

Kestabilan Pembakaran dalam *Meso-scale Combustor* dengan Variasi *Flame Holder*

Lilis Yulianti^{1, *}

¹Universitas Brawijaya, Jl. M.T. Haryono No. 167, Malang, Indonesia

*lilis_y@ub.ac.id

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi *flame holder* terhadap kestabilan pembakaran serta temperatur dan visualisasi nyala api di dalam *meso-scale combustor*. Tiga macam *flame holder* digunakan dalam penelitian ini, yaitu *facing step*, *wire mesh* dan *perforated plate*. *Meso-scale combustor* terbuat dari tembaga dengan diameter 3.5 mm dan panjang 30 mm, dengan bahan bakar *liquified petroleum gas* (LPG) dengan oksidator udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis *flame holder* yang digunakan memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap kestabilan pembakaran di dalam *meso-scale combustor*. Kestabilan pembakaran dari yang paling baik hingga yang kurang baik berturut-turut dihasilkan pada *combustor* dengan *flame holder perforated plate*, *wire mesh* dan *facing step*. Hasil pengukuran temperatur nyala api menunjukkan bahwa *combustor* dengan *flame holder* berbentuk *perforated plate* memiliki temperatur api yang paling besar pada debit bahan bakar dan udara yang sama. Hal tersebut menunjukkan terjadinya resirkulasi panas dari nyala api ke reaktan yang lebih baik pada *combustor* dengan *perforated plate flame holder*, sehingga temperatur reaktan masuk daerah pembakaran lebih besar, menghasilkan temperatur nyala api yang lebih besar pada debit reaktan yang sama dan pembakaran yang lebih stabil. *Combustor* dengan *perforated plate* memiliki luas penampang api yang paling besar, tetapi warna api tidak seragam.

Kata kunci : *Meso-scale combustor*, *flame holder*, kestabilan pembakaran, LPG.

Pendahuluan

Pengembangan *micro power generator* dengan bahan bakar hidro karbon semakin meningkat seiring dengan semakin diperlukannya pembangkit listrik portabel sebagai sumber energi listrik pada berbagai peralatan elektrik seperti smart phone, laptop, peralatan navigasi militer, dan berbagai peralatan lainnya. Hal ini dikarenakan *micro power generator* 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 bagian utama yaitu *micro-* atau *meso-scale combustor* dan modul pengkonversi energi yang mengkonversikan energi termal menjadi energi listrik. *Micro-* atau *meso-scale*

combustor berfungsi sebagai pembangkit energi panas dalam *micro power generator*, yang diperoleh dari proses pembakaran bahan bakar di dalamnya. Agar *micro-power generator* memiliki densitas energi yang tinggi, maka laju pembangkitan energi tiap satuan volum dalam *micro-* atau *meso-scale combustor* harus besar, demikian juga efisiensi konversi energi termal menjadi energi listrik pada modul pengkonversi energi juga harus besar.

Pembakaran dalam *micro-* atau *meso-scale combustor* yang stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi diperlukan untuk mencapai laju pembangkitan energi tiap satuan volum yang besar. Pembakaran dan api yang stabil di dalam *micro-* atau *meso-scale combustor* merupakan hal yang sulit terjadi karena terbatasnya waktu bahan bakar berada dalam ruang bakar (*fuel residence time*), dan tingginya laju kehilangan kalor (*heat loss*) yang mengakibatkan pemadaman api. Terutama pada kecepatan reaktan yang tinggi,

waktu tinggal bahan bakar di dalam *combustor* menjadi semakin pendek, sehingga tidak tersedia cukup waktu untuk terjadi reaksi pembakaran, yang pada akhirnya mengakibatkan api menjadi tidak stabil dan padam [1,2].

Salah satu metode untuk mendapatkan pembakaran yang stabil di dalam *meso-scale combustor* adalah dengan menggunakan *backward facing step* [3,4], wire mesh [5,6], ataupun dengan penggunaan *plate flame holder* [7] di dalam *combustor*. *Backward facing step* mempunyai peranan penting dalam stabilisasi api di dalam *combustor*. Dengan semakin besarnya ukuran *facing step*, pembakaran di dalam *combustor* semakin stabil, tetapi temperatur dinding *combustor* semakin turun [3,4]. *Wire mesh* dalam *meso-scale combustor* dengan bahan bakar cair mempunyai peranan sebagai pengumpul droplet sekaligus sebagai *flame holder* sehingga pembakaran stabil dapat terjadi di dalam *meso-scale combustor* [5]. Peranan *flame holder* dalam mekanisme stabilisasi nyala api dalam *combustor* dengan bahan bakar propana (C_3H_8) dijelaskan oleh Mikami [6]. *Flame holder* mempunyai peranan penting untuk meningkatkan resirkulasi panas dari nyala api ke reaktan melalui konduksi pada dinding *combustor*. Sehingga campuran udara – bahan bakar mendapatkan pemanasan awal yang cukup signifikan dan masuk daerah pembakaran dengan temperatur yang relatif tinggi, sehingga dapat terjadi pembakaran stabil didalam *combustor*. *Flame holder* juga berfungsi sebagai penyimpan kalor yang digunakan untuk proses penyalaan bahan bakar. Selanjutnya, Wan dan Fan [7] menunjukkan bahwa penggunaan *plate flame holder* dalam *micro combustor* dapat meningkatkan kestabilan pembakaran, karena adanya resirkulasi aliran yang meningkatkan *mixing* bahan bakar - udara disekitar *flame holder*.

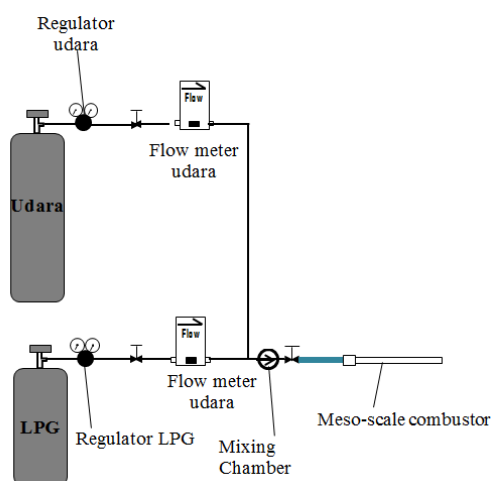
Berbagai penelitian mengenai *micro-* atau *meso-scale combustor* tersebut di atas pada dasarnya dilakukan untuk meningkatkan kestabilan pembakaran di dalam *micro-* atau *meso-scale combustor*, sehingga pembakaran dapat stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi. Sehingga didapatkan laju pembangkit-

an kalor tiap satuan volum *combustor* yang lebih tinggi. Dapat dilihat bahwa berbagai *flame holder* yang digunakan dalam penelitian sebelumnya mempunyai peranan penting dalam mekanisme stabilisasi pembakaran di dalam *micro-* atau *meso-scale combustor*. Tetapi penelitian-penelitian tersebut hanya menggunakan bentuk *flame holder* yang sederhana, belum mempertimbangkan geometri yang efektif dalam proses perpindahan kalor dari nyala api ke dinding dan reaktan. Dimana perpindahan kalor dari nyala api ke dinding merupakan faktor yang sangat penting untuk menghasilkan efisiensi *micro power generator* yang tinggi, dan resirkulasi kalor ke reaktan merupakan hal yang sangat diperlukan untuk mendapatkan pembakaran yang stabil.

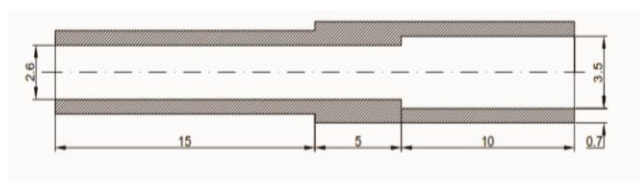
Berdasarkan uraian di atas, perlu dilakukan penelitian untuk mendapatkan geometri *flame holder* yang memberikan efek resirkulasi panas dan pemanasan awal reaktan yang optimal sehingga didapatkan *meso-scale combustor* dengan pembakaran yang stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi geometri *flame holder* terhadap kestabilan pembakaran, temperatur nyala api dan visualisasi nyala api dan di dalam *meso-scale combustor*.

Metodologi

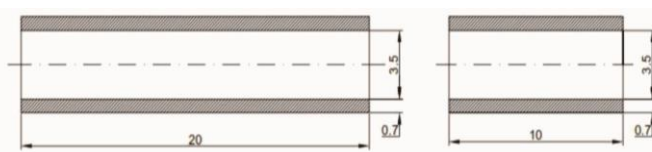
Gambar 1 menunjukkan skema instalasi penelitian yang digunakan dalam penelitian ini. Gambar 2 dan 3 berturut-turut menunjukkan gambar detail *meso-scale combustor* dan tiga jenis *flame holder*. *Combustor* terbuat dari dua buah pipa tembaga dengan diameter dalam 3.5 mm, tebal dinding 0.7 mm dan panjang masing-masing 20 mm dan 10 mm. *Flame holder* disisipkan diantara dua pipa tembaga, dan disatukan dengan *ceramic bond* seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Kecuali *meso-scale combustor* dengan *backward facing step*, terbuat dari satu pipa tembaga dengan undakan (*step*) yang berfungsi sebagai *flame holder*. *Flame holder wire mesh* terbuat dari stainless steel sedangkan *perforated plate* terbuat dari tembaga.



Gambar 1. Skema instalasi penelitian.

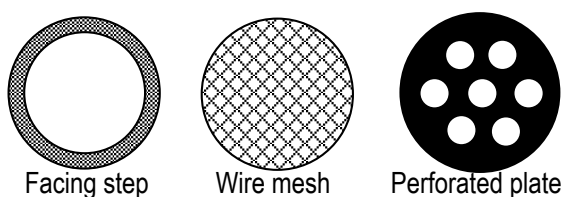


a. Backward facing step combustor



b. Meso-scale combustor

Gambar 2. Detail ukuran Meso-scale combustor.



Gambar 3. Variasi geometri flame holder.

Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah *liquified petroleum gas* (LPG) dengan oksidator udara. Debit LPG dan udara diatur dengan menggunakan flow meter (Koflock) dengan interval pengukuran masing-masing sebesar 2 – 20 mL/menit dan 50 – 500 mL/menit. Sebelum masuk ke *combustor*, bahan bakar dan udara dicampur dalam *mixing chamber*. Reaktan (campuran bahan bakar – udara) dinyalakan di mulut *combustor* dengan menggunakan pemantik. Pada debit bahan bakar dan udara yang sesuai api akan

merambat ke dalam *combustor* dan stabil di dekat *wire mesh*. Kemudian debit bahan bakar dan udara dinaikkan hingga mencapai nilai maksimum dimana pembakaran stabil terjadi di dalam *combustor* di dekat *flame holder*.

Pengukuran temperatur api dilakukan pada sumbu *combustor* dengan posisi aksial tertentu dimana nilai temperatur maksimal. Pengukuran temperatur dilakukan pada kecepatan reaktan sebesar 20, 30, 37.5, 45 dan 50 cm/detik dengan rasio ekuivalen sebesar 1, yaitu pada kondisi pembakaran stoikiometri. Temperatur diukur dengan termo kopel tipe R dengan diameter 0.2 mm yang dihubungkan dengan data logger (Advantec) dan laptop.

Selanjutnya visualisasi nyala api dilakukan pada kecepatan reaktan sebesar 30 cm/detik dengan rasio ekuivalen sebesar 1, pada kondisi campuran stoikiometri. Pengambilan gambar visualisasi nyala api dilakukan dari sisi depan *combustor* dengan jarak 20 cm dari mulut *combustor* menggunakan kamera Canon 600D dengan lensa makro.

Hasil

Kestabilan Api. Hasil pengamatan mengenai kestabilan pembakaran di dalam *meso-scale combustor* dengan variasi *flame holder* ditunjukkan pada Tabel 1. Tabel tersebut menunjukkan debit bahan bakar dan udara serta kecepatan reaktan maksimal dimana pembakaran dapat terjadi dengan stabil di dalam *combustor* di dekat *flame holder*.

Tabel 1. Debit LPG, debit udara dan kecepatan reaktan maksimal.

Jenis Flame Holder	$Q_{\text{fuel max}}$ (mL/menit)	$Q_{\text{air max}}$ (mL/menit)	V_{reactant} (cm/detk)
Facing step	9.1	200	36.42
Wire mesh	13.2	260	51.66
Perforated plate	22	435	86.74

Tabel 1 menunjukkan bahwa *combustor* dengan *flame holder* berbentuk *perforated plate* memiliki pembakaran yang paling stabil. Sebagaimana dijelaskan dalam penelitian Mikami [6], *flame holder* juga memiliki peranan penting dalam proses resirkulasi kalor dari nyala api ke reaktan melalui konduksi

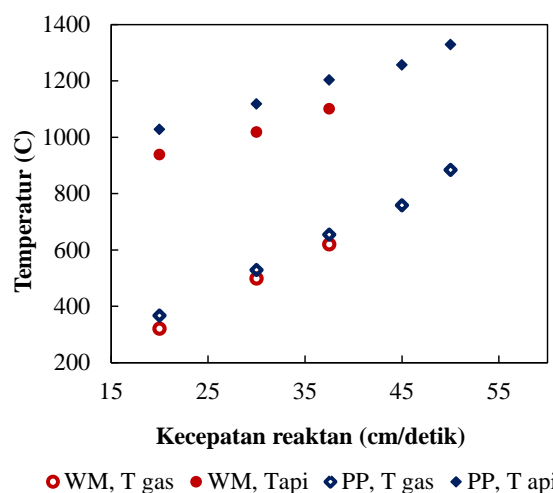
pada dinding *combustor*. Kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran sebagian dikonveksikan ke dinding *combustor*. Sebagian dari kalor ini dikonveksikan ke lingkungan sebagai *heat loss*, dan sisanya dikonduksikan ke bagian *upstream* dinding *combustor*. Sebagian kalor yang dikonduksikan pada dinding *combustor* selanjutnya dikonveksikan ke aliran reaktan untuk proses pemanasan awal reaktan dan sebagian dikonduksikan ke *flame holder*. Bagian kalor yang dikonduksikan pada *flame holder* ini juga akan dikonveksikan ke reaktan untuk pemanasan awal lebih lanjut, atau bila temperatur *flame holder* cukup tinggi sekaligus bisa berfungsi sebagai ignitor.

Flame holder yang berbentuk *perforated plate*, terbuat dari tembaga yang memiliki konduktivitas termal tinggi dan memiliki luas permukaan kontak dengan reaktan yang lebih besar, sehingga proses perpindahan kalor dari dinding *combustor* ke *flame holder* dan selanjutnya ke reaktan juga lebih besar. Semakin besar kalor yang diserap reaktan pada saat pemanasan awal, semakin tinggi temperatur reaktan dan nyala api. Hal tersebut menghasilkan kecepatan pembakaran yang lebih tinggi. Sehingga pembakaran dapat terjadi dengan stabil di dalam *combustor* pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada *combustor* dengan *flame holder* berbentuk *facing step*, luasan permukaan perpindahan kalor dari *flame holder* ke reaktan sangat minim, sehingga pemanasan awal reaktan menjadi kurang efektif, menghasilkan temperatur awal reaktan dan temperatur pembakaran yang lebih rendah. Hal tersebut mengakibatkan pembakaran hanya dapat stabil pada kecepatan reaktan yang relatif rendah.

Dari penjelasan tersebut di atas, terlihat bahwa besarnya kalor yang dikonveksikan dari nyala api ke dinding *combustor* dipengaruhi oleh besarnya perpindahan kalor dari dinding *combustor* ke reaktan, baik secara langsung melalui konveksi dari dinding ke reaktan ataupun secara tidak langsung dari dinding ke reaktan melalui *flame holder*. Untuk membuktikan analisis tersebut di atas, bagian berikut akan membahas mengenai pengukuran temperatur dan visualisasi nyala api pada

combustor dengan variasi geometri *flame holder*.

Temperatur Nyala Api. Temperatur nyala api dan temperatur gas hasil pembakaran di ujung *combustor* di ukur untuk memperkirakan besarnya perpindahan kalor dari nyala api ke dinding *combustor*. Pengukuran temperatur hanya dilakukan untuk *combustor* dengan *flame holder* berupa *wire mesh* dan *perforated plate*. Karena ke dua *flame holder* ini mampu menghasilkan pembakaran dengan kestabilan yang lebih baik. Pengukuran temperatur nyala api dan gas hasil pembakaran dilakukan pada beberapa kecepatan reaktan dengan rasio ekuivalen sebesar 1 (pada kondisi stoikiometri). Hasil pengukuran temperatur ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Temperatur nyala api dan gas hasil pembakaran.

Gambar diatas menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya kecepatan reaktan maka temperatur api dan temperatur gas hasil pembakaran pada masing-masing *combustor* akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena jumlah reaktan yang terdapat di dalam *combustor* akan semakin banyak dan berdampak pada kalor yang dilepas dari hasil pembakaran, menghasilkan pembangkitan kalor tiap satuan volum yang lebih besar. Untuk setiap kecepatan reaktan, *meso-scale combustor* dengan *flame holder* berbentuk *perforated plate* menghasilkan temperatur nyala api dan temperatur gas hasil pembakaran yang lebih besar dibandingkan dengan *combustor* dengan *flame holder* berbentuk *wire mesh*. Tetapi perbedaan temperatur api

memiliki nilai lebih besar, sedangkan temperatur gas hasil pembakaran memiliki nilai yang hampir sama.

Relatif rendahnya temperatur gas hasil pembakaran pada *combustor* dengan *flame holder* berbentuk *perforated plate* menunjukkan besarnya perpindahan panas dari nyala api ke dinding *combustor*. Panas ini kemudian dikonduksikan ke arah *upstream combustor* dan digunakan untuk pemanasan awal bahan bakar.

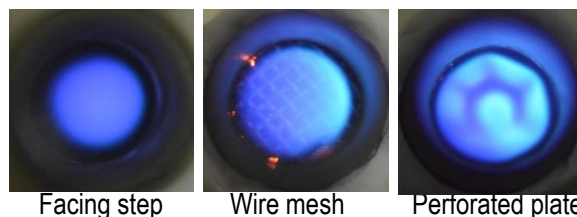
Sebaliknya, tingginya temperatur api pada rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan yang sama, menunjukkan bahwa kalor yang diserap reaktan pada saat pemanasan awal reaktan lebih besar, dengan asumsi pembakaran terjadi dengan tingkat kesempurnaan yang sama. Pemanasan awal reaktan pada *combustor* dengan *flame holder* berbentuk *perforated plate*, disebabkan oleh adanya perpindahan kalor dari *flame holder perforated plate* ke reaktan yang cukup besar sebagai tambahan terhadap perpindahan kalor konveksi dari dinding *combustor* secara langsung ke reaktan. Sebagaimana telah disebutkan dibagian sebelumnya, *perforated plate* memiliki luas permukaan perpindahan panas dan konduktivitas termal yang lebih tinggi dari pada *wire mesh*.

Tingginya temperatur reaktan dan nyala api inilah yang mengakibatkan pembakaran pada *combustor* dengan *flame holder* berbentuk *perforated plate* lebih stabil dari pada pembakaran pada *combustor* yang lain. Karena di dalam *combustor* ini api dapat stabil pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi.

Visualisasi Nyala Api. Visualisasi nyala api dilakukan pada tiga *combustor* dengan *flame holder* yang berbeda. Visualisasi nyala api dilakukan pada rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan yang sama, berturut-turut sebesar 1 dan 30 cm/detik. Hasil visualisasi nyala api ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar tersebut menunjukkan bahwa nyala api tidak memenuhi seluruh penampang *combustor*. Tetapi terdapat suatu jarak/celah antara api dengan dinding *combustor*. *Combustor* dengan *backward facing step* mempunyai luas penampang api yang lebih kecil dan warna yang lebih gelap bila

dibandingkan dengan *combustor* yang lainnya. Hal ini dikarenakan nyala api mempunyai temperatur yang lebih rendah, sehubungan dengan kurangnya pemanasan awal reaktan pada *combustor* dengan *backward facing step*. Jarak antara api dengan dinding terjadi karena ada pendinginan lokal di daerah sekitar dinding *combustor*, sehingga temperatur pada daerah tersebut menjadi sangat rendah dan nyala api mengalami pemadaman lokal. Semakin rendah temperatur nyala api, maka daerah yang memiliki temperatur dibawah temperatur kritis untuk api menyala semakin luas, sehingga luas penampang api menjadi semakin sempit. Kondisi ini menghasilkan pembakaran dengan kestabilan yang rendah. Api mudah mengalami *quenching* ataupun *blow-off* dengan adanya sedikit perubahan komposisi ataupun kecepatan reaktan.



Gambar 5. Visualisasi nyala api dalam *combustor* dengan variasi *flame holder*.

Combustor dengan *flame holder* berupa *perforated plate* mempunyai luas penampang api yang lebih besar dari pada *combustor* dengan *flame holder* berupa *wire mesh*, walaupun perbedaannya relatif kecil. Temperatur api relatif tinggi, sehingga daerah dengan temperatur dibawah temperatur kritis untuk api menyala sangat sempit, menghasilkan nyala api yang luas hampir memenuhi penampang *combustor*. Keadaan ini menghasilkan nyala api yang stabil terhadap perubahan komposisi dan kecepatan reaktan. Nyala api dapat stabil pada interval kecepatan reaktan dan rasio ekuivalen yang lebih luas.

Tetapi Gambar 5 juga menunjukkan bahwa warna api pada penampang *combustor* dengan *perforated plate* tidak seragam. Bagian sesudah lubang memiliki warna api terang dan tebal, menunjukkan pembakaran yang intens di daerah ini. Sedangkan pada bagian hilir *perforated plate* yang tidak berlubang, nyala api berwarna biru gelap, karena sedikitnya

konsentrasi reaktan pada daerah ini. Reaktan pada daerah ini ada karena adanya proses difusi reaktan dari daerah hilir bagian yang berlubang. Dari hasil visualisasi ini disarankan untuk membuat *flame holder* dengan luas permukaan kontak antara *flame holder* dan reaktan yang besar, agar perpindahan kalor untuk pemanasan awal reaktan terjadi dalam jumlah besar, tetapi juga harus memiliki distribusi reaktan yang seragam pada daerah hilir *flame holder*.

Kesimpulan

Dari pemaparan mengenai hasil penelitian pada bagian sebelumnya dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Geometri *flame holder* mempengaruhi resirkulasi kalor dan pemanasan awal reaktan pada *meso-scale combustor*.
2. Pembakaran paling stabil hingga yang kurang stabil berturut-turut terjadi pada *meso-scale combustor* dengan *flame holder* berupa *perforated plate*, *wire mesh* dan *facing step*.
3. Temperatur pembakaran tertinggi dan luas penampang api paling besar terjadi pada *combustor* dengan *perforated plate*.
4. Warna api pada *combustor* dengan *perforated plate* tidak seragam karena tidak meratanya distribusi reaktan di dalam *combustor*.

Referensi

- [1] A.C. Fernandez-Pello, *Micropower Generation using Combustion: Issues and Approaches*, *Proceedings of the Combustion Institute*, 29 (2002) 883–899.
- [2] Y. Ju, K. Maruta, *Microscale combustion: Technology development and fundamental research*, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 37 (2011) 669–715.
- [3] W.M. Yang, S.K. Chou, C. Shu, Z.W. Li, H. Xue, *Combustion in Micro-Cylindrical Combustors with and without a Backward Facing Step*, *J. Applied Thermal Engineering*, 22 (2002) 1777–1787.
- [4] M. Baigmohammadi, S. Tabejamaat, Y. Farsiani, *An experimental study of methane – oxygen – carbon dioxide premixed flame dynamics in non-adiabatic cylindrical meso-scale reactors with the backward facing step*, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 95 (2015) 105–123.
- [5] L. Yuliati, T. Seo, M. Mikami, *Liquid-fuel Combustion in a Narrow Tube Using an Electrospray Technique*, *Combustion and Flame*, 159 (2012) 462–464.
- [6] M. Mikami, Y. Maeda, K. Matsui, T. Seo, L. Yuliati, *Combustion of Gaseous and Liquid Fuels in Meso-scale Tubes with Wire Mesh*, *Proceeding of the Combustion Institute*, 34 (2013) 3387 – 3394.
- [7] J. Wan, A. Fan, *Effect of solid material on the blow-off limit of CH₄/air flames in a micro-combustor with a plate flame holder and preheating channels*, *Energi Conversion and Management*, 101 (2015) 552–560.