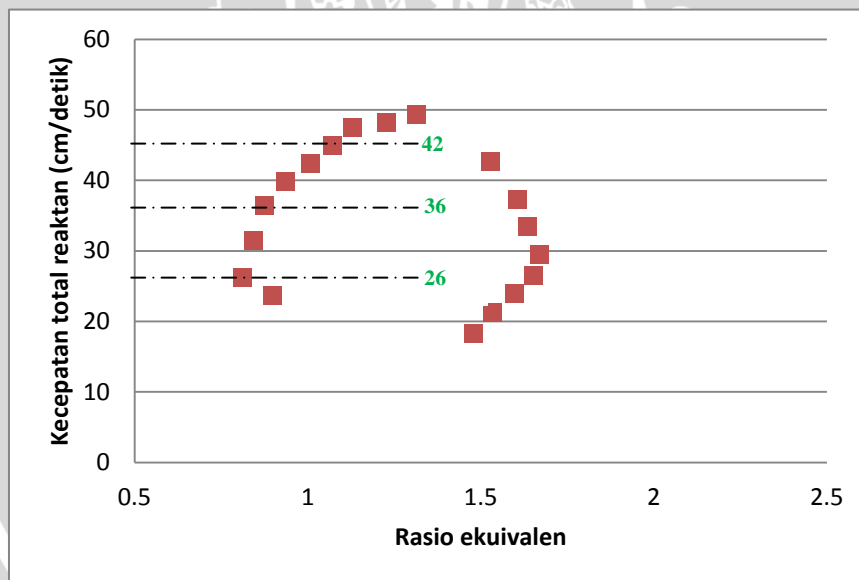


## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian kali ini, *combustor* memiliki *double fuel inlet* dan *triple wire mesh* yang bertujuan untuk memperluas daerah *flammability limit* dengan munculnya dua nyala api stabil pada dua *down stream wire mesh* yang berbeda. Sehingga di dalam satu *combustor* terdapat dua aliran reaktan yang berbeda saluran. Saluran reaktan tersebut dibedakan menjadi *fuel inlet* primer dan *fuel inlet* sekunder, dimana ke-2 *fuel inlet* tersebut berbeda perlakuannya. Reaktan yang masuk melalui *fuel inlet* primer tetap dijaga pada kondisi rasio ekuivalen  $\Phi = 1$  dan kecepatan reaktan pada *fuel inlet* primer ( $V_{\text{primer}}$ ) sebesar 26, 36, dan 42 cm/detik.  $V_{\text{primer}}$  tersebut ditentukan berdasarkan diagram *flammability limit* untuk *combustor* dengan *single wire mesh* dan *single fuel inlet*. Penentuan ke-3 titik tersebut berdasarkan pada daerah *flammability limit* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Diagram kestabilan api untuk *combustor* dengan *single wire mesh* dan *single fuel inlet*.

Setelah menentukan kecepatan reaktan pada *fuel inlet* primer, maka selanjutnya menentukan debit udara dan bahan bakar pada masing-masing  $V_{\text{primer}}$ . Berikut contoh perhitungannya.

Menentukan debit bahan bakar dan udara untuk  $V_{\text{primer}}$  yang berbeda dengan rasio ekuivalen ( $\Phi$ ) = 1. Contoh : Perhitungan untuk menentukan  $Q_{\text{udara}}$  dan  $Q_{\text{bb}}$  pada  $V_{\text{primer}}$  sebesar 26 cm/detik dan rasio ekuivalen  $\Phi = 1$

$$V_{\text{primer}} = \frac{(Q_{\text{bb}} + Q_{\text{udara}})_{\text{act}}}{60 (\pi \cdot \frac{r^2}{100})}$$

$$26 = \frac{(Q_{\text{bb}} + Q_{\text{udara}})_{\text{act}}}{60 (3,14 \cdot \frac{1,68^2}{100})}$$

$$139,21 = (Q_{\text{bb}} + Q_{\text{udara}})_{\text{act}} \quad (4-1)$$

Untuk bahan bakar gas, perbandingan mol juga dapat dinyatakan perbandingan volume, sehingga didapatkan :

$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a}$$

$$\Phi = \frac{(Q_{\text{udara}}/Q_{\text{bb}})_s}{(Q_{\text{udara}}/Q_{\text{bb}})_{\text{act}}}$$

$$\Phi = \frac{27,37}{(Q_{\text{udara}}/Q_{\text{bb}})_{\text{act}}}$$

$$\Phi = \frac{Q_{\text{bb act}} \cdot 27,37}{Q_{\text{udara act}}}$$

Untuk rasio ekuivalen  $\Phi = 1$ , maka :

$$Q_{\text{udara act}} = Q_{\text{bb act}} \cdot 27,37 \quad (4-2)$$

Dari persamaan (4-2) disubsitusikan ke persamaan (41), didapatkan :

$$139,21 = Q_{\text{bb act}} + 27,37 Q_{\text{bb act}}$$

$$Q_{\text{bb act}} = \frac{139,21}{28,37}$$

$$Q_{\text{bb act}} = 4,92 \text{ (mL/menit)} \approx 5 \text{ (ml/menit)}$$

$$Q_{\text{udara act}} = 4,92 \cdot 28,37$$

$$Q_{\text{udara act}} = 139,11 \text{ (mL/menit)}$$

Dalam penelitian, secara aktual  $Q_{bb \text{ primer}}$  dikondisikan pada 5 mL/menit sebab pada 4,92 mL/menit sangat sulit untuk dicapai, begitu pula untuk  $Q_{udara \text{ primer}}$  135,11 mL/menit dibulatkan menjadi 135 mL/menit. Cara yang sama berlaku untuk menentukan  $Q_{udara}$  dan  $Q_{bb}$  pada  $V_{primer}$  sebesar 36 dan 42 cm/detik dengan rasio ekuivalen  $\Phi = 1$ . Sehingga didapatkan nilai pengambilan data debit udara  $Q_{udara}$  dan bahan bakar  $Q_{bb}$  seperti pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Nilai  $Q_{bb}$  dan  $Q_{udara}$  pada  $V_{primer}$  yang berbeda dan  $(\Phi) = 1$

No	$V_{primer}$ (cm/detik)	$Q_{bb}$ (mL/menit)	$Q_{udara}$ (mL/menit)
1	26	4,92	135,11
2	36	6,96	189,37
3	42	8,01	217,86

Kemudian untuk reaktan yang masuk pada *fuel inlet* sekunder kecepatan reaktannya ( $V_{sekunder}$ ) divariasikan dengan mengatur jumlah debit udara yang masuk dengan debit bahan bakar tetap dalam *range* yang sekecil-kecilnya hingga sebesar-besarnya dengan kenaikan 1 mL/menit dari debit semula, dimana api masih dapat menyala stabil di dalam *combustor*. Jumlah antara  $V_{primer}$  dan  $V_{sekunder}$  yang masuk pada masing-masing *fuel inlet* dinamakan  $V_{total}$ , yang menunjukkan kecepatan total reaktan pada *fuel inlet* primer dan sekunder.

#### 4.1 Data Hasil Penelitian

Bedasarkan penelitian yang telah dilakukan pada *meso-scale combustor* dengan menggunakan *double fuel inlet* dan *triple wire mesh* maka didapatkan sejumlah data awal berupa  $Q_{udara \text{ Min}}$  sekunder,  $Q_{udara \text{ Max}}$  sekunder dan  $Q_{bahan \text{ bakar}}$  sekunder, data ini didapatkan pada kondisi dimana api stabil di dalam *meso-scale combustor*. Data awal tersebut selanjutnya akan diolah menjadi beberapa data yang nantinya dapat menjadi grafik *flammability limit* dan titik acuan yang menggambarkan bentuk api berupa visualisasi. Khusus untuk grafik *flammability limit*, dari grafik tersebut dapat ditunjukkan batas-batas kestabilan nyala api yang disimbolkan oleh rasio ekuivalen ( $\Phi$ ). Ada dua batas yang terdapat pada rasio ekuivalen, yaitu rasio ekuivalen minimum ( $\Phi_{Min}$ ) dan rasio ekuivalen maksimum ( $\Phi_{Max}$ ) atau biasa disebut *lower limit* dan *upper limit*. *Lower limit* dan *upper limit* merupakan suatu kondisi dimana api dapat menyala stabil pada konsentrasi reaktan tertentu. Perbedaan keduanya berada pada debit udara yang disuplai. *Lower limit* merupakan daerah dengan konsentrasi udara tertinggi, sedangkan *upper*

*limit* pada konsentrasi udara terendah untuk debit bahan bakar yang sama. Atau dengan kata lain *lower limit* merupakan suatu keadaan atau daerah dimana api dapat menyala stabil di dalam *combustor* pada campuran debit udara maksimal dengan debit bahan bakar tertentu, sedangkan *upper limit* adalah keadaan atau daerah dimana api dapat menyala stabil di dalam *combustor* pada campuran debit udara minimal dengan debit bahan bakar tertentu.

Pada penelitian ini, data yang diambil adalah debit reaktan sekunder (dalam mL/menit) dengan tiga kondisi yang berbeda yaitu pengambilan data pada *combustor* dengan  $V_{\text{primer}}$  : 26, 36, dan 42 cm/detik. Setelah didapatkan data debit reaktan sekunder maka data tersebut diolah. Semua data pada *combustor* dengan  $V_{\text{primer}}$  yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 4.2 – 4.4.

Tabel 4.2 Data debit bahan bakar dan udara pada *fuel inlet* sekunder dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan  $V_{\text{primer}}$  : 26 cm/detik

<b>Fuel inlet Primer</b>		<b>Fuel inlet Sekunder</b>		
$Q_{\text{bb}}$	$Q_{\text{udara}}$	$Q_{\text{bb}}$	$Q_{\text{udara min}}$	$Q_{\text{udara max}}$
5	135	6	120	240
		7	137.5	260
		8	150	285
		9	175	315
		10	187.5	335
		11	200	367.5
		12	207.5	400
		13	227.5	417.5
		14	247.5	457.5
		15	250	497.5
		16	272.5	527.5
		17	282.5	540
18	300	600		

Tabel 4.3 Data debit bahan bakar dan udara pada *fuel inlet* sekunder dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan  $V_{\text{primer}} : 36 \text{ cm/detik}$

<i>Fuel inlet primer</i>		<i>Fuel inlet sekunder</i>		
$Q_{\text{bb}}$	$Q_{\text{udara}}$	$Q_{\text{bb}}$	$Q_{\text{udara min}}$	$Q_{\text{udara max}}$
7	189	6	165	297.5
		7	197.5	310
		8	187.5	325
		9	192.5	347.5
		10	200	382.5
		11	205	405
		12	200	442.5
		13	212.5	485
		14	227.5	500
		15	242.5	530
		16	262.5	580

Tabel 4.4 Data debit bahan bakar dan udara pada *Fuel inlet* sekunder dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* dengan  $V_{\text{primer}} : 42 \text{ Cm/detik}$

<i>Fuel inlet primer</i>		<i>Fuel inlet sekunder</i>		
$Q_{\text{bb}}$	$Q_{\text{udara}}$	$Q_{\text{bb}}$	$Q_{\text{udara min}}$	$Q_{\text{udara max}}$
8	218	6	170	335
		7	185	350
		8	187.5	347.5
		9	195	380
		10	202.5	392.5
		11	215	422.5
		12	225	460
		13	227.5	497.5
		14	240	530
		15	252.5	550
		16	277.5	580
		17	290	600

Pada penelitian ini peneliti mengalami keterbatasan pengambilan data dikarenakan *flow meter* untuk *fuel inlet* sekunder yang digunakan hanya dapat membaca debit udara sampai 600 mL/menit saja. Kemungkinan untuk kondisi dimana api masih dapat stabil didalam *combustor* pada debit udara diatas 600 mL/menit dapat terjadi. Sehingga dalam proses pengambilan data pada *combustor* dengan  $V_{\text{primer}} 26, 36$  dan  $42 \text{ cm/detik}$  sebenarnya api masih mungkin dapat stabil pada kecepatan reaktan yang lebih besar.

## 4.2 Perhitungan Data Penelitian

### 4.2.1 Menentukan rasio ekuivalen ( $\Phi$ )

Untuk menentukan rasio ekuivalen, sebelumnya dicari dulu total debit reaktan dengan cara menjumlah debit bahan primer dengan bahan bakar sekunder begitu pula dengan debit udara. Kemudian dapat menentukan  $\Phi$  baik *lower* maupun *upper limit*.

Contoh : ( $\Phi$ ) *lower limit* pada kecepatan reaktan primer sebesar  $V_{\text{primer}} = 26 \text{ cm/detik}$  dan untuk  $Q_{\text{bb sekunder}} = 6 \text{ ml/menit}$

$$\Phi_{\text{lower}} = \frac{(Q_{\text{bb primer}} + Q_{\text{bb sekunder}})27.37}{(Q_{\text{udara primer}} + Q_{\text{udara sekunder Max}})}$$

$$\Phi = \frac{(5 + 6)27.37}{(135 + 240)}$$

$$\Phi = 0.802$$

Contoh : ( $\Phi$ ) Upper limit pada kecepatan reaktan primer sebesar  $V_{\text{primer}} = 26$  cm/detik dan untuk  $Q_{\text{bb sekunder}} = 6$  ml/menit

$$\Phi_{\text{Upper}} = \frac{(Q_{\text{bb primer}} + Q_{\text{bb sekunder}})27,37}{(Q_{\text{udara primer}} + Q_{\text{udara sekunder Min}})}$$

$$\Phi = \frac{(5 + 6)27,37}{(135 + 120)}$$

$$\Phi = 1,1806$$

#### 4.2.2 Menentukan kecepatan total reaktan ( $V_{\text{total}}$ )

Dalam  $V_{\text{total}}$ , terdapat  $V_{\text{total minimal}}$  dan  $V_{\text{total maksimal}}$ .

Contoh :  $V_{\text{total min}}$  pada kecepatan reaktan pada *fuel inlet* primer sebesar  $V_{\text{primer}} = 26$  cm/detik

$$V_{\text{total Min}} = \frac{(Q_{\text{bb total}} + Q_{\text{udara total Min}})}{60 (\pi \cdot \frac{r^2}{100})}$$

$$V_{\text{total Min}} = \frac{(11 + 255)}{60 (3,14 \cdot \frac{1,68^2}{100})}$$

$$V_{\text{total Min}} = 50.0244 \text{ cm/detik}$$

Contoh :  $V_{\text{total max}}$  untuk kecepatan reaktan pada *fuel inlet* primer sebesar  $V_{\text{primer}} = 26$  cm/detik

$$V_{\text{total Max}} = \frac{(Q_{\text{bb total}} + Q_{\text{udara total Max}})}{60 (\pi \cdot \frac{r^2}{100})}$$

$$V_{\text{total Max}} = \frac{(11 + 375)}{60 (3,14 \cdot \frac{1,68^2}{100})}$$

$$V_{\text{total Max}} = 72.591 \text{ cm/detik}$$

Setelah didapatkan hasil perhitungan  $\Phi$  dan  $V_{\text{total}}$  reaktan pada  $V_{\text{primer}}$  26 cm/detik kemudian dilanjutkan pada kondisi 36, dan 42 cm/detik. Tabel 4.5 – 4.7 berikut merupakan data hasil perhitungan pada  $V_{\text{primer}}$  26, 36, dan 42 cm/detik.





Tabel 4.5 Data hasil perhitungan rasio ekuivalen ( $\Phi$ ) dan kecepatan total reaktan ( $V_{total}$ ) dengan  $V_{primer} : 26 \text{ Cm/detik}$

<i>Fuel inlet primer</i>		<i>Fuel inlet sekunder</i>			TOTAL			$\Phi$		$V_{total}$	
Qbb (ml/menit)	Qudara (ml/menit)	Qbb (ml/menit)	Qudara min (ml/menit)	Qudara max (ml/menit)	Qbb (ml/menit)	Qudara min (ml/menit)	Qudara max (ml/menit)	Lower limit	Upper limit	Vmin (cm/detik)	Vmax (cm/detik)
5	135	6	120	240	11	255	375	0.80285333	1.18066667	50.02443	72.59185
		7	137.5	260	12	272.5	395	0.83149367	1.2052844	53.50358	76.54114
		8	150	285	13	285	420	0.84716667	1.24845614	56.04241	81.43075
		9	175	315	14	310	450	0.85151111	1.23606452	60.93202	87.26067
		10	187.5	335	15	322.5	470	0.87351064	1.27302326	63.47085	91.20996
		11	200	367.5	16	335	502.5	0.87148259	1.30722388	66.00968	97.51003
		12	207.5	400	17	342.5	535	0.86970093	1.35851095	67.60821	103.8101
		13	227.5	417.5	18	362.5	552.5	0.89169231	1.35906207	71.55751	107.2892
		14	247.5	457.5	19	382.5	592.5	0.87768776	1.35955556	75.5068	114.9998
		15	250	497.5	20	385	632.5	0.86545455	1.42181818	76.16502	122.7103
		16	272.5	527.5	21	407.5	662.5	0.86757736	1.41047853	80.58447	128.5402
		17	282.5	540	22	417.5	675	0.89205926	1.4422515	82.65315	131.0791
		18	300	600	23	435	735	0.85647619	1.44714943	86.13229	142.5508

Tabel 4.6 Data hasil perhitungan rasio ekuivalen ( $\Phi$ ) dan kecepatan total reaktan ( $V_{total}$ ) dengan  $V_{primer} : 36 \text{ Cm/detik}$ 

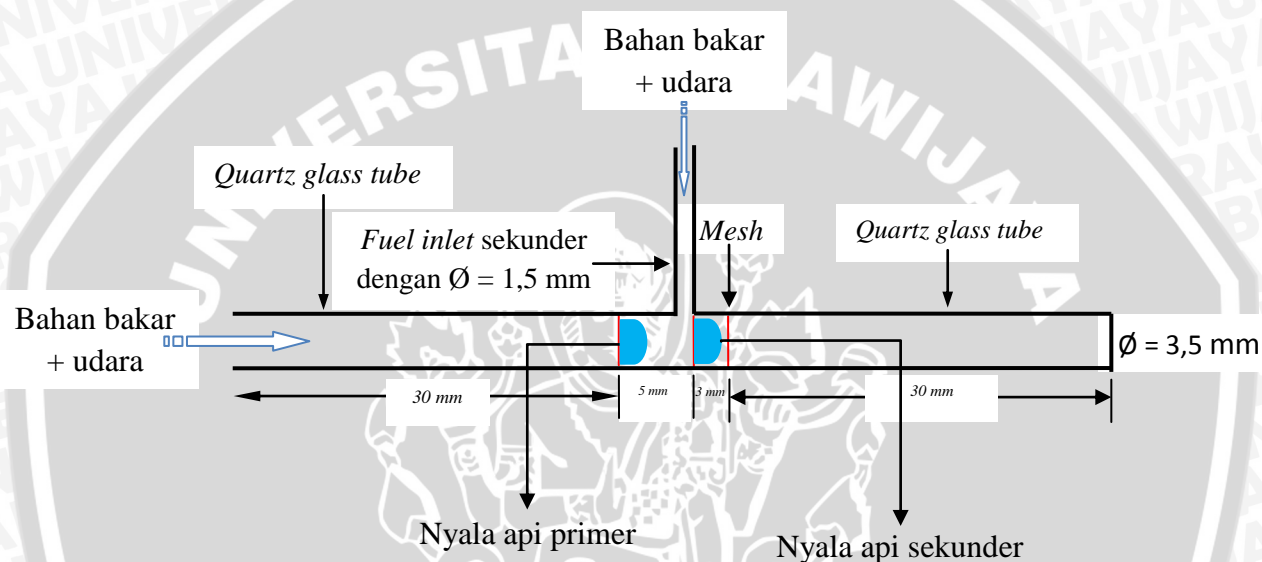
<i>Fuel inlet primer</i>		<i>Fuel inlet sekunder</i>			TOTAL			$\Phi$		$V_{total}$	
Qbb (ml/menit)	Qudara (ml/menit)	Qbb (ml/menit)	Qudara min (ml/menit)	Qudara max (ml/menit)	Qbb (ml/menit)	Qudara min (ml/menit)	Qudara max (ml/menit)	Lower limit	Upper limit	Vmin (cm/detik)	Vmax (cm/detik)
7	189	6	165	297.5	13	354	486.5	0.73136691	1.00511299	69.01867	93.93686
		7	197.5	310	14	386.5	499	0.76789579	0.99141009	75.31874	96.47569
		8	187.5	325	15	376.5	514	0.79873541	1.09043825	73.62619	99.48468
		9	192.5	347.5	16	381.5	536.5	0.81625349	1.14788991	74.75456	103.9041
		10	200	382.5	17	389	571.5	0.81415573	1.19611825	76.35308	110.6744
		11	205	405	18	394	594	0.82939394	1.25040609	77.48145	115.0938
		12	200	442.5	19	389	631.5	0.82348377	1.33683805	76.72921	122.3342
		13	212.5	485	20	401.5	674	0.81216617	1.3633873	79.26804	130.5149
		14	227.5	500	21	416.5	689	0.834209	1.38	82.27703	133.5239
		15	242.5	530	22	431.5	719	0.83746871	1.39545771	85.28602	139.3538
		16	262.5	580	23	451.5	769	0.81860858	1.39426357	89.23531	148.9449

Tabel 4.7 Data hasil perhitungan rasio ekuivalen ( $\Phi$ ) dan kecepatan total reaktan ( $V_{total}$ ) dengan  $V_{primer} : 42 \text{ Cm/detik}$ 

<i>Fuel inlet primer</i>		<i>Fuel inlet sekunder</i>			TOTAL			$\Phi$		$V_{total}$	
Qbb (ml/menit)	Qudara (ml/menit)	Qbb (ml/menit)	Qudara min (ml/menit)	Qudara max (ml/menit)	Qbb (ml/menit)	Qudara min (ml/menit)	Qudara max (ml/menit)	Lower limit	Upper limit	Vmin (cm/detik)	Vmax (cm/detik)
8	218	6	170	335	14	388	553	0.69291139	0.98757732	75.60083	106.631
		7	185	350	15	403	568	0.7227993	1.01873449	78.60982	109.64
		8	187.5	347.5	16	405.5	565.5	0.77439434	1.07995068	79.26804	109.3579
		9	195	380	17	413	598	0.77807692	1.12661017	80.86656	115.658
		10	202.5	392.5	18	420.5	610.5	0.80697789	1.17160523	82.46509	118.1968
		11	215	422.5	19	433	640.5	0.81191257	1.20099307	85.00392	124.0267
		12	225	460	20	443	678	0.80737463	1.23566591	87.0726	131.2671
		13	227.5	497.5	21	445.5	715.5	0.80331237	1.29016835	87.73082	138.5075
		14	240	530	22	458	748	0.805	1.31471616	90.26965	144.8076
		15	252.5	550	23	470.5	768	0.81967448	1.33795962	92.80849	148.7569
		16	277.5	580	24	495.5	798	0.82315789	1.32569122	97.69809	154.5868
		17	290	600	25	508	818	0.83649144	1.34694882	100.2369	158.5361

### 4.3 Pembahasan

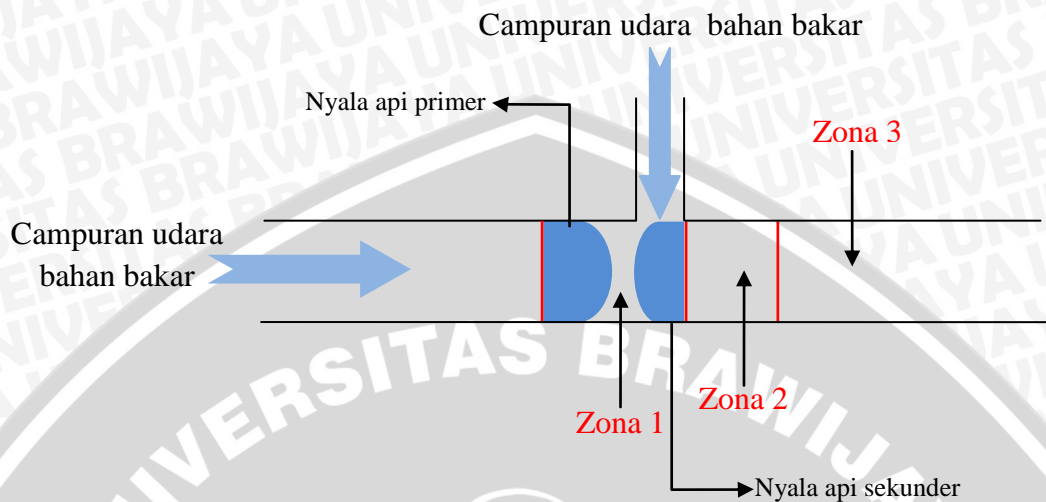
Pada awalnya penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui bagaimana visualisasi nyala api dan *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan *double fuel inlet* dan *triple wire mesh*, baik *combustor* jenis 1 ataupun jenis 2 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Tujuan dari penggunaan *double fuel inlet* adalah suatu upaya untuk meningkatkan laju pembangkitan energi setiap satu satuan volume, dengan terbentuknya *double flame* pada zona *combustor* yang berbeda, dengan adanya *double flame* diharapkan interaksi ke-2 *flame* tersebut dapat meningkatkan *flammability limit* ke arah kecepatan reaktan yang lebih tinggi.



Gambar 4.2 Ilustrasi terbentuknya *double flame* pada zona yang berbeda pada *meso-scale combustor* jenis 1

Namun pada kenyataannya kondisi tersebut tidak bisa didapatkan. Pada saat nyala api primer menyala dengan reaktan yang masuk dari sisi kiri *combustor*, nyala api sekunder tidak dapat menyala dan stabil pada zona dua atau *down stream mesh* yang berbeda meskipun telah dialirkan reaktan dari *fuel inlet* sekunder. Hal ini terjadi karena untuk membentuk nyala api sekunder yang stabil pada zona dua, diperlukan kecepatan pembakaran yang sangat tinggi karena adanya hembusan gas hasil pembakaran dengan kecepatan tinggi dari api primer. Hal ini memerlukan temperatur yang sangat tinggi pula pada *wire mesh* ke-2 atau pada zona dua. Sedangkan pada kenyataannya temperatur pada *wire mesh* ke-2 tidak begitu tinggi meskipun terkena radiasi dari nyala api primer. Akan tetapi semakin besar reaktan yang dialirkan pada *fuel inlet* sekunder maka nyala api sekunder mulai terbentuk tetapi tidak pada zona yang berbeda dengan nyala api

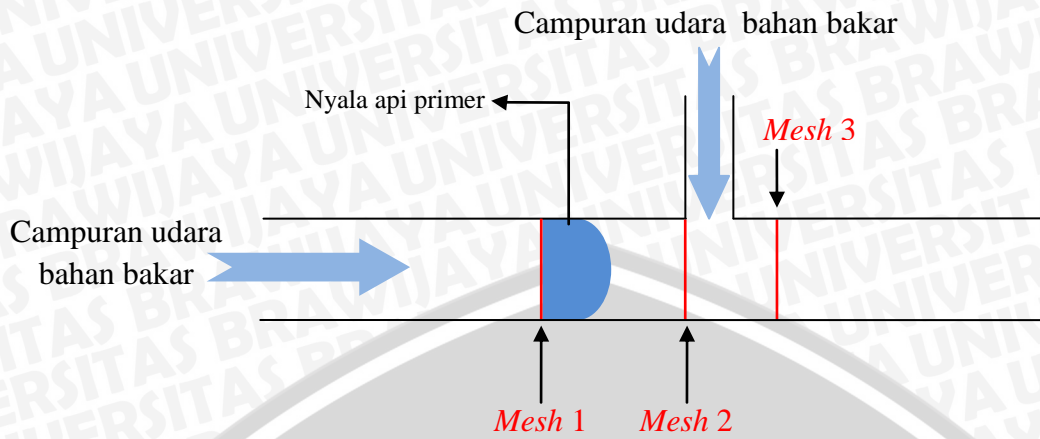
primer melainkan berada pada zona yang sama pada zona nyala api primer seperti terlihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Posisi *double flame* pada zona yang sama dalam *meso-scale combustor* jenis 1.

Posisi nyala api sekunder tepat berada di zona 1 dan menempel pada api primer, hal ini diakibatkan karena panas yang dihasilkan oleh api primer menjadi energi aktivasi yang cukup untuk mengaktifkan molekul bahan bakar dari reaktan sekunder, sehingga nyala api sekunder terbentuk dan menempel pada nyala api primer.

Pada *combustor* jenis 2, reaktan dan nyala api yang dikondisikan pada *fuel inlet* sekunder sama seperti perlakuan yang terjadi pada *meso-scale combustor* jenis 1, namun *combustor* pada jenis ini tidak dapat membentuk *double flame*. Hal ini terjadi akibat dari kecepatan pembakaran yang tidak terlalu tinggi pula pada zona 2. Adapun skema dari *meso-scale combustor* jenis 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Meso-scale combustor dengan double fuel inlet dan triple wire mesh jenis 2.

Selama penelitian berlangsung penulis telah mengambil visualisasi nyala api yang dapat menyala stabil dalam meso scale combustor jenis 1 pada debit reaktan tertentu baik primer ataupun sekunder. Gambar gambar ini sengaja diambil guna memperkuat penjelasan mengapa nyala api sekunder tidak dapat menyala pada zona yang berbeda sekaligus untuk mengetahui urutan urutan posisi flame dari luar combustor menuju ke dalam.

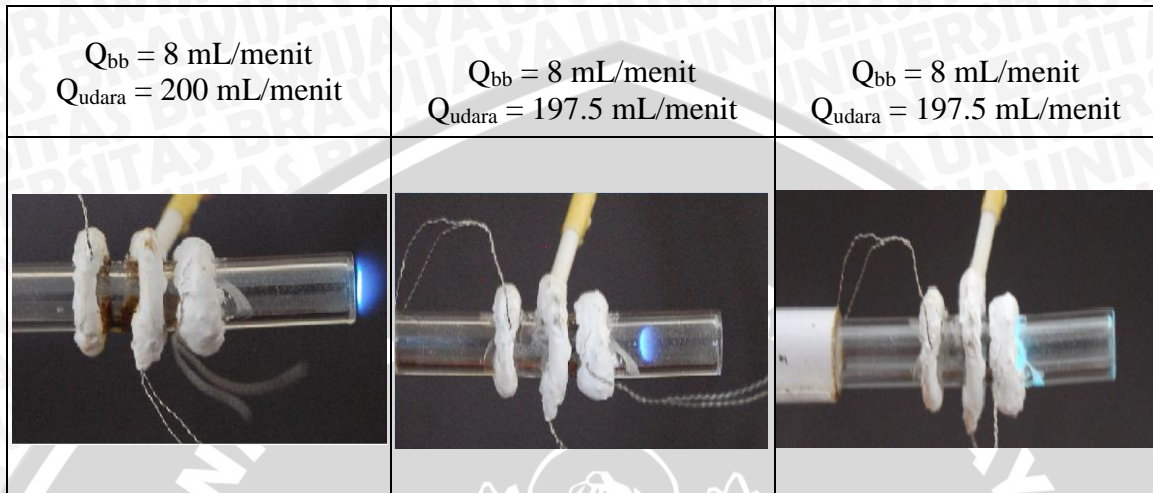
Pada Gambar 4.5 sebagai visual pertama meso-scale combustor dengan double fuel inlet dan triple wire mesh dikondisikan dengan mengalirkan sejumlah reaktan pada fuel inlet primer saja.

$Q_{bb} = 8 \text{ mL/menit}$ $Q_{udara} = 300 \text{ mL/menit}$	$Q_{bb} = 8 \text{ mL/menit}$ $Q_{udara} = 220 \text{ mL/menit}$	$Q_{bb} = 8 \text{ mL/menit}$ $Q_{udara} = 200 \text{ mL/menit}$

Gambar 4.5 Posisi awal flame berada pada luar combustor dengan debit reaktan tertentu. Dari kiri ke kanan pembakaran miskin, stoikiometri, dan kaya.

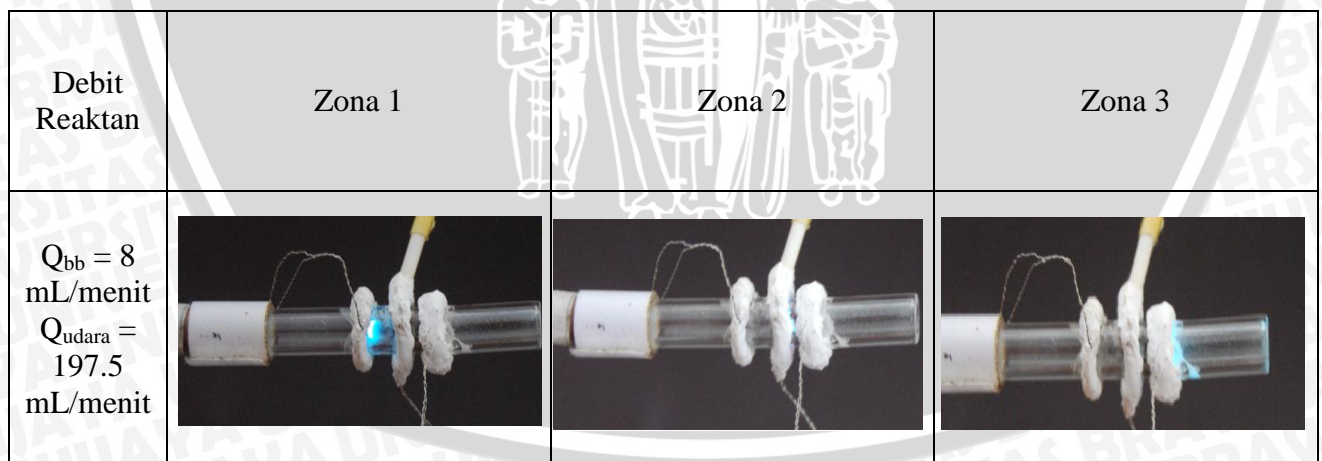
Terlihat jelas bentuk api pada Gambar 4.5, pada kondisi pembakaran kaya bahan bakar bentuk api lebih besar dibandingkan stoikiometri dan miskin. Api tersebut dapat

menyala saat reaktan pada *fuel inlet* primer disuplai dan pada mulut *combustor* dipercikan aliran listrik dengan *ignitor elektrik*. Selanjutnya *flame* tersebut mulai distabilkan di dalam *combustor* dengan merubah debit udara secara perlahan-lahan tanpa merubah debit bahan bakar.



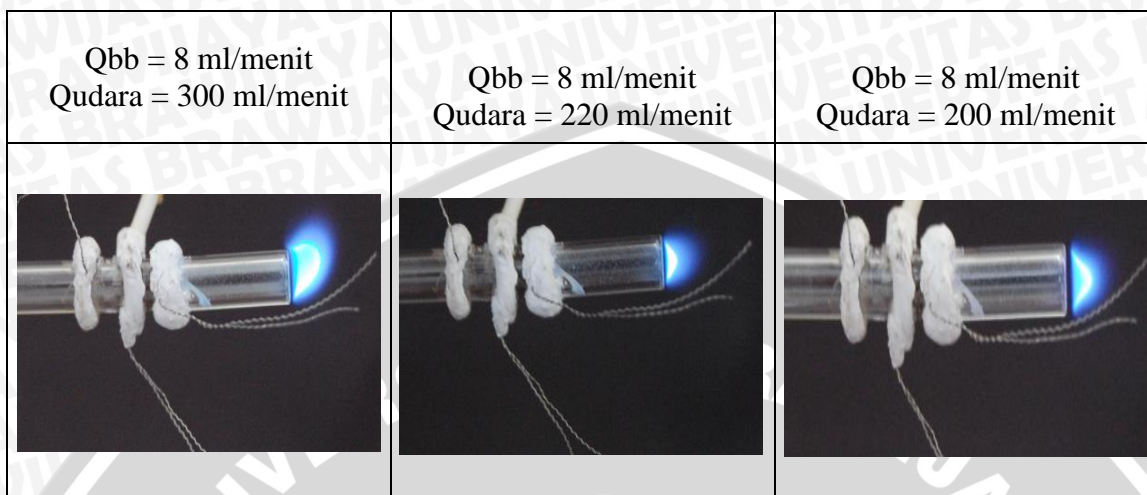
Gambar 4.6 Posisi *flame* yang bergerak masuk ke dalam *combustor*

Pada Gambar 4.6 *flame* dapat menyala stabil dan menempel pada *mesh* tiga dengan debit reaktan tertentu di dalam zona 3. Kemudian *flame* juga dapat menyala pada zona 1 dan 2 dengan mengalirkan listrik antara *wire mesh* pertama dan ke-2 yang telah tersambung pada *mesh*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7.





Gambar 4.7 Posisi *flame* pada setiap zona di dalam *meso scale combustor* dengan reaktan mengalir dari *main fuel inlet* saja.

Kemudian *meso-scale combustor* dengan *double fuel inlet* dan *triple wire mesh* dikondisikan dengan mengalirkan sejumlah reaktan pada *fuel inlet* sekunder saja seperti Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Posisi awal *flame* berada pada luar *combustor* dengan debit reaktan tertentu. Dari kiri ke kanan pembakaran miskin, stoikiometri, dan kaya.

Selanjutnya *flame* tersebut mulai dimasukan ke dalam *combustor* dengan merubah debit udara secara perlahan-lahan tanpa merubah debit bahan bakar. Kemudian langkah berikutnya adalah mencoba memposisikan nyala api pada setiap zona seperti Gambar 4.9.


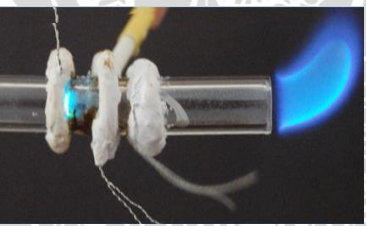

Debit Reaktan	Zona 1	Zona 2	Zona 3
$Q_{bb} = 8 \text{ mL/menit}$ $Q_{udara} = 247.5 \text{ mL/menit}$	-		

Gambar 4.9 Posisi *flame* pada setiap zona di dalam *meso scale combustor* dengan reaktan mengalir dari *fuel inlet* sekunder saja

Berikutnya adalah memposisikan nyala api dalam zona 1 dengan mengalirkan reaktan dari *fuel inlet* primer dan kemudian disusul dengan mengalirkan reaktan dari

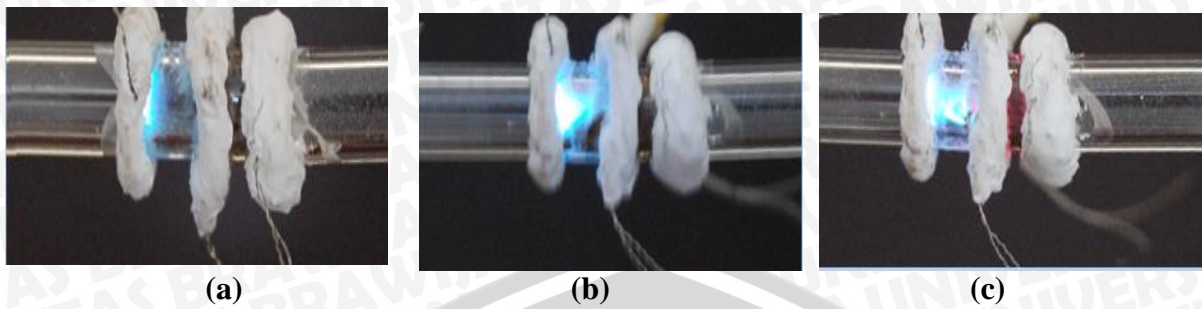


*fuel inlet sekunder*. Setelah itu mencoba menyalakan *flame* skunder dari luar dengan mengalirkan arus listrik di mulut *combustor*. Nyala api dari *fuel inlet* sekunder hanya dapat distabilkan pada ujung *combustor* seperti terlihat pada Gambar 4.10. Nyala api ini memiliki ukuran yang relative panjang dikarenakan adanya hembusan gas buang hasil dari nyala api primer pada zona 1, sehingga reaktan yang masuk pada *fuel inlet* sekunder tidak semua terbakar, melainkan terbuang ke luar *combustor*. Gas buang tersebut juga yang mengakibatkan posisi nyala api sekunder tidak bisa menyentuh mulut *combustor* saat nyala api distabilkan di luar *combustor*. Terakhir, dampak dari gas buang dari nyala api primer tersebut adalah nyala api sekunder yang tidak bisa masuk ke dalam zona 2 dan 3 meskipun debit reaktan diubah secara perlahan-lahan.

<i>Fuel inlet</i> primer	<i>Fuel inlet</i> Sekunder	<i>Fuel inlet</i> Primer	<i>Fuel inlet</i> Sekunder	<i>Fuel inlet</i> Primer	<i>Fuel inlet</i> Sekunder
$Q_{bb} = 8$ & $Q_{udara} = 220$ mL/menit	$Q_{bb} = 7.5$ & $Q_{udara} = 120$ mL/menit	$Q_{bb} = 8$ & $Q_{udara} = 220$ mL/menit	$Q_{bb} = 9,5$ & $Q_{udara} = 266$ mL/menit	$Q_{bb} = 8$ & $Q_{udara} = 220$ mL/menit	$Q_{bb} = 6$ & $Q_{udara} = 100$ mL/menit
					

Gambar 4.10 Posisi *double flame* pada *meso scale combustor* dengan nyala api sekunder berada di luar *combustor*.

Kemudian yang terakhir adalah memposisikan nyala api dalam zona 1 dengan mengalirkan reaktan dari *fuel inlet* primer dan membentuk nyala api primer kemudian disusul dengan mengalirkan debit reaktan dari *fuel inlet* sekunder. Tanpa mengalirkan arus listrik pada mulut *combustor*, debit reaktan pada *fuel inlet* sekunder diperbesar, sehingga berangsur-angsur nyala api primer mulai memanjang dan akhirnya nyala api sekunder terbentuk walaupun pada zona satu dan menempel pada nyala api primer seperti yang terlihat pada Gambar 4.11.

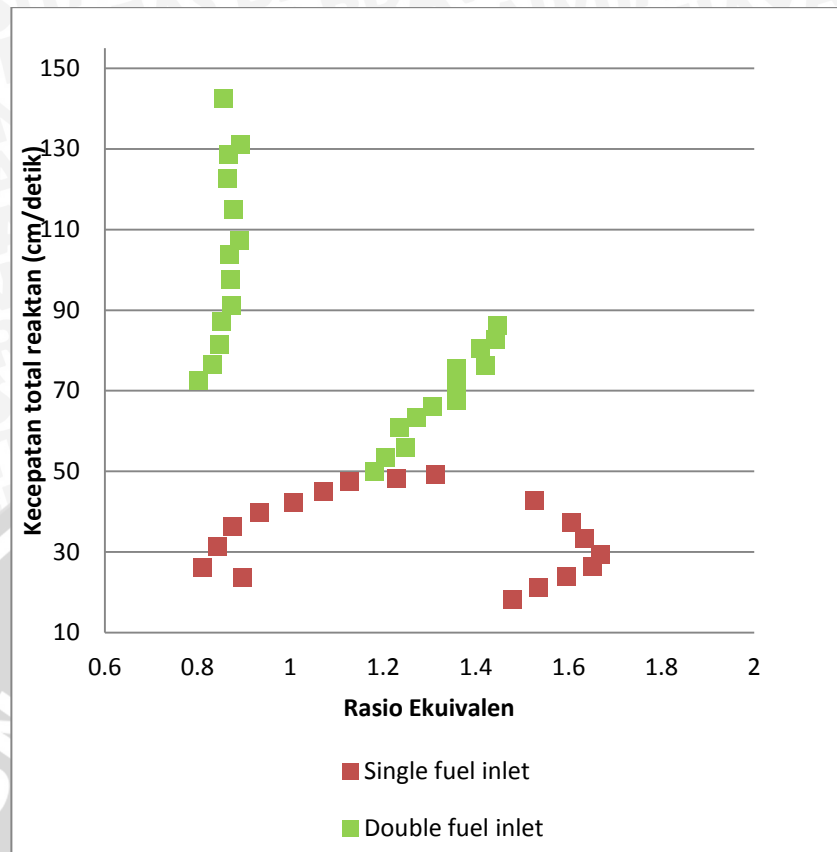


Gambar 4.11 Proses terbentuknya *double flame* pada *meso scale combustor*. (a) *First flame*, (b) *First flame* memanjang, (c) *Double flame*

Dari hasil-hasil diatas, penulis menyimpulkan untuk mengambil data *flammability limit* dan visualisasi nyala api dengan nyala api sekunder berada pada zona 1 bersama dengan nyala api primer.

#### 4.3.1 *Flammability limit*

Gambar 4.12 menunjukkan perbandingan diagram *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan *double fuel inlet* dan *triple wire mesh* dengan *meso-scale combustor* dengan *single fuel inlet* dan *single wire mesh*, dimana api menyala di dalam *combustor* pada *downstream wire mesh* pertama.



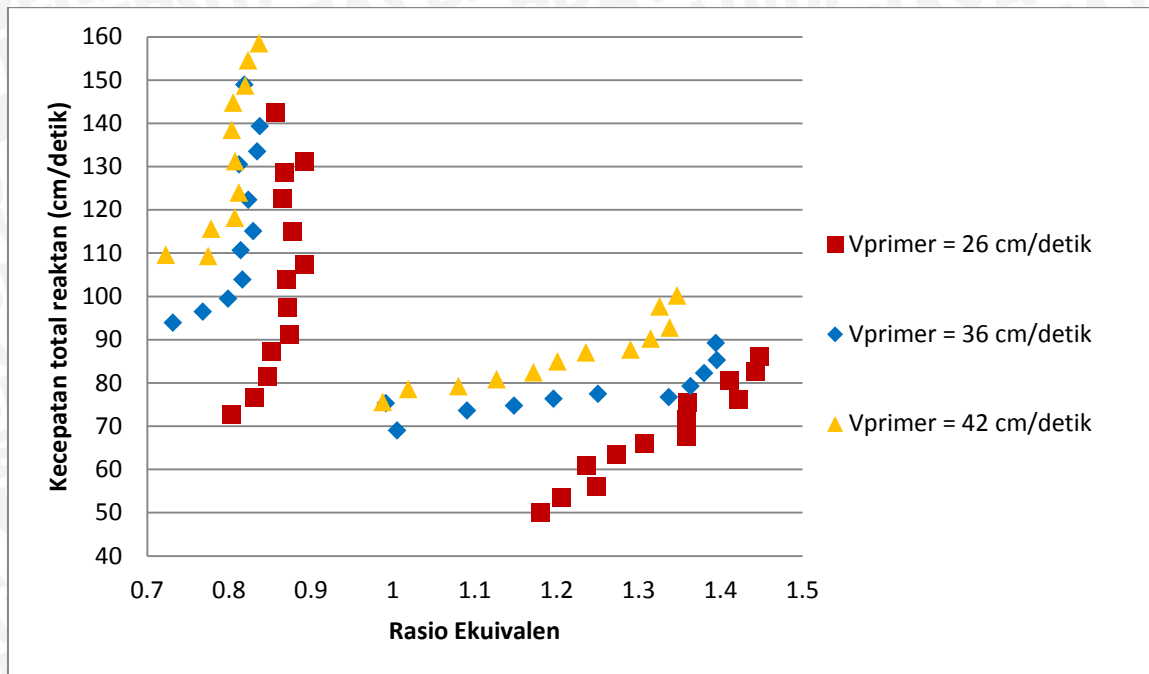
Gambar 4.12 flammability limit pada meso-scale combustor dengan double fuel inlet dan single fuel inlet

Dapat dilihat bahwa batas  $V_{total}$  dimana nyala api pada combustor dengan triple wire mesh dan double fuel inlet terlihat lebih tinggi dibandingkan dengan combustor dengan single fuel inlet dan single wire mesh. Pada combustor dengan double fuel inlet api mampu menyala dalam combustor hingga  $V_{total}$  di atas 145 cm/detik, kondisi ini tentu saja dapat berubah lebih tinggi jika flow meter yang digunakan dapat membaca debit udara diatas 600 mL/menit. Hal inilah yang membatasi dalam mencari puncak  $V_{total}$  yang sebenarnya dalam diagram flammability limit. Sedangkan pada combustor dengan single fuel inlet, api dapat menyala dalam combustor hanya pada  $V_{total}$  tertinggi 50 cm/detik. Hal ini diakibatkan karena pengaruh dari wire mesh di dalam combustor. Fungsi dari wire mesh tersebut sangat sentral, dimana selain sebagai flame holder, wire mesh juga berfungsi sebagai penahan blow off pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi dan penahan flashback pada kecepatan reaktan yang lebih rendah. Pada combustor yang menggunakan single wire mesh dan single fuel inlet satu-satunya mesh tersebut hanya memiliki fungsi sebagai flame holder sekaligus penahan flashback. Flashback merupakan suatu fenomena dimana nyala api bergerak masuk ke dalam combustor dikarenakan kecepatan pembakaran lebih besar daripada kecepatan reaktan. Sedangkan

*Blow off* merupakan fenomena kecepatan pembakaran lebih kecil daripada kecepatan reaktan. Sehingga saat  $V_{total}$  ditingkatkan diatas 50 cm/detik, maka api tersebut akan *blow off*. Dari penjelasan diatas maka dapat disimpulkan bahwa kestabilan nyala api pada *combustor* yang menggunakan *single wire mesh* dan *single fuel inlet* bergantung pada fungsi *mesh*. Sedangkan pada *combustor* yang menggunakan *triple wire mesh* dan *double fuel inlet*, memiliki lebih dari satu *wire mesh* yang memiliki fungsi yang berbeda. *Wire mesh* pertama pada sisi kiri zona 1 mempunyai fungsi sebagai *flame holder* dan penahan *flashback* bagi nyala api primer dan untuk *wire mesh* ke-2 (sisi kanan zona 1) memiliki fungsi sebagai penahan *blow-off* bagi dua nyala api sekaligus dalam satu zona, yaitu nyala api primer dan nyala sekunder. Sehingga saat  $V_{total}$  diperbesar diatas 50 cm/detik nyala api keduanya masih mampu nyala stabil di dalam *combustor*.

Meskipun memiliki batas  $V_{total\ max}$  yang tinggi, batas  $V_{total\ min}$  pada *combustor* yang menggunakan *triple wire mesh* dan *double fuel inlet* jauh lebih tinggi yaitu 50 cm/detik daripada *combustor* yang menggunakan *single wire mesh* dan *single fuel inlet* yang memiliki  $V_{total\ min}$  12 cm/detik. Artinya untuk *combustor* yang menggunakan *triple wire mesh* dan *double fuel inlet* mengalami pergeseran daerah  $V_{total\ min}$ , dimana untuk bisa membuat nyala api sekunder yang stabil di dalam *combustor* diperlukan sedikitnya  $V_{total}$  yang jauh lebih tinggi dari pada 12 cm/detik. Hal ini diakibatkan karena hembusan gas buang dari nyala api primer yang mengakibatkan reaktan pada *fuel inlet* sekunder terhembus sebagian keluar dari zona pembakaran. Semakin besar  $V_{primer}$  maka hembusan yang dialami pada reaktan sekunder juga akan semakin besar dan hal ini akan berujung pada pergeseran daerah *flammability limit*. Dampak lain dari gas buang yang dihasilkan pada nyala primer yaitu terjadi lagi pergeseran pada daerah rasio ekuivalen ( $\Phi$ ) kearah yang lebih kecil atau pembakaran yang terjadi pada kondisi campuran lebih miskin. Sehingga dari penjelasan diatas kestabilan nyala api sekunder dipengaruhi oleh *wire mesh* sebagai penahan *blow-off* dan keberadaan nyala api primer sebagai pemicu terbentuknya nyala api sekunder, meskipun pada kenyataannya nyala api primer menghembuskan gas buang yang menyulitkan untuk membuat nyala api sekunder stabil.

Selanjutnya akan dibahas tentang perbedaan daerah *flammability limit* untuk masing-masing *combustor* pada kondisi dengan  $V_{primer}$  26, 36 dan 42 cm/detik. Grafik *flammability limit* untuk setiap *combustor* dengan  $V_{primer}$  26, 36 dan 42 cm/detik ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 *Flammability limit* dalam *meso-scale combustor* dengan *double fuel inlet* dan *triple wire mesh* dan variasi  $V_{\text{primer}}$

Pada Gambar 4.13 terlihat semakin besar  $V_{\text{primer}}$ , maka terjadi pergeseran dua daerah *flammability limit* dimana daerah  $V_{\text{total min}}$  yang semakin tinggi dan daerah rasio ekuivalen yang semakin sempit ke arah pembakaran pada campuran yang lebih miskin. Kecenderungan ini terjadi diakibatkan karena waktu reaktan yang masuk pada *fuel inlet* sekunder dalam daerah pembakaran terbatas akibat pengaruh dari hembusan gas buang dari nyala api primer. Sehingga tidak semua bahan bakar pada *fuel inlet* sekunder dapat terbakar sempurna. Sehingga semakin banyak debit reaktan yang disuplai dari *fuel inlet* sekunder, maka semakin banyak juga reaktan yang belum terbakar sempurna dan terhembus keluar dari daerah reaksi pembakaran. Sebagai contoh pada  $V_{\text{primer}} 26$  cm/detik memiliki  $V_{\text{total min}}$  sebesar 50 cm/detik lebih kecil dibandingkan  $V_{\text{primer}} 36$  cm/detik yaitu  $V_{\text{total min}} 70$  cm/detik. Artinya pada saat reaktan pada *fuel inlet* sekunder dialirkan dengan jumlah tertentu dan  $V_{\text{primer}}$  dikondisikan pada 26 cm/detik maka sebagian kecil saja reaktan tersebut akan dihembuskan oleh gas buang pada nyala api primer, namun jika pada nyala api primer dikondisikan pada 36 cm/detik, maka hembusan yang dialami oleh reaktan dari *fuel inlet* sekunder akan lebih besar. Hal ini mungkin mengakibatkan sejumlah reaktan dari *fuel inlet* sekunder terbang dari zona pembakaran sebelum mengalami proses pembakaran. Sehingga untuk membuat nyala api sekunder dapat menyala dan stabil di dalam *combustor* pada  $V_{\text{primer}} 36$  cm/detik dibutuhkan kecepatan reaktan yang lebih tinggi pula daripada *combustor* pada  $V_{\text{primer}} 26$

cm/detik. Fenomena ini juga berlangsung pada  $V_{\text{primer}} 42$  cm/detik, dimana untuk membuat nyala api sekunder dapat menyala dan stabil di dalam *combustor* dibutuhkan kecepatan reaktan yang lebih tinggi daripada *combustor* pada  $V_{\text{primer}} 26$  dan  $36$  cm/detik.

Pada Gambar 4.13 terlihat *combustor* dengan  $V_{\text{primer}} 26$  cm/detik batas  $V_{\text{total}}$  berada pada  $50$  hingga  $140$  cm/detik, dengan  $\Phi_{\text{min}}$  berada pada  $\Phi = 0.8$  dan  $\Phi_{\text{max}}$  pada  $\Phi = 1.45$ . Kemudian *combustor* dengan  $V_{\text{primer}} 36$  cm/detik batas  $V_{\text{total}}$  berada pada  $70$  hingga  $150$  cm/detik dengan  $\Phi_{\text{min}} = 0.7$  dan  $\Phi_{\text{max}}$  berada pada  $\Phi = 1.4$ . Dan yang terakhir *combustor* dengan  $V_{\text{primer}} 42$  cm/detik batas  $V_{\text{total}}$  berada pada  $73$  hingga  $160$  cm/detik dengan  $\Phi_{\text{min}}$  berada pada  $\Phi = 0.7$  dan  $\Phi_{\text{max}}$  pada  $\Phi = 1.3$ . Jadi *combustor* dengan  $V_{\text{primer}} 26$  cm/detik memiliki batas daerah *flammability limit* yang lebih luas daripada daerah *flammability limit* pada  $36$  dan  $42$  cm/detik. Hal ini diakibatkan karena waktu tinggal reaktan dari *fuel inlet* sekunder dalam daerah reaksi pembakaran cukup lama, meskipun gas buang dari nyala api primer menghembuskan sebagian kecil debit reaktan dari *fuel inlet* sekunder, sehingga jumlah reaktan yang masuk pada *fuel inlet* sekunder masih lebih banyak terbakar daripada *combustor* dengan  $V_{\text{primer}} 36$  dan  $42$  cm/detik.

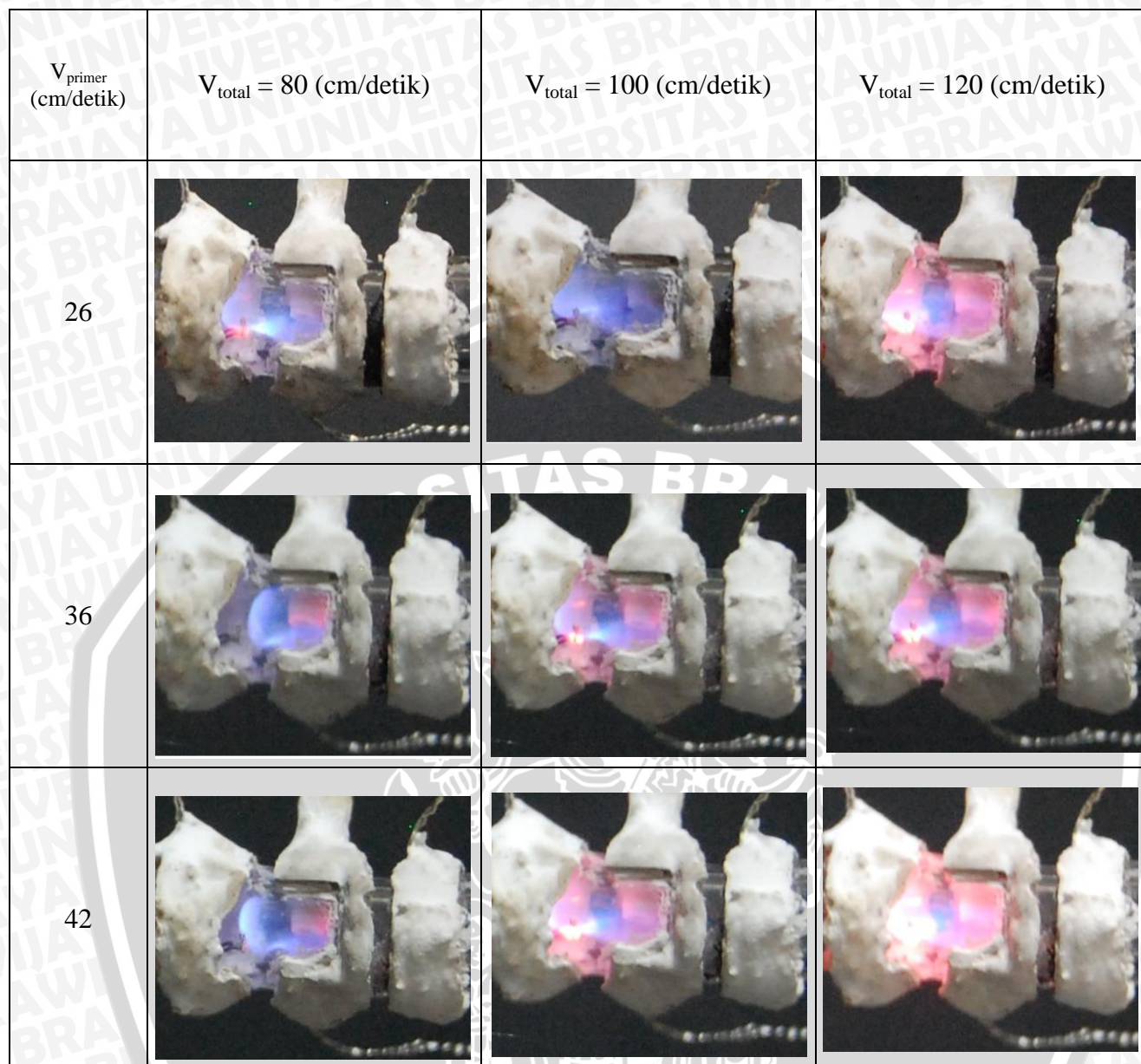
#### 4.3.1 Visualisasi nyala api

Untuk mengambil data berupa visualisasi nyala api, langkah awal adalah menentukan titik-titik pengukuran berdasarkan data dari Tabel 4.5, 4.6, dan 4.7. Dari data tersebut, diambil beberapa titik pengukuran untuk mengetahui karakteristik visualisasi nyala api dimana kesemua titik pengukuran yang diambil harus berada didalam ketiga area batas kestabilan api dari tiga kecepatan total reaktan dari *fuel inlet* primer yang berbeda. Kemudian ditentukan tiga titik pada rasio ekuivalen ( $\phi$ ) = 1 dengan kecepatan total reaktan yang berbeda dan tiga titik pada kecepatan total reaktan yang sama ( $100$  cm/detik) dengan rasio ekuivalen yang berbeda. Total pengambilan data ada lima titik. Tabel 4.8 menunjukkan rincian titik pengukuran visualisasi nyala api.

Tabel 4.8 Titik pengukuran visualisasi nyala api

No.	Ratio teoritis	V teoritis (cm/detik)	Primer		Sekunder		Total	
			Q bb (ml/menit)	Q udara (ml/menit)	Q bb (ml/menit)	Q udara (ml/menit)	Q bb (ml/menit)	Q udara (ml/menit)
1	1	80	5	135	10	278.55	15	413.55
2	1	80	7	189	8	224.55	15	413.55
3	1	80	8	218	7	195.55	15	413.55
4	1	100	5	135	14	385.03	19	520.03
5	1	100	7	189	12	331.03	19	520.03
6	1	100	8	218	11	302.03	19	520.03
7	1	120	5	135	18	494.51	23	629.51
8	1	120	7	189	16	440.51	23	629.51
9	1	120	8	218	15	411.51	23	629.51
10	0.9	100	5	135	12	382.29	17	516.988889
11	0.9	100	7	189	10	328.29	17	516.988889
12	0.9	100	8	218	9	298.29	17	516.988889
13	1.2	100	5	135	18	389.51	23	524.591667
14	1.2	100	7	189	16	335.51	23	524.591667
15	1.2	100	8	218	15	306.51	23	524.591667

Gambar 4.14 menunjukkan visualisasi nyala api didalam *meso-scale combustor* dengan *double fuel inlet* dan *triple wire mesh* pada  $V_{\text{primer}}$  26, 36, dan 42 cm/detik dimulai dengan  $\Phi = 1$  (stoikiometri) dengan  $V_{\text{total}}$  80, 100 dan 120 cm/detik.



Gambar 4.14 Visualisasi nyala api dalam *meso-scale combustor* dengan *double fuel inlet* pada  $\Phi = 1$ .

Pada gambar 4.14 terlihat bahwa warna api untuk setiap kenaikan  $V_{\text{total}}$  dengan  $V_{\text{primer}}$  yang sama pada *meso-scale combustor* cenderung memiliki warna api yang bewarna biru. Hal ini menunjukkan bahwa pembakaran terjadi pada saat kondisi stoikiometri atau pada rasio ekuivalen  $\Phi=1$  bahan bakar dapat terbakar sempurna. Warna biru juga menunjukkan tidak ada proses pembentukan jelaga yang dihasilkan dalam pembakaran di dalam *meso-scale combustor*. Bertambahnya  $V_{\text{total}}$  juga mempengaruhi warna nyala api, semakin tinggi  $V_{\text{total}}$  dengan  $V_{\text{primer}}$  tetap maka warna

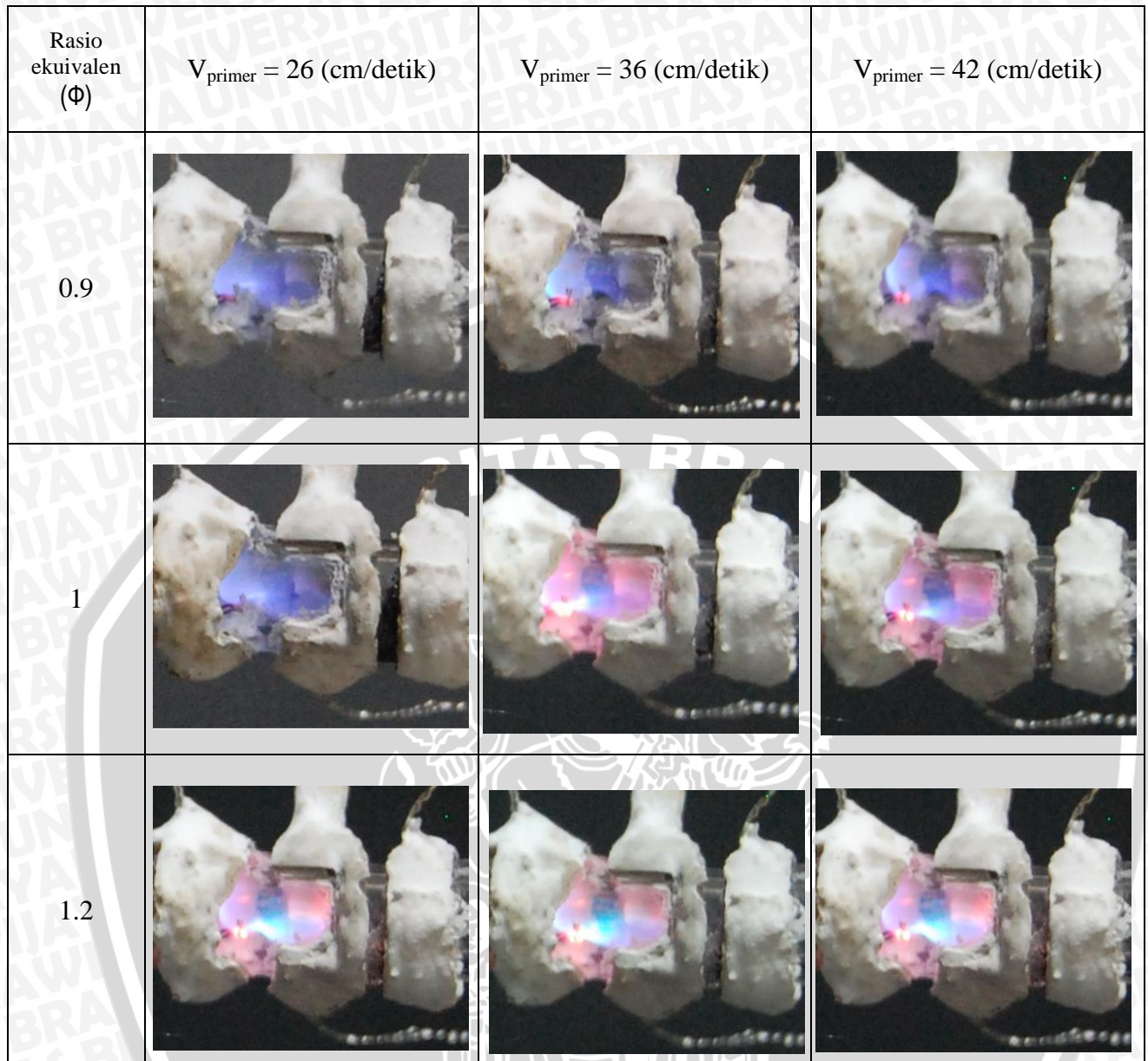


nyala api menjadi biru dan semakin terang diikuti dengan perubahan warna dinding *combustor* yang awalnya tidak bewarna menjadi semakin memerah. Hal ini dikarenakan semakin tinggi  $V_{total}$ , maka jumlah reaktan yang terbakar semakin besar pula, sehingga energi yang dihasilkan juga akan besar dan temperaturnya semakin meningkat pula. Dengan semakin besarnya energi yang dihasilkan oleh ke-2 nyala api maka *wire mesh* ke-2 yang berada pada zona 1 semakin banyak menyerap kalor dari ke-2 nyala api tersebut sehingga *wire mesh* ke-2 menjadi berwarna merah dan memancarkan radiasi ke setiap bagian kaca *combustor*. Selain itu warna merah tersebut juga diakibatkan oleh efek pantulan cahaya dari *mesh*. Sehingga warna dinding *combustor* menjadi kemerahan juga. Itulah alasan mengapa dengan semakin tingginya  $V_{total}$  warna dinding *combustor* menjadi merah, tetapi warna api tetap bewarna biru. Sebagai contoh Gambar 4.14 menunjukkan warna api pada  $V_{reaktan}$  100 cm/s dengan  $V_{primer}$  36 cm/s.



Gambar 4.15 Warna nyala api dalam *meso-scale combustor* dengan *double fuel inlet* dan *triple wire mesh*.

Pada gambar 4.14 juga terlihat warna api untuk  $V_{primer}$  yang semakin besar pada masing-masing  $V_{total}$  juga memiliki kecenderungan warna nyala api dalam *meso-scale combustor* terlihat semakin terang tetapi berangsur angsur nyala api sekunder semakin menipis. Hal ini diakibatkan karena waktu tinggal reaktan pada *fuel inlet* sekunder semakin sebentar akibat dari pengaruh gas buang hasil dari proses pembakaran pada nyala api primer. Sehingga tidak semua reaktan yang masuk melalui *fuel inlet* sekunder dapat terbakar sempurna, melainkan terbuang ke luar daerah pembakaran. Selain itu pada kondisi yang sama bentuk nyala api primer semakin melebar, hal ini dikarenakan semakin banyak jumlah reaktan yang terbakar pada nyala api primer dan mengakibatkan penambahan luas penampang dari bentuk api tersebut.



Gambar 4.16 Visualisasi nyala api dalam *meso-scale combustor* dengan  $V_{\text{total}} = 100$  cm/detik

Kemudian Gambar 4.15 menunjukkan visualisasi nyala api didalam *meso-scale combustor* dengan *double fuel inlet* pada  $\Phi = 0.9$ ,  $\Phi = 1$  dan  $\Phi = 1.2$  pada masing  $V_{\text{total}}$  sebesar 100 cm/detik. Pada Gambar 4.15 diketahui bahwa secara keseluruhan warna api hampir sama untuk  $\Phi = 0.9$  dan  $\Phi = 1$  yaitu berwarna biru dan semakin diikuti dengan perubahan warna dinding *combustor* yang awalnya tidak bewarna menjadi semakin memerah. Hal ini dikarenakan semakin tinggi  $V_{\text{primer}}$ , maka jumlah reaktan yang terbakar semakin besar pula, sehingga energi yang dihasilkan juga akan besar dan temperturnya semakin meningkat pula. Dengan semakin besarnya energi yang dihasilkan oleh ke-2 nyala api maka *wire mesh* ke-2 yang berada pada zona 1 semakin

banyak menyerap kalor dari ke-2 nyala api tersebut sehingga *wire mesh* ke-2 menjadi berwarna merah dan memancarkan radiasi ke setiap bagian kaca *combustor*. Selain itu warna merah tersebut juga diakibatkan oleh efek pantulan cahaya dari *mesh*. Sehingga warna dinding *combustor* menjadi kemerahan juga.

Kemudian semakin tinggi  $\Phi$  dengan  $V_{\text{primer}}$  tetap maka warna api yang dihasilkan akan berwarna biru dan semakin terang, kondisi ini terjadi pada  $\Phi = 0,9$  dan  $\Phi = 1$ . Hal ini diakibatkan karena semakin banyak debit reaktan yang terbakar sehingga energi yang dihasilkan semakin besar dan warna api semakin terang. Namun pada kondisi yang terjadi pada  $\Phi = 1,2$  warna api tidak lagi berwarna biru terang, melainkan berwarna biru kehijau hijauan, warna hijau tersebut mengindikasikan energi dan temperatur yang dihasilkan menurun, hal ini terjadi karena kekurangan udara ( $O_2$ ) yang berperan sebagai oksidator yang mengakibatkan tidak semua bahan bakar terbakar. Pembakaran yang tidak sempurna ini akan menghasilkan  $C_2$  yang memancarkan warna hijau terang pada nyala api (Turn 2000:256).

