

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian dan Analisis data

Tabel 4.1 sampai dengan Tabel 4.6 adalah data hasil penelitian dan perhitungan tentang pembakaran dalam *meso-scale* dengan variasi material *non-homogen* untuk dinding *combustor*. Dalam grafik *flammability limit*, setiap debit udara memiliki batas rasio ekuivalen (Φ) minimal dan batas rasio ekuivalen (Φ) maksimal dimana api stabil di dalam *combustor*. Batas rasio ekuivalen (Φ) maksimal adalah kondisi dimana api masih dapat distabilkan didalam *combustor* pada debit bahan bakar maksimal (*upper limit*), sedangkan batas rasio ekuivalen (Φ) minimal adalah kondisi dimana api masih dapat distabilkan di dalam *combustor* pada debit bahan bakar minimal (*lower limit*). Pengambilan data dan perhitungan dilakukan pada *combustor* dengan dan tanpa isolasi panas.

Tabel 4.1 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan material *quartz glass tube* tanpa isolator.

No.	Q _{udara} (mL/menit)	Q _{bb} (mL/menit)		V _{total} (cm/detik)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
1	80.82	3.14	4.32	14.55	14.76	1.48	2.03
2	96.04	3.73	5.21	17.29	17.55	1.48	2.07
3	111.76	3.88	5.83	20.04	20.38	1.32	1.99
4	127.98	4.03	6.48	22.88	23.30	1.20	1.93
5	144.7	4.17	8.05	25.80	26.47	1.10	2.12
6	161.92	4.61	8.79	28.86	29.59	1.08	2.07
7	179.64	4.91	9.36	31.99	32.76	1.04	1.98
8	197.86	5.36	10.14	35.22	36.05	1.03	1.95
9	216.58	5.99	10.53	38.58	39.36	1.05	1.85
10	235.8	6.65	10.93	42.02	42.76	1.07	1.76
11	255.52	7.69	11.32	45.62	46.25	1.15	1.69
12	275.74	8.53	11.91	49.27	49.86	1.18	1.65
13	296.46	9.55	12.11	53.04	53.48	1.23	1.56

Tabel 4.2 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan material *quartz glass tube* dengan isolator.

No.	Q _{udara} (mL/menit)	Q _{bb} (mL/menit)		V _{total} (cm/detik)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
1	80.82	2.99	4.32	14.53	14.76	1.41	2.03
2	96.04	3.44	5.36	17.24	17.58	1.36	2.13
3	111.76	3.59	6.15	19.99	20.44	1.22	2.10
4	127.98	3.73	6.99	22.83	23.39	1.11	2.08
5	144.7	3.88	8.23	25.75	26.51	1.02	2.17
6	161.92	4.32	8.98	28.81	29.62	1.02	2.11
7	179.64	4.61	9.75	31.93	32.82	0.98	2.07
8	197.86	5.06	10.53	35.17	36.12	0.97	2.03
9	216.58	5.52	10.93	38.49	39.43	0.97	1.92
10	235.8	5.99	11.32	41.91	42.83	0.97	1.83
11	255.52	6.65	11.91	45.44	46.35	0.99	1.78
12	275.74	7.69	12.31	49.12	49.92	1.06	1.70
13	296.46	8.79	13.08	52.91	53.65	1.13	1.68
14	317.68	9.55	13.46	56.72	57.39	1.15	1.61
15	339.4	10.73	13.84	60.68	61.22	1.20	1.55

Tabel 4.3 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan material *stainless steel-quartz glass tube* tanpa isolator.

No.	Q _{udara} (mL/menit)	Q _{bb} (mL/menit)		V _{total} (cm/detik)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
1	80.82	3.14	4.76	14.55	14.83	1.48	2.24
2	96.04	3.44	5.99	17.24	17.68	1.36	2.38
3	111.76	3.59	6.48	19.99	20.49	1.22	2.21
4	127.98	4.03	7.16	22.88	23.42	1.20	2.13
5	144.7	4.32	8.42	25.83	26.54	1.14	2.21
6	161.92	4.76	9.17	28.89	29.65	1.12	2.16
7	179.64	5.06	9.75	32.01	32.82	1.07	2.07
8	197.86	5.36	10.33	35.22	36.08	1.03	1.99
9	216.58	5.83	11.12	38.55	39.47	1.03	1.96
10	235.8	5.99	11.52	41.91	42.86	0.97	1.86

No.	Q _{udara} (mL/menit)	Q _{bb} (mL/menit)		V _{total} (cm/detik)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
11	255.52	6.99	12.89	45.50	46.52	1.04	1.92
12	275.74	7.87	13.84	49.15	50.19	1.09	1.91
13	296.46	8.42	15.10	52.84	54.00	1.08	1.94
14	317.68	8.60	15.61	56.55	57.76	1.03	1.87
15	339.4	9.36	16.85	60.45	61.74	1.05	1.89
16	361.62	11.12	17.00	64.60	65.62	1.17	1.79
17	384.34	13.08	17.94	68.88	69.72	1.30	1.78

Tabel 4.4 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan material *stainless steel-quartz glass tube* dengan isolator.

No.	Q _{udara} (mL/menit)	Q _{bb} (mL/menit)		V _{total} (cm/detik)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
1	80.82	2.99	4.91	14.53	14.86	1.41	2.31
2	96.04	3.29	6.15	17.22	17.71	1.31	2.44
3	111.76	3.44	6.65	19.97	20.52	1.17	2.27
4	127.98	3.88	7.87	22.85	23.54	1.15	2.34
5	144.7	4.17	8.79	25.80	26.60	1.10	2.31
6	161.92	4.47	9.55	28.84	29.72	1.05	2.25
7	179.64	4.76	10.14	31.96	32.89	1.01	2.15
8	197.86	4.91	10.33	35.14	36.08	0.95	1.99
9	216.58	5.21	11.52	38.44	39.53	0.92	2.03
10	235.8	5.36	11.91	41.80	42.93	0.87	1.92
11	255.52	5.68	13.08	45.27	46.55	0.85	1.95
12	275.74	6.15	14.03	48.86	50.22	0.85	1.94
13	296.46	7.87	15.27	52.75	54.03	1.01	1.96
14	317.68	8.23	15.77	56.49	57.79	0.99	1.89
15	339.4	8.98	17.00	60.38	61.77	1.01	1.91
16	361.62	10.73	17.28	64.53	65.67	1.13	1.82
17	384.34	10.93	18.06	68.51	69.74	1.08	1.79

Tabel 4.5 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan material tembaga-quartz glass tube tanpa isolator.

No	Q _{udara} (mL/menit)	Q _{bb} (mL/menit)		V _{total} (cm/detik)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
1	80.82	3.14	4.91	14.55	14.86	1.48	2.31
2	96.04	3.73	6.15	17.29	17.71	1.48	2.44
3	111.76	4.03	6.82	20.07	20.55	1.37	2.32
4	127.98	4.32	7.33	22.93	23.45	1.29	2.18
5	144.7	4.61	8.60	25.88	26.57	1.21	2.26
6	161.92	4.91	9.55	28.91	29.72	1.15	2.25
7	179.64	5.36	9.94	32.06	32.86	1.14	2.11
8	197.86	5.68	10.53	35.28	36.12	1.09	2.03
9	216.58	5.99	11.52	38.58	39.53	1.05	2.03
10	235.8	6.32	11.91	41.96	42.93	1.02	1.92
11	255.52	7.16	13.08	45.53	46.55	1.07	1.95
12	275.74	8.05	14.03	49.19	50.22	1.11	1.94
13	296.46	8.79	15.44	52.91	54.06	1.13	1.98
14	317.68	9.36	15.77	56.68	57.79	1.12	1.89
15	339.4	9.55	17.14	60.48	61.79	1.07	1.92
16	361.62	11.91	17.41	64.74	65.69	1.25	1.83
17	384.34	13.46	18.43	68.95	69.81	1.33	1.83

Tabel 4.6 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan material tembaga-quartz glass tube dengan isolator.

No	Q _{udara} (mL/menit)	Q _{bb} (mL/menit)		V _{total} (cm/detik)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
1	80.82	2.99	5.06	14.53	14.88	1.41	2.38
2	96.04	3.29	6.32	17.22	17.74	1.31	2.50
3	111.76	3.73	6.99	20.02	20.58	1.27	2.38
4	127.98	4.03	7.69	22.88	23.51	1.20	2.29
5	144.7	4.17	8.79	25.80	26.60	1.10	2.31
6	161.92	4.47	10.33	28.84	29.85	1.05	2.43

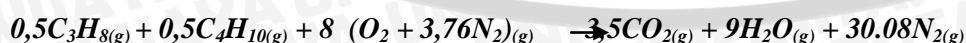
No	Q _{udara} (mL/menit)	Q _{bb} (mL/menit)		V _{total} (cm/detik)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
7	179.64	4.91	10.53	31.99	32.96	1.04	2.23
8	197.86	5.21	10.93	35.20	36.19	1.00	2.10
9	216.58	5.52	11.91	38.49	39.60	0.97	2.09
10	235.8	5.68	12.31	41.85	43.00	0.92	1.99
11	255.52	6.32	13.65	45.38	46.65	0.94	2.03
12	275.74	6.82	14.39	48.97	50.29	0.94	1.99
13	296.46	8.05	15.77	52.78	54.12	1.03	2.03
14	317.68	8.79	16.09	56.58	57.85	1.05	1.93
15	339.4	9.36	17.28	60.45	61.82	1.05	1.94
16	361.62	10.33	17.55	64.47	65.72	1.09	1.85
17	384.34	11.12	18.55	68.54	69.83	1.10	1.84

Pada proses pengambilan data setiap material mempunyai batas debit udara dan bahan bakar berbeda-beda. Hal ini dikarenakan jika debit udara dan bahan terus menerus ditingkatkan sampai batas maksimal api dalam *combustor* masih bisa distabilkan, jika sudah melewati batas maksimal api tidak bisa distabilkan lagi dalam *combustor*. Sehingga dalam kestabilan api dan *flammability limit* lebih terlihat jelas perbedaan antara *combustor* dengan menggunakan material yang berbeda-beda.

4.2 Perhitungan

4.2.1 Pembakaran Stoikiometri

Pembakaran stoikiometri adalah pembakaran dimana semua atom dari pengoksidasi bereaksi secara kimia untuk menjadi berbagai produk. Pengoksidasi yang paling lazim adalah udara yang untuk berbagai keperluan dapat dianggap sebagai campuran dari 21% oksigen dan 79% nitrogen (fraksi mol atau volume). Jadi persamaan stoikiometri dari reaksi pembakaran LPG (campuran 70% propana dan 30% butana) dengan udara adalah:



Persamaan diatas berarti campuran 0,7 mol propana dan 0,3 mol butana direaksikan dengan 8 mol udara menghasilkan 3,5 mol CO₂, 9 mol air (H₂O) dan 30,08 mol Nitrogen (N₂).

4.2.2 Rasio Udara dan Bahan Bakar (AFR)

Rasio udara/bahan bakar (*air-fuel ratio*) dari suatu reaksi dinyatakan seperti pada persamaan berikut, dimana N adalah jumlah mol:

$$\begin{aligned} (\text{AFR}) &= \left(\frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{bahan bakar}}} \right) \\ &= \frac{8(1 + 3,76)}{(0,5 + 0,5)} \\ &= \frac{38,08}{1} = 38,08 \frac{\text{mol udara}}{\text{mol bahan bakar}} \end{aligned}$$

Dalam Hukum Avogadro *Gas-gas yang memiliki volum yang sama, pada temperatur dan tekanan yang sama, memiliki jumlah partikel yang sama pula.* Jadi perbandingan jumlah molekul gas-gas itu juga merupakan perbandingan volume gas-gas yang terlibat dalam reaksi. Perbandingan volume dari udara dan bahan bakar pada reaksi diatas dapat juga ditentukan dengan cara sebagai berikut:

- Massa jenis udara 27° C adalah 0,0012 gr/cm³.
 - Massa jenis propana adalah 0,00183 gr/cm³.
 - Massa jenis butana adalah 0,00248 gr/cm³.
 - Massa jenis LPG (50% propana dan 50% butana) 0,002024 gr/cm³.
- Massa udara = n x Mr
- $$\begin{aligned} &= 8 (\text{Mr O}_2 + 3,76 \text{ Mr N}_2) \\ &= 8 [32 + (3,76 \times 28)] \\ &= 8 (137,176) \\ &= 1.097,408 \text{ gr.} \end{aligned}$$
- Massa bahan bakar = n x Mr
- $$\begin{aligned} &= 0,5 \text{ Mr C}_3\text{H}_8 + 0,5 \text{ Mr C}_4\text{H}_{10} \\ &= [0,5(36+8)] + [0,5(48+10)] \\ &= 22 + 29 \\ &= 51 \text{ gr.} \end{aligned}$$

Berdasarkan data yang diketahui diatas maka dengan persamaan $\rho = \frac{m}{V}$ kita dapat menghitung volume menggunakan persamaan $V = \frac{m}{\rho}$.

$$- V_{\text{udara}} = \frac{m}{\rho}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1.097,408}{0,0012} \\
 &= 914.506,667 \text{ cm}^3 \\
 - \quad V_{\text{bahan bakar}} &= \frac{m}{\rho} \\
 &= \frac{51}{0,002024} \\
 &= 25.247,5247 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

Sehingga perbandingan volume antara udara dan bahan bakar.

$$\begin{aligned}
 - \quad V_{\text{udara}} &: V_{\text{bahan bakar}} \\
 914.506,667 &: 25.247,5247 \\
 36.22 &: 1
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan diatas, dapat dilihat bahwa perbandingan volume udara bahan bakar yang dihitung berdasarkan perbandingan mol nilainya adalah 38,08 : 1, sedangkan perbandingan volume udara-bahan bakar yang ditentukan berdasarkan perbandingan massa adalah 36,22 : 1. Hasil perhitungan tersebut sedikit berbeda dikarenakan pada perhitungan AFR berdasarkan perbandingan massa, parameter massa jenis udara dan bahan bakar nilainya berbeda mengikuti tekanan dan temperatur lingkungan. Dikarenakan hasil perhitungan AFR menggunakan perbandingan mol dan massa tidak terlalu berbeda, maka untuk perhitungan rasio ekuivalen (Φ) selanjutnya dapat menggunakan AFR_{stoic} 38:1.

4.2.3 Perhitungan Rasio Ekuivalen (Φ)

Contoh perhitungan rasio ekuivalen dilakukan untuk parameter yang diketahui pada tabel 4.2 no.10 untuk *combustor* quart glass tube tanpa isolasi panas Berikut merupakan parameter-parameter pada *combustor quartz glass tube* dengan dan tanpa isolasi panas :

- Debit udara (Q_{udara}) : 235.8mL/menit
- Debit bahan bakar minimum ($Q_{\text{bb min}}$) : 5.99mL/menit
- Debit bahan bakar maksimum ($Q_{\text{b max}}$) : 11.32mL/menit
- $AFR_{stoikiometri}$ (AFR_{stoic}) : 38

Dari parameter yang diketahui diatas, maka dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut :

$$- \quad AFR_{\text{aktual}} (AFR_{\text{act}})$$

$$\begin{aligned}
 AFR_{act} &= \frac{Q_{udr}}{Q_{bb}} \\
 &= \frac{235.8 \text{ mL/menit}}{5.99 \text{ mL/menit}} \\
 &= 39.36
 \end{aligned}$$

– Rasio Ekuivalen

$$\begin{aligned}
 \Phi &= \frac{AFR_{stoic}}{AFR_{act}} \\
 &= \frac{38.08}{39.36} \\
 &= 0.97
 \end{aligned}$$

– $AFR_{aktual} (AFR_{act})$

$$\begin{aligned}
 AFR_{act} &= \frac{Q_{udr}}{Q_{bb}} \\
 &= \frac{235.8 \text{ mL/menit}}{11.32 \text{ mL/menit}} \\
 &= 20.83
 \end{aligned}$$

– Rasio Ekuivalen

$$\begin{aligned}
 \Phi &= \frac{AFR_{stoic}}{AFR_{act}} \\
 &= \frac{38.08}{20.83} \\
 &= 1.83
 \end{aligned}$$

4.3 Pembahasan

4.3.1 Visualisasi Nyala Api

Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan bahwa *micro power generator* adalah alat yang berfungsi mengkonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi termal pada *combustor* dan selanjutnya dirubah termal menjadi energi listrik, sehingga semakin besar energi kimia yang bisa dirubah menjadi energi termal pada *combustor* maka semakin besar pula energi listrik yang didapat nanti. Untuk menghasilkan energi termal sebesar mungkin pada *meso-scale combustor*, maka pada penelitian ini *meso-scale combustor* menggunakan *material non-homogen*. Hal tersebut dimaksudkan agar dapat menghasilkan api yang lebih stabil dan *flammability limit* yang lebih luas pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi karena menggunakan material yang memiliki konduktivitas termal yang berbeda-beda. Diharapkan *heat loss* pada *combustor* menjadi seminimal mungkin, sedangkan *heat recirculation* menjadi lebih besar.

Gambar 4.1 - 4.6 menunjukkan visualisasi api dalam *meso-scale combustor* dengan variasi penggunaan material *non-homogen*, untuk rasio ekuivalen $\Phi = 1$ dan kecepatan

total reaktan sebesar 14.5 cm/s, 38.9 cm/s dan 53.4 cm/s. Dilihat dari kiri ke kanan secara berurutan adalah visualisasi nyala api dalam *combustor* dengan material *quartz glass tube*, *stainless steel-quartz glass tube* dan tembaga-*quartz glass tube*. Visualisasi dilakukan pada *combustor* tanpa isolasi dan dengan isolasi panas.



Gambar 4.1 Visualisasi api dalam *combustor* tanpa *isolator* pada $V_{tot} = 14.5$ cm/s dan $\Phi = 1$.



Gambar 4.2 Visualisasi api dalam *combustor* dengan *isolator* pada $V_{tot} = 14.5$ cm/s dan $\Phi = 1$.



Gambar 4.3 Visualisasi api dalam *combustor* tanpa *isolator* pada $V_{tot} = 38.9$ cm/s dan $\Phi = 1$.



Gambar 4.4 Visualisasi api dalam *combustor* dengan *isolator* pada $V_{tot} = 38.9$ cm/s dan $\Phi = 1$.



Gambar 4.5 Visualisasi api dalam *combustor* tanpa *isolator* pada $V_{tot} = 53.4$ cm/s dan $\Phi = 1$.

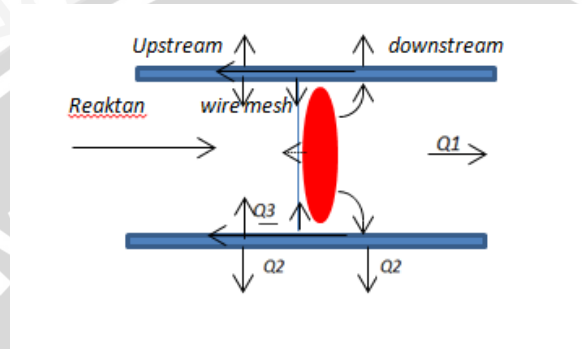


Gambar 4.6 Visualisasi api dalam *combustor* dengan *isolator* pada $V_{\text{tot}} = 53.4 \text{ cm/s}$ dan $\Phi = 1$.

Gambar 4.1 - 4.6 menunjukkan perubahan bentuk nyala api didalam *meso-scale combustor* yang terjadi selama proses pembakaran dengan variasi material *non-homogen* pada dinding *combustor* dengan menggunakan isolator maupun tidak dan pada nilai rasio ekuivalen $\Phi = 1$. Dari visualisasi diatas dapat dilihat untuk setiap kecepatan total reaktan V_{tot} warna api hampir sama yaitu biru agak gelap, tetapi terlihat makin terang pada V_{tot} yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan semakin tinggi V_{tot} berarti jumlah bahan bakar yang dibakar dalam *combustor* semakin besar, sehingga kalor dan temperatur yang dihasilkan dari pembakaran semakin tinggi pula yang menghasilkan warna api lebih terang. Dapat dilihat juga semakin tinggi V_{tot} maka luas penampang api semakin lebar. Hal ini dikarenakan semakin tinggi V_{tot} maka kalor dan temperatur yang dihasilkan dari pembakaran semakin tinggi pula dan temperatur yang tinggi ini dapat mengurangi terjadinya *radical quenching*. Sehingga pemadaman api disekitar dinding karena *radical quenching* berkurang, jarak antara api dan dinding *combustor* menjadi lebih kecil dan luas penampang api menjadi lebih lebar.

Sedangkan pada V_{tot} yang rendah dapat dilihat pada Gambar 4.1 bahwa luas penampang api pada *combustor* dengan material *quartz glass tube* terlihat lebih kecil bila dibandingkan dengan *combustor* yang menggunakan material *stainless steel-quartz glass tube* dan *tembaga-quartz glass tube*. Hal ini dikarenakan *quartz glass tube* mempunyai konduktivitas termal yang lebih rendah bila dibandingkan dengan konduktivitas termal *stainless steel* dan tembaga. Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.7, sejumlah kalor (Q_1) dikonveksikan dari nyala api ke dinding *combustor*. Selanjutnya sebagian dari kalor ini (Q_2) dikonveksikan ke lingkungan dan merupakan fraksi kalor yang hilang. Kehilangan kalor ini mengakibatkan api menjadi tidak stabil, dan bila terjadi dalam jumlah yang cukup besar akan mengakibatkan api padam. Dari dinding *combustor* sebagian kalor dikonduksikan kearah *wire mesh* dan kearah *upstream* dinding *combustor* (Q_3), yang berfungsi untuk pemanasan awal reaktan. Bagian ini mendorong terjadinya pembakaran yang stabil. Karena *quartz glass tube* memiliki konduktivitas termal yang rendah,

perpindahan kalor ke arah *upstream* yang terjadi tidak begitu besar. Hal ini menyebabkan kalor yang menuju reaktan untuk proses *preheating* tidak begitu besar, sehingga temperatur reaktan ketika memasuki daerah pembakaran belum tinggi dan pembakaran terjadi pada kecepatan yang lebih rendah. Dalam kondisi ini *radical quenching* menjadi semakin dominan, sehingga jarak antara api dan dinding *combustor* semakin besar atau luas penampang apinya semakin kecil. Selain itu terdapat pula sejumlah kalor yang terkandung dalam aliran gas hasil pembakaran (Q_1) yang dibuang ke lingkungan.



Gambar 4.7 Skema perpindahan panas (*heat loss* dan *heat recirculation*) pada *meso-scale combustor*.

Bila dibandingkan dengan visualisasi nyala api dalam *combustor* dengan *isolator* saat V_{tot} yang rendah pada Gambar 4.2 dapat dilihat perbedaan yang tidak signifikan terhadap *combustor* tanpa *isolator*. Warna dan luas penampang api hampir sama dengan warna biru agak gelap, tetapi warna pada *combustor* dengan menggunakan isolator sedikit lebih terang dan luas penampang api sedikit lebih lebar. Hal ini disebabkan karena pada *combustor* dengan isolasi, perpindahan kalor dari dinding *combustor* ke lingkungan lebih kecil sedangkan fraksi panas yang diresirkulasikan ke arah *upstream* untuk pemanasan awal bahan bakar lebih besar. Hal tersebut dikarenakan adanya isolator yang memiliki sifat sulit untuk menghantarkan kalor ke lingkungan sehingga *heat loss* yang terjadi berkurang dan menghasilkan temperatur pembakaran yang lebih tinggi. Hal ini mengakibatkan warna api lebih terang dari pada api dalam *combustor* tanpa isolator.

Dapat dilihat juga pada Gambar 4.3 dan 4.5 bahwa luas penampang api semakin besar untuk debit reaktan yang semakin besar. Hal ini dikarenakan semakin tinggi debit reaktan, maka daerah reaksi pembakarannya akan semakin luas. Temperatur pembakarannya juga semakin tinggi dan *radical quenching* semakin berkurang. Sehingga luas penampang apinya menjadi lebih besar. Bila dibandingkan pada Gambar 4.4 dan 4.6 dapat dilihat bahwa ada sedikit perbedaan dari warna api yang sedikit lebih terang

dibanding warna api pada Gambar 4.3 dan 4.5. Karena *combustor* pada Gambar 4.4 dan 4.6 dilapisi *glass wool* yang mengurangi kehilangan kalor dari dinding *combustor* ke lingkungan secara konveksi. Hal ini menghasilkan temperatur pembakaran yang lebih tinggi yang mengakibatkan warna api lebih terang dari pada *combustor* tanpa isolator.

Gambar 4.8 - 4.13 menunjukkan visualisasi nyala api dalam *combustor* dengan variasi dinding *combustor* dan rasio ekuivalen pada kecepatan reaktan $V_{tot} \approx 38$.



Gambar 4.8 Visualisasi api dalam *combustor* tanpa *isolator* pada rasio ekuivalen $(\Phi) = 0.72$.



Gambar 4.9 Visualisasi api dalam *combustor* dengan *isolator* pada rasio ekuivalen $(\Phi) = 0.72$.



Gambar 4.10 Visualisasi api dalam *combustor* tanpa *isolator* pada rasio ekuivalen $(\Phi) = 1$.



Gambar 4.11 Visualisasi api dalam *combustor* dengan *isolator* pada rasio ekuivalen $(\Phi) = 1$.



Gambar 4.12 Visualisasi api dalam *combustor* tanpa *isolator* pada rasio ekuivalen (Φ) = 1.26.



Gambar 4.13 Visualisasi api dalam *combustor* dengan *isolator* pada rasio ekuivalen (Φ) = 1.26.

Dari hasil visualisasi api di atas dapat diketahui bahwa warna api hampir sama untuk $\Phi = 0.7177$ dan $\Phi = 1$ karena bahan bakar dapat terbakar sempurna pada saat reaksi pembakaran terjadi. Secara keseluruhan warna api untuk $\Phi = 1$ terlihat sedikit lebih terang daripada warna api untuk $\Phi = 0.7747$. Hal ini dikarenakan dalam penelitian ini variasi rasio ekuivalen diperoleh dengan memvariasikan debit bahan bakar pada debit udara yang konstan. Pada jumlah debit udara yang sama, debit bahan bakar pada $\Phi = 1$ lebih banyak dari pada bahan bakar pada $\Phi = 0.7747$ sehingga temperatur pada $\Phi = 1$ lebih tinggi.

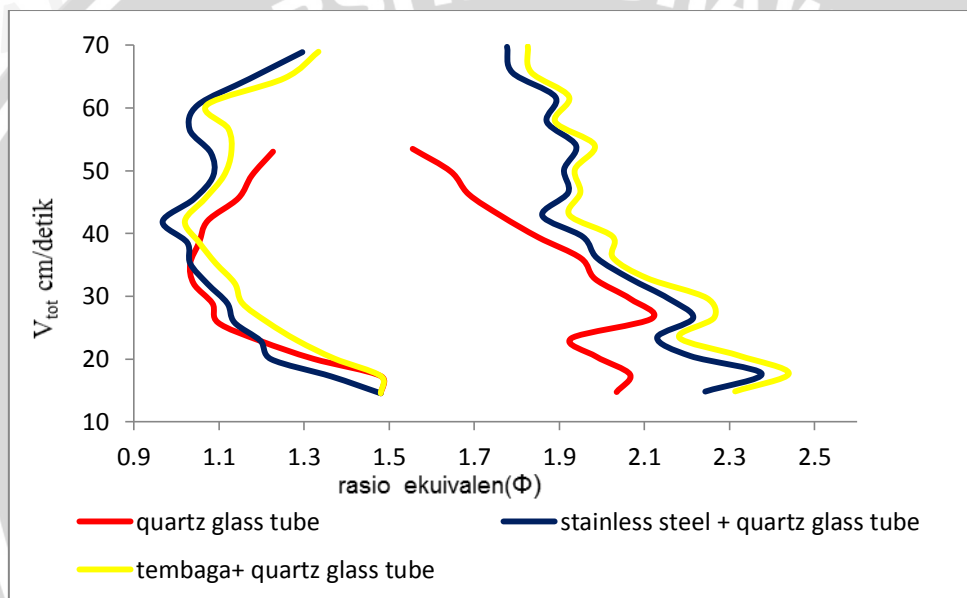
Untuk $\Phi = 1.2614$ api berwarna biru kehijauan dan luas penampang api menjadi lebih kecil. Pada $\Phi = 1.2614$ kecepatan pembakaran menjadi lebih rendah, dikarenakan kurangnya udara sebagai oksidator sehingga tidak semua bahan bakar dapat terbakar. Hal tersebut mengakibatkan terdapat unsur karbon monoksida dan karbon didalam gas hasil pembakarannya dimana partikel-partikel dari karbon tersebut menghasilkan pancaran warna yang berwarna biru kehijauan dan terang pada nyala api.

Pada rasio ekuivalen (Φ) = 1.2614 nyala api dalam *combustor* dengan dinding yang terbuat dari tembaga-*quartz glass tube* memiliki luas penampang yang paling besar dan lebih terang dibandingkan *combustor* dengan material *stainless steel-quartz glass tube* dan *quartz glass tube*. Hal ini karena jumlah kalor berpindah secara konduksi dari *downstream* (dinding *quartz glass tube*) kearah *upstream* (dinding tembaga) dan *wire mesh* lebih besar. Karena tembaga memiliki konduktivitas termal yang tinggi sehingga mengakibatkan perpindahan kalor yang lebih besar. Dimana kalor tersebut kemudian

dikonveksikan ke reaktan yang akan memasuki daerah pembakaran dan berfungsi sebagai kalor pemansan awal reaktan. Karena reaktan memiliki lebih banyak kalor dan temperatur api juga tinggi mengakibatkan kecepatan reaksi pembakaran dalam *combustor* ini lebih tinggi dari *combustor* yang lainnya. Sehingga efek *radical quenching* dalam *combustor* ini lebih kecil, sehingga jarak antara api dan dinding *combustor* semakin sempit dan luas penampang apinya semakin besar.

4.3.2 Diagram kestabilan api dan grafik *flammability limit*

Gambar 4.14 menunjukkan diagram kestabilan api dan grafik *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan variasi dinding material *combustor* non-homogen.



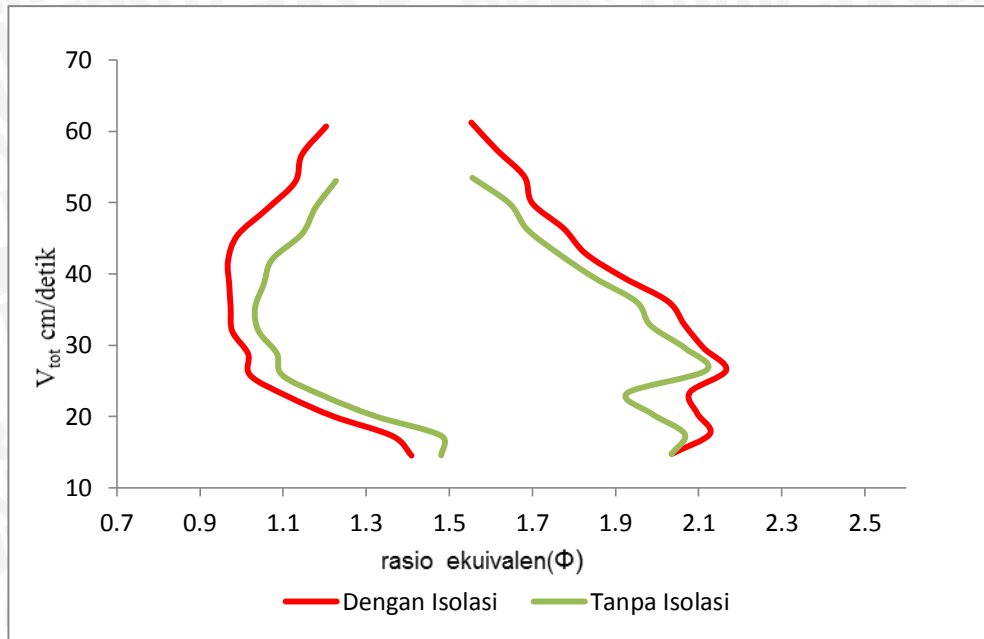
Gambar 4.14 Diagram kestabilan api dan *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan variasi dinding material *combustor* non-homogen tanpa menggunakan isolator.

Dari grafik diatas dapat diketahui besarnya kecepatan reaktan V_{tot} maksimal dimana api dapat menyala di dalam masing-masing jenis *combustor*. *Combustor* dengan material *quartz glass tube* memiliki V_{tot} maksimum yang paling kecil dan *flammability limit* paling sempit dibanding dengan *combustor* tembaga-*quartz glass tube* dan *stainless steel-quartz glass tube* yaitu 53.48 cm/detik, sedangkan V_{tot} maksimum pada *combustor* tembaga-*quartz glass tube* dan *stainless steel-quartz glass tube* adalah 69.72 cm/detik. Hal ini menunjukkan kecepatan pembakaran dalam *combustor stainless steel-quartz glass tube* dan tembaga-*quartz glass tube* lebih tinggi bila dibandingkan dengan kecepatan

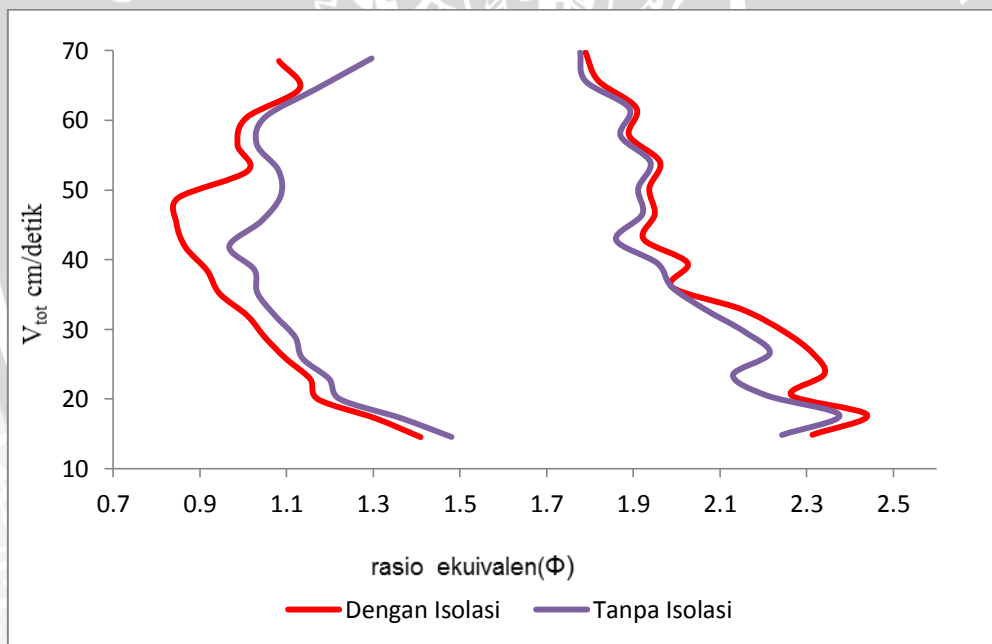
pembakaran dalam *combustor quartz glass tube*. Sehingga api dapat stabil pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi. Api dapat stabil dalam *combustor* bila kecepatan reaktan dan kecepatan perambatan api relatif sama. Tingginya kecepatan pembakaran dalam *combustor stainless steel-quartz glass tube* dan tembaga-*quartz glass tube* mungkin disebabkan karena pada kedua jenis *combustor* ini temperatur reaktan sudah cukup tinggi ketika memasuki ruang bakar, karena adanya pemanasan awal dari nyala api melalui konduksi panas melalui dinding *combustor* yang konduktivitas termalnya tinggi. Adanya tambahan kalor pada reaktan menghasilkan temperatur pembakaran yang lebih tinggi. Dimana kecepatan pembakaran merupakan fungsi dari temperatur pembakaran. Semakin tinggi temperatur pembakaran, kecepatan pembakaran juga semakin tinggi dan api dapat stabil pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi.

Pada *combustor quartz glass tube* batas mampu nyala terlihat lebih sempit dibandingkan dengan batas mampu nyala dalam *combustor* yang terbuat dari material tembaga-*quartz glass tube* dan *stainless steel-quartz glass tube*. Seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya mengenai visualisasi nyala api, fraksi kalor yang diresirkulasikan untuk pemanasan awal reaktan melalui konduksi pada dinding *combustor* lebih kecil pada *combustor quartz glass tube*. Hal tersebut dikarenakan konduktivitas termal *quartz glass tube* yang rendah. Sehingga temperatur reaktan pada *combustor* ini lebih rendah dari pada kedua jenis *combustor* yang lain. Sehingga temperatur dan kecepatan pembakarannya lebih rendah dibandingkan dengan *combustor* yang lainnya. Hal ini juga akan mempengaruhi stabilitas api dan luasnya *flammability limit*. Temperatur pembakaran yang lebih rendah mempunyai kestabilan api yang kurang baik dan *flammability limit* yang lebih sempit.

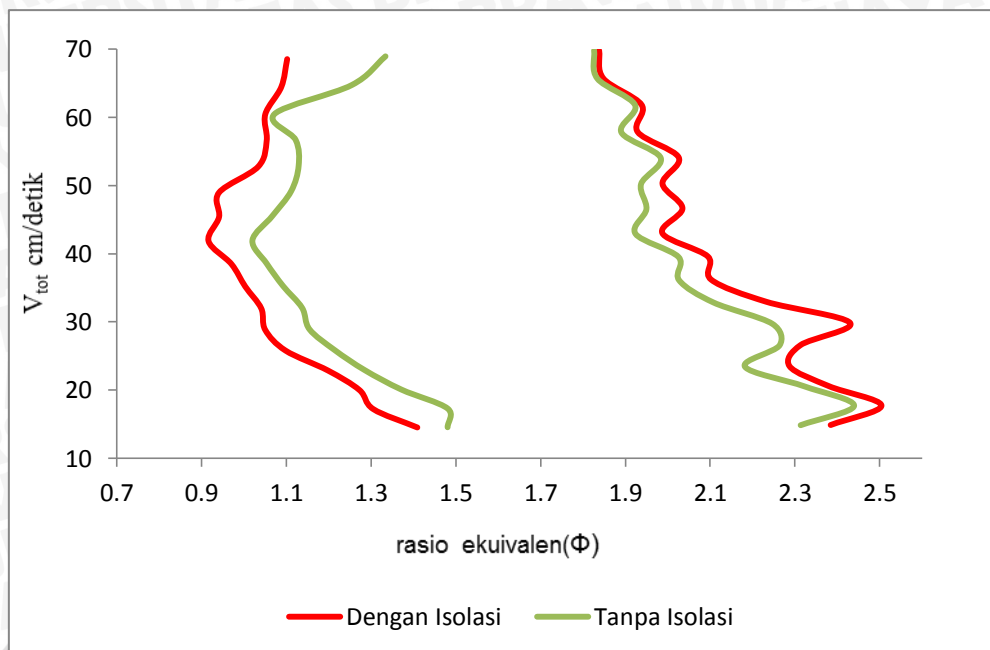
Gambar 4.15 – 4.17 menunjukkan diagram kestabilan api dan *flammability limit* dalam *combustor* dengan isolasi dan tanpa isolasi panas, berturut-turut untuk *quartz glass tube*, *stainless steel-quartz glass tube*, dan tembaga-*quartz glass tube*.



Gambar 4.15 Diagram kestabilan api dan *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan dinding material *combustor quartz glass tube*.



Gambar 4.16 Diagram kestabilan api dan *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan dinding material *combustor stainless steel-quartz glass tube*.



Gambar 4.17 Diagram kestabilan api dan *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan dinding material *combustor* tembaga-quartz glass tube.

Grafik pada Gambar 4.15 – 4.17 menunjukkan bahwa *combustor* yang menggunakan isolator memiliki *flammability limit* yang lebih luas dibanding dengan *combustor* tanpa isolator. Hal ini disebabkan pada *combustor* yang menggunakan isolasi kalor yang berpindah secara konveksi dari dinding *combustor* ke arah lingkungan menjadi sedikit karena adanya isolasi yang menghambat perpindahan kalor ke lingkungan. Sehingga kalor yang digunakan untuk pemanasan awal reaktan menjadi lebih besar dan temperatur reaktan menjadi lebih tinggi. Jika temperatur awal reaktan tinggi maka kecepatan pembakaran menjadi lebih cepat, hal ini menyebabkan daerah *flammability limit* menjadi lebih luas dari pada *combustor* tanpa menggunakan isolasi.