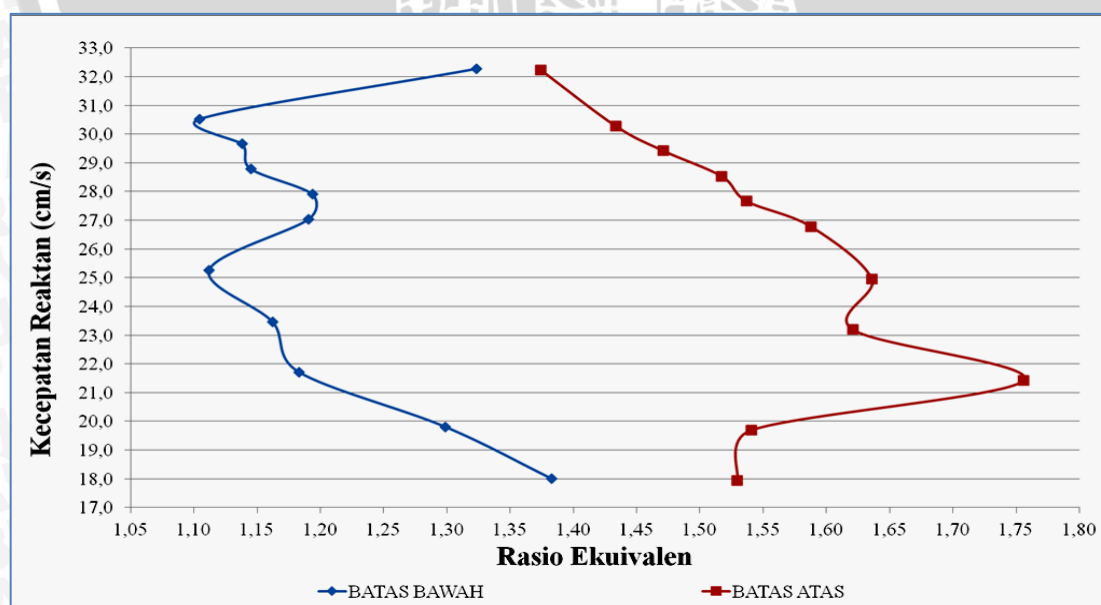
Tabel 4.5 Hasil pengolahan data *flammability limit* untuk Q_A konstan

No	$\dot{m}_a$ (gr/ml)	$\dot{m}_{f(min)}$ (gr/ml)	$Q_{f(vapor)}$ min (ml/min)	$\dot{m}_{f(max)}$ (gr/ml)	$Q_{f(vapor)}$ max (ml/min)	ϕ_{lower}	ϕ_{upper}	$V_{reaktan}$ min (cm/s)	$V_{reaktan}$ max (cm/s)
1	0,1185	0,0108	3,4858	0,0120	3,8555	1,3829	1,5295	17,9359	18,0000
2	0,1304	0,0112	3,6013	0,0132	4,2714	1,2988	1,5405	19,6891	19,8053

3	0,1422	0,0111	3,5782	0,0165	5,3110	1,1829	1,7558	21,4183	21,7186
4	0,1541	0,0118	3,8093	0,0165	5,3110	1,1625	1,6207	23,1915	23,4518
5	0,1659	0,0122	3,9248	0,0179	5,7731	1,1122	1,6359	24,9447	25,2651
6	0,1778	0,0140	4,5024	0,0186	6,0042	1,1908	1,5879	26,7780	27,0383
7	0,1837	0,0145	4,6641	0,0186	6,0042	1,1938	1,5367	27,6726	27,9049
8	0,1896	0,0143	4,6179	0,0190	6,1197	1,1450	1,5173	28,5312	28,7915
9	0,1955	0,0147	4,7334	0,0190	6,1197	1,1381	1,4714	29,4178	29,6581
10	0,2015	0,0147	4,7334	0,0190	6,1428	1,1046	1,4335	30,2844	30,5287
11	0,2133	0,0186	6,0042	0,0193	6,2352	1,3233	1,3742	32,2378	32,2779
Jumlah						13,2347	17,0034	282,101	284,440

Selanjutnya dilakukan pengeplotan grafik berdasar nilai rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan dari Tabel 4.5 diatas. Sehingga didapat diagram hubungan rasio ekuivalen dengan kecepatan reaktan diagram tersebut yang menjadi dasar analisa *flammability limit* atau batas stabilitas nyala api di dalam *meso-scale combustor*.

4.3 Pembahasan *Flammability limit*



Gambar 4.2 Grafik hubungan rasio ekuivalen dengan kecepatan reaktan dalam *meso-scale combustor* berbahan bakar cair

Grafik pada Gambar 4.2 merupakan grafik hubungan rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan pembakaran bahan bakar cair di dalam *meso-scale combustor*. Bahan bakar cair yang digunakan adalah heksana (C_6H_{14}). Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa rasio ekuivalen terendah terdapat pada nilai 1,1046 dengan kecepatan reaktan sebesar 30,2844 cm/s. Sedangkan titik rasio ekuivalen tertinggi terletak pada nilai 1,7554 dengan kecepatan reaktan sebesar 21,4183 cm/s.

Apabila dilihat dari nilai kecepatan reaktannya diketahui bahwa grafik tersebut memiliki batas kecepatan tertinggi dan terendah dimana batas kecepatan terendah ada di sekitar nilai 18 cm/s dengan rasio ekuivalen antara 1,3826 - 1,5292 ini artinya apabila kecepatan reaktan diatur dibawah nilai tersebut dengan rasio ekuivalen dijaga tetap maka akan terjadi fenomena *flashback* pada api di dalam *combustor*. Batas kecepatan reaktan tertinggi terletak disekitar nilai 32,2 cm/s pada nilai rasio ekuivalen antara 1,323 - 1,3739, artinya apabila kecepatan reaktan diatur diatas nilai tersebut dengan nilai rasio ekuivalen dijaga tetap dapat terjadi nyala api yang stabil di ujung *combustor* atau bahkan *blow off*.

Kondisi api menyala dengan stabil di mulut *combustor* akan mengakibatkan *heat recirculation* menjadi kurang optimal karena panas dari api terhambat oleh *quartz glass tube*. Diketahui bahwa konduktivitas *quartz glass tube* jauh lebih rendah dari tembaga. Hal tersebut membuat suplai panas untuk menguapkan bahan bakar cair akan menurun dengan drastis. Sehingga pada akhirnya api akan padam. Dapat dilihat pada grafik diatas bahwa area grafik terletak pada zona rasio ekuivalen diatas 1 ($\phi > 1$) yang berarti pembakaran bahan bakar cair (heksana) di dalam *meso-scale combustor* terjadi pada kondisi *fuel-rich mixture* atau campuran kaya.

Penyebabnya kemungkinan besar karena kondisi campuran reaktan homogen yang diasumsikan tidak sesuai dengan kondisi campuran di dalam *combustor*. Hal tersebut dikarenakan rasio ekuivalen campuran di dalam *combustor* tidak merata ke seluruh bagiannya. Sehingga terdapat bahan bakar yang mampu dan tidak mampu bercampur dengan udara untuk reaksi pembakaran. Persebaran uap bahan bakar yang tidak merata di dalam *combustor* akan mengakibatkan nyala api jadi tidak simetris terhadap sumbu *combustor*. Karena akan terdapat bahan bakar yang tidak bercampur dengan udara. Bahan bakar yang tidak bercampur dengan udara tersebut akhirnya keluar sebagai *unburned gas* tanpa mengalami pembakaran di dalam *combustor*.

Karena itu untuk mempertahankan proses pembakaran di dalam *combustor* kita harus mengatur rasio ekuivalen yang terbaca pada daerah kaya. Hal tersebut dilakukan untuk menutupi jumlah bahan bakar yang keluar sebagai *unburned gas*. Itulah kenapa grafik *flammability limit* diatas berada pada zona campuran kaya. Kondisi nyala api yang tidak merata akan dijelaskan lebih lanjut pada analisa visualisasi bentuk nyala api di subbab 4.5 selanjutnya.

4.4 Penentuan Titik Pengambilan Data Visualisasi dan Temperatur Nyala Api

Pengambilan gambar visualisasi bentuk nyala api dilakukan dengan acuan pada titik tengah batas *flammability limit*. Pengambilan titik tengah dihitung menggunakan perhitungan rata - rata nilai rasio ekuivalen (ϕ_{lower} dan ϕ_{upper}) dan rata - rata nilai kecepatan reaktan ($V_{reaktan (min)}$ dan $V_{reaktan (max)}$). Dari data pada Tabel 4.5 didapat nilai rata - rata rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan rata - rata melalui perhitungan sebagai berikut.

1. Rata - rata rasio ekuivalen ($\phi_{average}$)

$$\phi_{average} = \frac{(\sum \phi_{lower}) + (\sum \phi_{upper})}{n} \quad (4-3)$$

$$\phi_{average} = \frac{(13,2347) + (17,0034)}{22} = 1,3745$$

2. Rata - rata kecepatan reaktan ($V_{reaktan average}$)

$$V_{reaktan average} = \frac{(\sum v_{reaktan min}) + (\sum v_{reaktan max})}{n} \quad (4-4)$$

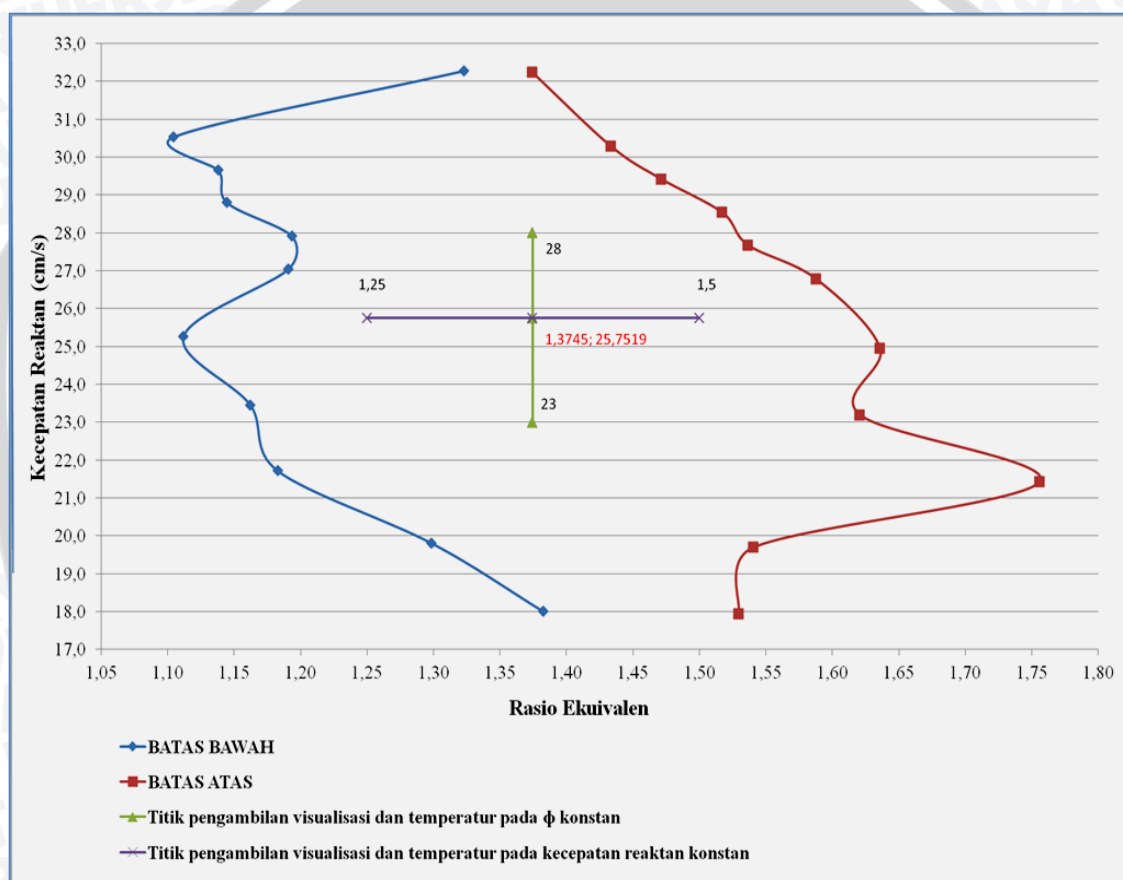
$$V_{reaktan average} = \frac{(282,101) + (284,440)}{22} = 25,7519$$

Keterangan:

- $\phi_{average}$ = Rasio ekuivalen rata - rata
- ϕ_{upper} = Rasio ekuivalen batas atas
- ϕ_{lower} = Rasio ekuivalen batas bawah
- $V_{reaktan average}$ = Kecepatan reaktan rata - rata
- $V_{reaktan max}$ = Kecepatan reaktan maksimum
- $V_{reaktan min}$ = Kecepatan reaktan minimum
- n = Jumlah data = 22

Kedua nilai diatas kemudian di plot pada grafik hubungan rasio ekuivalen dengan kecepatan reaktan dalam *meso-scale combustor* berbahan bakar cair sehingga didapat titik tengah diantara kedua *trend* pada grafik tersebut. Dengan acuan titik tengah

tersebut ditentukan titik - titik yang dapat mewakili untuk dijadikan perbandingan. Yang pertama ditentukan variasi nilai kecepatan reaktan pada nilai rasio ekuivalen tetap yaitu 1,3745, titik nilai kecepatan reaktan yang diambil adalah 23 cm/s , 25,7519 cm/s dan 28 cm/s. Selanjutnya variasi nilai rasio ekuivalen pada nilai kecepatan reaktan tetap yaitu 25,7519 cm/s titik nilai rasio ekuivalen yang diambil adalah 1,25 , 1,3745 dan 1,5. Titik - titik tersebut diambil dengan pertimbangan bahwa titik-titik tersebut masih berada didalam area *flammability limit*. Titik - titik tersebut kemudian di plot pada grafik seperti Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Penentuan titik pengambilan visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api

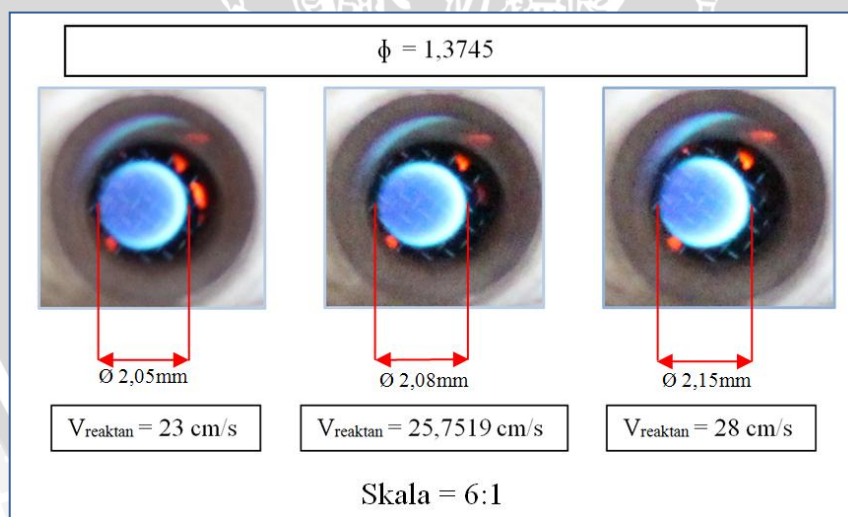
Dari titik - titik pengambilan data visualisasi dan temperatur nyala api yang telah ditentukan nilainya pada grafik diatas. Kemudian dihitung nilai debit udara dan debit bahan bakar pada masing masing titik tersebut. Nilai - nilainya dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut ini.

Tabel 4.6 Titik pengambilan data visualisasi dan temperatur nyala api

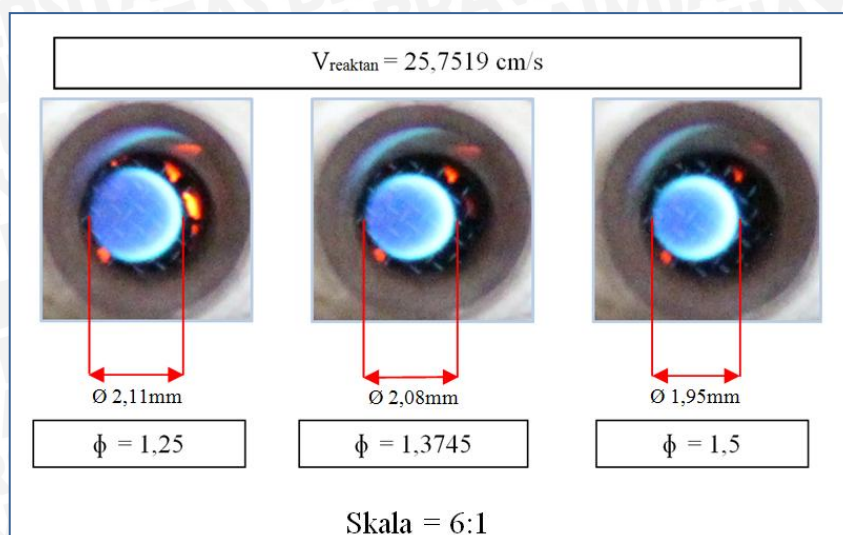
No	Q_f (ml/hr)	Q_f (ml/min)	Konversi Q_f (ml/min)	$\dot{m}_f$ (gr/ml)	Q_f (vapor) (ml/min)	Q_a (ml/min)	$\dot{m}_a$ (gr/ml)	ϕ	$V_{reaktan}$ (cm/s)
1	1,15	0,0192	1,66	0,0126	4,0745	129	0,1532	1,25	23
2	1,28	0,0213	1,86	0,0141	4,5351	144	0,1706	1,25	25,75
3	1,40	0,0233	2,05	0,0154	4,9602	157	0,1866	1,25	28
4	1,26	0,0210	1,83	0,0138	4,4642	129	0,1527	1,3745	23
5	1,40	0,0233	2,05	0,0154	4,9602	143	0,1696	1,3745	25,75
6	1,53	0,0255	2,25	0,0168	5,4208	156	0,1854	1,3745	28
7	1,37	0,0228	2,00	0,0150	4,8539	128	0,1521	1,5	23
8	1,53	0,0255	2,25	0,0168	5,4208	143	0,1699	1,5	25,75
9	1,66	0,0277	2,45	0,0182	5,8814	156	0,1843	1,5	28

4.5 Visualisasi Bentuk Nyala Api

Setelah dilakukan pengambilan data visualisasi bentuk nyala api menggunakan kombinasi - kombinasi debit udara dan debit bahan bakar pada Tabel 4.5 sebelumnya. Didapat gambar visualisasi bentuk nyala api seperti pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4.4 Visualisasi bentuk nyala api pada nilai rasio ekuivalen 1,3745 dengan kecepatan reaktan bervariasi



Gambar 4.5 Visualisasi bentuk nyala api pada kecepatan reaktan 25,7519 cm/s dengan nilai rasio ekuivalen bervariasi

Kedua gambar diatas menunjukkan visualisasi bentuk nyala api pada berbagai macam kondisi. Pada Gambar 4.4 menunjukkan visualisasi bentuk nyala api pada rasio ekuivalen 1,3745 dengan kecepatan reaktan yang bervariasi yaitu 23 cm/s, 25,7519 cm/s dan 28 cm/s. Sedangkan Gambar 4.5 menunjukkan visualisasi bentuk nyala api pada kecepatan reaktan 25,7519 dengan rasio ekuivalen bervariasi yaitu 1,25, 1,3745, dan 1,5.

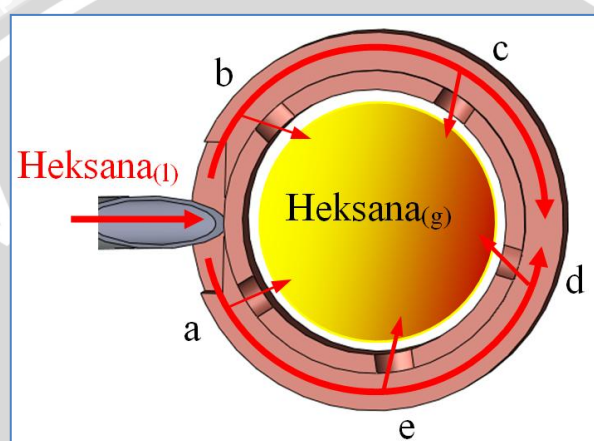
Dari Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan reaktan di dalam *meso-scale combustor* api yang tampak juga akan semakin tebal dan lebar. Hal ini dikarenakan dengan meningkatnya kecepatan reaktan berarti debit udara dan debit bahan bakar yang mengalir di dalam *combustor* juga akan semakin besar. Dengan demikian akan semakin banyak reaktan yang tersedia untuk direaksikan di dalam *combustor*. Karenanya api hasil pembakaran juga akan nampak semakin besar dan terang daripada api pembakaran dengan kecepatan reaktan yang lebih rendah.

Tampak pada Gambar 4.5 bahwa dengan seiring bertambahnya rasio ekuivalen pada kecepatan reaktan yang tetap, visualisasi bentuk nyala api terlihat semakin tebal dan terang namun lingkaran apinya semakin kecil. Hal tersebut dikarenakan jumlah bahan bakar di dalam *meso-scale combustor* menjadi semakin melimpah apabila rasio ekuivalen dinaikkan.

Semakin banyak jumlah bahan bakar akan mengakibatkan warna api menjadi lebih hijau dan terang. Namun jika hal tersebut tidak diimbangi oleh kenaikan jumlah udara maka campuran reaktan akan menjadi terlalu jenuh. Sehingga menimbulkan adanya bahan bakar yang tidak bereaksi dengan udara. Bahan bakar yang tidak bereaksi

tersebut tetap mengalir di dalam *meso-scale combustor* sehingga mengakibatkan ruang pembakaran menjadi semakin sempit. Itulah yang menyebabkan campuran reaktan dengan rasio ekuivalen lebih tinggi memiliki ukuran api yang lebih kecil.

Dapat dilihat pada keenam foto diatas, secara garis besar bentuk api sudah sempurna yaitu berbentuk lingkaran. Namun terlihat bahwa bentuk api tidak simetris terhadap sumbu *combustor*. Bentuk api yang lebih terang di salah satu sisinya seperti itu dapat terjadi karena distribusi uap tidak merata keseluruh bagian *combustor*.



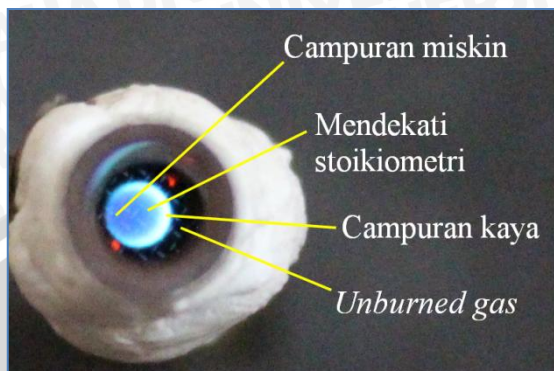
Gambar 4.6 Ilustrasi persebaran uap heksana di dalam *meso-scale combustor*

Gambar 4.6 diatas menunjukkan ilustrasi persebaran uap di dalam *meso-scale combustor*. Warna semakin oranye menandakan bahwa kandungan uap heksana pada area tersebut semakin pekat. Persebaran uap yang tidak merata seperti itu diakibatkan oleh sifat alami fluida yang cenderung mengalir lurus menuju luasan yang lebih besar daripada berbelok ke luasan yang sempit. Disini lubang inlet uap memiliki diameter 0,5 mm ukuran tersebut cukup kecil dibandingkan lebar kanal cincin yaitu 2 mm. Sehingga aliran uap akan cenderung mengalir lurus melingkari cincin.

Pada sisi seberang inlet heksana, kedua aliran uap akan bertemu dan mengakibatkan meningkatnya konsentrasi uap heksana di area tersebut. Sehingga pemasukan uap ke dalam *combustor* akan lebih banyak melalui lubang c, d dan e daripada lubang a dan b. Oleh karena itu persebaran uap pada bagian dalam *combustor* menjadi tidak merata. Hal ini menunjukkan bahwa mesh yang ada di dalam *combustor* tidak mampu meratakan distribusi uap hanya mampu berperan sebagai *flame holder* saja.

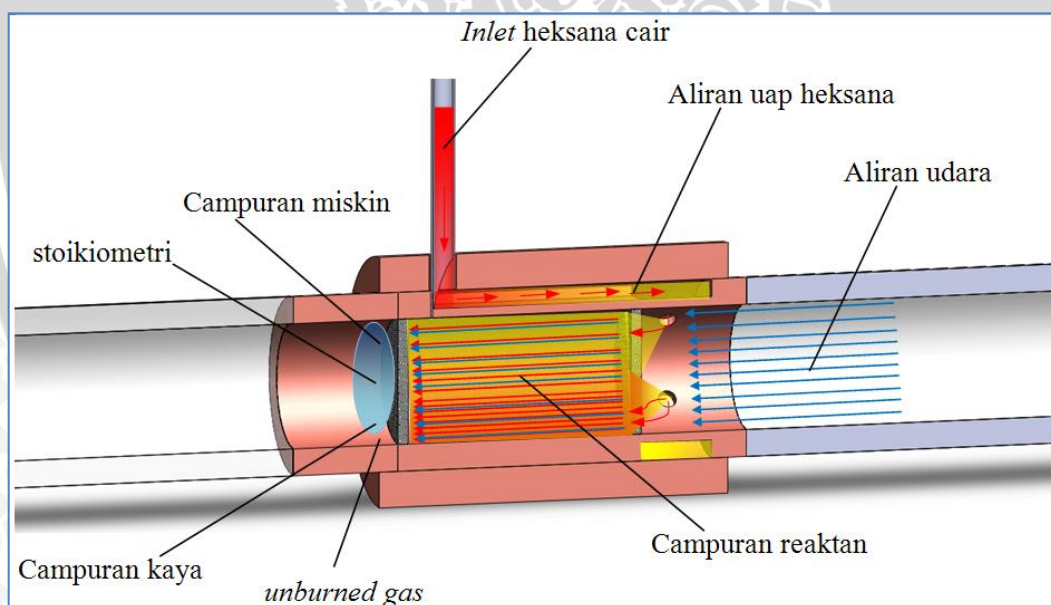
Penjelasan diatas menjawab kenapa api pada *meso-scale combustor* dengan *preheated multiple fuel inlet* tidak simetris terhadap sumbunya. Jika analisis diatas

dikaitkan dengan persebaran rasio ekuivalen di dalam *combustor*, maka kurang lebih persebaran rasio ekuivalen campuran berdasarkan bentuk apinya akan seperti yang terlihat pada gambar 4.7 dibawah ini.



Gambar 4.7 Persebaran rasio ekuivalen campuran dilihat dari warna api

Jika lebih diperjelas lagi maka fenomena aliran uap bahan bakar dan udara di dalam *meso-scale combustor* kurang lebih akan tampak seperti Gambar 4.8 berikut ini



Gambar 4.8 Ilustrasi aliran udara dan uap heksana di dalam *meso-scale combustor*

Dari Gambar 4.8 diatas terlihat fenomena aliran di dalam *combustor*. Panah merah menunjukkan aliran uap heksana sedangkan panah biru menunjukkan aliran udara. Pada zona campuran reaktan dapat dilihat bahwa aliran uap dan aliran udara tidak dapat tercampur secara merata di dalam *combustor*. Semakin oranye warna zona menunjukkan semakin banyak jumlah uap bahan bakar.

Warna api pada ilustrasi diatas juga menunjukkan persebaran rasio ekuivalen semakin terang warna biru dari api menunjukkan rasio ekuivalen semakin tinggi. Terbentuknya *unburned gas* pada bagian bawah api juga dikarenakan rasio ekuivalen pada bagian tersebut terlalu tinggi. Sehingga tidak terjadi pembakaran pada bagian tersebut karena tidak terdapat cukup udara agar proses pembakaran bisa berlangsung pada bahan bakar yang terdapat pada daerah tersebut.

4.6 Temperatur Nyala Api

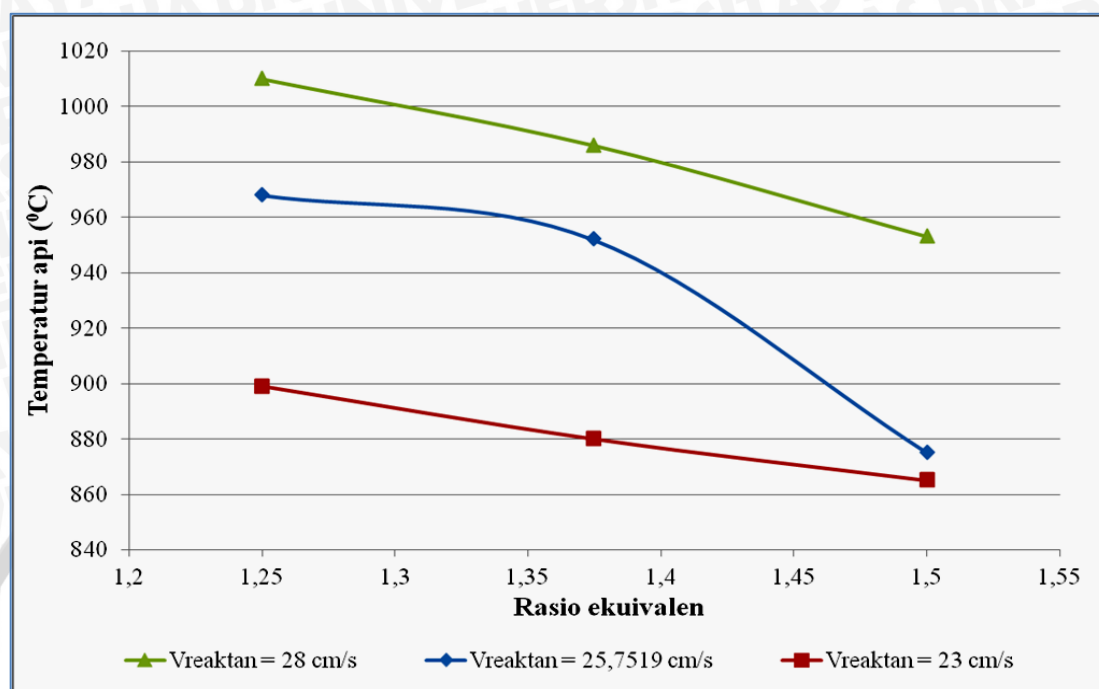
Titik pengambilan data temperatur nyala api dilakukan pada titik acuan yang sama dengan pengambilan data visualisasi bentuk nyala api yaitu titik tengah grafik. Perbandingan yang dilakukan adalah membandingkan temperatur nyala api pada rasio ekuivalen bervariasi dan kecepatan reaktan tetap. Serta membandingkan temperatur nyala api pada rasio ekuivalen tetap dan kecepatan reaktan bervariasi. Data temperatur dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4.7 Data temperatur nyala api

No	ϕ	V_{reaktan} (cm/s)	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
1	1,25	23	899
2	1,25	25,7519	968
3	1,25	28	1010
4	1,3745	23	880
5	1,3745	25,7519	952
6	1,3745	28	986
7	1,5	23	880
8	1,5	25,7519	875
9	1,5	28	986

Untuk membandingkan nilai temperatur pada Tabel 4.7 diatas, selanjutnya dilakukan pengeplotan data - data temperatur tersebut pada grafik temperatur vs rasio ekuivalen dan grafik temperatur vs kecepatan reaktan. Dari grafik tersebut akan

terbentuk 3 *trend* yang mewakili masing - masing variasinya. Grafik - Grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 berikut ini.



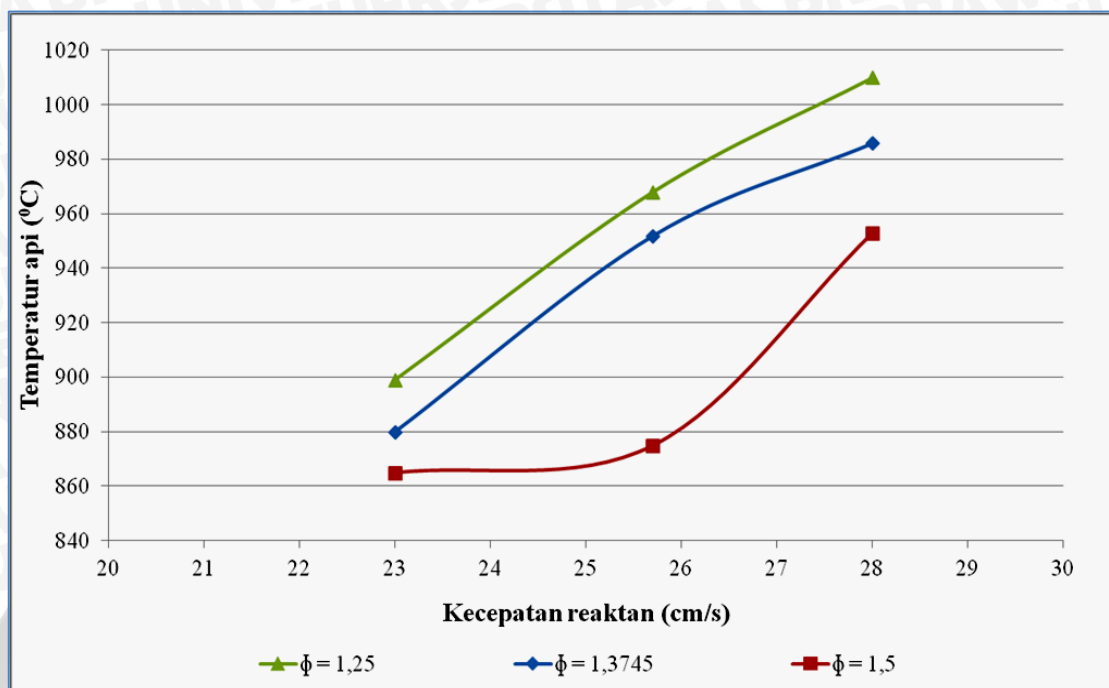
Gambar 4.9 Grafik perbandingan nilai temperatur pada kecepatan reaktan tetap dan rasio ekuivalen bervariasi

Grafik pada Gambar 4.9 menunjukkan hubungan antara temperatur dan rasio ekuivalen untuk setiap nilai kecepatan reaktan yang berbeda. Terlihat bahwa temperatur api semakin menurun seiring dengan kenaikan nilai rasio ekuivalen. Hal ini disebabkan pada rasio ekuivalen yang lebih tinggi jumlah bahan bakar yang berada di dalam *combustor* akan semakin melimpah. Dan karena tidak diimbangi dengan kenaikan jumlah udara, campuran reaktan di dalam *combustor* akan bersifat semakin kaya. Sehingga menimbulkan kemungkinan jumlah bahan bakar yang tidak terbakar (*unburned gas*) akan semakin meningkat.

Dengan meningkatnya jumlah *unburned gas* akan mempengaruhi temperatur api karena suhu *unburned gas* jauh lebih rendah daripada suhu api. Hal ini sesuai dengan teori bahwa suhu api pembakaran akan semakin meningkat apabila campuran reaktan pembakaran tersebut semakin mendekati kondisi stoikiometri.

Jika membandingkan ketiga *trend* grafik pada Gambar 4.9 diatas dengan meninjau dari temperatur nyala apinya dapat dilihat bahwa reaktan dengan kecepatan 28 cm/s berada di posisi tertinggi. Sedangkan reaktan dengan kecepatan terendah yaitu 23 cm/s nilai temperaturnya juga berada di posisi terendah. Pembahasan mengenai hal ini akan

lebih mudah dimengerti apabila melihat grafik hubungan temperatur dengan kecepatan pembakaran pada Gambar 4.10 di bawah ini.



Gambar 4.10 Grafik perbandingan nilai temperatur pada kecepatan reaktan bervariasi dan rasio ekuivalen tetap

Gambar 4.10 diatas menunjukkan grafik hubungan temperatur dengan dengan kecepatan reaktan pada nilai rasio ekuivalen yang bervariasi. Ketiga *trend* pada grafik tersebut menunjukkan dengan seiring meningkatnya kecepatan reaktan yang mengalir di dalam *combustor*, temperatur nyala api yang terbaca juga akan semakin tinggi.

Hal tersebut dikarenakan meningkatnya kecepatan reaktan disebabkan oleh kenaikan debit udara dan debit bahan bakar yang mengalir di dalam *combustor*. Kenaikan debit udara dan bahan bakar tersebut mengakibatkan kenaikan massa alir udara dan bahan bakar. Semakin tinggi massa alir udara dan bahan bakar akan membuat jumlah reaktan di dalam *combustor* semakin banyak. Dengan adanya reaktan yang melimpah maka proses pembakaran yang terjadi juga akan semakin besar dan membuat kalor yang terlepas dari reaksi pembakaran akan semakin banyak. Kalor yang terlepas dari reaksi pembakaran secara otomatis juga akan meningkatkan temperatur pada nyala api hasil pembakaran.

Dari kedua gambar grafik diatas dapat dilihat bahwa temperatur tertinggi berada pada nilai 1010 °C. Nilai temperatur tersebut dicapai pada rasio ekuivalen 1,25 dan kecepatan reaktan 28 cm/s. Nilai tersebut bisa dikatakan rendah untuk suhu api hasil pembakaran bahan bakar heksana. Karena menurut jurnal yang ditulis oleh Torii, et al,

(1991). Suhu api hasil pembakaran heksana pada kondisi adiabatik mampu mencapai nilai 2273,7 K atau setara dengan 2000,7 °C pada rasio ekuivalen 1,1 (Torii, et al, 1991). Nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut ini.

Tabel 4.8 Temperatur maksimum api adiabatik

fuel	adiabatic flame temperature [K]	equivalence ratio
methanol	2221.05	1.0
ethanol	2236.29	1.0
methane	2225.43	1.0
ethane	2258.88	1.0
propane	2266.54	1.0
butane	2269.20	1.0
hexane	2273.74	1.1
octane	2276.09	1.1
decane	2278.06	1.1
ethylene	2392.01	1.1
propylene	2473.37	1.1
acetylene	2607.57	1.3

Sumber : Torii, et al, 1991

Rendahnya temperatur api pada penelitian ini diakibatkan karena beberapa faktor yang dapat menurunkan suhu api. Faktor yang pertama adalah terjadi penurunan kalor akibat *heat loss* ke dinding *combustor*. Faktor ini adalah salah satu kekurangan paling umum dari *meso-scale combustor*. Karena pembakaran pada *meso-scale combustor* berada pada *quenching diameter* atau diameter dimana rasio luas permukaan terhadap volume pembakaran meningkat sehingga *heat loss* dari api ke dinding *combustor* juga akan meningkat (Xu, et al, 2007). *Heat loss* ke dinding *combustor* dipercepat oleh konduktivitas dinding yang terbuat dari tembaga. Diketahui bahwa tembaga memiliki konduktivitas yang terkenal cukup tinggi yaitu sekitar 400 W/m⁰C dibandingkan dengan konduktivitas termal baja murni yang hanya 43 W/m⁰C.

Faktor lain yang dapat menurunkan suhu api adalah banyaknya kalor api yang terserap pada proses penguapan heksana. Pernyataan ini didukung oleh bentuk api yang lebih redup pada sisi dimana terjadi proses penguapan heksana. Karena selain menunjukkan rasio ekuivalen yang rendah api yang lebih redup dan tipis juga menunjukkan bahwa suhu api tersebut rendah. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.11 berikut ini.



Gambar 4.11 Posisi penurunan suhu api terhadap sisi penguapan heksana

Jika dikaitkan dengan analisa pada bagian visualisasi bentuk nyala api. Adanya reaktan yang tidak terbakar (*unburned gas*) juga dapat menjadi salah satu faktor yang mengakibatkan turunnya suhu api. Karena diketahui temperatur *unburned gas* jauh lebih rendah daripada suhu api mengingat *unburned gas* adalah reaktan yang tidak bereaksi sehingga tidak ada panas yang dihasilkan olehnya.

