

LAPORAN AKHIR
PENELITIAN UNGGULAN PERGURUAN TINGGI (M)



HIGH ENERGY DENSITY MESO-SCALE COMBUSTOR
MENGGUNAKAN MULTIPLE FUEL INLET
DENGAN BAHAN BAKAR GAS DAN CAIR

Tahun ke 1 dari rencana 2 tahun

Ketua/Anggota Tim

Dr. Eng. LILIS YULIATI, ST, MT

NIDN 0002077503

Prof. Ir. I.N.G. WARDANA, M. Eng., Ph. D

NIDN 0003075906

Dr. SLAMET WAHYUDI, ST, MT

NIDN 0003097203

Dibiayai oleh :

Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi,

Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Melalui DIPA Universitas Brawijaya

Nomor : DIPA-023.04.2.414989/2013, Tanggal 5 Desember 2012, dan berdasarkan

SK Rektor Universitas Brawijaya Nomor : 295/SK/2013 tanggal 12 Juni 2013

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
NOVEMBER 2013

HALAMAN PENGESAHAN

Judul : *High Energy Density Meso-scale Combustor*
Menggunakan *Multiple Fuel Inlet* dengan Bahan Bakar
Gas dan Cair

Peneliti / Pelaksana
Nama Lengkap : Dr. Eng. Lilis Yulianti, ST, MT
NIDN : 0002077503
Jabatan Fungsional : Lektor
Program Studi : Teknik Mesin
Nomor HP : 081734788404
Alamat surel (e-mail) : lilis_y@ub.ac.id

Anggota (1)
Nama Lengkap : Prof. Ir. I.N.G. Wardana, M. Eng., Ph. D
NIDN : 0003075906
Perguruan Tinggi : Universitas Brawijaya

Anggota (2)
Nama Lengkap : Dr. Slamet Wahyudi, ST, MT
NIDN : 0003097203
Perguruan Tinggi : Universitas Brawijaya

Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 1 dari rencana 2 tahun
Biaya Tahun Berjalan : Rp. 85.000.000,00
Biaya Keseluruhan : Rp. 178.000.000,00

Malang, 30 November 2013

Ketua,

(Dr. Eng. Lilis Yulianti, ST, MT)
NIP.19750702 200003 2 001

Mengesahkan
Rektor Fakultas Teknik UB

(Prof. Dr. Ir. MOHAMMAD BISRI, MS)
NIP. 19581120 198609 1 001

Menyetujui,
Ketua LPPM UB


(Prof. Dr. Ir. Saif Chuzaimi, MS)
NIP. 19530714 198002 2 001

ABSTRAK

Penelitian mengenai karakteristik pembakaran bahan bakar gas dan cair dalam *meso-scale combustor* dengan *multiple fuel inlet* dan *multiple wire mesh* telah dilakukan secara eksperimental. Combustor yang digunakan terbuat dari *quartz glass tube* dengan diameter dalam 3,5 mm, dengan *stainless steel wire mesh* (60 mesh/inchi) terselip didalamnya. Bahan bakar gas yang digunakan dalam penelitian ini adalah LPG, dan bahan bakar cair yang digunakan adalah heptan dan campuran etanol-heptan. Nyala api dapat distabilkan pada *downstream wire mesh* yang manapun. Tetapi sampai saat ini api belum dapat distabilkan pada setiap *downstream wire mesh* secara bersamaan (nyala api ganda), walaupun telah menggunakan *multiple fuel inlet*. Selanjutnya penelitian difokuskan pada karakteristik pembakaran LPG diantara dua *wire mesh*. Visualisasi nyala api dalam *combustor* dengan dua *wire mesh* menunjukkan warna dinding yang merah pada debit bahan bakar yang tinggi. Hal ini menunjukkan dinding *combustor* mempunyai temperatur yang relatif tinggi. Fenomena tersebut tidak terjadi pada *combustor* dengan *single wire mesh*. Pengukuran temperatur dinding *combustor* menunjukkan bahwa dinding *combustor* dengan dua *wire mesh* mempunyai temperatur yang lebih tinggi. Daerah *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan dua *wire mesh* lebih luas daripada *combustor* dengan satu *wire mesh*. Perluasan daerah ini terjadi ke arah *equivalence ratio* yang lebih rendah untuk campuran miskin bahan bakar dan ke arah *equivalence ratio* yang lebih besar untuk campuran kaya bahan bakar. Dan yang lebih penting adalah perluasan daerah *flammability limit* ke arah kecepatan reaktan yang lebih tinggi. Kecepatan reaktan maksimum dimana api dapat stabil dalam *combustor* dengan dua *wire mesh* adalah 57 cm/detik, sedangkan pada *combustor* dengan satu *wire mesh* hanya 45 cm/detik. Perluasan daerah *flammability limit* ini dikarenakan adanya *wire mesh* yang kedua yang berfungsi untuk mencegah *blow-out* pada kecepatan reaktan yang tinggi, serta meningkatnya *heat recirculation* untuk pemanasan awal reaktan sebagai akibat meningkatnya temperatur dinding *combustor*.

Penelitian awal mengenai pembakaran bahan bakar cair dalam *meso-scale combustor* juga telah dilakukan. Untuk campuran bahan bakar etanol-heptan dan bahan bakar disuplai ke *combustor* dengan metode *electrospray*, api dapat distabilkan dalam *meso-scale combustor* pada debit bahan bakar sebesar 0,5 – 2 mL/jam pada *equivalence ratio* sekitar satu. Selanjutnya api juga dapat distabilkan pada pembakaran heptan dalam *meso-scale combustor*, dimana bahan bakarnya disuplai ke *combustor* dengan cara diteteskan ke *wire mesh* atau media porous dalam *combustor*. Kemudian bahan bakar cair membentuk lapisan yang sangat tipis (*thin liquid film*) pada permukaan *wire mesh* atau media porous untuk mempermudah proses penguapan dan pembakarannya.

ABSTRACT

Combustion characteristics of gaseous and liquid fuel inside meso-scale combustor with multiple fuel inlet and multiple wire mesh was investigated experimentally. Combustor in this research was made from quartz glass tube with an inner diameter of 3.5 mm and stainless steel wire mesh, 60 mesh/inchi, was inserted inside its combustor. Liquefied petroleum gas (LPG) was used as a gas fuel when heptane and mixture of ethanol-heptane were used as liquid fuels. Stable flame could be established at each wire mesh downstream separately. However, stable flame could not be establish simultaneously at every wire mesh downstream at the same time (double flame), eventhough multiple fuel inlet was used in this research. Then, this research was focussed on the combustion characteristics of gaseous fuel inside meso-scale combustor between two wire meshes. Flame visualization showed that combustor with two wire mesh has red luminosity color of combustor wall at relatively high reactant flow rate. This condition indicated that combustor wall has relatively high temperature. This phenomena did not occur on the meso-scale combustor with single wire mesh. Measurement of combustor wall quantitatively indicate that wall of meso-scale combustor with multiple wire mesh has higher temperature. Flammability limit area of meso-scale combustor with multiple wire mesh is broader than that one inside meso-scale combustor with single wire mesh. Extention of this region occured toward lower equivalence ratio for lean fuel mixture, as well as toward higher equivalence ratio for rich fuel mixture. And, the most important extention region of flammability limit is toward higher reactant flow rate. Maximum reactant velocity in which stable flame could be established inside meso-scale combustor with multiple wire mesh is 57 cm/second, when the value is 45 cm/second for meso-scale combustor with single wire mesh. Extention of this flammability limit area is caused by existing of second wire mesh which has function to prevent occurence of blow-out at relatively high reactant flow rate, as well as the increasing of heat recirculation for unburnt reactant preheating as a results of higher wall temperature.

Preliminary research about combustion of liquid fuel inside meso-scale combustor was conducted. For ethanol-heptane mixture and fuel is supplied into combustor using electrospray method, stable flame could be established inside combustor at fuel flow rate of 0,5 – 2 mL/hour for equivalence ratio around unity. Furthermore, stable flame also established for heptane combustion, in which liquid fuel is supplied into combustor by dripping method. Liquid fuel was dripped to the wire mesh or porous medium inside combustor, than liquid fuel form a thin liquid film on the wire mesh or porous medium surface to facilitate its evaporation and combustion process.

RINGKASAN

Meningkatnya mobilitas masyarakat modern dan penggunaan peralatan listrik portabel mendorong pengembangan pembangkit listrik portabel (*micro-power generator*) yang berukuran kecil, ringan dan mempunyai densitas energi yang tinggi. *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. Dalam dua dekade terakhir, penelitian mengenai *micro-* dan *meso-scale combustor* dilakukan secara intensif. Sebagian besar penelitian dilakukan pada *micro-* dan *meso-scale combustor* dengan bahan bakar gas, dimaksudkan untuk memperbaiki kinerja dan stabilitas pembakaran dalam *micro-* dan *meso-scale combustor*. Tetapi penggunaan bahan bakar gas dalam *micro-power generator* sangat tidak praktis karena jenis bahan bakar ini memerlukan penanganan khusus dalam penyimpanan dan transportasinya. Selain itu energi spesifik bahan bakar ini rendah bila dibandingkan dengan bahan bakar cair. Hal tersebut mengakibatkan laju pembangkitan dan densitas energi pada *meso-scale combustor* dan *micro-power generator* menjadi rendah.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan *meso-scale combustor* dengan laju pembangkitan energi yang tinggi dengan menggunakan bahan bakar cair. Tetapi tidak mudah untuk mewujudkan pembakaran yang stabil dalam *meso-scale combustor* dengan bahan bakar cair. Karena itu penelitian akan dilakukan dalam dua tahap, pada tahap pertama akan digunakan bahan bakar gas untuk mendapatkan desain/konfigurasi *meso-scale combustor* dengan pembakaran yang lebih stabil dan *flammability limit* yang lebih luas. Perluasan *flammability limit* ke arah debit bahan bakar yang lebih besar akan menghasilkan peningkatan densitas pembangkitan energi. Pada tahap berikutnya akan digunakan bahan bakar cair dalam *meso-scale combustor* terbaik yang dihasilkan dalam penelitian tahap pertama.

Penelitian pada tahun pertama (Tahap I) dilakukan untuk mengetahui karakteristik pembakaran bahan bakar gas dalam *meso-scale combustor* dengan *multiple wire mesh* dan *multiple fuel inlet*. Terdapat dua *fuel/reactant inlet* pada *combustor*, yaitu saluran masuk primer pada *combustor upstream* dan saluran masuk sekunder yang terletak sebelum atau sesudah *wire mesh* yang kedua. *Combustor* dibuat dari *quartz glass tube* dengan diameter dalam 3,5 mm dan diameter luar 5 mm. Tiga atau dua lembar *wire mesh* yang terbuat dari *stainless steel*, dengan spesifikasi 60 mesh/inchi, disisipkan di dalam *combustor*. Bahan bakar yang digunakan adalah *liquified petroleum gas* (LPG) dengan oksidator udara dari tangki kompresor torak. Debit bahan bakar dan udara divariasikan untuk mendapatkan nilai *equivalence ratio* yang berbeda-beda. Debit bahan bakar dan udara masing-masing diatur dengan menggunakan *flow meter* bahan bakar dan *flow meter* udara. Data yang diambil dalam penelitian ini adalah visualisasi nyala api dan debit udara serta bahan bakar ketika ketika api padam ataupun api keluar dari dalam *combustor*, untuk kemudian stabil di ujung *combustor* ataupun mengalami *blow-out*. Visualisasi api dilakukan dengan menggunakan kamera. Temperatur dinding *combustor* diukur dengan menggunakan termokopel untuk memperkirakan besarnya *heat recirculation* pada *combustor*. Penelitian awal untuk *combustor* dengan bahan bakar cair juga telah dilakukan. Bahan bakar yang digunakan adalah heptan dan campuran etanol-heptan. Bahan bakar disuplai ke dalam *combustor* dengan menggunakan metode *electrospray* atomization (untuk campuran etanol-heptan) dan pembentukan *liquid film* pada permukaan *wire mesh* atau media porous dalam (untuk heptan).

Hasil yang diperoleh dari penelitian pada tahun pertama adalah sebagai berikut. Api dapat distabilkan pada *downstream wire mesh* yang manapun secara terpisah. Tetapi sampai saat ini api belum bisa distabilkan pada setiap *downstream wire mesh* secara bersamaan untuk membentuk nyala api ganda, walaupun telah digunakan *multiple fuel inlet*. Penelitian berikutnya difokuskan pada karakteristik pembakaran bahan bakar gas diantara dua *wire mesh*. Visualisasi nyala api dalam *combustor* dengan dua *wire mesh* menunjukkan warna dinding yang merah pada debit bahan bakar yang tinggi. Hal ini menunjukkan dinding *combustor* mempunyai temperatur yang relatif tinggi. Fenomena tersebut tidak terjadi pada *combustor* dengan *single wire mesh*. Pengukuran temperatur dinding *combustor* secara kuantitatif menunjukkan bahwa dinding *combustor* dengan dua *wire mesh* mempunyai temperatur yang lebih tinggi. Daerah *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan dua *wire mesh* lebih luas daripada *combustor* dengan satu *wire mesh*. Perluasan daerah ini terjadi ke arah *equivalence ratio* yang lebih rendah untuk campuran miskin bahan bakar dan ke arah *equivalence ratio* yang lebih besar untuk campuran kaya bahan bakar. Dan yang lebih penting adalah perluasan daerah *flammability limit* ke arah kecepatan reaktan yang lebih tinggi. Kecepatan reaktan maksimum dimana api dapat stabil dalam *combustor* dengan dua *wire mesh* adalah 57 cm/detik, sedangkan pada *combustor* dengan satu *wire mesh* hanya 45 cm/detik. Perluasan daerah *flammability limit* ini dikarenakan adanya *wire mesh* yang kedua yang berfungsi untuk mencegah *blow-out* pada kecepatan reaktan yang tinggi, serta meningkatnya *heat recirculation* untuk pemanasan awal reaktan sebagai akibat meningkatnya temperatur dinding *combustor*.

Pembakaran dengan api yang stabil juga dapat diperoleh dalam *meso-scale combustor* dengan bahan bakar cair. Untuk campuran bahan bakar etanol-heptan dan bahan bakar disuplai ke *combustor* dengan metode *electrospray*, api dapat distabilkan dalam *meso-scale combustor* pada debit bahan bakar sebesar 0,5 – 2 mL/jam pada *equivalence ratio* sekitar satu. Selanjutnya api juga dapat distabilkan pada pembakaran heptan dalam *meso-scale combustor*, dimana bahan bakarnya disuplai ke *combustor* dengan cara diteteskan ke *wire mesh* atau media porous dalam *combustor*. Kemudian bahan bakar cair membentuk lapisan yang sangat tipis (*thin liquid film*) pada permukaan *wire mesh* atau media porous untuk mempermudah proses penguapan dan pembakarannya.

Kata-kata kunci: *Meso-scale combustor*, *High energi density*, *Multiple fuel inlet*, Bahan bakar gas, Bahan bakar cair.

SUMMARY

The increasing of modern society mobility and the using of portable electric devices encourage development of micro-power generator which has small size, light as well as has high energy density. Micro-power generator consists of two main parts, which are micro- or meso-scale combustor that has function to convert chemical energy of fuel into thermal energy and energy converter module to convert thermal energy become electric energy. In the last two decades, research about micro- and meso-scale combustor was intensively conducted. Almost all of the research were conducted on the micro- and meso-scale combustor with gaseous fuel, intended to improve performance and combustion stability inside micro- and meso-scale combustor. However, utilization of gaseous fuel in micro-power generator are not practical, because gaseous fuel require special handling method for its storage and transportation. Furthermore it also has low specific energy density if compare to specific energy density of liquid fuel. Therefore rate of energy generation and energy density on the meso-scale combustor and micro-power generator with gaseous fuel become low.

Goal of this research is to find a meso-scale combustor with high energy generation rate using liquid fuel. It is difficult to realize stable combustion of liquid fuel inside meso-scale combustor. Therefore, this research conduct in two step, in the first step gaseous fuel was used to find out the best meso-scale combustor configuration which has more stable combustion and broader flammability limit. Extension of flammability limit region toward higher fuel and reactant flow rate results increasing of energy generation rate. In the second step, liquid fuel will burn in the best meso-scale combustor that is determined based on the results of the first step research.

The research in the first year (Step-I) was conducted to investigate combustion characteristics of gaseous fuel inside meso-scale combustor with multiple wire mesh and multiple fuel inlet. There are two fuel/reactant inlet on the combustor, which are a primary fuel inlet at the combustor upstream and a secondary fuel inlet which are located before or after second wire mesh. Combustor was made from quartz glass tube with an inner diameter of 3.5 mm and an outer diameter of 5 mm. Three or two pieces of stainless steel wire mesh, with spacification 60 mesh/inchi, was inserted inside the combustor. Liquified petroleum gas (LPG) was used as a gaseous fuel with an oxidator of compressed air from reciprocating compressor tank. Fuel and air flow rate were vary to obtain different equivalence ratio value. Each of fuel and air flow rate were controlled by fuel flow meter and air flow meter respectively. The observed data in this research are flame visualization and flow rate of fuel and air when flame was extinguished or moved out from combustor, then stabilize at the end of combustor or blow-out. Flame visualization was conducted using camera photo. Temperature of combustor wall was measured by thermocouple to predict the heat recirculation on the combustor. Preliminary research of combustor with liquid fuel also conducted. The fuels in the preliminary research were heptane and mixture of ethanol-heptane. The liquid was supply into the combustor using electrospray atomization method (for ethanol-heptane mixture) and formation of thin liquid film on the wire mesh or porous medium surface inside the combustor (for heptane fuel).

Results of the research at the first year are as follow. Stable flame could be established at each wire mesh downstream separately. However, stable flame could not be establish simultaneously at every wire mesh downstream at the same time (double flame), eventhough multiple fuel inlet was used in this research. Then, this research was focussed on the combustion characteristics of gaseous fuel inside meso-scale combustor between two

wire meshes. Flame visualization show that combustor with two wire mesh has red luminosity color of combustor wall at relatively high reactant flow rate. This condition indicated that combustor wall has relatively high temperature. This phenomena did not occur on the meso-scale combustor with single wire mesh. Measurement of combustor wall quantitatively indicate that wall of meso-scale combustor with multiple wire mesh has higher temperature. Flammability limit area of meso-scale combustor with multiple wire mesh is broader than that one inside meso-scale combustor with single wire mesh. Extention of this region occurred toward lower equivalence ratio for lean fuel mixture, as well as toward higher equivalence ratio for rich fuel mixture. And, the most important extention region of flammability limit is toward higher reactant flow rate. Maximum reactant velocity in which stable flame could be established inside meso-scale combustor with multiple wire mesh is 57 cm/second, when the value is 45 cm/second for meso-scale combustor with single wire mesh. Extention of this flammability limit area is caused by existing of second wire mesh which has function to prevent occurrence of blow-out at relatively high reactant flow rate, as well as the increasing of heat recirculation for unburnt reactant preheating as a results of higher wall temperature.

Combustion with stable flame also could be founded inside meso-scale combustor with liquid fuel. For ethanol-heptane mixture and fuel is supplied into combustor using electrospray method, stable flame could be established inside combustor at fuel flow rate of 0,5 – 2 mL/hour for equivalence ratio around unity. Furthermore, stable flame also establish for heptane combustion, in which liquid fuel is supplied into combustor by dripping method. Liquid fuel was dripped to the wire mesh or porous medium inside combustor, than liquid fuel form a thin liquid film on the wire mesh or porous medium surface to facilitate its evaporation and combustion process.

Key words: Meso-scale combustor, High energi density, Multiple fuel inlet, Gaseous fuel, Liquid fuel.

DAFTAR PUSTAKA

1. Chou, S.K., W.M. Yang, K.J. Chua, J. Li, K.L. Zhang, “*Development of Micro Power Generators – A Review*”, J. Applied Energi, 88 (2011) p. 1–16.
2. Fernandez-Pello, A.C., “*Micropower Generation using Combustion: Issues and Approaches*”, Proceedings of the Combustion Institute, 29 (2002) p. 883–899.
3. Kim, N.I., Aizumi, S., Yokomori, T., Kato, S., Fujimori, T., Maruta, K., “*Development and Scale Effects of Small Swiss-Roll Combustors*”, Proceedings of the Combustion Institute, 31 (2007) p. 3243–3250.
4. Kyritsis, D.C., Guerrero-Arias, I., Roychoudhury, S., Gomez, A. , “*Mesoscale Power Generation by a Catalytic Combustor using Electrosprayed Liquid Hydrocarbons*”, Proceedings of the Combustion Institute, 29 (2002) p. 965–972.
5. Maruta, K., “*Micro and Mesoscale Combustion*”, Proceedings of the Combustion Institute, 33 (2011) p. 125-150.
6. Matsui, K., **Yuliati, L.**, Seo, T., Mikami, M., “*A Study of Stabilization of Pre-mixed Propane/Air flames in Narrow Quartz Glass Tubes*”, 48th Japanese Combustion Symposium, Fukuoka, Japan, 2010.
7. Miesse, C.M., Masel, R.I., Jensen, C.D., Shannon, M.A., Short, M., Submillimeter-scale combustion, AIChE J., 50 (2004) 3206-3214.
8. Mikami, M., Maeda, Y., Matsui, K., Seo, T., **Yuliati, L.**, “*Combustion of Gaseous and Liquid Fuels in Meso-scale Tubes with Wire Mesh*”, Proceeding of the Combustion Institute, Available online 16 Juni 2012 (In Press).
9. Norton, D.G., Vlachos, D.G., “*Combustion Characteristics and Flame Stability at the Microscale: a CFD Study of Premixed Methane/Air Mixtures*”, J. Chemical Engineering Science, 58 (2003) p. 4871 – 4882.
10. Yang, W.M., Chou, S.K., Shu, C., Li, Z.W., Xue, H., “*Combustion in Micro-Cylindrical Combustors with and without a Backward Facing Step*”, J. Applied Thermal Engineering, 22 (2002) p. 1777-1787.
11. Yang, W.M., Chou, S.K., Shu, C., Xue, H., Li, Z.W., Li, D.T., Pan, J.F., “*Microscale Combustion Research for Application to Micro Thermophotovoltaic Sistem*”, J. Energi Conversion and Management, 44 (2003) p. 2625-2634.
12. **Yuliati, L.**, Matsui, K., Maeda, Y., Seo, T., Mikami, M., “*Study on Electrosprayed Liquid Fuel Combustion in a Narroe Tube: Flammability Limit and Flame Visualization*”, Proceeding of 24th ILASS-Europe, Estoril, Portugal, September 2011.
13. **Yuliati, L.**, Seo, T., Mikami, M., “*Liquid-fuel Combustion in a Narrow Tube Using an Electrospray Technique*”, Combustion and Flame 159 (2012) 462-464.
14. Turns, S.R., “*An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*”, McGraw Hill, Singapura, 2000.