

PENGARUH VARIASI BENTUK *FLAME HOLDER* TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN PADA MESO SCALE *COMBUSTOR*

Mochammad Khoirul Rosidin¹⁾ ✉, Lilis Yulianti¹⁾, Winarto¹⁾

¹⁾ Mechanical Engineering Department
Universitas Brawijaya
East Java, INDONESIA
mochkhoirulrosidin13@gmail.com
lilis_y@ub.ac.id
winarto@ub.ac.id

Abstract

This study used an experimental method by directly observing the object under study. The independent variables in this study include the geometry of the flame holder on the meso-scale combustor, airflow, and fuel discharge. The research data were analyzed and displayed in graphical form as well as flame visualization. This research concludes that combustion using a flame holder circle has a more stable and even flame compared to a flame holder concentric ring and backward facing step. The shape of the Flame holder circle also produces a higher flame temperature.

The results of this study contribute to the development of MPG based on micro combustion with a better understanding of the interaction between flame holders, reactant velocities and equivalent ratios in achieving stable and efficient combustion in meso-scale combustors. This research can provide important input for the development of high-efficiency micro-combustion-based power generation technology in the future.

Keywords: *Meso-Scale Combustor, Flame Holder, Butane, Combustion Characteristics*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan tentang *micro power generator* (MPG) berbasis *microcombustion* dengan bahan bakar gas dan cair menjadi penelitian yang mendapatkan perhatian signifikan dalam beberapa tahun terakhir karena potensinya untuk pembangkit listrik efisiensi tinggi dalam *meso-scale combustor*. MPG memiliki beberapa kelebihan dibandingkan baterai yang selama ini digunakan sebagai sumber energi listrik untuk berbagai peralatan elektrik *portable*. Kelebihan tersebut adalah densitas energi yang relatif besar, waktu isi ulang bahan bakar yang sangat singkat serta tidak adanya limbah kimia dari material *micro power generator* sehingga lebih ramah lingkungan^[1, 2]. *Micro power generator* terdiri dari dua komponen utama yaitu *micro* atau *meso scale combustor* yang merupakan tempat terjadinya perubahan energi kimia bahan bakar menjadi energi termal dalam proses pembakaran dan peralatan pengkonversi energi panas menjadi energi listrik (*thermovoltaic*).

Kesetabilan api dalam *micro combustor* menjadi salah satu masalah yang perlu mendapatkan perhatian pada MPG. Pembakaran dalam *micro combustor* cenderung menjadi tidak stabil karena keterbatasan waktu yang tersedia untuk reaksi pembakaran (*fuel residence time*) dan tingginya perbandingan panas yang hilang terhadap panas yang dibangkitkan terkait dengan peningkatan ratio luas permukaan terhadap volume, yang

Corresponding Author:

✉ Mochammad Khoirul Rosidin

Received on: 2023-07-28

Revised on: 2025-01-06

Accepted on: 2025-01-06

mana menyebabkan *thermal quenching*^[3]. Beberapa penelitian dilakukan untuk meningkatkan kestabilan api dan pembakaran di dalam *meso-scale combustor*, salah satunya dengan cara meningkatkan *fuel residence time* dan kecepatan reaksi pembakaran serta meminimalkan *heat loss*. Selain itu *backward facing step* juga berpengaruh terhadap peningkatan kestabilan pembakaran didalam *micro combustor*^[4-8]. Dari hasil penelitian-penelitian tersebut dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut: pembakaran stabil dapat terjadi dalam sebuah *combustor* dengan *backward facing step* yang berfungsi untuk meningkatkan proses pencampuran udara dan bahan bakar, serta memperpanjang waktu reaktan berada di dalam daerah reaksi pembakaran. *Meso-scale combustor* dengan *backward facing step* sangat efektif dalam mengontrol posisi api dan meningkatkan laju aliran dan rasio bahan bakar / udara serta mampu mensirkulasikan pencampuran reaktan pada pembakaran. Efek sinergitas dari *bluff-body* dan *cavity* yakni kecepatan kritis meningkat, dan munculnya zona resirkulasi yang dapat meningkatkan stabilitas nyala api^[9]. Daerah nyala api dengan aliran yang beresirkulasi dapat terbentuk dalam reaktor dengan *facing step* pada nilai rasio ekuivalen dan laju aliran campuran tertentu^[10]. Pengaruh parameter geometris (seperti panjang reaktor) dan diameter dalam, tinggi step, bilangan Reynolds dan rasio ekuivalen terhadap kestabilan nyala api telah diteliti oleh peneliti sebelumnya dan hasil penelitian menunjukkan beberapa regim nyala api yaitu blow out, marginal, stasioner (stabil), RERI, stasioner (stabil)-*flashback* dan *flashback* yang terjadinya dipengaruhi oleh panjang dan diameter reaktor^[10]. Kedua parameter tersebut sangat mempengaruhi dinamika nyala api, terutama daerah nyala yang terjadi dalam reaktor skala meso. Penelitian tentang peningkatan kinerja pembakaran dari pembakaran premiks metana/udara dalam ruang bakar mikro dua tingkat menunjukkan bahwa stabilitas pembakaran campuran metana-udara dalam ruang bakar mikro dua tingkat sangat dipengaruhi oleh sudut step, kecepatan masuk reaktan dan bahan dinding *combustor*^[6].

Beberapa penelitian lain menunjukkan peran pemegang nyala (*flame holder*) juga sangat penting dalam proses penstabilan nyala api dalam *micro-* atau *meso-scale combustor*. Beberapa jenis pemegang nyala yang pernah diteliti sebelumnya diantaranya berupa porous media^[11], *wire mesh*^[3], *backward facing step*^[8], maupun *slit*^[12], *perforated plate line 8* dan *perforated plate hole*^[13]. Intensitas turbulensi pada *combustor* mikro dengan *slits* di kedua sisi *bluff body* menjadi lebih besar sehingga memperlama *residence time* dan meningkatkan efisiensi pembakaran serta *velocity extinction limit*^[14]. Sedangkan, mekanisme untuk meningkatkan stabilitas api dengan menggunakan *wire mesh* telah diteliti^[3]. Penggunaan *wire mesh* ini memungkinkan terciptanya api yang stabil di dekat *wire mesh*, dimana pada *combustor* tanpa *wire mesh* api hanya bisa stabil di ujung *combustor*. Dalam penelitian ini juga diamati pengaruh variasi ukuran diameter *combustor* yang berbentuk silinder terhadap kestabilan api dan kecepatan pembakaran (*flame propagation*). Dari penelitian ini didapatkan bahwa semakin kecil ukuran diameter *combustor* maka daerah stabilitas api yang digambarkan pada diagram kecepatan – *equivalence ratio* juga semakin sempit. Hal ini disebabkan rasio kehilangan panas yang lebih tinggi dan keterbatasan waktu nyala api yang tidak memadai yang terkait dengan peningkatan perbandingan luas permukaan terhadap volume.

Selanjutnya kecepatan reaktan memasuki *combustion reaction zone* dan pola aliran di dalamnya juga sangat mempengaruhi kestabilan pembakaran dan *flame behavior* pada *meso scale combustor* dengan *backward facing step*^[15]. Kecepatan inlet reaktan yang lebih tinggi mengakibatkan api menjadi kurang stabil walaupun ukuran *facing step* yang memiliki fungsi sebagai *flame holder* lebih besar dan *combustion reaction zone* memiliki ukuran yang sama. Hal ini bertentangan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa peningkatan ukuran *facing step* mengakibatkan peningkatan kestabilan pembakaran pada *micro combustor*.

Beberapa hasil penelitian tersebut di atas menunjukkan bahwa geometri dan dimensi *flame holder* memiliki peranan yang sangat penting untuk mendapatkan pembakaran yang stabil di dalam *micro* atau *meso scale combustor*. Selain itu, kestabilan pembakaran juga sangat dipengaruhi oleh ukuran *combustion reaction zone*, kecepatan inlet reaktan ke ruang bakar, serta pola aliran reaktan di dalam daerah reaksi pembakaran. Dalam penelitian ini akan diamati interaksi beberapa parameter seperti tersebut di atas dengan meneliti pembakaran di dalam *meso scale combustor* dengan *backward facing step* dan *combustor dengan flame holder*. Penelitian ini menggunakan dua jenis *flame holder* meliputi *concentric ring* dan *circle flame holder* untuk mengetahui pengaruh pola aliran terhadap kestabilan pembakaran di dalam *meso scale combustor*.

2. METODE PENELITIAN

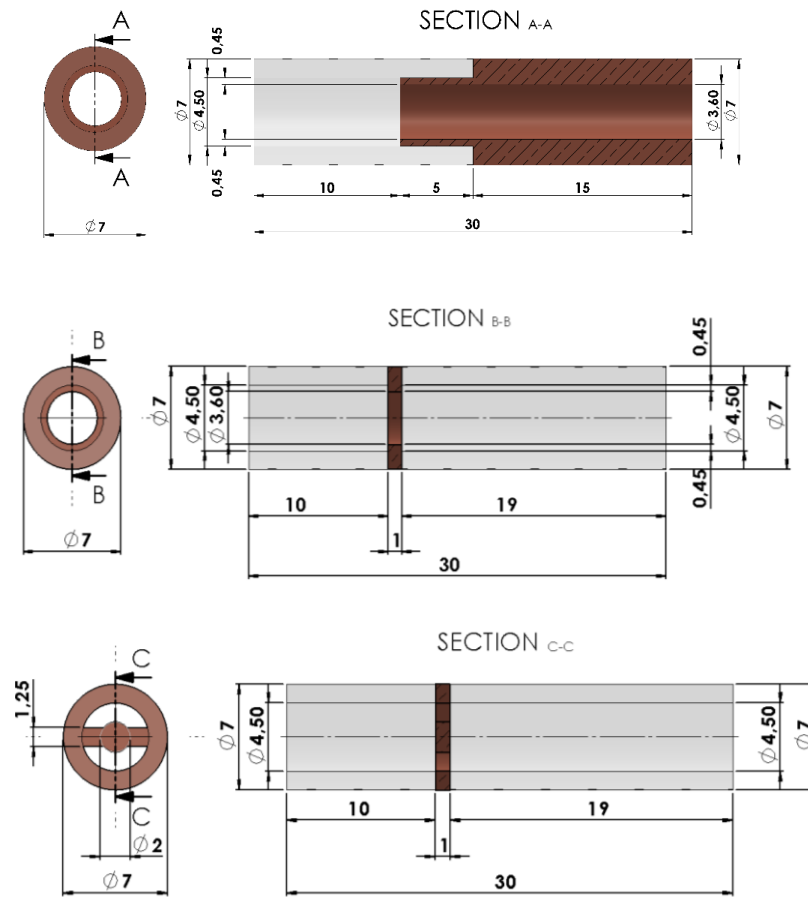
Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah metode eksperimental (*experimental method*) dimana dilakukan pengamatan secara langsung pada objek yang diteliti. Dari data-data hasil penelitian ini akan dimasukkan ke dalam suatu tabel penelitian, kemudian dianalisis dan kemudian dibuat suatu diagram untuk melihat kecenderungan yang terjadi, sehingga dapat dibandingkan dan diambil suatu kesimpulan.

Adapun variabel-variabel yang digunakan pada penelitian ini dibagi menjadi 3 bagian yaitu variabel bebas, variabel terikat dan variabel terkontrol. Variabel bebas terdiri dari Geometri *flame holder* pada *meso scale combustor*, debit udara dan debit bahan bakar. Penelitian ini menggunakan tiga jenis *flame holder* yaitu *facing step*, *concentric ring* dan *circle flame holder*. *Meso scale combustor* dengan tiga jenis *flame holder* yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 1. Selain itu debit udara dan bahan bakar divariasikan pada batas atas dan batas bawah dimana masih memungkinkan terjadinya nyala api pembakaran pada *cylindrical mesoscale combustor* dengan rasio ekuivalen yang masih dapat menimbulkan pembakaran. Beberapa variabel kontrol yang nilainya dijaga tetap selama proses penelitian yaitu diameter dalam ruang bakar adalah = 4,5 mm dan rasio diameter penampang inlet *combustor* (D2) terhadap diameter penampang *combustor* (D1) outlet yang konstan $D1:D2 = 0,8$. Bahan bakar yang digunakan terdiri dari butana 100%, serta temperatur ruangan pada saat pengambilan data diasumsikan sebesar 28-30 °C. Sedangkan variabel terikat yang sekaligus data yang diambil meliputi kecepatan perambatan nyala api, batas stabilitas nyala api (*flame stability limit*), visualisasi nyala api dan temperatur nyala api.

2.1. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Meso-scale combustor* dengan variasi geometri *flame holder* merupakan alat utama yang digunakan pada penelitian ini. Material yang digunakan adalah tembaga pada sisi *upstream flame holder* dan kaca pada sisi *downstream flame holder*. Detail *combustor* yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.

Bahan bakar yang digunakan terdiri dari butana 100%. Kompresor 0,75 hp untuk menyuplai udara pembakaran (*oxidizer*) pada *meso-scale combustor*, udara yang digunakan adalah udara atmosfer (*ambient air*). Regulator digunakan sebagai pengatur debit bahan bakar gas butana (C_4H_{10}) dari *outlet* tangki gas butana. *Flow meter* digunakan untuk mengukur debit bahan bakar butana dan debit udara yang masuk pada *meso-scale combustor* dengan spesifikasi yang dapat di lihat pada Tabel 1. Untuk saluran aliran bahan bakar dan udara menggunakan *Pisco tube* dan *Y connector* untuk menghubungkan saluran udara dan bahan bakar, sekaligus sebagai tempat untuk mencampur udara dan bahan bakar. Fluida yang keluar dari *Y connector* merupakan campuran udara-bahan bakar yang akan masuk ke ruang bakar.



Gambar 1. *Combustor*

Pemantik berfungsi sebagai penyalaan awal campuran *premixed* gas butana dan udara pada *meso-scale combustor*, dengan jarak penyalaan diasumsikan 10 mm. *Thermocouple* digunakan untuk mengukur temperatur nyala api pada *meso scale combustor*. *Thermocouple* yang digunakan tipe K dengan diameter 0.1 mm dan mampu mengukur temperatur pada rentang 200 - 1260 °C. *Data Logger* digunakan untuk menerima data temperatur nyala api pada *meso-scale combustor*. *Data logger* yang digunakan adalah 1 buah NI USB TC01 dengan spesifikasi yang dapat di lihat pada tabel. Laptop digunakan untuk mengolah data digital hasil penelitian yang didapatkan dari *data logger*. Kamera yang digunakan untuk mengambil gambar visualisasi bentuk nyala api. Kamera digunakan untuk mendapatkan data visual, yang meliputi visualisasi nyala api nampak depan dan visualisasi dinding *combustor* serta pola aliran panas pada *combustor*. Visualisasi nyala api dan dinding *combustor* menggunakan kamera Canon EOS 60 D.

Tabel 1. Spesifikasi *Flow Meter*

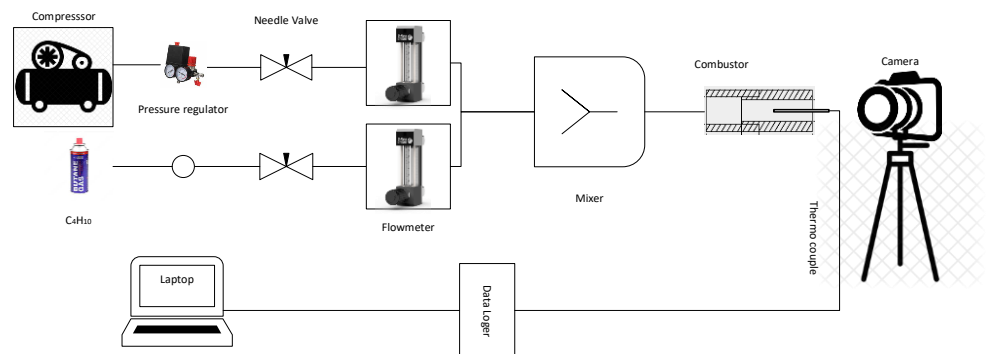
No.	Spesifikasi	<i>Flow Meter</i> Udara	<i>Flow Meter</i> Butana
1.	Merk	Kofloc	Kofloc
2.	Series	RK-1250	RK-1250
3.	Jenis	<i>Flow meter</i> udara	<i>Flow meter</i> Butana
4.	Tekanan Kerja	0.1 Mpa	0.1 Mpa
5.	Maximum Flow	500 ml/min	20 ml/min
6.	Minimum Flow	50 ml/min	2 ml/min
7.	Skala Terkecil	5 ml/min	0.5 ml/min

Tabel 2. Spesifikasi *Data Logger*

No.	Spesifikasi	
1.	ADC resolution	20 bits
2.	Input range	± 73.125 mV
3.	Common-mode range, channel-to-USB ground	± 30 V
4.	Temperature measurement ranges works	over temperature ranges defined by NIST (J, K, R, S, T, N, E, and B thermocouple types; the E type has a maximum limit of 900 °C.)
5.	Cold-junction compensation sensor accuracy, 0 °C to 65 °C	1.25 °C maximum, 0.6 °C typical
6.	Cold-junction compensation sensor resolution	0.0625 °C typical

2.2. Skema Instalasi Penelitian dan Prosedur Pengambilan Data

Rangkaian instalasi penelitian yang digunakan dapat dilihat pada Gambar

**Gambar 2.** Instalasi alat penelitian

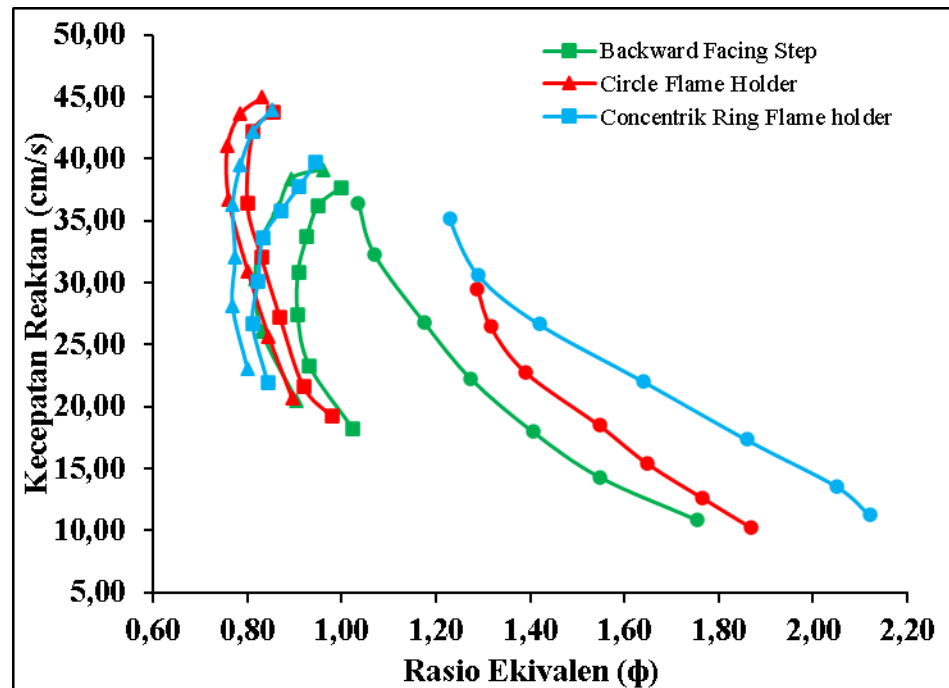
Pengambilan data temperatur nyala api pada *meso-scale combustor* letakkan sensor thermocouple yang terhubung dengan data *logger* pada bagian *upstream* nyala api. Data yang terukur disimpan pada laptop dan disimpan dalam file excel untuk diolah lebih lanjut. Pengukuran kecepatan perambatan nyala api, dilakukan dengan menggunakan perekaman kamera dari samping *combustor*. Kecepatan perambatan nyala api adalah perubahan posisi nyala api terhadap waktu sejak api menyala di ujung / mulut *combustor*, hingga api mencapai posisi stabil di dekal *flame holder*. Visualisasi nyala api juga dilakukan dengan melakukan pengambilan gambar dari arah depan *combustor*. Pengambilan data seperti dijelaskan di atas dilakukan untuk setiap *meso scale combustor* dengan jenis *flame holder*

yang berbeda. Data yang diperoleh diolah dan ditampilkan dalam bentuk grafik ataupun visualisasi nyala api.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data dalam penelitian didapatkan dari penelitian eksperimental pembakaran menggunakan bahan bakar Butana (C_4H_{10}) di dalam *meso-scale combustor* dengan variasi bentuk geometri *flame holder* di dalam *combustor*. Dalam penelitian ini, data yang diambil berupa data flame stability limit, visualisasi nyala api, temperatur nyala api, kecepatan reaktan.

3.1. Flame Stability Limit



Gambar 3. Grafik flame stability limit pada meso scale combustor dengan variasi bentuk flame holder



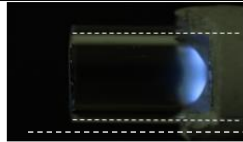
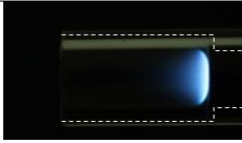
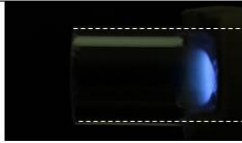
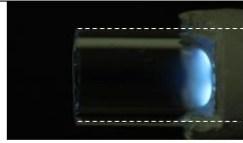


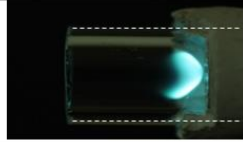
Gambar 3 menunjukkan hubungan antara rasio ekivalen terhadap kecepatan reaktan. Pada grafik tersebut, dengan menggunakan bentuk *flame holder circle* membuat pembakaran dengan nyala api yang stabil di dalam *meso-scale combustor* cenderung pada pada kecepatan reaktan yang tinggi. Dengan menggunakan bentuk *flame holder concentric ring* dan *backward facing step* api dapat tetap menyala dengan stabil di dalam *meso-scale combustor* namun dengan kecepatan yang lebih rendah.

Kestabilan nyala api di dalam *meso-scale combustor* dapat terjadi apabila kecepatan reaktan sama dengan kecepatan pembakaran. Untuk kecepatan reaktan dipengaruhi oleh nilai debit bahan bakar dan debit udara, sedangkan kecepatan pembakaran dipengaruhi oleh temperatur pada saat pembakaran. Maka dari itu perlu adanya *flame holder* yang berfungsi sebagai tempat menempelnya api dan juga sebagai tempat resirkulasi panas (heat recirculation) dari api menuju reaktan sehingga panas yang dihasilkan dari pembakaran bisa digunakan untuk pemanasan awal reaktan. Pada *meso-scale combustor*, heat recirculation dapat terjadi melalui proses konveksi dari api menuju dinding *combustor* dan

diteruskan secara konduksi melalui dinding *combustor* menuju reaktan. Pada grafik tersebut terlihat bahwa dengan menggunakan *circle flame holder* membuat kestabilan nyala api dapat terjadi pada kecepatan reaktan yang rendah. Hal tersebut dikarenakan bentuk *flame holder concentric ring* dan *backward facing step* memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih rendah bila dibandingkan dengan bentuk *circle flame holder* sehingga membuat *heat recirculation* dari api menuju reaktan menjadi kurang optimal. Dengan menggunakan bentuk *flame holder circle* yang terbuat dari tembaga yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi membuat *heat recirculation* menjadi optimal dan membuat temperatur reaktan saat memasuki zona pembakaran menjadi lebih tinggi sehingga dengan menggunakan *flame holder* yang memiliki nilai konduktivitas termal yang tinggi membuat nyala api di dalam *meso-scale combustor* dapat stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi.

3.2. Visualisasi Nyala Api

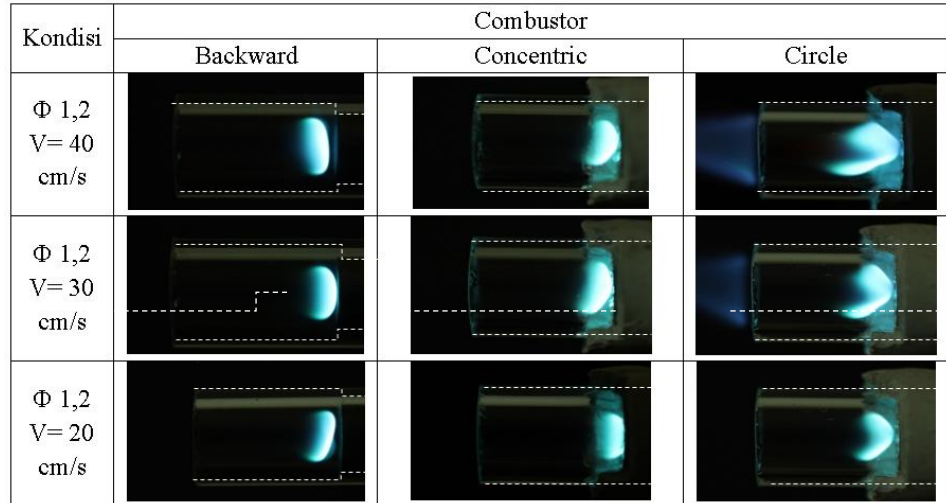
Untuk pengambilan data visualisasi nyala api, perlu menentukan titik-titik pengambilan data terlebih dahulu berdasarkan grafik pada *flame stability limit*. Pada grafik tersebut diambil beberapa titik dengan nilai rasio ekuivalen yang tetap dan nilai kecepatan reaktan yang berbeda-beda dan juga titik dengan nilai kecepatan reaktan yang tetap dan nilai rasio ekuivalen yang berbeda-beda. Nilai-nilai kecepatan reaktan, rasio ekuivalen, debit bahan bakar, dan debit udara berdasarkan titik-titik tersebut.

Kondisi	Combustor		
	Backward	Concentric	Circle
Φ 0,8 V= 20 cm/s			
Φ 1,0 V= 20 cm/s			
Φ 1,2 V= 20 cm/s			

Gambar 4. Visualisasi nyala api pada kecepatan reaktan konstan dan ekuivalen rasio yang berbeda

Gambar 5 menunjukkan visualisasi nyala api dengan kondisi nilai rasio ekuivalen yang tetap yaitu 1 dan kecepatan reaktan yang berbeda-beda, yaitu 20 cm/s, 30cm/s, dan 40cm/s. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya kecepatan reaktan di dalam *meso-scale combustor*, maka membuat luas penampang nyala api semakin besar. Hal tersebut disebabkan karena meningkatnya kecepatan reaktan berarti nilai debit udara dan bahan bakar yang mengalir juga semakin meningkat sehingga temperatur pembakaran juga meningkat dan jarak antara api dengan dinding *combustor* juga semakin mengecil apabila dibandingkan dengan kecepatan reaktan yang lebih rendah. Sedangkan Gambar 4 menunjukkan visualisasi nyala api dengan kondisi nilai kecepatan reaktan yang tetap yaitu 20 cm/s dan rasio ekuivalen yang berbeda-beda, yaitu 0,8, 1 dan 1,2. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya rasio ekuivalen di dalam *meso-scale combustor*,

maka membuat luas penampang nyala api di dalam *combustor* semakin menyempit, namun perubahan warna yang terjadi dari warna biru gelap menjadi biru terang. Hal tersebut terjadi dikarenakan semakin meningkatnya nilai rasio ekuivalen dengan nilai kecepatan reaktan yang tetap membuat debit bahan bakar yang masuk ke dalam *combustor* semakin meningkat namun dengan debit udara yang tetap sehingga membuat temperatur pembakaran di dalam *meso-scale combustor* menurun. Dengan menurunnya temperatur pembakaran di dalam *combustor* membuat nyala api tidak menyebar memenuhi dinding *combustor* sehingga luasan api menjadi menyempit.



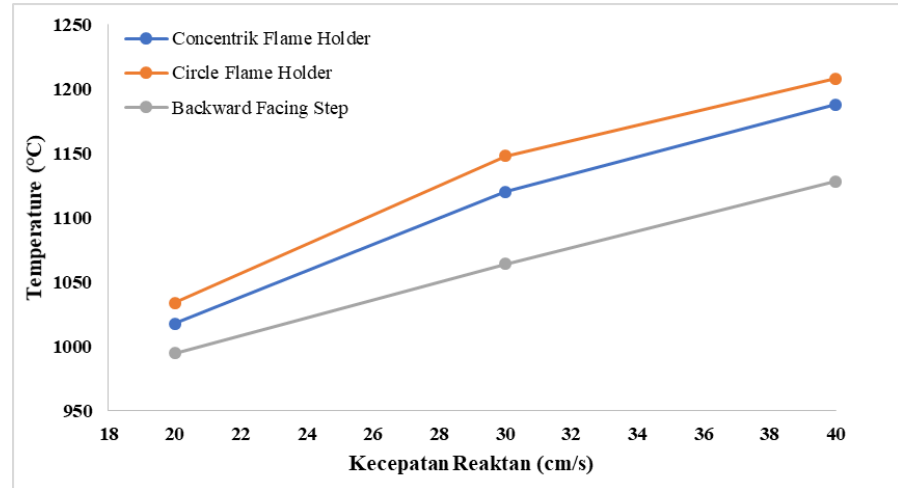
Gambar 5. Visualisasi nyala api pada ekuivalen rasio konstan dan kecepatan reaktan berbeda

3.3. Temperatur Nyala Api

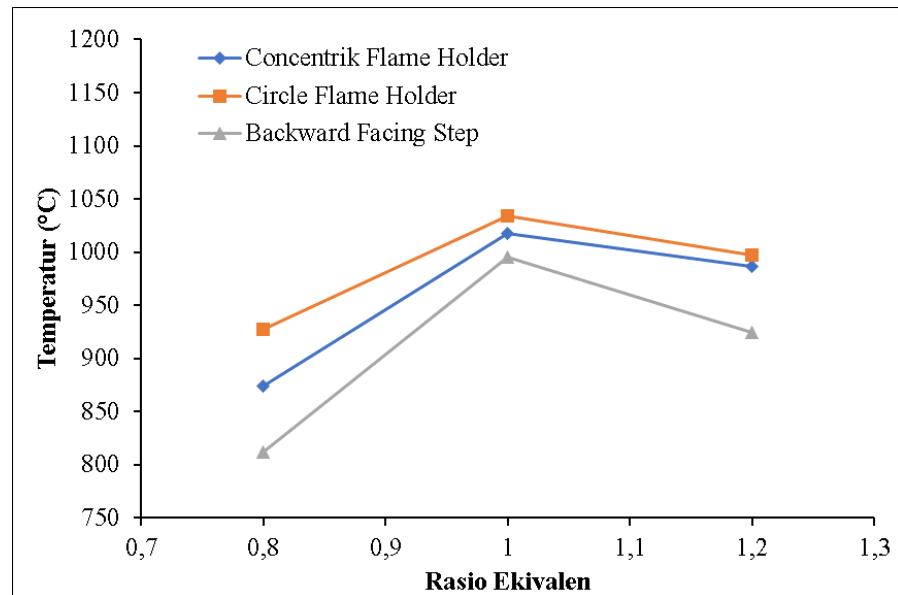
Proses pengambilan data temperatur nyala api pembakaran di dalam *meso-scale combustor* menggunakan thermocouple tipe K yang memiliki kemampuan membaca suhu maksimum pada 1380°C yang kemudian dihubungkan dengan data logger dan juga laptop. Pada saat pengambilan data temperatur nyala api, ujung kabel *thermocouple* diletakkan pada api yang menyala didalam *combustor*. Pengambilan temperature ini dilakukan setelah mendapatkan data peta stabilitas nyala. Titik – titik data temperatur diambil berdasarkan peta stabilitas nyala. Rentang pengambilan data ada pada ekuivalen rasio $\phi = 0.8, 1.0, 1.2$ dan kecepatan reaktan $V = 20 \text{ cm/s}, 30 \text{ cm/s}, 40 \text{ cm/s}$.

Setelah mendapatkan data temperatur nyala api pembakaran pada *meso-scale combustor* dengan menggunakan bentuk *flame holder* yang berbeda, selanjutnya data tersebut dimasukkan ke dalam tabel dan kemudian diolah menjadi sebuah grafik. Gambar 6 merupakan grafik hubungan antara temperatur nyala api hasil pembakaran terhadap kecepatan reaktan untuk masing-masing bentuk *flame holder*. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya kecepatan reaktan, maka temperature nyala api masing-masing *flame holder* juga semakin meningkat. Hal tersebut dikarenakan debit reaktan yang ada di dalam *meso-scale combustor* juga semakin meningkat sehingga memberikan pengaruh terhadap kalor yang dilepaskan dari hasil pembakaran. Pada *meso-scale combustor* dengan menggunakan bentuk *flame holder circle* yang terbuat dari material tembaga memiliki nilai temperatur nyala api paling tinggi bila dibandingkan dengan bentuk *flame holder concentric ring* dan *backward facing step*. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan bentuk *flame holder circle* memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk *flame holder* yang lain menyebabkan resirkulasi

panas dari api menuju reaktan yang digunakan untuk pemanasan awal reaktan semakin meningkat sehingga temperatur reaktan dan temperatur nyala api semakin meningkat. Sedangkan pada bentuk *flame holder concentric ring* dan *backward facing step* memiliki nilai temperatur nyala api lebih rendah. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan bentuk *flame holder concentric ring* dan *backward facing step* memiliki nilai konduktivitas termal yang paling rendah dibandingkan material *flame holder* yang lainnya menyebabkan resirkulasi panas dari api menuju reaktan yang digunakan sebagai pemanasan awal reaktan tidak optimal.



Gambar 6. Korelasi antara temperatur nyala api dengan kecepatan reaktan untuk setiap bentuk *flame holder*



Gambar 7. Kolerasi antara temperatur nyala api terhadap rasio ekivalen untuk setiap bentuk *flame holder*

Gambar 7 merupakan hubungan antara temperatur nyala api hasil pembakaran terhadap rasio ekivalen untuk masing-masing *flame holder*. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya rasio ekivalen, maka temperatur nyala api semakin menurun. Hal tersebut dikarenakan pada kondisi rasio ekuivalen yang semakin meningkat,

debit bahan bakar yang ada di dalam *combustor* juga semakin meningkat, namun debit udara yang berada di dalam *combustor* tidak bertambah sehingga kondisi campuran antara udara dan bahan bakar yang ada di dalam *combustor* cenderung menjadi kaya bahan bakar yang menyebabkan kemungkinan besar masih ada bahan bakar yang tidak terbakar dalam jumlah yang banyak. Dengan banyaknya jumlah bahan bakar yang tidak terbakar di dalam *combustor*, menyebabkan berpengaruhnya temperatur nyala api dikarenakan temperatur dari bahan bakar yang tidak terbakar jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan temperatur nyala api.

4. KESIMPULAN

Pembakaran pada *combustor flame holder circle* menghasilkan pembakaran yang lebih stabil dan merata dibandingkan dengan pembakaran pada *combustor flame holder concentric ring dan backward facing step*, warna api cenderung menjadi biru tua menunjukkan bahwa proses pembakaran berlangsung pada kondisi hampir stoikiometri. *Combustor* dengan *flame holder circle* juga memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan *combustor* dengan *flame holder concentric ring dan backward facing step*.

PERNYATAAN TERIMA KASIH

Melalui pernyataan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pembimbing I Dr. Eng Lilis Yuliati, S.T., M.T dan Winarto, S.T., M.T, Ph.D. Sebagai pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, dorongan, saran dan masukan selama saya menjalani pendidikan dan menyelesaikan penelitian ini, serta terima kasih kepada semua pihak yang namanya tidak dapat saya sebutkan satu-persatu yang telah membantu penulis baik dari segi moril maupun materil hingga selesainya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. C. Fernandez-Pello, "Micropower generation using combustion: Issues and approaches," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 29, no. 1, 2002, doi: 10.1016/s1540-7489(02)80113-4.
- [2] Y. Ju and K. Maruta, "Microscale combustion: Technology development and fundamental research," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 37, no. 6, 2011, doi: 10.1016/j.pecs.2011.03.001.
- [3] M. Mikami, Y. Maeda, K. Matsui, T. Seo, and L. Yuliati, "Combustion of gaseous and liquid fuels in meso-scale tubes with wire mesh," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 34, no. 2, 2013, doi: 10.1016/j.proci.2012.05.064.
- [4] W. M. Yang, S. K. Chou, C. Shu, Z. W. Li, and H. Xue, "Combustion in micro-cylindrical combustors with and without a backward facing step," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 22, no. 16, 2002, doi: 10.1016/S1359-4311(02)00113-8.
- [5] R. DuttaRoy, S. R. Chakravarthy, and A. K. Sen, "Experimental investigation of flame propagation and stabilization in a meso-combustor with sudden expansion," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 90, no. April 2017, pp. 299–309, 2018, doi: 10.1016/j.exptthermflusci.2017.09.008.
- [6] E. Jiaqiang *et al.*, "Investigation on the combustion performance enhancement of the premixed methane/air in a two-step micro combustor," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 141, no. May, pp. 114–125, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.101.
- [7] M. Malushte and S. Kumar, "Flame dynamics in a stepped micro-combustor for non-adiabatic wall conditions," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 13, no. January, p. 100394, 2019, doi: 10.1016/j.tsep.2019.100394.

- [8] M. Baigmohammadi, S. Tabejamaat, and Y. Farsiani, "Experimental study of the effects of geometrical parameters, Reynolds number, and equivalence ratio on methane-oxygen premixed flame dynamics in non-adiabatic cylindrical meso-scale reactors with the backward facing step," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 132, pp. 215–233, 2015, doi: 10.1016/j.ces.2015.04.008.
- [9] Z. Zhang, K. Wu, W. Yao, R. Yuen, and J. Wang, "Enhancement of combustion performance in a microchannel: Synergistic effects of bluff-body and cavity," *Fuel*, vol. 265, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116940.
- [10] B. Khandelwal, A. A. Deshpande, and S. Kumar, "Experimental studies on flame stabilization in a three step rearward facing configuration based micro channel combustor," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 58, no. 1–2, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.04.058.
- [11] X. Chen, J. Li, M. Feng, D. Zhao, B. Shi, and N. Wang, "Flame stability and combustion characteristics of liquid fuel in a meso-scale burner with porous media," *Fuel*, vol. 251, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.04.011.
- [12] W. Gao, Y. Yan, L. Huang, K. Shen, Z. He, and B. Gao, "Numerical comparison of premixed H₂/air combustion characteristic of three types of micro cavity-combustors with guide vanes, bluff body, guide vanes and bluff body respectively," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 47, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.04.197.
- [13] Y. Yan *et al.*, "Numerical comparison of H₂/air catalytic combustion characteristic of micro-combustors with a conventional, slotted or controllable slotted bluff body," *Energy*, vol. 189, p. 116242, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116242.
- [14] F. Baananto, L. Yulianti, and N. Hamidi, "Studi Numerik Pembakaran Butana (C₄H₁₀) dalam Meso Scale Combustor dengan Perforated Plate," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 69–74, 2018, doi: 10.21776/ub.jrm.2018.009.02.1.
- [15] A. Sanata, I. N. G. Wardana, L. Yuliati, and M. N. Sasongko, "Effect Of Backward Facing Step On Combustion Stability In A Constant Contact Area Meso-Scale Combustor," pp. 51–59, 2019, doi: 10.15587/1729-4061.2019.149217.