

KARAKTERISTIK PEMBAKARAN PADA TANGENTIAL CIRCULAR DISC COMBUSTOR DENGAN VARIASI TEBAL RUANG BAKAR

Lilis Yulianti¹

¹Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya,
Jln. Mayjen Haryono No. 167, Malang
+62-341-554291
E-mail: lilis_y@ub.ac.id

Abstract

This research intended to investigate the effect of combustor thickness on the combustion characteristics, include flame stability, flame visualization and combustor wall temperature, inside tangential circular disk combustor. Combustor was made from copper and quartz glass tube cover with an inner diameter of 30 mm. Thickness of the combustor was vary at 1,5 mm, 2 mm and 3 mm. The reactant was a mixture of butane – air. The results show that stable flame could established inside combustor with 2 mm and 3 mm thickness, and failed inside combustor with 1,5 mm thicknes. Furthermore flame fulfils the combustor with thickness 3 mm and occupy only edges section of combustor with 2 mm thickness, due to flame quenching at the combustor center related to high velocity reactant and high shear stress in this region. At the same reactant flow rate, combustor with 2 mm thickness has higher combustor wall temperature because higher volumetric heat release in this combustor.

Keywords: *Disk combustor, tangential inlet, kestabilan api, visualisasi api, temperature dinding combustor.*

PENDAHULUAN

Berkembangnya *micro power generator* (MPG) sebagai sumber energi listrik portabel mendorong berkembangnya penelitian mengenai *micro* atau *meso scale combustor*. *Micro power generator* terdiri dari dua bagian utama, yaitu *micro* atau *meso scale combustor* yang merupakan pembangkit/sumber panas dan modul pengkonversi energi panas menjadi energi listrik [1]. Berdasarkan energi termal konverternya *micro power generator* terbagi menjadi dua yaitu *micro power generator* yang menggunakan siklus daya konvensional dan *micro power generator* yang menggunakan modul pengkonversi energi panas menjadi energi listrik dengan menggunakan *thermophotovoltaic* atau *thermoelectric* [2].

Combustor berfungsi sebagai pengkonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi termal dan merupakan sumber energi dalam *micro power generator*. Kinerja *micro power generator* sangat dipengaruhi oleh kestabilan dan karakteristik pembakaran di dalam *combustor*. Selanjutnya untuk *micro power generator* yang menggunakan *thermophotovoltaic* atau *thermoelectric* untuk mengkonversikan energi termal menjadi energi panas, temperatur dinding *combustor* yang tinggi dan seragam

merupakan persyaratan yang harus dipenuhi untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi. Selain itu juga diperlukan permukaan yang datar, dalam hal ini permukaan dimaksud adalah dinding *combustor*, sehingga dapat dengan mudah dihubungkan dengan modul termoelektrik. Selama ini bentuk *combustor* yang banyak digunakan adalah *cylindrical tube combustor* (ruang bakar berbentuk tabung/silinder), selain itu beberapa peneliti mengembangkan *combustor* berbentuk *rectangular slot* (saluran dengan penampang berbentuk persegi panjang), *swiss roll combustor* serta *circular disk combustor* [3].

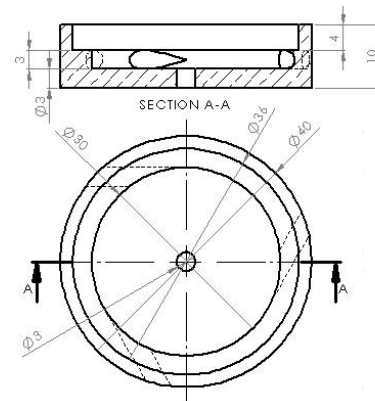
Cylindrical tube combustor memiliki keunggulan dalam kestabilan nyala api yang baik, namun memiliki waktu tinggal reaktan yang sangat cepat, daerah yang efektif sebagai *reaction zone* sangat sempit dan pengaplikasian *thermophotovoltaic* atau *thermoelectric* yang sulit karena tidak memiliki permukaan datar. Hal yang sama terjadi pada *rectangular slot combustor*. *Swiss roll combustor* memiliki kelebihan dengan adanya proses pertukaran kalor yang efektif antara gas hasil pembakaran dengan reaktan sebelum memasuki ruang bakar, sehingga menghasilkan proses *preheating* yang baik

dan peningkatan kestabilan pembakaran [4]. Bagaimanapun juga, waktu tinggal reaktan di dalam *swiss roll combustor* relative kecil karena saluran laluan bahan bakar yang sempit, menghasilkan kecepatan reaktan yang tinggi dan *fuel residence time* yang rendah, mengakibatkan terjadinya *uncomplete combustion*. *Circular disk combustor* memiliki kelebihan bila dibandingkan dengan tipe *combustor* yang lain, yaitu memiliki permukaan dan bidang kontak yang luas dan datar sehingga mudah di aplikasikan ke *thermophotovoltaic* atau *thermoelectric* dan memiliki efisiensi thermal yang lebih baik dari pada tipe yang lain. Tetapi, dalam penelitian yang dilakukan Katsuyoshi, dkk, 2009, pembakaran hanya terjadi dalam saluran sempit di dalam *circular disk combustor*, sehingga *combustor* ini juga memiliki daerah yang efektif sebagai *reaction zone* sangat sempit.

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan *combustor* dengan waktu tinggal reaktan yang lebih besar dengan pembakaran yang lebih stabil serta temperatur dinding *combustor* yang tinggi dan seragam. Hal ini akan dicapai dengan membuat inlet bahan bakar pada arah tangensial. Sehingga terjadi aliran *swirling* di dalam *combustor*, dan diharapkan seluruh ruangan/volume *combustor* efektif sebagai *reaction zone*. Selain itu tebal ruang bakar akan divariasikan untuk mendapatkan pembakaran yang lebih stabil dengan temperatur dinding *combustor* yang tinggi dan seragam.

METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini digunakan *combustor* berbentuk silinder tipis dengan inlet reaktan pada arah tangensial (*tangential circular disc combustor*). *Combustor* terbuat dari tembaga dengan penutup kaca untuk memungkinkan dilakukan visualisasi nyala api di dalam *combustor*. Ruang bakar berbentuk silinder dengan diameter 30 mm dengan 3 saluran inlet pada arah tangensial yang masing-masing berdiameter 1 mm. Tinggi (tebal) *combustor* divariasikan sebesar 1,5 mm, 2 mm dan 3 mm. Detail *combustor* dengan tebal ruang bakar 3 mm ditunjukkan pada Gambar 1

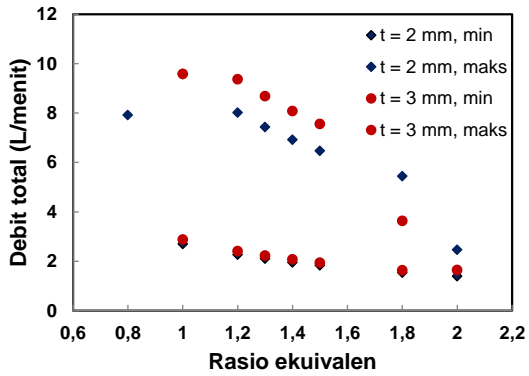


Gambar 1. *Tangential cylindrical disk combustor.*

Dua *combustor* yang lain sama dengan *combustor* pada Gambar 1, kecuali tebalnya 1,5 mm dan 2 mm. Bahan bakar yang digunakan adalah butana dengan oksidator udara. Udara disimpan dalam tangki kompresor sebelum dialirkan ke ruang bakar. Debit bahan bakar dan udara di atur menggunakan flow meter bahan bakar dan udara (Koflock, R1250). Campuran bahan bakar-udara dengan debit dan rasio ekuivalen tertentu dialirkan ke dalam ruang bakar dan dinyalakan dengan *spark ignitor*. Selanjutnya debit bahan bakar dan udara divariasikan untuk mengetahui batas kecepatan reaktan minimum dan maksimum dimana nyala api stabil di dalam *combustor*. Saluran keluar gas hasil pembakaran terletak pada bagian tengah dinding tembaga (alas silinder) dengan diameter 3 mm. Temperatur dinding *combustor* diukur pada beberapa posisi radial dengan menggunakan termokopel tipe K yang dihubungkan dengan data logger. Visualisasi nyala api dilakukan pada sisi *combustor* dengan penutup kaca dengan menggunakan kamera.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan pembakaran stabil dapat terjadi pada *combustor* dengan tebal ruang bakar 2 mm dan 3 mm. Api bisa dinyalakan dalam *combustor* dengan tebal 1,5 mm, tetapi kemudian padam. Gambar 2 menunjukkan diagram kestabilan pembakaran di dalam *tangential circular disc combustor* dengan tebal 2 mm dan 3 mm.



Gambar 2. Diagram kestabilan api pada *tangential cylindrical disk combustor*.

Gambar 2 menunjukkan bahwa debit minimal dimana api stabil di dalam *combustor* dengan tebal 2 mm lebih kecil dibandingkan dengan debit minimal pada *combustor* dengan tebal 3 mm, walaupun perbedaannya sangat kecil. Hal ini dikarenakan ruang bakar dengan tebal 2 mm memiliki volume yang lebih kecil dibandingkan dengan tebal 3 mm, sehingga ruang bakar dengan tebal 2 mm pada debit reaktan yang sama memiliki densitas reaktan yang lebih besar dan menghasilkan *volumetric heat release* dan temperatur nyala api yang lebih tinggi. Hal tersebut merupakan alasan mengapa nyala api pada *combustor* dengan tebal 2 mm memerlukan debit minimal yang lebih kecil dibandingkan *combustor* dengan tebal 3 mm.

Sedangkan debit maksimum reaktan dimana nyala api stabil di dalam *combustor* lebih besar pada ruang bakar dengan tebal 3 mm dibandingkan ruang bakar dengan tebal 2 mm. Api menyala dengan stabil bila terdapat kesetimbangan antara *flame propagation speed* dengan kecepatan reaktan. Karena memiliki tebal yang lebih besar, *combustor* dengan tebal 3 mm memiliki kecepatan reaktan di dalam *combustor* yang lebih kecil pada debit reaktan yang sama. Selain itu, *combustor* dengan tebal 2 mm memiliki kecepatan reaktan didalam ruang bakar yang lebih tinggi dibandingkan dengan tebal 3 mm, semakin tinggi kecepatan reaktan mengakibatkan waktu tinggal reaktan diruang bakar semakin singkat sehingga banyak reaktan yang belum terbakar sudah keluar melalui saluran keluar.

Sedangkan pada *tangential circular disk combustor* dengan tebal 1,5 mm api sulit untuk menyala dengan stabil dikarenakan *surface to volume ratio* semakin besar menyebabkan perbandingan antara *heat loss* yang terjadi dengan panas yang dihasilkan dalam proses pembakaran semakin besar. *Heat loss* yang semakin besar mengakibatkan banyak panas yang terbuang sehingga temperatur api turun, yang mengakibatkan api padam atau tidak bisa menyala. Selain itu reaktan didalam ruang bakar memiliki kecepatan yang tinggi, lebih tinggi dari pada kecepatan perambatan apinya, sehingga api menjadi padam. Padamnya nyala api juga mungkin disebabkan adanya tegangan geser yang terlalu tinggi yang terjadi antara lapisan reaktan didalam *combustor*, dimana kecepatan dan perubahan kecepatan reaktan di dalam ruang bakar relative tinggi, menghasilkan gradien kecepatan dan tegangan geser yang tinggi diantara lapisan fluida. Tegangan geser yang terlalu besar dapat mengakibatkan pemadaman api didalam *combustor*. Gambar 3 menunjukkan visualisasi nyala api di dalam *combustor* pada rasio ekuivalen $\phi = 1$ dan variasi kecepatan reaktan.

Q_{fuel} (mL/menit)	t = 2 mm	t = 3 mm
100		
150		
200		
300		

Gambar 3. Visualisasi nyala api pada rasio ekuivalen $\phi = 1$.

Combustor dengan tebal 2 mm memiliki warna nyala api yang lebih seragam pada seluruh *reaction zone*. Hal ini dikarenakan ketika berada di dalam *combustor* mempunyai kecepatan reaktan yang lebih tinggi dari pada kecepatan reaktan pada *combustor* dengan tebal ruang bakar 3 mm. Kecepatan yang lebih tinggi mengakibatkan bahan bakar lebih cepat terdistribusi secara merata didalam *combustor*, kemudian bahan bakar terbakar secara merata di dalam *combustor* dan menghasilkan warna nyala api yang seragam. Tetapi pada *combustor* dengan tebal 2 mm terlihat bahwa pada kecepatan reaktan yang tinggi nyala api hanya terlihat pada bagian tepi *combustor*. Sedangkan pada bagian tengah *combustor* tidak terjadi reaksi pembakaran. Fenomena ini dijelaskan sebagai berikut. Ketika reaktan keluar dari saluran inlet dan bergerak dalam ruang bakar, reaktan bergerak melingkar dan membentuk dengan lintasan berbentuk spiral. Kecepatan reaktan yang tinggi mengakibatkan reaktan terdistribusi secara merata di dalam seluruh bagian *combustor*. Semakin mendekati pusat lingkaran, kecepatan reaktan semakin tinggi. Karena gradien kecepatan yang besar di daerah sekitar pusat lingkaran, tegangan geser yang terjadi di daerah ini juga besar yang mengakibatkan api padam. Selain itu pada debit reaktan yang tinggi, warna api pada *combustor* dengan tebal 2 mm terlihat merah. Dalam hal ini sebenarnya warna api tetap biru. Dinding *combustor* yang terbuat dari tembaga memiliki temperature yang sangat tinggi, sehingga membara dan berwarna merah. Hal inilah yang menyebabkan nyala api terlihat berwarna merah, walaupun sebenarnya tetap berwarna biru. Fakta ini akan dibahas lebih detail pada bagian pengukuran temperature dinding *combustor*.

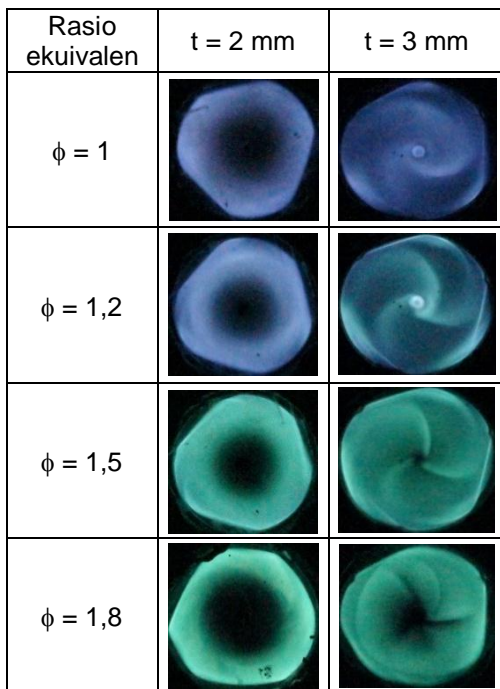
Sedangkan pada *combustor* dengan tebal 3 mm, kecepatan reaktan keluar dari saluran inlet relative kecil. Campuran udara-bahan bakar bergerak ke arah tangensial kemudian berbelok ke arah radial. Selain bergerak ke arah pusat lingkaran dimana terletak saluran keluar gas hasil pembakaran, reaktan juga berdifusi memenuhi ruang kosong di sekitarnya. Aliran reaktan dalam ruang bakar menghasilkan distribusi reaktan yang tidak seragam di dalam *combustor*. Warna nyala api yang lebih terang menunjukkan daerah dengan konsentrasi reaktan yang lebih terang.

Sedangkan daerah yang berwarna biru gelap menunjukkan daerah dengan konsentrasi reaktan yang lebih rendah. Gambar 4 dan 5 menunjukkan visualisasi nyala api di dalam *combustor* dengan tebal 2 mm dan 3 mm pada berbagai rasio ekuivalen pada kecepatan bahan bakar 100 dan 150 mL/menit. Peningkatan nilai rasio ekuivalen dilakukan dengan mengurangi debit udara pada debit bahan bakar konstan, dimana untuk kondisi stoikiometri perbandingan volume antara bahan bakar udara adalah 1 : 30,94. Sehingga debit total reaktan berkurang secara signifikan dengan bertambahnya nilai rasio ekuivalen pada debit bahan bakar yang tetap.

Secara umum terlihat bahwa nyala api memiliki warna biru gelap pada rasio ekuivalen sekitar 1 dan berubah menjadi biru kehijauan pada rasio ekuivalen 1,5 dan yang lebih besar. Visualisasi nyala api pada debit bahan bakar 100 mL/menit dan 150 mL/menit menunjukkan kecenderungan yang sangat berbeda. Pada debit bahan bakar 100 mL/menit, visualisasi nyala api pada *combustor* dengan tebal 2 mm menunjukkan bahwa api memenuhi seluruh penampang *combustor* dengan distribusi warna yang relative seragam, kecuali pada sebagian kecil daerah di bagian tepi. Hal ini

Rasio ekuivalen	t = 2 mm	t = 3 mm
$\phi = 1$		
$\phi = 1,2$		
$\phi = 1,5$		
$\phi = 1,8$		

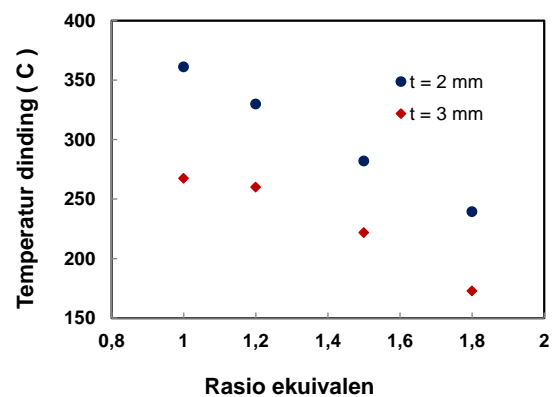
Gambar 4. Visualisasi nyala api pada debit bahan bakar $Q = 100$ mL/m.



Gambar 5. Visualisasi nyala api pada debit bahan bakar $Q = 150$ mL/m.

dikarenakan reaktan terdistribusi secara merata pada seluruh bagian *combustor*, sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Sedangkan pada *combustor* dengan tebal 3 mm, nyala api memenuhi seluruh penampang *combustor* pada rasio ekuivalen $\phi = 1$ dan $\phi = 1,2$, tetapi nyala api hanya terlihat pada bagian tepi *combustor* pada rasio ekuivalen $\phi = 1,5$ dan $\phi = 1,8$. Kondisi ini diakibatkan karena reaktan mempunyai kecepatan reaktan di dalam *combustor* yang relative lebih kecil bila dibandingkan *combustor* dengan tebal 2 mm. semakin besar rasio ekuivalen, kecepatan reaktan semakin kecil. Dalam hal ini, daerah berwarna gelap pada bagian tengah *combustor* menunjukkan daerah dimana tidak terjadi reaksi pembakaran. Kurang tersedianya udara sebagai oksidator dan kecepatan reaktan yang rendah di dalam *combustor*, mengakibatkan reaktan telah habis bereaksi pada bagian tepi *combustor*. Yang tersisa pada bagian tengah *combustor* adalah gas hasil pembakaran dan bahan bakar yang tidak mendapatkan oksidator, sehingga pada bagian ini tidak terjadi reaksi pembakaran.

Sebaliknya pada debit bahan bakar 150 mL/menit, pada *combustor* dengan tebal 2 mm api hanya memenuhi bagian tepi *combustor* dan pada bagian tengahnya terdapat daerah tanpa reaksi pembakaran. Sedangkan pada *combustor* dengan tebal 3 mm, api memenuhi seluruh bagian *combustor*, dengan distribusi warna api yang kurang seragam sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Penyebab tidak adanya reaksi pembakaran pada bagian tengah *combustor* dengan tebal 2 mm adalah tingginya kecepatan reaktan didalam *combustor*, terutama pada bagian tengah *combustor*, yang mengakibatkan padamnya nyala api. Sedangkan pada *combustor* dengan tebal 3 mm, reaktan dapat terdistribusi hingga memenuhi seluruh bagian *combustor*, pada kondisi stoikiometri ataupun pada kondisi kaya bahan bakar, sehingga reaksi pembakaran terjadi pada seluruh bagian *combustor*, menghasilkan visualisasi nyala api yang memenuhi seluruh bagian *combustor*. Gambar 6 menunjukkan hubungan antara temperatur dinding ruang bakar rata-rata dengan rasio ekuivalen pada variasi tebal ruang bakar.



Gambar 6. Temperatur dinding *combustor*.

Pengambilan data temperatur dinding dilakukan pada tiga titik pada posisi radial 5 mm, 1 mm dan 1,5 mm. Temperatur pada Gambar 6 merupakan temperature rata-rata dari ketiga titik tersebut. Gambar di atas menunjukkan bahwa temperatur dinding ruang bakar semakin menurun seiring dengan kenaikan nilai rasio ekuivalen. Hal ini disebabkan pada rasio ekuivalen yang lebih tinggi jumlah bahan bakar yang berada di dalam *combustor* akan semakin melimpah

namun tidak diimbangi dengan kenaikan debit udara yang membuat campuran reaktan cenderung menjadi lebih kaya bahan bakar. Sehingga menimbulkan kemungkinan jumlah bahan bakar yang tidak terbakar akan semakin meningkat. Sehingga kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran semakin berkurang dan mengakibatkan temperature dinding *combustor* yang lebih rendah.

Gambar 6 juga menunjukkan bahwa *combustor* dengan tebal 2 mm memiliki temperature dinding yang lebih tinggi dari pada *combustor* dengan tebal 3 mm. Pada debit reaktan yang sama, kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar adalah sama, dengan asumsi semua bahan bakar bereaksi secara sempurna. *Combustor* dengan tebal 2 mm memiliki volume ruang bakar yang lebih kecil. Sehingga *combustor* ini memiliki pembangkitan panas tiap satuan volume (*volume heat generation*) yang lebih besar dan menghasilkan temperature ruang bakar dan dinding *combustor* yang lebih tinggi. Selain itu kecepatan reaktan yang lebih tinggi di dalam *combustor* juga mengakibatkan perpindahan panas secara konveksi dari nyala api ke dinding *combustor* lebih efektif. Mengakibatkan temperature dinding *combustor* yang lebih tinggi.

KESIMPULAN

Berdasarkan uraian pada bagian sebelumnya dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Tebal *combustor* tidak mempengaruhi secara signifikan kestabilan api di dalam *tangential circular disk combustor*, kecuali untuk *combustor* dengan tebal 1,5 mm api tidak bisa distabilkan di dalam *combustor*.
2. Semakin tebal ruang bakar pada *tangential circular disk combustor*, maka nyala api dapat memenuhi seluruh ruang *combustor*, walaupun distribusi warna api kurang seragam.
3. Semakin tebal ruang bakar pada *tangential circular disk combustor* maka temperatur rata-rata dinding ruang bakarnya akan semakin menurun.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fernandes-Pello, C., 2002, Proceedings of The Combustion Institute, Berkeley, Vol. 29, No. 1, pp. 883-899
- [2] Maruta, K., 2011, Proceedings of The Combustion Institute, Berkeley, Vol. 33, No. 1, pp. 125-150.
- [3] Katsuyoshi, T., Soichiro, K., Taku, M., Toshiyuki, S., 2009, Engineering Review, Vol 42, No 2, pp. 97-101.
- [4] Kim, N.I., Aizumi, S., Yokomori, T., Kato, S., Fujimori, T., Maruta, K., 2007, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, No. 3, p. 3243–3250.