

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Data hasil penelitian diperoleh dari penelitian eksperimental pembakaran butana (C_4H_{10}) pada *combustor* dengan variasi jumlah dan jarak antar-*flame holder* jenis *perforated plate*. Pengambilan data meliputi *flame stability limit*, visualisasi nyala api, temperatur dinding *combustor*, dan temperatur gas buang.

Data *flame stability limit* diperoleh dengan cara menjaga debit bahan bakar (Q_f) konstan dan memvariasikan debit udaranya (Q_a). Debit udara (Q_a) divariasikan hingga menemukan debit udara minimum (*upper limit*) dan debit udara maksimum (*lower limit*) di mana api masih dapat menyala dengan stabil di dalam *combustor*. Pengambilan data dilakukan secara berulang-ulang untuk berbagai debit bahan bakar (Q_f) kemudian ditampilkan ke dalam bentuk grafik. Data *flame stability limit* terlampir dalam lampiran 1-3. Kalibrasi bahan bakar dan udara juga dilakukan agar memperoleh hasil yang sesuai dengan standar instrumen alat ukur.

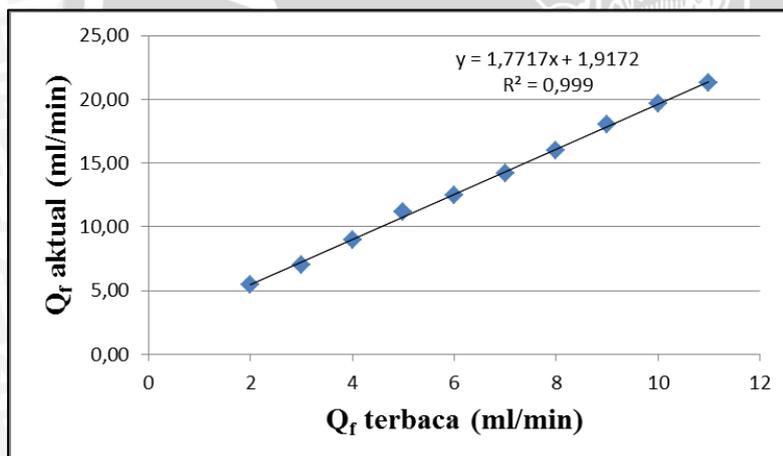
4.2 Kalibrasi *Flowmeter* Butana (C_4H_{10}) dan Udara

Pengambilan data debit bahan bakar (Q_f) menggunakan *flowmeter* untuk bahan bakar propana (C_3H_8). Sedangkan bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah bahan bakar butana (C_4H_{10}). Oleh sebab itu, kalibrasi perlu dilakukan untuk mendapatkan debit aktual dari debit yang terbaca pada saat pengambilan data. Proses kalibrasi *flowmeter* bahan bakar butana diawali dengan mengisi penuh bak penampung. Sebuah gelas ukur kemudian dimasukkan ke dalam bak penampung hingga terisi air dan diposisikan terbalik serta tegak lurus terhadap dasar bak penampung. Bahan bakar dari tabung butana dialirkan dengan mengatur debit bahan bakar butana menggunakan *flowmeter* propana yang terhubung dengan selang. Ujung selang tersebut dimasukkan ke dalam gelas ukur dari bawah, di mana *volume* air pada gelas ukur nantinya akan terus berkurang akibat gas butana yang memenuhi ruang dalam gelas ukur, lalu posisi gelas ukur ditarik perlahan ke atas agar permukaan air di dalam gelas ukur dan bak penampung sama. Penurunan *volume* air diamati pada gelas ukur selama satu menit. Data kalibrasi *flowmeter* bahan bakar butana (C_4H_{10}) dimasukkan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1
Data kalibrasi *flowmeter* bahan bakar butana (C_4H_{10})

Q_f terbaca (ml/min)	Q_f aktual (ml/min)
2	5,5
3	7
4	9
5	11,17
6	12,5
7	14,17
8	16
9	18
10	19,67
11	21,33

Kemudian data dari Tabel 4.1 diolah menjadi grafik kalibrasi seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Kalibrasi *flowmeter* bahan bakar butana (C_4H_{10})

Dari grafik, sebuah garis regresi linear ditarik dan menghasilkan persamaan :

$$y = 1,7717x + 1,9172 \quad (4-1)$$

Di mana:

$$y = Q_f \text{ aktual}$$

$$x = Q_f \text{ terbaca}$$

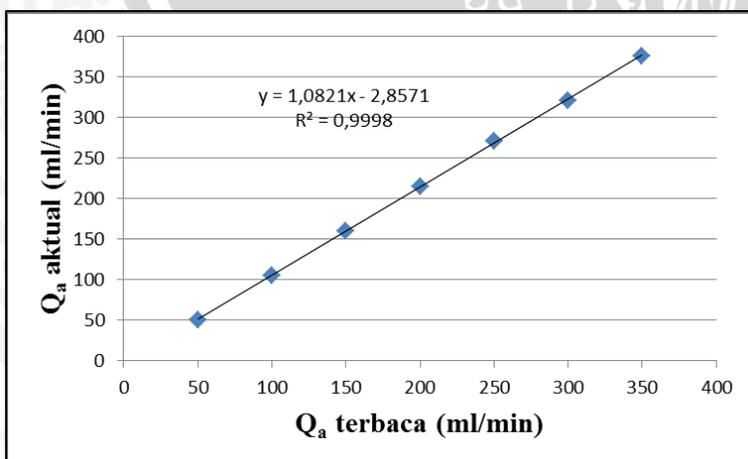
R^2 adalah koefisien determinasi yang menentukan keakuratan suatu persamaan regresi dengan cara memberikan proporsi atau persentase yang terletak antara 0–1. Persamaan semakin akurat apabila nilai R^2 semakin mendekati angka 1. Setelah didapat persamaan

diatas, seluruh nilai Q_f pada dikonversi menggunakan persamaan tersebut. Kemudian hasil konversinya dapat dilihat pada lampiran 1-3.

Kalibrasi juga dilakukan pada *flowmeter* udara seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.2. Tujuannya agar didapatkan data hasil penelitian yang akurat. Proses kalibrasi *flowmeter* udara diawali dengan mengisi penuh air bak penampung. Sebuah gelas ukur kemudian dimasukkan ke dalam bak penampung hingga terisi air dan diposisikan terbalik serta tegak lurus terhadap dasar bak penampung. Udara dari kompresor dialirkan dengan mengatur debit udara menggunakan *flowmeter* udara yang terhubung dengan selang. Ujung selang tersebut dimasukkan ke dalam gelas ukur dari bawah, di mana *volume* air pada gelas ukur nantinya akan terus berkurang akibat udara yang memenuhi ruang dalam gelas ukur, lalu posisi gelas ukur ditarik perlahan ke atas agar permukaan air di dalam gelas ukur dan bak penampung sama. Penurunan *volume* air diamati pada gelas ukur selama satu menit. Hasil kalibrasi debit udara Q_a dapat dilihat pada lampiran 1-3.

Tabel 4.2
Data kalibrasi *flowmeter* udara

Q_a terbaca (ml/min)	Q_a aktual (ml/min)
50	50
100	105
150	160
200	215
250	270
300	320
350	375



Gambar 4.2 Kalibrasi *flowmeter* udara

Dari titik-titik tersebut ditariklah sebuah garis regresi linear sehingga menghasilkan persamaan:

$$y = 1,0821x - 2,8571 \quad (4-2)$$

Di mana:

y = Q_a aktual

x = Q_a terbaca

4.3 Pengolahan Data *Flame Stability Limit*

Di dalam grafik *flame stability limit* terdapat dua data yang diperlukan, yaitu data rasio ekuivalen dan data kecepatan total reaktan. Untuk mengetahui nilai rasio ekuivalen pada *flame stability limit*, maka terlebih dahulu harus dilakukan perhitungan rasio udara dan bahan bakar (AFR) stoikiometri dengan AFR aktual. AFR stoikiometri adalah perbandingan komposisi campuran udara dengan bahan bakar pada kondisi di mana setiap molekul bahan bakar bereaksi seluruhnya dengan molekul udara. Setelah nilai AFR stoikiometri didapatkan, maka selanjutnya dapat dilakukan perhitungan rasio ekuivalen dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

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

Keterangan:

ϕ : Rasio ekuivalen

AFR_{stoic} : Rasio udara dengan bahan bakar pada kondisi stoikiometri

AFR_{actual} : Rasio udara dengan bahan bakar pada kondisi aktual

Perhitungan nilai AFR_{actual} dapat menggunakan data aktual debit udara dan debit bahan bakar. Data yang digunakan berdasarkan lampiran 1. Berikut perhitungan *rasio ekuivalen* sebagai contoh.

4.3.1 Perhitungan Rasio Ekuivalen (ϕ)

Diketahui dari data lampiran 1

- $AFR_{stoic} = 30,94$
- $Q_f = 9,89$ ml/min
- $Q_{a \min} = 122$ ml/min
- $Q_{a \max} = 181$ ml/min

Perhitungan rasio ekuivalen (Φ) menggunakan penurunan rumus rasio ekuivalen (2-3), berdasarkan nilai $Q_{a \min}$ dan $Q_{a \max}$, dapat dicari *lower limit* (Φ_{lower}) dan *upper limit* (Φ_{upper}) dengan rumus (4-2) dan (4-3).

$$a. \Phi_{lower} = \frac{Q_f \times AFR_{stoic}}{Q_{a \max}} \quad (4-2)$$

$$\Phi_{lower} = \frac{9,89 \text{ ml/min} \times 30,94}{181 \text{ ml/min}}$$

$$\Phi_{lower} = 1,69$$

$$b. \Phi_{upper} = \frac{Q_f \times AFR_{stoic}}{Q_{a \min}} \quad (4-3)$$

$$\Phi_{upper} = \frac{9,89 \text{ ml/min} \times 30,94}{122 \text{ ml/min}}$$

$$\Phi_{upper} = 2,52$$

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

4.3.2 Perhitungan Kecepatan Total Reaktan (V_{total})

Diketahui dari data lampiran 1

- $Q_f = 9,89 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \min} = 122 \text{ ml/min}$
- $Q_{a \max} = 181 \text{ ml/min}$
- $r_{combustor} = 1,75 \text{ mm}$

$$V_{total} = \frac{Q}{A}$$

Perhitungan kecepatan total reaktan (V_{total}) menggunakan persamaan kontinuitas, di mana volume fluida udara dan bahan bakar (Q) yang mengalir per satuan waktu dibagi dengan luas penampang *combustor* (A). V_{total} terbagi menjadi dua, yaitu kecepatan reaktan minimum dan kecepatan reaktan maksimum. Pada persamaan 4-4 dan 4-5, debit total aliran reaktan dikonversikan ke dalam cm^3/s dan luasan penampang menggunakan satuan cm^2 .

$$a. V_{total \min} = \frac{\left(\frac{Q_{a \min} + Q_f}{60}\right)}{\left(\frac{\pi \times r^2}{100}\right)} \quad (4-4)$$

$$V_{total\ min} = \frac{\left(\frac{122\ ml/min + 9,89\ ml/min}{60}\right)}{\frac{(3,14 \times 1,75^2)}{100}} cm^2$$

$$V_{total\ min} = 22,79\ cm/s$$

$$b. V_{total\ max} = \frac{\left(\frac{Q_{a\ max} + Q_f}{60}\right)}{\frac{(3,14 \times r^2)}{100}} \quad (4-5)$$

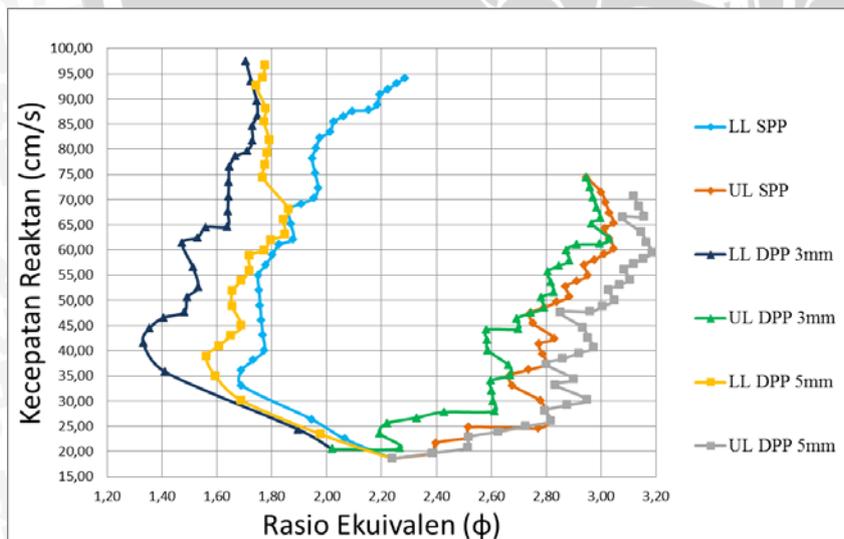
$$V_{total\ max} = \frac{\left(\frac{181\ ml/min + 9,89\ ml/min}{60}\right)}{\frac{(3,14 \times 1,75^2)}{100}} cm^2$$

$$V_{total\ max} = 33,10\ cm/s$$

Seluruh perhitungan di atas diterapkan ke masing-masing data pada lampiran 1 sampai dengan lampiran 3.

4.4 Flame Stability Limit

Pengambilan data *flame stability limit* bertujuan untuk mengetahui daerah di mana api masih dapat menyala dengan stabil pada rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan tertentu. Daerah tersebut berada di antara *upper limit* dan *lower limit*. Selanjutnya, *flame stability limit* juga digunakan dalam pengambilan data visualisasi nyala api dan temperatur dinding *combustor* serta temperatur gas buang.



Gambar 4.3 *Flame stability limit* pada *combustor* dengan variasi jumlah dan jarak antara *perforated plate*

Gambar 4.3 menampilkan daerah kestabilan api (*flame stability limit*) pada setiap variasi *perforated plate*. Terlihat bahwa penggunaan DPP dapat membuat rentang rasio ekuivalen di mana api stabil di dalam *combustor* lebih tinggi jika dibandingkan dengan

hanya menggunakan SPP. Hal ini disebabkan karena *perforated plate* kedua dalam DPP berperan sebagai pencegah *blow off* pada debit udara yang tinggi dengan kondisi ekuivalen rasio rendah dan sebagai media penghantar panas yang dihasilkan dalam pembakaran ke dinding *combustor* sehingga meningkatkan resirkulasi panas dari nyala api ke reaktan dengan adanya konduksi pada *perforated plate* ke dinding *combustor*. Akibatnya suhu awal reaktan meningkat, sehingga kecepatan pembakaran juga ikut meningkat dan pembakaran dapat terjadi pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi.

Akan tetapi peningkatan kestabilan pembakaran pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi tidak teramati. Hal ini dikarenakan debit reaktan telah mencapai batas maksimal kapasitas *flowmeter* dan api masih stabil di dalam *combustor*. Tetapi apabila debit reaktan lebih ditingkatkan, maka nyala api dalam SPP bergerak menjauhi *perforated plate* kemudian menyala di mulut *combustor*. Sedangkan nyala api dalam *combustor* dengan DPP masih tetap stabil, baik dengan jarak 3 mm maupun 5 mm. Hal tersebut menunjukkan bahwa pembakaran pada *combustor* dengan dua *perforated plate* lebih stabil pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi dibandingkan dengan pembakaran pada *combustor* yang hanya menggunakan satu *perforated plate* saja. Untuk perbandingan jarak antar-*perforated plate*, *combustor* dengan DPP 3 mm memiliki performa yang lebih baik dari *combustor* dengan DPP 5 mm karena pembakaran dapat terjadi pada kondisi yang lebih dekat dengan stoikiometri. Bagian *lower limit* dari diagram kestabilan api bergeser ke daerah lebih miskin bahan bakar, mendekati kondisi stoikiometri $\phi=1$.

Mengecilnya jarak antar-*perforated plate* juga membuat intensitas resirkulasi panas di dalam *combustor* semakin tinggi dan lebih mampu menahan *blow off* pada rasio ekuivalen yang lebih rendah. Hal tersebut menguntungkan, karena pembakaran yang lebih mendekati kondisi stoikiometri pada $\phi>1$ memiliki arti bahwa pembakaran yang terjadi lebih mendekati pembakaran sempurna. Bahan bakar yang terbuang bersama gas buang sebelum sempat terbakar semakin sedikit.

Pada daerah kaya bahan bakar, *combustor* dengan DPP 3 mm mengalami pergeseran batas menjadi lebih sempit. Ini dikarenakan letak *perforated plate* kedua yang sangat dekat dengan api menyebabkan terjadinya *radical quenching* dan kalor dari api yang terserap ke *perforated plate* terlalu banyak, sehingga api lebih mudah padam.

4.5 Visualisasi Bentuk Nyala Api

Pengambilan visualisasi api dilakukan di dalam ruangan minim cahaya dengan latar belakang gelap agar mendapat hasil gambar yang baik.



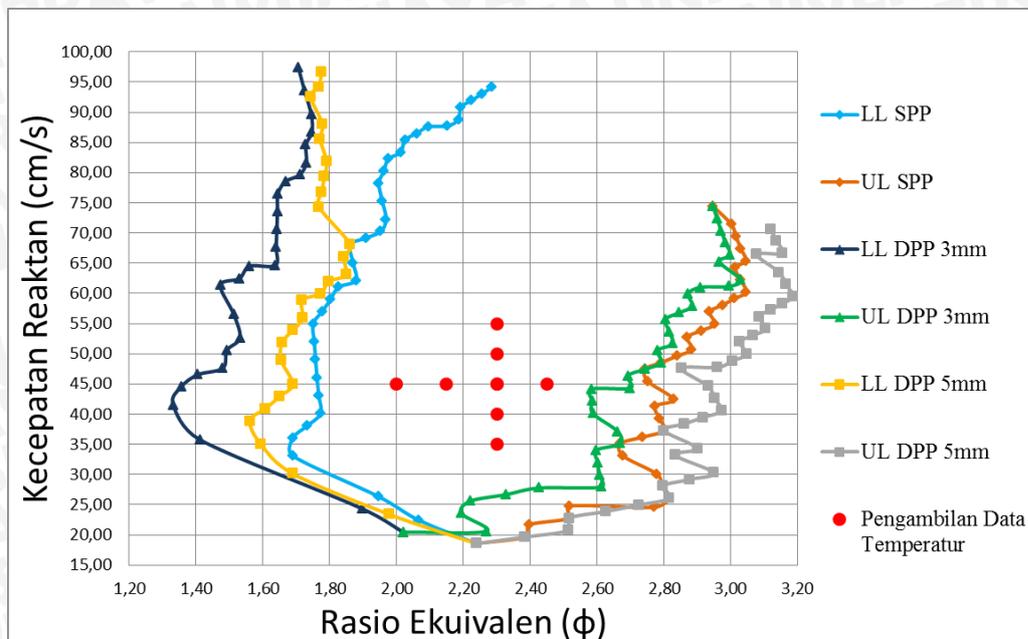
Gambar 4.4 Visualisasi bentuk nyala api pada *meso-scale combustor* dengan (a) SPP, (b) DPP 3 mm, dan (c) DPP 5 mm

Gambar 4.4 (a), (b), dan (c) menunjukkan visualisasi bentuk nyala api pada *combustor* dengan *single* dan *double perforated plate*. Semakin tinggi rasio ekuivalen, maka warna nyala api akan berubah dari biru redup menjadi biru terang. Ini disebabkan karena perbandingan debit bahan bakar yang masuk ke dalam zona pembakaran meningkat lebih tinggi daripada debit udara. Selain itu, peningkatan rasio ekuivalen dapat memperkecil luasan api seperti yang terlihat pada Gambar 4.4 (b).

Kemudian pada variasi kecepatan reaktan dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan reaktan, maka pembakaran dapat menghasilkan luasan api yang dapat memenuhi dinding *combustor*. Pada kecepatan reaktan tertinggi yang diambil dalam penelitian, pembakaran menghasilkan nyala api berwarna merah menyala pada *downstream*. *Perforated plate* kedua dan dinding *combustor* menjadi berwarna merah disebabkan karena penyerapan kalor yang berasal dari api, sehingga temperaturnya sangat tinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 (b) dan (c). Bahkan pada Gambar 4.4 (b) terjadi perubahan bentuk pada *perforated plate* kedua akibat pemuaiannya pada temperatur yang sangat tinggi.

4.6 Temperatur Dinding *Combustor* dan Temperatur Gas Buang

Untuk membandingkan penyerapan kalor pada dinding *combustor*, maka pengambilan data temperatur dilakukan pada kondisi yang sama pada setiap variasi. Titik-titik merah pada Gambar 4.5 menunjukkan titik pengambilan data temperatur.



Gambar 4.5 Titik pengambilan data temperatur

4.6.1 Perbandingan Temperatur Dinding *Combustor* dan Temperatur Gas Buang dengan Variasi Rasio Ekuivalen

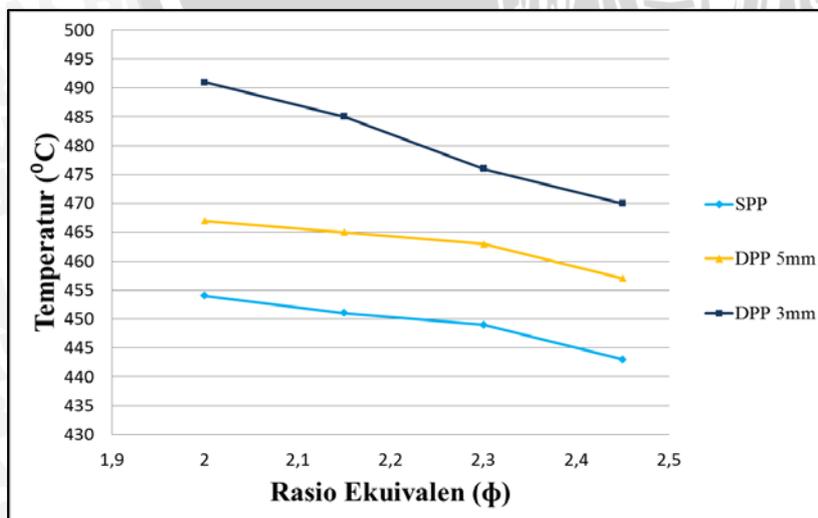
Pemasangan DPP dapat meningkatkan temperatur dinding *combustor*. Berdasarkan Tabel 4.3 pada kecepatan reaktan 45 cm/s, dari rasio ekuivalen 2 sampai dengan 2,45 selisih temperatur rata-rata antara gas buang dengan dinding *combustor* pada SPP, DPP 3 mm, dan DPP 5 mm secara berturut-turut adalah 105°C, 40°C, dan 68°C. Ini membuktikan bahwa perpindahan kalor dari nyala api ke dinding *combustor* meningkat. Pada *combustor* dengan SPP hanya terjadi satu peristiwa konveksi saja, yaitu perpindahan kalor dari api ke dinding *combustor*. Akan tetapi pada *combustor* dengan DPP, selain berpindah ke dinding *combustor*, kalor api secara konveksi juga berpindah ke *perforated plate* kedua yang kemudian secara konduksi dihantarkan menuju dinding *combustor* sehingga menyebabkan peningkatan resirkulasi panas dan temperatur awal reaktan sebelum masuk ke dalam zona pembakaran. Bila dibandingkan dengan DPP 5 mm, jarak *perforated plate* yang lebih dekat dengan api membuat penyerapan kalor pada *perforated plate* lebih banyak, sehingga kalor yang dilepas dalam gas buang lebih sedikit dan temperaturnya lebih rendah.

Tabel 4.3

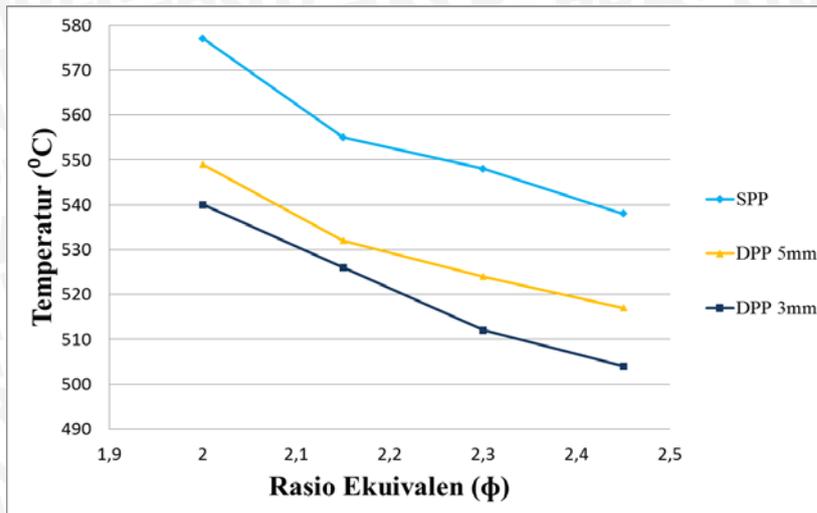
Data temperatur *combustor* pada kecepatan reaktan 45 cm/s dengan variasi rasio ekuivalen

Variasi	ϕ	Temperatur Dinding <i>Combustor</i> (°C)	Temperatur Gas Buang (°C)	ΔT (°C)
SPP	2	454	577	122
	2,15	451	555	104
	2,3	449	548	100
	2,45	443	538	96
DPP 3 mm	2	491	540	49
	2,15	485	526	41
	2,3	476	512	36
	2,45	470	504	34
DPP 5 mm	2	467	549	82
	2,15	465	532	67
	2,3	463	524	61
	2,45	457	517	60

Sementara itu, grafik pada Gambar 4.6 dan 4.7 juga menunjukkan bahwa semakin tingginya rasio ekuivalen, maka baik temperatur dinding dan temperatur gas buang akan mengalami penurunan. Meningkatnya rasio ekuivalen menunjukkan bahwa kuantitas oksidator pada saat pembakaran kecil, sehingga bahan bakar yang teroksidasi lebih sedikit daripada bahan bakar yang tidak ikut teroksidasi (*unburned fuel*). Hal ini bersifat merugikan. Kecenderungan kaya bahan bakar inilah yang menyebabkan menurunnya temperatur pada ketiga variasi, karena kalor yang dihasilkan dari reaksi pembakaran berkurang.



Gambar 4.6 Perbandingan temperatur dinding pada kecepatan reaktan 45 cm/s dengan variasi rasio ekuivalen



Gambar 4.7 Perbandingan temperatur gas buang pada kecepatan reaktan 45 cm/s dengan variasi rasio ekuivalen

4.6.2 Perbandingan Temperatur Dinding *Combustor* dan Temperatur Gas Buang dengan Variasi Kecepatan Reaktan

Tabel 4.4 menunjukkan data temperatur dinding *combustor* dan temperatur gas buang pada rasio ekuivalen 2,3. Dari kecepatan reaktan 35 cm/s sampai dengan 55 cm/s, selisih temperatur rata-rata antara gas buang dengan dinding *combustor* pada SPP, DPP 3 mm, dan DPP 5 mm secara berturut-turut adalah 109°C, 42°C, dan 66°C.

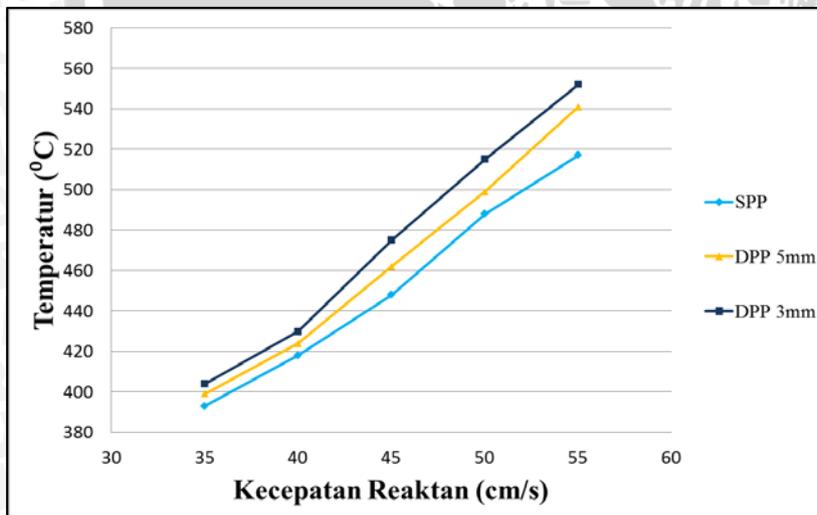
Tabel 4.4

Data temperatur *combustor* pada rasio ekuivalen 2,3 dengan variasi kecepatan reaktan

Variasi	V_{reaktan} (cm/s)	Temperatur Dinding <i>Combustor</i> (°C)	Temperatur Gas Buang (°C)	ΔT (°C)
SPP	35	393	470	77
	40	418	503	85
	45	448	549	101
	50	488	623	135
	55	517	663	146
DPP 3 mm	35	404	433	29
	40	430	462	32
	45	475	510	35
	50	515	564	49
	55	552	616	64
DPP 5 mm	35	399	448	49
	40	424	478	54
	45	462	526	64
	50	499	574	75
	55	541	630	89

Semakin tinggi kecepatan reaktan, maka baik temperatur dinding maupun temperatur gas buang akan mengalami peningkatan. Meningkatnya kecepatan reaktan menunjukkan bahwa penambahan debit bahan bakar dan udara pada rasio ekuivalen yang sama dapat meningkatkan kalor yang dihasilkan. Dengan demikian, temperatur pembakaran semakin meningkat.

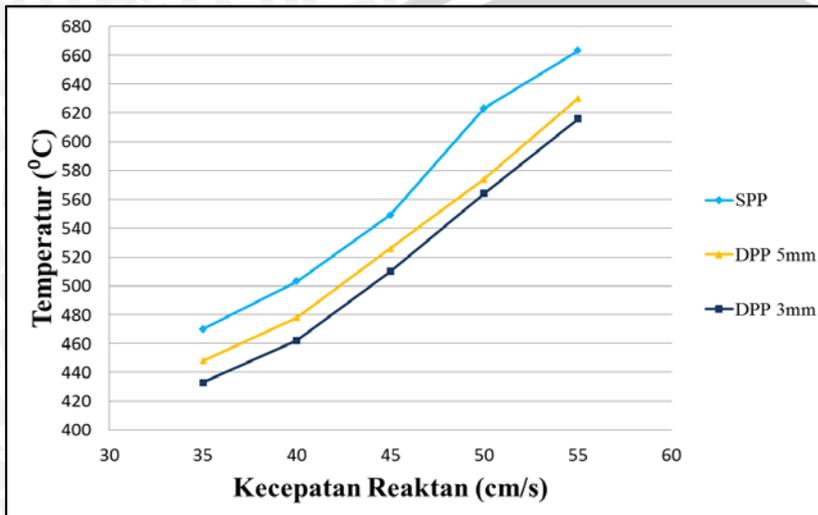
Pada Gambar 4.8, ketiga variasi memiliki kecenderungan posisi grafik yang sama dengan Gambar 4.6, di mana SPP memiliki temperatur dinding yang paling rendah dibandingkan dengan kedua variasi DPP. Hal ini disebabkan karena api yang dihasilkan SPP terus mengalir hingga keluar dari mulut *combustor*. Berbeda dengan DPP karena selain berpindah ke dinding *combustor*, kalor api secara konveksi juga berpindah ke *perforated plate* kedua yang kemudian secara konduksi dihantarkan menuju dinding *combustor* sehingga menyebabkan peningkatan resirkulasi panas dan temperatur awal reaktan sebelum masuk ke dalam zona pembakaran. Pada perbandingan jarak antar *perforated plate*, DPP 3 mm memiliki temperatur dinding yang lebih tinggi daripada DPP 5 mm karena letak *perforated plate* kedua yang lebih dekat dengan api. Dengan begitu, perpindahan kalor dari api ke dinding *combustor* semakin besar.



Gambar 4.8 Perbandingan temperatur dinding pada rasio ekuivalen 2,3 dengan variasi kecepatan reaktan

SPP memiliki temperatur gas buang yang paling tinggi bila dibandingkan dengan kedua variasi DPP, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Hal ini disebabkan karena kalor yang dihasilkan SPP terus mengalir begitu saja ke mulut *combustor*. Pada DPP, kalor hasil pembakaran akan diserap terlebih dahulu oleh *perforated plate* kedua. Penyerapan ini mengurangi kalor yang terdapat pada gas buang, sehingga temperatur gas

buang pada ujung *combustor* lebih rendah. Untuk variasi jarak antar-*perforated plate*, DPP 3 mm memiliki temperatur gas buang yang lebih rendah daripada DPP 5 mm karena pada DPP 3 mm. jarak antara api dengan *perforated plate* kedua lebih dekat menyebabkan DPP 3 mm menyerap kalor dari api lebih banyak. Dengan begitu, kalor yang dilepas ke lingkungan dalam gas buang menjadi lebih sedikit. Karena itulah temperatur gas buang DPP 3 mm lebih rendah bila dibandingkan dengan DPP 5 mm.



Gambar 4.9 Perbandingan temperatur gas buang pada rasio ekuivalen 2,3 dengan variasi kecepatan reaktan

