

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1 Data Hasil Penelitian

Tabel 4.1 sampai dengan tabel 4.4 adalah data hasil penelitian tentang debit udara minimum dan maksimum dimana api stabil di dalam *meso-scale combustor* untuk debit bahan bakar tertentu. Dalam grafik *flammability limit*, setiap debit bahan bakar memiliki batas rasio ekuivalen (Φ) minimal dan batas rasio ekuivalen (Φ) maksimal dimana api stabil di dalam *combustor*. Batas rasio ekuivalen (Φ) minimal adalah kondisi dimana api masih dapat distabilkan didalam *combustor* pada debit udara maksimal (*lower limit*), sedangkan batas rasio ekuivalen (Φ) maksimal adalah kondisi dimana api masih dapat distabilkan di dalam *combustor* pada debit udara minimal (*upper limit*),

Tabel 4.1 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan *single wire mesh*

No.	Q _{bb} (mL/menit)	Q _{udara} (mL/menit)	Ket.
1	8,75	180	Upper Limit
		230	Lower limit
2	10	210	Upper Limit
		270	Lower limit
3	12,5	250	Upper Limit
		350	Lower limit
4	15	290	Upper Limit
		450	Lower limit
5	17,5	330	Upper Limit
		480	Lower limit
6	20	370	Upper Limit
		510	Lower limit
7	22,5	410	Upper Limit
		530	Lower limit
8	25	450	Upper Limit
		550	-
9	27,5	500	Upper Limit
		550	-

Tabel 4.2 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan *double wire mesh* pada jarak antar *wire mesh* 3 mm.

No.	Q _{bb} (mL/menit)	Q _{udara} (mL/menit)	Ket.	No.	Q _{bb} (mL/menit)	Q _{udara} (mL/menit)	Ket.
1	8,75	220	Upper Limit	6	20	360	Upper Limit
		250	Lower limit			550	Lower limit
2	10	220	Upper Limit	7	22,5	420	Upper Limit
		300	Lower limit			550	-
3	12,5	260	Upper Limit	8	25	450	Upper Limit
		400	Lower limit			550	-
4	15	300	Upper Limit	9	27,5	490	Upper Limit
		450	Lower limit			550	-
5	17,5	340	Upper Limit	10	30	540	Upper Limit
		520	Lower limit			550	-

Tabel 4.3 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan *double wire mesh* pada jarak antar *wire mesh* 4 mm.

No.	Q _{bb} (mL/menit)	Q _{udara} (mL/menit)	Ket.	No.	Q _{bb} (mL/menit)	Q _{udara} (mL/menit)	Ket.
1	7,5	180	Upper Limit	6	20	380	Upper Limit
		210	Lower limit			550	Lower limit
2	10	210	Upper Limit	7	22,5	420	Upper Limit
		310	Lower limit			550	-
3	12,5	250	Upper Limit	8	25	450	Upper Limit
		410	Lower limit			550	-
4	15	290	Upper Limit	9	27,5	490	Upper Limit
		500	Lower limit			550	-
5	17,5	330	Upper Limit				
		540	Lower limit				

Tabel 4.4 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan *double wire mesh* pada jarak antar *wire mesh* 5 mm.

No.	Q_{bb} (mL/menit)	Q_{udara} (mL/menit)	Ket.	No.	Q_{bb} (mL/menit)	Q_{udara} (mL/menit)	Ket.
1	7,5	170	Upper Limit	6	20	370	Upper Limit
		220	Lower limit			550	-
2	10	220	Upper Limit	7	22,5	410	Upper Limit
		330	Lower limit			550	-
3	12,5	240	Upper Limit	8	25	460	Upper Limit
		450	Lower limit			550	-
4	15	300	Upper Limit	9	27,5	490	Upper Limit
		510	Lower limit			550	-
5	17,5	320	Upper Limit	10	30	530	Upper Limit
		550	-			550	-

Skala pada *flow meter* udara yang digunakan dalam penelitian ini hanya mampu mengukur debit hingga 500 mL/menit, tetapi apabila pengatur debit udara pada *flow meter* dimaksimalkan maka *flow meter* dapat mengukur debit hingga 550 mL/menit. Dikarenakan *flow meter* udara yang digunakan hanya mampu membaca debit maksimal sampai 550 mL/menit, maka sesuai data pada tabel 4.1, 4.2, 4.3, dan 4.4 terdapat debit bahan bakar yang *lower limit*-nya tidak dapat ditentukan.

Pada *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 3 mm, saat debit bahan bakar 22,5 mL/menit, debit udara (Q_{udara}) sudah menunjukkan angka 550 mL/menit. Sedangkan pada *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 4 mm, pada saat debit bahan bakar 22,5 mL/menit, debit udara (Q_{udara}) sudah menunjukkan angka 550 mL/menit, dan pada *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 5 mm, saat debit bahan bakar 20 mL/menit, debit udara (Q_{udara}) sudah menunjukkan angka 550 mL/menit. Saat debit udara sudah mencapai angka 550 mL/menit (maksimal), api sebenarnya masih dapat menyala dan stabil didalam *combustor*. Tetapi karena *flow meter* udara hanya mampu membaca debit hingga 550 mL/menit, maka nantinya akan terdapat debit bahan bakar yang *lower limit* nya tidak dapat ditentukan. *Lower limit* adalah daerah dimana api akan mengalami *blow off* namun masih dapat distabilkan didalam *combustor*, jadi daerah dibagian kiri *lower limit* adalah daerah dimana api sudah tidak dapat distabilkan lagi didalam *combustor*. *Upper limit* adalah daerah dimana api akan mengalami *flashback* namun masih dapat

distabilkan didalam *combustor*. Sedangkan daerah dibagian kanan *upper limit* adalah daerah dimana api mengalami *flashback*.

4.1.2 Perhitungan

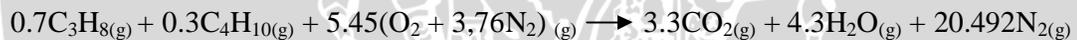
1. Pembakaran Stoikiometri

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 kandungan 21 oksigen % dan 79 % nitrogen (Wardana:2008).

Untuk menghitung AFR (*Air fuel ratio*) stoikiometri maka sebelumnya kita harus menyeimbangkan persamaan kimia dari reaktan dan produk sebagai berikut:

- Bahan bakar LPG yang terdiri dari 70% kandungan propana (C_3H_8) dan 30% kandungan butana (C_4H_{10}) (Wardana:2008).
- *Oksidizer* yaitu udara, yang terdiri dari 79% kandungan nitrogen (N_2) dan 21% kandungan oksigen (O_2).

Sehingga didapat persamaan reaksi kimia sebagai berikut:



Persamaan stoikiometri dari reaksi yang terjadi antara LPG (0,7% kandungan propana dan 0,3% kandungan butana) dengan 5,45 mol udara menghasilkan 3,3 mol karbondioksida, 4,3 mol air, dan 20,492 mol nitrogen.

Dari persamaan tersebut dapat dihitung AFR stoikiometri antara udara dengan LPG:

$$\begin{aligned} AFR &= \frac{N_{air}}{N_{fuel}} \\ &= \frac{5,45(1 + 3,76)}{(0,7 + 0,3)} \\ &= \frac{25,942}{1} = 25,942 \frac{mol\ udara}{mol\ bahan\ bakar} \end{aligned}$$

Dalam Hukum Avogadro berlaku pada suhu dan tekanan yang tetap, semua gas dengan volume tertentu akan mengandung jumlah molekul yang sama pula. Jadi perbandingan volume gas-gas itu juga merupakan perbandingan jumlah molekul yang terlibat dalam reaksi. Perbandingan volume dari reaktan pada reaksi diatas dapat juga ditentukan dengan cara sebagai berikut:

- Massa jenis udara pada temperatur 27° C dan tekanan 0,1 Mpa adalah 0,0012 gr/cm³.
- Massa jenis propana pada temperatur 29° C dan tekanan 0,1 Mpa adalah 0,00183 gr/cm³.
- Massa jenis butana pada temperatur 29° C dan tekanan 0,1 Mpa adalah 0,00248 gr/cm³.
- Massa jenis LPG (70% kandungan propana dan 30% kandungan butana) 0,002024 gr/cm³.

- Massa udara = $n \times Mr$

$$= 5,45 (Mr O_2 + 3,76 Mr N_2)$$

$$= 5,45 [32 + (3,76 \times 28)]$$

$$= 5,45 (137,176)$$

$$= 748,176 \text{ gr.}$$

- Massa bahan bakar = $n \times Mr$

$$= 0.7 Mr C_3H_8 + 0.3 Mr C_4H_{10}$$

$$= [0,7(36+8)]+[0,3(48+10)]$$

$$= 30,8 + 17,4$$

$$= 48,2 \text{ gr.}$$

Berdasarkan persamaan $\rho = \frac{m}{V}$, sehingga untuk mencari volume maka didapat

persamaan $V = \frac{m}{\rho}$.

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

$$= \frac{748,176}{0,0012}$$

$$= 623.480 \text{ cm}^3$$

- $V_{\text{bahan bakar}} = \frac{m}{\rho}$

$$= \frac{48,2}{0,002024}$$

$$= 23.814,23 \text{ cm}^3$$

Sehingga perbandingan volume antara udara dan bahan bakar.

- $V_{\text{udara}} : V_{\text{bahan bakar}}$

$$623.480 : 23.814,23$$

$$26,18 : 1$$

Dari hasil perhitungan diatas, dapat dilihat bahwa AFR hasil perbandingan mol nilainya adalah 25,942 : 1 sedangkan AFR hasil perbandingan volume yang ditentukan dari massa molekul dan densitasnya adalah 26,18 : 1. Hasil perhitungan tersebut sedikit berbeda dikarenakan pada perhitungan AFR menggunakan perbandingan volume, parameter massa jenis udara dan bahan bakar nilainya berbeda mengikuti tekanan dan temperatur lingkungan. Dikarenakan hasil perhitungan AFR menggunakan perbandingan mol dan volume tidak terlalu berbeda, maka untuk perhitungan rasio ekuivalen (Φ) selanjutnya dapat menggunakan AFR_{stoic} 25,942:1.

2. Perhitungan Ekuivalen Rasio

Parameter yang diketahui pada salah satu data hasil penelitian untuk *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 3 mm adalah sebagai berikut:

- Debit bahan bakar (Q_{bb}) = 8,75 mL/menit
- Debit udara (Q_{udara}) = 180 mL/menit
- AFR stoikiometri (AFR_{stoic}) = 25,942

Dari parameter-parameter yang diketahui di atas, maka dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut :

- AFR aktual (AFR_{act})

$$\begin{aligned} AFR_{act} &= \frac{Q_{udr}}{Q_{bb}} \\ &= \frac{180 \text{ mL/menit}}{8,75 \text{ mL/menit}} \\ &= 20,57 \end{aligned}$$

- Rasio ekuivalen (Φ)

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{AFR_{stoic}}{AFR_{act}} \\ &= \frac{25,94}{20,57} \\ &= 1,26 \end{aligned}$$

Apabila rasio ekuivalen lebih dari 1 ($\Phi > 1$), maka campuran dinyatakan kaya bahan bakar. Dengan menggunakan cara perhitungan diatas maka didapat hasil sebagai berikut.

Tabel 4.5 Rasio ekuivalen pada *lower* dan *upper limit* dalam *combustor* dengan *single wire mesh*.

No.	Q _{bb} (mL/menit)	Q _{udara} (mL/menit)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
1	8,75	230	180	0,98	1,26
2	10	210	270	0,96	1,23
3	12,5	350	250	0,92	1,29
4	15	430	290	0,9	1,34
5	17,5	480	330	0,94	1,37
6	20	530	370	0,97	1,4
7	22,5	550	410	1,02	1,42
8	25	>550	450	-	1,44
9	27,5	>550	500	-	1,42

Tabel 4.6 Rasio ekuivalen pada *lower* dan *upper limit* dalam *combustor* dengan *double wire mesh* (jarak antar *wire mesh* 3 mm).

No.	Q _{bb} (mL/menit)	Q _{udara} (mL/menit)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
1	10	300	220	0,86	1,17
2	12,5	400	260	0,8	1,24
3	15	450	300	0,86	1,29
4	17,5	340	530	0,85	1,33
5	20	550	360	0,9	1,43
6	22,5	>550	420	-	1,38
7	25	>550	450	-	1,43
8	27,5	>550	490	-	1,45
9	30	>550	540	-	1,43

Tabel 4.7 Rasio ekuivalen pada *lower* dan *upper limit* dalam *combustor* dengan *double wire mesh* (jarak antar *wire mesh* 4 mm).

No.	Q _{bb} (mL/menit)	Q _{udara} (mL/menit)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
1	7,5	210	180	0,92	1,07
2	10	310	210	0,83	1,23
3	12,5	410	250	0,78	1,29
4	15	500	290	0,77	1,33
5	17,5	540	330	0,83	1,37
6	20	>550	380	0,87	1,36
7	22,5	>550	420	-	1,38
8	25	>550	450	-	1,43
9	27,5	>550	490	-	1,45

Tabel 4.8 Rasio ekuivalen pada *lower* dan *upper limit* dalam *combustor* dengan *double wire mesh* (jarak antar *wire mesh* 5 mm).

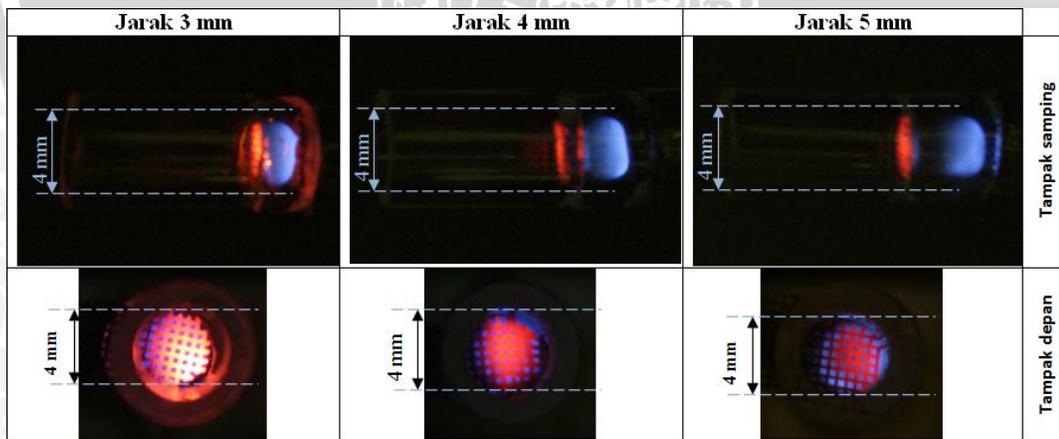
No.	Q _{bb} (mL/menit)	Q _{udara} (mL/menit)		Φ	
		Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
1	7,5	220	170	0,8	1,14
2	10	330	220	0,78	1,17
3	12,5	450	240	0,71	1,34
4	15	510	300	0,76	1,29
5	17,5	550	320	0,76	1,41
6	20	>550	370	-	1,4
7	22,5	>550	410	-	1,42
8	25	>550	460	-	1,4
9	27,5	>550	490	-	1,45
10	30	>550	530	-	1,46

Seperti yang diutarakan sebelumnya, karena *flow meter* udara hanya mampu membaca debit maksimal hingga 550 mL/menit. Maka pada tabel diatas terdapat data dimana *lower limit* pada *meso-scale combustor* tidak dapat ditentukan dengan tepat.

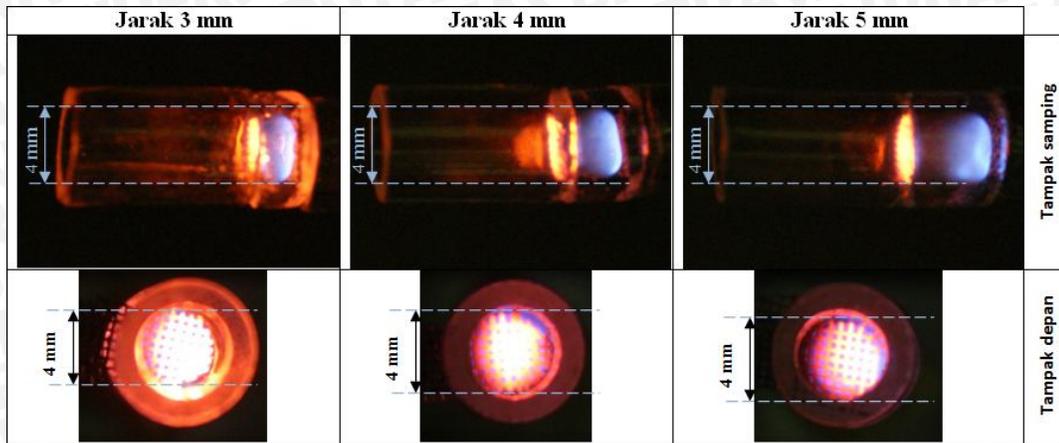
4.2 Pembahasan

4.2.1 Visualisasi Api

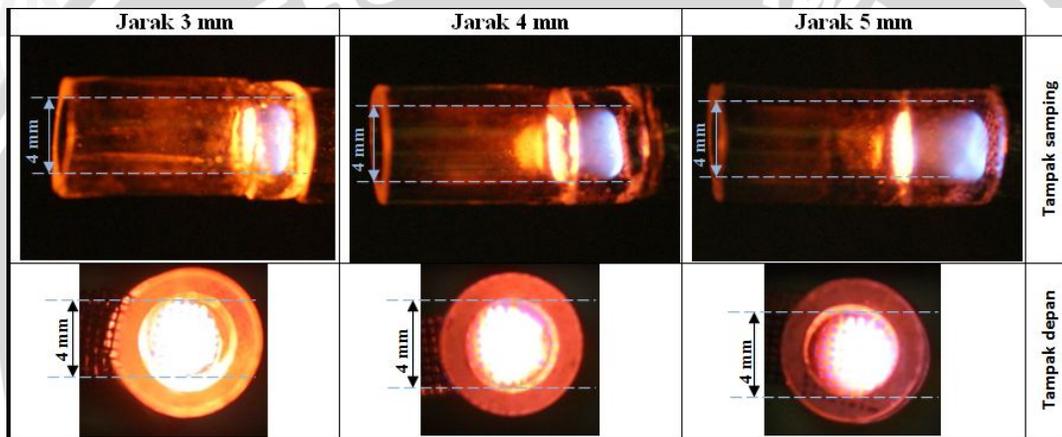
Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3 merupakan visualisasi nyala api pada *meso-scale combustor* dengan variasi jarak antar *wire mesh* pada kondisi stoikiometri ($\Phi=1$), dengan variasi debit bahan bakar 12,5, 20, dan 25 mL/menit.



Gambar 4.1 Visualisasi nyala api pada debit bahan bakar 12,5 mL/menit.



Gambar 4.2 Visualisasi nyala api pada debit bahan bakar 20 mL/menit.



Gambar 4.3 Visualisasi nyala api pada debit bahan bakar 25 mL/menit.

Pada pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan menggunakan 2 *wire mesh*, hasil yang diperoleh api dapat distabilkan pada *downstream wire mesh* pertama atau *wire mesh* kedua. Pada latar belakang sebelumnya telah dijelaskan bahwa *micro power generator* adalah alat yang berfungsi mengkonversi energi termal pada *meso-scale combustor* menjadi energi listrik, sehingga semakin besar energi termal yang dihasilkan *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 *wire mesh* pertama sebagai *flame holder*. Hal tersebut dimaksudkan agar *wire mesh* kedua dapat menahan terjadinya *blow off*, sehingga debit udara yang dialirkan pada *combustor* pada tiap penambahan bakar dapat lebih besar dibanding menggunakan *wire mesh* kedua sebagai *flame holder*. Apabila debit udara yang dialirkan kedalam *combustor* lebih besar, maka akan lebih

banyak pula bahan bakar yang dapat terbakar sehingga energi termal yang dihasilkan juga akan lebih besar pula.

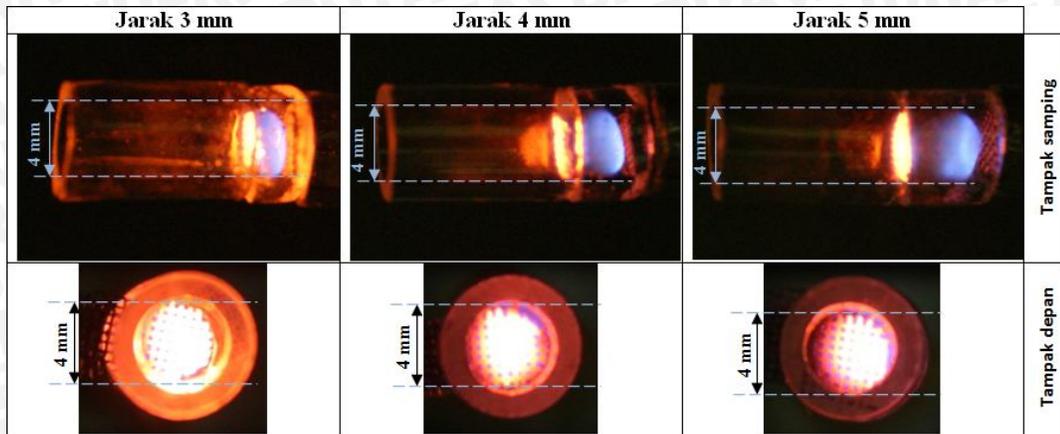
Dari visualisasi diatas dapat dilihat bahwa nyala api dalam *combustor* pada kondisi $\Phi = 1$ berwarna biru gelap. Warna api bahan bakar hidrokarbon hasil dari pembakaran sempurna umumnya berwarna biru yang menandakan bahwa proses pembakaran didominasi ion CH (Wardana:2008). Panjang api dalam *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 3 mm lebih kecil daripada dalam *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 4 mm dan 5 mm. Hal tersebut dikarenakan semakin kecil jarak antar *wire mesh*, maka api pada *downstream wire mesh* pertama akan menyentuh *wire mesh* kedua, sehingga nyala api yang terbentuk cenderung lebih kecil dibanding pada *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 4 mm dan 5 mm.

Sedangkan semakin tinggi debit bahan bakar, maka warna nyala api pada kondisi $\Phi = 1$ terlihat semakin terang. Hal tersebut dikarenakan semakin tinggi debit bahan bakar maka energi dan temperaturnya pun menjadi tinggi dan menyebabkan nyala api menjadi lebih terang. Selain itu semakin tinggi debit bahan bakar maka api juga semakin panjang. Hal tersebut dikarenakan kecepatan bahan bakar menjadi lebih besar dan daerah reaksinya pun menjadi lebih luas. Karena daerah reaksi menjadi luas maka api yang terbentukpun terlihat lebih panjang.

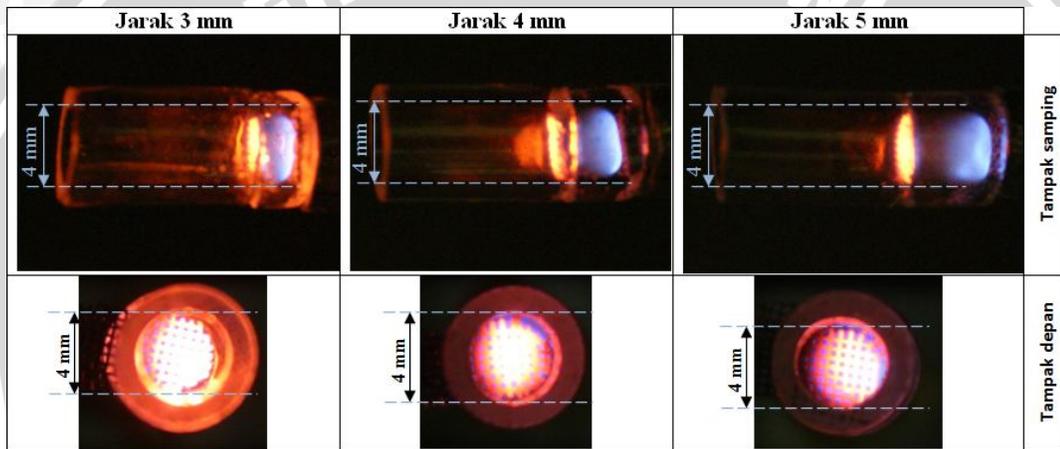
Pada debit bahan bakar yang sama, semakin kecil jarak antar *wire mesh* maka *wire mesh* kedua terlihat semakin merah menyala. Warna merah pada *wire mesh* kedua bisa disebabkan karena *mesh* kedua menyerap kalor dari api pada *downstream wire mesh* pertama. Sehingga temperatur *wire mesh* kedua menjadi tinggi dan berwarna merah.

Sedangkan pada kondisi $\Phi = 1$, semakin besar debit bahan bakar, maka *wire mesh* kedua terlihat semakin terang. Hal tersebut dikarenakan semakin tinggi debit bahan bakar, maka semakin banyak pula kalor yang dihasilkan dan mengakibatkan temperatur menjadi tinggi.

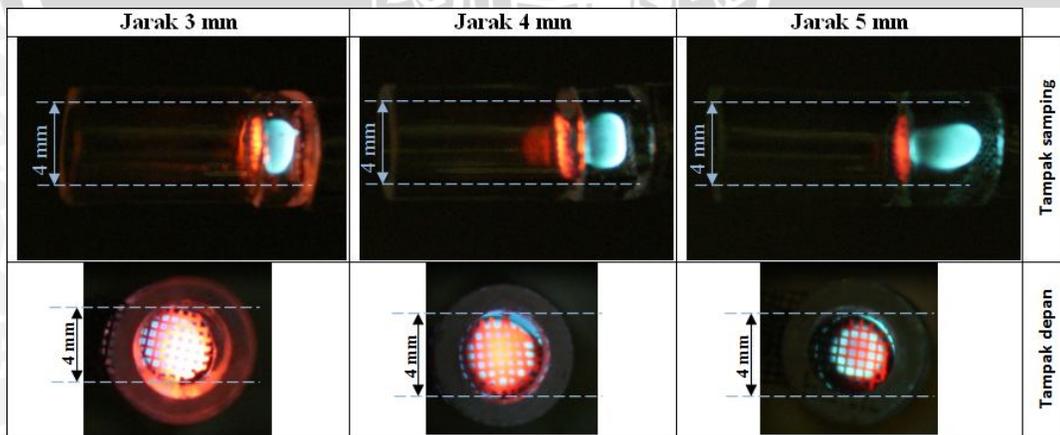
Pada gambar 4.4, 4.5, dan 4.6 merupakan visualisasi nyala api pada *meso-scale combustor* dengan variasi jarak antar *wire mesh* pada debit bahan bakar 20 mL/menit, dengan variasi rasio ekuivalen 0,8, 1, dan 1,2.



Gambar 4.4 Visualisasi nyala api pada kondisi $\Phi = 0,8$.



Gambar 4.5 Visualisasi nyala api pada kondisi stoikiometri ($\Phi = 1$).



Gambar 4.6 Visualisasi nyala api pada kondisi $\Phi = 1,2$.

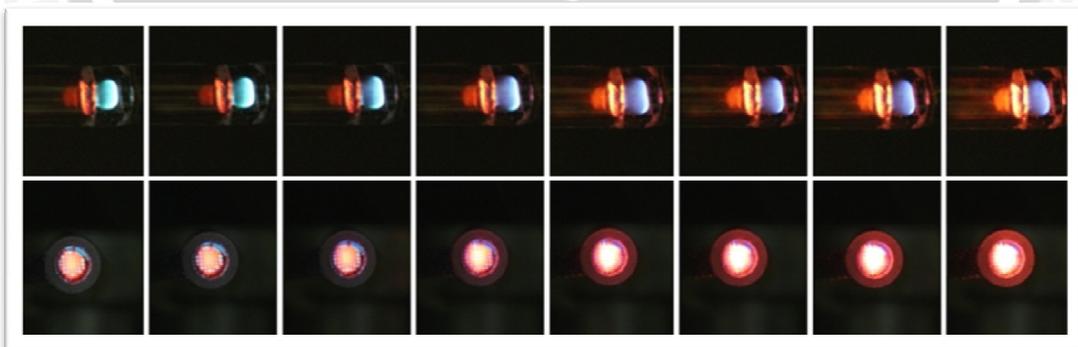
Dari visualisasi diatas dapat dilihat semakin panjang jarak antar *wire mesh*, maka semakin panjang pula api yang terbentuk. Hal tersebut dikarenakan semakin

panjang jarak antar *wire mesh* maka semakin luas pula daerah reaksi pembakaran, sehingga nyala api yang terbentuk pun cenderung lebih besar. Panjang api dalam *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 3 mm lebih kecil daripada dalam *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 4 mm dan 5 mm. Hal tersebut dikarenakan semakin kecil jarak antar *wire mesh*, maka api pada *downstream wire mesh* pertama akan menyentuh *wire mesh* kedua. sehingga nyala api yang terbentuk cenderung lebih kecil dibanding pada *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 4 mm dan 5 mm.

Visualisasi api pada $\Phi = 0,8$ dan $\Phi = 1$ hampir sama yakni berwarna biru. Karena pada $\Phi = 1$ dan $\Phi = 0,8$ bahan bakar bisa terbakar sempurna. Pada gambar diatas juga terlihat warna api untuk $\Phi = 1$ terlihat sedikit lebih terang daripada warna api untuk $\Phi = 0,8$. Hal ini dikarenakan pada jumlah debit bahan bakar yang sama udara pada $\Phi = 1$ lebih sedikit daripada udara pada $\Phi = 0,8$, sehingga temperatur pada $\Phi = 1$ lebih tinggi, yang mengakibatkan warna api sedikit lebih terang. Panjang api untuk $\Phi = 0,8$ lebih besar dibanding $\Phi = 1$ karena kecepatan reaktan lebih besar dan kecepatan pembakaran menjadi lebih rendah.

Untuk $\Phi = 1,2$ warna api tidak lagi berwarna biru, luas penampang api lebih kecil, dan panjang api lebih besar. Pada $\Phi = 1,2$ kecepatan pembakaran menjadi lebih rendah, dikarenakan kurangnya udara sebagai oksidator sehingga tidak semua bahan bakar terbakar sempurna. Untuk $\Phi = 0,8$ warna *mesh* terlihat paling terang dikarenakan 2 kemungkinan, yang pertama jarak *mesh* ke api lebih dekat sehingga temperaturnya menjadi lebih tinggi.

Untuk $\Phi = 1,2$ warna *mesh* terlihat paling redup dibandingkan $\Phi 0,8$ dan $\Phi = 1$, karena tidak semua bahan bakar terbakar, sehingga energi yang dihasilkan dalam pembakaran menjadi rendah dan temperaturnya rendah pula.



Gambar 4.7 Rangkaian visualisasi api pada *meso-scale combustor* dari awal menyala hingga akan mengalami *extingusih*.

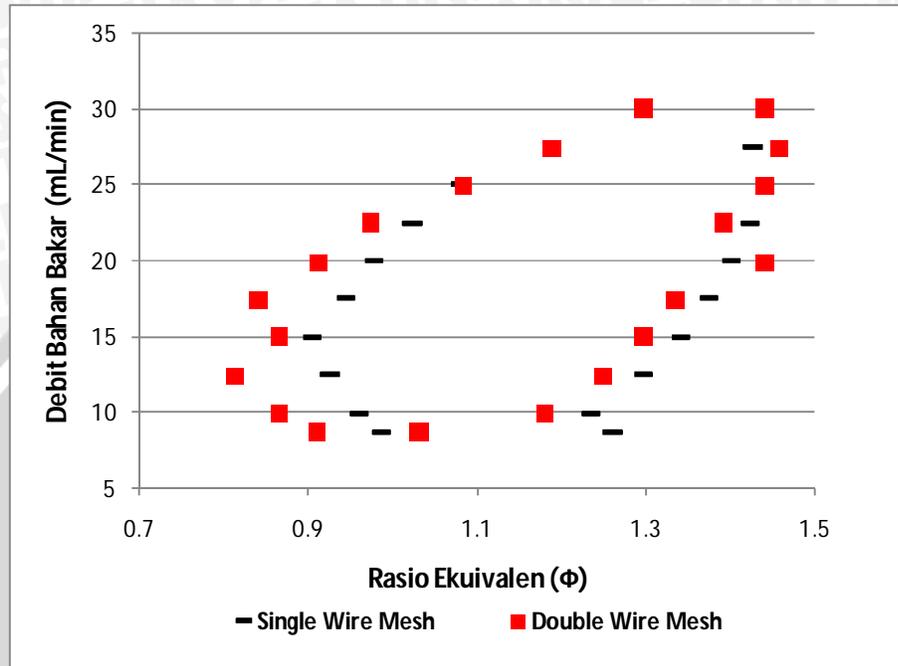
Pada gambar 4.7 dapat dilihat bahwa pada debit bahan bakar yang sama, mula-mula api dinyalakan dalam *combustor* adalah pada debit udara yang rendah (*upper limit*). Pada kondisi ini terdapat bahan bakar yang tidak terbakar sempurna, hal tersebut mengakibatkan terbentuknya karbon, dimana partikel-partikel dari karbon tersebut menghasilkan warna biru kehijauan pada nyala api (Wardana:2008). Luas penampang api terlihat lebih kecil dikarenakan terdapat bahan bakar yang tidak terbakar, sehingga temperatur api rendah. Hal tersebut mengakibatkan terjadinya *radical quenching* sehingga terlihat ada jarak antara api dengan dinding *combustor*, sehingga api terlihat lebih kecil dan panjang.

Sedangkan apabila debit udara semakin diperbesar maka api akan terlihat menjadi biru gelap, hal ini mengindikasikan semakin banyak bahan bakar yang teroksidasi dengan oksigen. Temperatur api menjadi lebih tinggi sehingga mengurangi *radical quenching* yang terjadi disekitar dinding *combustor*, hal tersebut mengakibatkan penampang api menjadi lebih besar dan panjang api terlihat cenderung menjadi lebih pendek. Apabila debit udara semakin diperbesar atau dengan kata lain debit reaktan semakin besar, maka hal tersebut akan mengakibatkan api mengalami *blow off*. Pada *meso-scale combustor* dengan *double wire mesh* api tidak akan mengalami *blow off*, dikarenakan terdapat *wire mesh* kedua yang menahan terjadinya *blow off* tersebut. Sehingga fenomena yang terlihat adalah api menyentuh *wire mesh* kedua dan mengalami pemadaman.

Pada *combustor*, terlihat semakin tinggi debit udara maka *wire mesh* kedua terlihat semakin merah menyala. Apabila debit udara diperbesar, maka *wire mesh* kedua akan terlihat semakin menyala. Hal tersebut dikarenakan semakin banyak udara, maka semakin banyak pula bahan bakar yang terbakar. Sehingga temperatur api cenderung meningkat, dan hal tersebut memberikan perubahan pada visualisasi pada *wire mesh* kedua yang terlihat menjadi merah menyala.

4.2.2 Diagram kestabilan api (*Flammability limit*)

Gambar 4.8 merupakan grafik *flammability limit* pada *meso-scale combustor* menggunakan *single* dan *multiple wire mesh*.



Gambar 4.8 Grafik *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan *single* dan *double wire mesh*.

Kapasitas/batas kemampuan mengukur debit udara pada *flow meter* yang digunakan adalah 500 mL/menit, tetapi apabila pengatur debit udara pada *flow meter* dimaksimalkan, *flow meter* dapat membaca debit hingga 550 mL/menit. Pada grafik *flammability limit* diatas, bagian kiri grafik merupakan daerah *lower limit* sedangkan bagian kanan grafik merupakan daerah *upper limit*. Dikarenakan *flow meter* udara yang digunakan hanya mampu membaca debit maksimal sampai 550 mL/menit, maka nantinya pada grafik *lower limit* terdapat data yang cenderung terlihat lurus. Hal tersebut dikarenakan pada saat debit udara sudah mencapai angka 550 mL/menit (maksimal), api masih dapat menyala dan stabil didalam *combustor* dengan penambahan debit udara tertentu hingga api tidak lagi dapat menyala.

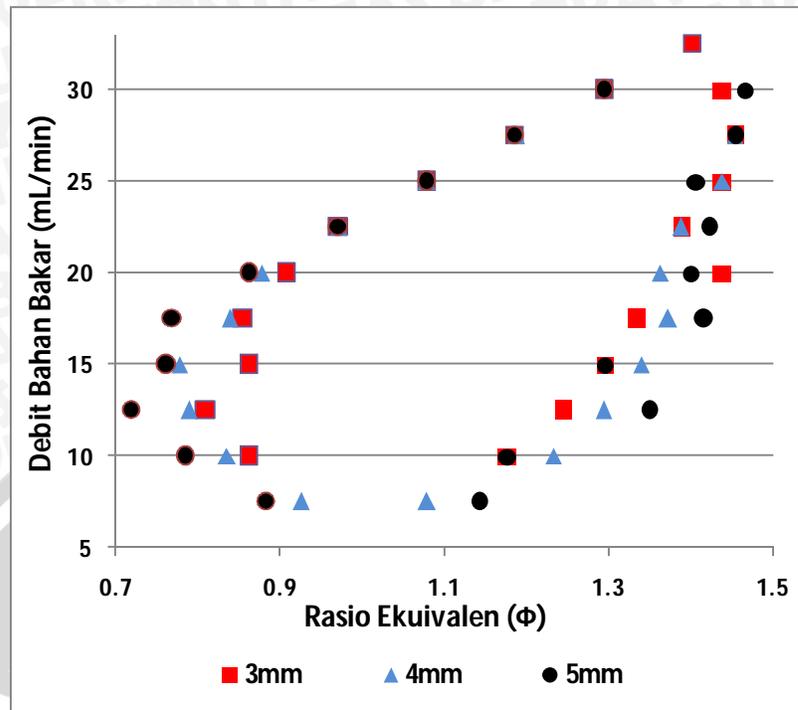
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa daerah *flammability limit* pada *combustor* dengan *single wire mesh* lebih sempit dibandingkan dengan *double wire mesh*. Pada *single wire mesh* api hanya dapat distabilkan dalam *combustor* hingga debit bahan bakar 27,5 mL/menit, debit tersebut lebih rendah bila dibandingkan dengan

combustor menggunakan *double wire mesh*, dimana api masih dapat distabilkan dalam *combustor* hingga debit bahan bakar lebih dari 27,5 mL/menit. Hal tersebut dikarenakan pada *combustor* dengan *single wire mesh* api mudah mengalami *blow off* pada debit bahan bakar tinggi, disebabkan tidak ada *mesh* yang menahan terjadinya *blow off* pada *downstream wire mesh* pertama. Pada *combustor* yang menggunakan *double wire mesh* api diperkirakan masih dapat distabilkan dalam *combustor* pada debit bahan bakar yang lebih tinggi lagi (> 30 mL/menit), apabila *flow meter* udara dapat membaca debit lebih dari 550 mL/menit.

Pada *combustor* dengan *single wire mesh*, api tidak dapat distabilkan di dalam *combustor* pada debit bahan bakar lebih besar dari 27,5 mL/menit. Fenomena yang terjadi apabila debit udara diperbesar lagi adalah api akan perlahan menuju ujung *combustor*. Pada saat api menyala diujung *combustor*, bahan bakar akan mudah berdifusi dengan udara luar. Sehingga hal tersebut memungkinkan api dapat menyala pada penambahan debit bahan bakar yang lebih besar. Pada saat kondisi api kaya bahan bakar, maka api cenderung terlihat berwarna terang kehijauan dikarenakan adanya karbon dalam gas hasil pembakaran.

Sedangkan pada *combustor* dengan *double wire mesh*, api dapat distabilkan pada debit bahan bakar yang lebih tinggi dibanding pada *combustor* dengan *single wire mesh*. Hal tersebut dikarenakan *mesh* kedua mempunyai peranan dalam mencegah terjadinya *blow off* pada *down stream wire mesh* pertama, sehingga apabila dialirkan debit bahan bakar yang lebih tinggi, api masih dapat stabil menyala pada daerah diantara *mesh* (*downstream wire mesh* pertama). Pada *combustor* dengan *double wire mesh*, saat debit bahan bakar 22,5 mL/menit, debit udara (Q_{udara}) sudah menunjukkan angka 550 mL/menit. Pada debit udara tersebut, *lower limit*-nya belum dapat ditentukan dikarenakan api masih dapat menyala dan stabil didalam *combustor* apabila debit udara diperbesar.

Gambar 4.9 merupakan grafik *flammabilty limit* pada *meso-scale combustor* menggunakan *multiple wire mesh* dengan variasi jarak antar *wire mesh* 3 mm, 4 mm, dan 5 mm.



Gambar 4.9 Grafik *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan variasi jarak antar *wire mesh*.

Pada saat percobaan dilakukan, pada setiap debit bahan bakar awalnya api diset pada kondisi kaya bahan bakar (*upper limit*). Pada kondisi ini debit udara diseting sekecil mungkin dimana api dapat menyala dan stabil di dalam *combustor*. Dengan kata lain pada saat kondisi ini, *combustor* teraliri reaktan dengan debit terkecil. Sehingga fenomena yang terjadi adalah *flashback* apabila tidak disisipkan *wire mesh* pada *combustor*.

Dari grafik *flammability limit* diatas dapat dilihat bahwa pada ketiga *combustor* memiliki daerah *upper limit* yang hampir sama pada setiap debit bahan bakarnya. Daerah *upper limit* disini adalah batas api stabil didalam *combustor* pada kondisi udara minimum. Pada kondisi *upper limit*, api pada *combustor* cenderung mengalami *flashback*, *flashback* disini tidak dipengaruhi oleh adanya *wire mesh* kedua. Fungsi dari *wire mesh* kedua adalah mencegah terjadinya *blow off*, sehingga tidak terlalu ada perbedaan yang mencolok pada ketiga *combustor* ketika dalam keadaan udara minimum (*upper limit*).

Pada grafik diatas terlihat bahwa daerah *flammability limit* untuk *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 5 mm lebih luas dibanding jarak antar *wire mesh* 4 mm dan 3 mm. Pada *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 5 mm daerah *lower limit*-nya

dapat mencapai angka rasio ekuivalen terendah hingga 0,71, sedangkan pada *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 4 mm daerah *lower limit*-nya mencapai 0,77, dan *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 3 mm *lower limit* terendahnya 0,80. Hal tersebut dikarenakan semakin besar jarak antar *wire mesh*, maka daerah reaksi pembakaran akan semakin luas pula. Sehingga apabila semakin luas jarak antar *wire mesh* maka *wire mesh* kedua mampu mencegah terjadinya *blow off* api dalam kondisi debit reaktan yang lebih besar.

Daerah *lower limit* adalah daerah dimana api akan mengalami *blow off*, dengan kata lain penambahan debit udara sudah mencapai titik maksimum pada tiap debit bahan bakar. Apabila debit udara diperbesar lagi maka api akan mengalami *blow off*. *Fenomena* api yang mengalami *blow off* disini *wire mesh* kedua cenderung terlihat seperti menyerap api yang menyala pada *downstream wire mesh* pertama. Hal tersebut dikarenakan *wire mesh* bermaterial *stainless steel*, dimana material tersebut memiliki konduktivitas termal yang baik. Sehingga semakin besar debit reaktan yang dialirkan, maka api terlihat cenderung semakin dekat dengan *wire mesh* kedua. Semakin dekat api pada *wire mesh* kedua akan menyebabkan semakin besar *heat loss* yang terjadi pada api yang menyala pada *downstream wire mesh* pertama. Apabila debit udara (debit reaktan) diperbesar maka *heat loss* dari api ke *wire mesh* yang kedua akan semakin besar. Hal tersebut ditandai dengan visualisasi pada *wire mesh* kedua yang terlihat semakin merah menyala dan diakhiri dengan api padam (*fire extinguish*) pada *downstream wire mesh* pertama.

Pada Grafik diatas terlihat bahwa *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 3 mm pada debit bahan bakar 22,5 mL/menit hingga 30 mL/menit grafiknya cenderung terlihat lurus, hal tersebut dikarenakan debit udara (Q_{udara}) sudah menunjukkan angka 550 mL/menit. Pada debit udara tersebut, api masih dapat menyala dan stabil didalam *combustor*. Pada debit bahan bakar ini terdapat kemungkinan api dapat stabil didalam *combustor* pada debit udara yang lebih besar ($Q_{udara} > 550$ mL/menit). Sehingga untuk debit bahan bakar $Q_{bb} = 22,5$ mL/menit dan yang lebih besar, rasio ekuivalen minimum (*lower limit*) dalam diagram kestabilan api tidak dapat ditentukan dengan tepat. Hal tersebut berlaku juga pada *combustor* dengan jarak antar *wire mesh* 4 mm dan 5 mm.