

Karakteristik Pembakaran Campuran Etanol – n-Heptan dalam *Meso-scale Combustor*

Lilis Yuliati

Fakultas Teknik Jurusan Mesin Universitas Brawijaya
Jl. MT Haryono 167, Malang, 65145
E-mail: lilis_y@ub.ac.id

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik pembakaran bahan bakar cair, yaitu campuran etanol dan n-heptane, dalam *meso-scale combustor*. *Combustor* yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari *quartz glass tube* dengan diameter dalam sebesar 3,5 mm, tanpa *external heating* ataupun katalis. Komposisi bahan bakar terdiri dari 30% volume etanol dan 70% volume n-heptane. Sistem *electrospray* yang terdiri dari kapiler – *mesh extractor* – *mesh collector* diletakkan dalam *combustor* dan digunakan untuk mengatomisasi bahan bakar cair. Nyala api yang stabil terbentuk didalam *meso-scale combustor* di belakang *flame holder mesh* pada debit bahan bakar 0,7 – 1,5 mL/jam dengan *equivalence ratio* sekitar satu tanpa pembentukan *film* / akumulasi bahan bakar cair pada dinding *combustor*. Api mempunyai bentuk aksisimetri dan warna biru seragam seperti nyala api pada pembakaran bahan bakar gas. Hasil penelitian ini membuktikan pentingnya peranan *mesh* sebagai pengumpul droplet dan pemegang nyala api (*flame holder*), sehingga api dapat stabil dalam *meso-scale combustor*.

Keywords: Karakteristik pembakaran, etanol, n-heptane, *meso-scale combustor*, *electrospray*.

Pendahuluan

Kebutuhan akan pembangkit daya yang berukuran kecil (*micro-power generator*) semakin meningkat dengan meningkatnya penggunaan peralatan listrik portabel seperti *note book computer*, telepon selular, pemutar musik, kamera digital, *micro-space vehicle*, peralatan militer untuk navigasi dan komunikasi, dan lain-lain. Selama ini, kebutuhan energi listrik ini dipenuhi dengan beberapa macam baterai, di antaranya adalah litium ion baterai yang mempunyai densitas energi rendah dan waktu operasi yang relatif pendek dibandingkan dengan waktu isi ulang (*recharge*) energi listrik yang relatif panjang. Selain itu, litium ion baterai mengandung material kimia yang sangat berbahaya ketika dibuang ke lingkungan. Sehingga sangat mendesak untuk mengembangkan *micro-power generator* yang memiliki densitas energi tinggi, memiliki waktu operasi relatif panjang dengan waktu isi ulang energi yang lebih pendek dan juga ramah lingkungan (Fernandez-Pello 2002, Yang, et al 2003, Chou, et al 2011).

Dalam dua dekade terakhir penelitian mengenai *micro-* dan *meso-scale combustor* sebagai bagian utama dari *micro-power generator*, dilakukan secara intensif (Fernandez-Pello 2002, Maruta 2011, Chou, et al 2011). Komponen paling penting dalam *micro-power generator* adalah *micro-* atau *meso-scale combustor* dengan pembakaran dan api yang stabil. Tidak mudah untuk menjaga agar pembakaran

berlangsung stabil dalam *micro-* dan *meso-scale combustor* karena terbatasnya waktu bahan bakar berada dalam ruang bakar (*fuel residence time*) dan tingginya laju kehilangan kalor (*heat loss*) yang mengakibatkan pemadaman api. Beberapa penelitian telah dilakukan pada *micro-* dan *meso-scale combustor* dengan bahan bakar hidrogen dan bahan bakar gas yang lainnya yang dapat terbakar dengan mudah dalam waktu yang relatif singkat. Beberapa penelitian dimaksudkan untuk memperbaiki kinerja dan stabilitas *microcombustor* dengan bahan bakar gas. Diantaranya adalah *microcombustor* dengan *backward facing step* yang dimaksudkan untuk memperbaiki pencampuran bahan bakar dan udara (Li, et al 2005, Li, et al 2009). *Swiss roll combustor* digunakan untuk pemanasan awal reaktan dan mereduksi *heat loss* (Kim, et al 2007, Bei-Jing & Jian-Hua, 2010). Pemanasan dengan listrik atau *external heating* yang lainnya digunakan untuk memperbaiki stabilitas api, memperluas *flammability limit* dan mengurangi *quenching distance* (Zhou, et al 2009, Fan, et al 2009). Pembakaran dengan katalis juga banyak diteliti, dimaksudkan untuk memperbaiki efisiensi pembakaran dan mengurangi *heat loss* serta *radical loss* (Benedetto, et al, 2009, Wang, et al 2010).

Bagaimanapun, dalam praktek pengaplikasian *micro* dan *meso-scale combustor* terkendala oleh rendahnya densitas energi bahan bakar gas, dan kesulitan dalam penyimpanan dan transportasi bahan bakar gas. Karena itu *combustor* dengan bahan bakar cair lebih menguntungkan, karena bahan bakar cair

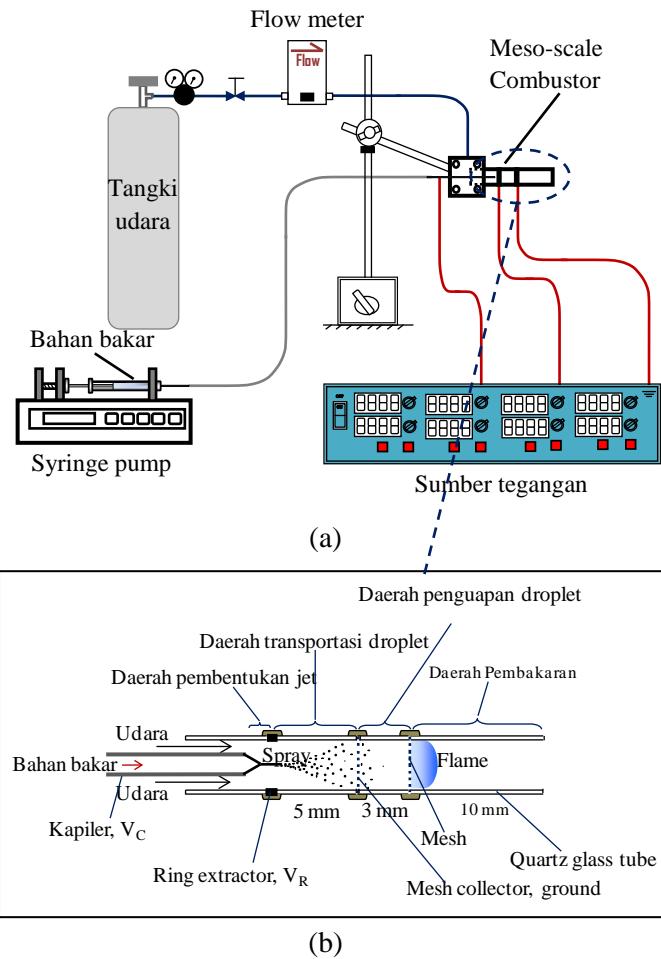
mempunyai densitas energi yang tinggi, serta mudah disimpan dan ditransportasikan. Beberapa penelitian mengenai *micro* dan *meso-scale combustor* dengan bahan bakar cair telah dilakukan. Pembakaran yang stabil dapat terbentuk di dalam dan diluar *combustor* yang terbuat dari pipa kaca dengan diameter 10 mm. Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah campuran metan – methanol dan heptan dengan udara yang diinjeksikan secara tangensial (*swirling flow*) ke dalam ruang bakar (Sirignano, et al 2002). Dalam penelitian lain diamati pembakaran bahan bakar hidro karbon cair dalam *meso-scale combustor* dengan katalis (Kyritsis, et al 2002). Bahan bakar diinjeksikan dan diatomisasi dengan menggunakan metode *electrospray*, kemudian terbakar pada permukaan katalis. Temperatur katalis mencapai 900 – 1300 K tergantung pada laju aliran bahan bakar dan *equivalence ratio* dengan efisiensi pembakaran maksimum sebesar 97%. Dalam penelitian berikutnya, digunakan *combustor* yang lebih kecil yang dibuat dengan metode mikro fabrikasi. *Combustor* ini juga menggunakan metode *electrospray* untuk atomisasi bahan bakar dan katalis dalam proses pembakarannya. Pembakaran sempurna tercapai untuk debit bahan bakar sebesar 3 – 6 mL/jam. Hal ini ditunjukkan dengan perbandingan CO terhadap CO₂ yang lebih kecil dari 1% (Deng, et al 2007).

Tetapi katalis terbuat dari logam khusus yang harganya mahal. Selain itu dengan bertambahnya waktu permukaan katalis akan mengalami retak, pengelupasan dan terbentuk gumpalan partikel yang semuanya akan mengakibatkan penurunan kinerja *combustor* setelah beroperasi dalam waktu yang relatif lama. Dalam penelitian ini ingin dikembangkan *meso-scale combustor* dengan bahan bakar cair tanpa menggunakan katalis. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan pembakaran yang stabil dalam *meso-scale combustor* dengan bahan bakar cair tanpa menggunakan katalis ataupun *external heating*.

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Gambar 1 menunjukkan skema instalasi penelitian (a) dan detail *meso-scale combustor* (b) yang digunakan dalam penelitian ini. *Meso-scale combustor* terbuat dari 4 potong *quartz glass tube* dengan diameter dalam 3.5 mm. *Quartz glass tube* dihubungkan dengan *ring extractor* dan dua buah *mesh* yang berfungsi sebagai pengumpul droplet dan *flame holder* menggunakan lem yang tahan temperatur tinggi. Bahan bakar disuplai ke *combustor* dan diatomisasi menggunakan metode *electrospray*. Sistem *electrospray* terdiri kapiler, *mesh extractor* dan *mesh collector*. Kapiler terbuat dari *stainless steel* dengan diameter dalam 0,4 mm dan diameter luar 0,6 mm, diletakkan pada pusat *combustor*, 1mm sebelum *ring*

extractor. *Ring extractor* terbuat dari *stainless steel* dengan diameter dalam 2,5 mm. Dua buah *mesh* yang terbuat dari *stainless steel* masing-masing digunakan sebagai pengumpul droplet dan *flame holder*. Jarak antara *ring extractor* - *mesh collector* dan *mesh collector* - *flame holder mesh* adalah 5 mm and 3 mm. Daerah antara *mesh collector* dan *flame holder mesh* mempunyai fungsi sebagai daerah penguapan droplet dan pencampuran udara – bahan bakar.



Gambar 1. Skema instalasi penelitian (a) dan detail *meso-scale combustor* (b)

Bahan bakar yang digunakan adalah campuran 30% volume ethanol dan 70% volume heptan. Laju aliran bahan bakar divariasikan sebesar 0,5 – 2 mL/jam, disuplai ke *combustor* melalui kapiler dengan menggunakan *syringe pump*. Bahan bakar diatomisasi menjadi butiran droplet yang sangat halus dengan metode *electrospray* seperti diterangkan pada bagian sebelumnya. Kapiler dan *ring extractor* di beri tegangan tinggi menggunakan sebuah sumber tegangan DC, dan *mesh* yang berfungsi sebagai *flame holder* dihubungkan ke *ground*. *Ring extractor* diberi tegangan 1 kV dan tegangan kapiler sedikit divariasikan sekitar 2,6 – 2,9 kV untuk mendapatkan *electrospray* yang beroperasi dengan mode *cone jet*. Udara untuk pembakaran disuplai dari tangki udara,

debitnya diatur menggunakan *flow meter* udara.

Untuk memudahkan pengamatan, karakteristik *electrospray* diselidiki di ruang terbuka. Visualisasi *spray* dilakukan dengan menggunakan berkas laser yang diarahkan tegak lurus ke sumbu *spray* dan sebuah kamera digital digunakan untuk mengambil gambar visualisasi *spray*. Kecepatan dan ukuran droplet diukur menggunakan *phase doppler partikel analyzer* (PDPA). Pengukuran kecepatan dan ukuran droplet dilakukan pada beberapa posisi axial sepanjang garis horizontal. Titik asal untuk koordinat pengukuran adalah ujung kapiler.

Karakteristik pembakaran yang diamati adalah visualisasi nyala api, batas mampu nyala (*flammability limit*) dan temperatur *flame*. Visualisasi nyala api dalam *meso-scale combustor* dilakukan dengan menggunakan kamera digital. Batas mampu nyala ditentukan dengan mengoperasikan *meso-scale combustor* pada kecepatan bahan bakar konstan dan kecepatan udara divariasikan. Pengambilan data dimulai pada kondisi stoikiometri, kemudian kecepatan udara berangsur - angsur dikurangi atau dinaikkan, hingga terjadi *flash back* atau *blow-off*.

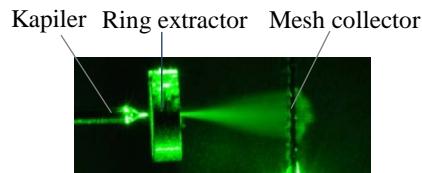
Hasil dan Pembahasan

1. Karakteristik *elektrospray*.

Metode *electrospray* adalah cara atomisasi fluida dengan menggunakan tegangan listrik tinggi. Metode ini hanya dapat digunakan untuk mengatomisasi fluida yang memiliki konduktivitas listrik yang cukup tinggi. Metode ini sesuai untuk penggunaan dalam *micro* atau *meso-scale combustor* karena metode ini dapat mengalirkan sejumlah fluida dengan debit yang sangat kecil, seperti jumlah bahan bakar yang dibakar dalam *micro* dan *meso-scale combustor*. Sehubungan dengan proses pembakaran dalam *micro* dan *meso-scale combustor*, *electrospray* mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan metode atomisasi yang lainnya. Metode ini dapat menghasilkan droplet dengan ukuran yang sangat kecil (beberapa mikron) dengan ukuran yang relatif seragam. Droplet dengan ukuran kecil dan seragam merupakan satu parameter yang penting agar bahan bakar dapat menguap dengan cepat dalam *combustor*. Droplet yang dihasilkan dari proses atomisasi dengan metode *electrospray* mempunyai muatan listrik, menyebabkan terjadinya penyebaran *spray* karena gaya tolak - menolak antara droplet. Hal ini mencegah terjadinya penggabungan droplet.

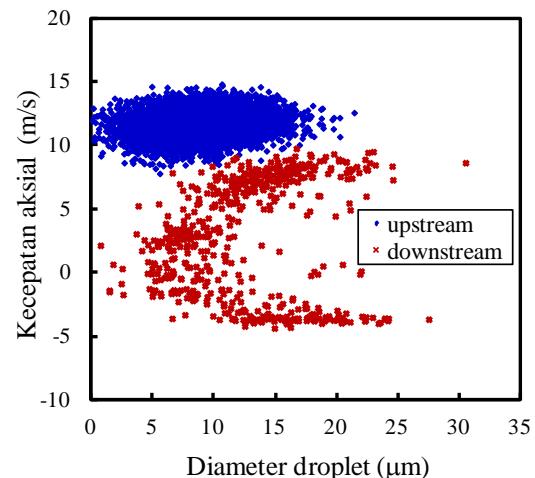
Dalam penelitian ini digunakan campuran etanol dan heptan sebagai bahan bakar, karena etanol mempunyai konduktivitas elektrik yang tinggi tetapi nilai kalornya rendah, sebaliknya heptan mempunyai konduktivitas elektrik yang sangat rendah tetapi nilai kalornya tinggi. Sehingga campuran dari kedua jenis bahan bakar ini mempunyai konduktivitas yang relatif

tinggi dan dapat diatomisasi dengan metode *electrospray*, dengan nilai kalor yang juga relatif tinggi. Gambar 2 menunjukkan visualisasi *electrospray* menggunakan berkas laser dan kamera digital untuk debit bahan bakar 1 mL/jam.



Gambar 2. Visualisasi *spray* disekitar *mesh* yang berfungsi sebagai pengumpul droplet

Gambar di atas menunjukkan *electrospray* yang dioperasikan dalam mode *cone jet*. Dalam mode ini cairan fluida membentuk kerucut (*cone*) pada ujung kapiler, memancarkan jet dari ujung kerucut yang kemudian terpecah menjadi droplet berukuran kecil dan seragam. Droplet yang dihasilkan dari proses ini mempunyai muatan listrik positif. Ukuran droplet, dinyatakan dengan Sauter mean diameter, adalah sebesar 10 μm . Dalam daerah antara *ring extractor* dan *mesh collector*, semua droplet bergerak ke arah *mesh collector*. Kecepatan droplet dalam daerah ini sebesar 11 m/detik. Beberapa droplet menempel pada sisi kiri *mesh collector*, sisanya menembus *mesh collector*. Karena droplet mempunyai muatan positif, droplet yang telah menembus *mesh collector* berbalik arah menuju *mesh collector* yang merupakan *ground elektrode*. Fenomena ini ditunjukkan oleh distribusi kecepatan aksial pada sisi kanan *mesh collector* yang mempunyai kecepatan negatif seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



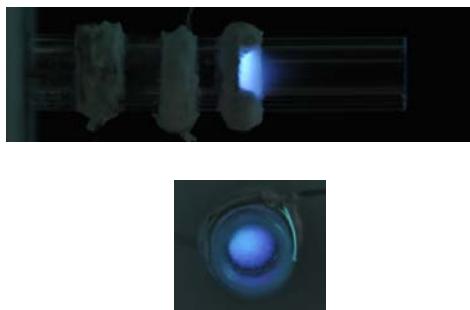
Gambar 3. Distribusi kecepatan aksial droplet pada titik sebelum dan sesudah *mesh collector*.

Ukuran droplet meningkat dengan bertambahnya debit bahan bakar, bervariasi dari 7 – 14 μm untuk debit bahan bakar sebesar 0,5 – 2 mL/jam. Sebaliknya kecepatan droplet hampir sama untuk semua variasi

debit bahan bakar, yaitu sekitar 11 m/detik di daerah antara *ring extractor* dan *mesh collector*, asalkan *electrospray* beroperasi dalam mode *cone jet*. Mode ini merupakan kondisi penting yang diperlukan dalam atomisasi bahan bakar. Karena *electrospray* dengan mode *cone jet* menghasilkan *spray* yang stabil dan berukuran relatif seragam. Mode *cone jet* terbentuk pada debit bahan bakar yang relatif rendah, lebih kecil dari 1,5 mL/jam untuk campuran bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini. Pada debit bahan bakar 1,5 mL/jam atau lebih besar, kerucut dan jet fluida terbentuk secara kontinyu di ujung kapiler, tetapi jet bergerak bolak-balik atau berotasi di sekeliling sumbu kerucut. Bila *electrospray* dioperasikan dalam *combustor*, droplet yang terbentuk akan menabrak dinding *combustor*.

2. Karakteristik pembakaran dalam *meso-scale combustor*.

Nyala api yang stabil terbentuk dalam *meso-scale combustor* di dekat *mesh* yang berfungsi sebagai *flame holder*. Visualisasi nyala api dalam *meso-scale combustor* ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Visualisasi nyala api dalam *meso-scale combustor* pada $Q_f = 1$ mL/jam dan $\phi = 1$.

Nyala api dapat stabil dalam *meso-scale combustor* pada debit bahan bakar $Q_f = 0,7 - 1,5$ mL/jam dengan *equivalence ratio* ϕ sekitar 1, tanpa adanya akumulasi bahan bakar pada dinding *combustor*. Untuk debit bahan bakar 1 mL/jam, nyala api stabil terbentuk pada *downstream flame holder mesh* pada *equivalence ratio* $\phi = 0,86 - 1,66$, bersesuaian dengan kecepatan udara sebesar 26 – 13 cm/s. Api berwarna biru, menunjukkan tidak ada pembentukan jelaga. Penampang api berbentuk simetris, seperti pada *combustor* dengan bahan bakar gas. Bentuk nyala api dalam *meso-scale combustor* mendekati parabolik, hal ini bersesuaian dengan profil kecepatan aliran laminar dalam *meso-scale combustor*. Api pada bagian *upstream* mempunyai warna yang lebih terang dari pada api pada bagian *downstream*, hal ini dikarenakan konsentrasi bahan bakar dan kecepatan pembakaran lebih tinggi pada bagian *upstream*.

Proses pembakaran dimulai dengan menyalaikan pemantik api diujung *combustor*, sementara *combustor*

dipanasi dengan sebuah pemanas yang diletakkan di dekat *mesh collector* dan *flame holder mesh*. Setelah bahan bakar dapat dinyalakan, pembakaran dapat berlangsung secara kontinyu tanpa menggunakan *external heating* (pemanas luar). Pemanasan awal diperlukan untuk menguapkan bahan bakar dan memberikan energi aktivasi untuk proses pembakaran. Tanpa adanya *mesh collector* atau *flame holder mesh*, api tidak dapat distabilkan dalam *meso-scale combustor*, tetapi api hanya dapat distabilkan pada ujung *combustor*.

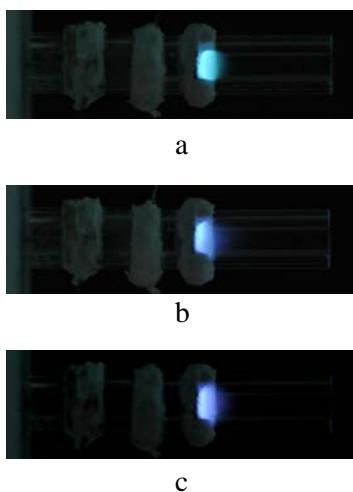
Hal tersebut di atas menunjukkan pentingnya peranan *mesh collector* dan *flame holder mesh* dalam mekanisme stabilisasi api dalam *meso-scale combustor*. Seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya, *electrospray* menghasilkan droplet dengan Sauter mean diameter sebesar 10 μm dan kecepatan aksialnya rata-rata 11 m/detik, sehingga droplet akan sulit untuk menguap secara sempurna dalam waktu yang sangat singkat. Terutama bila diantaranya terdapat beberapa droplet berukuran besar dengan $d_{32} \approx 20$ mm. Selain itu kecepatan bahan bakar jauh lebih tinggi dari pada kecepatan udara, sekitar 0,2 m/s untuk debit bahan bakar 1 mL/jam dan *equivalence ratio* sekitar satu. *Mesh collector* yang dihubungkan ke *ground* akan memperlambat secara elektrik kecepatan aksial droplet, seperti ditunjukkan pada gambar 3, menangkap beberapa droplet pada permukaannya dan menambah waktu tinggal bahan bakar sehingga dapat menguap secara sempurna. Beberapa droplet menembus *mesh collector* dan bergerak kembali ke arah *mesh collector*, kemudian menguap dalam daerah antara *mesh collector* dan *flame holder mesh* atau pada sisi kanan permukaan *mesh collector*.

Sejak api menyala dengan stabil dalam *meso-scale combustor*, *flame holder mesh* dan *mesh collector* dipanasi oleh radiasi panas dan konduksi termal dari nyala api melalui dinding *combustor*. Ini akan memperbaiki penguapan droplet di permukaan *mesh collector* dan pada daerah penguapan droplet seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (daerah antara *mesh collector* dan *flame holder mesh*). Lebih lanjut, terjadi pemanasan awal campuran bahan bakar - udara di daerah ini, kemudian reaktan ini dinyalakan dan dapat distabilkan di dekat *flame holder mesh*. Nyala api dapat distabilkan di dekat *flame holder mesh* selama temperatur nyala api cukup tinggi untuk mempertahankan proses pembakaran.

Peranan *mesh* sebagai *flame holder* dibuktikan oleh fakta – fakta sebagai berikut. Pada *combustor* yang tidak menggunakan *mesh collector* atau *flame holder mesh*, nyala api hanya dapat distabilkan dalam *combustor* dengan menggunakan pemanasan dari luar. Tanpa adanya pemanasan dari luar, nyala api hanya dapat distabilkan di ujung *combustor*.

Gambar 5 menunjukkan visualisasi nyala api pada debit bahan bakar $Q_f = 1$ mL/jam untuk berbagai

equivalence ratio. Ukuran nyala api kecil pada $\phi \approx 1,66$, karena tidak terdapat oksigen yang cukup agar dapat terjadi pembakaran sempurna (Gambar 5a). Penampang nyala api menjadi lebih kecil dan memancarkan warna yang lebih terang. Nyala api mempunyai visualisasi yang serupa untuk pembakaran stoikiometri dan campuran miskin bahan bakar, seperti ditunjukkan pada Gambar 5b dan 5c dengan *equivalence ratio* $\phi = 1$ dan $\phi = 0,8$. Panjang api meningkat dengan berkurangnya *equivalence ratio*. Dalam penelitian ini *equivalence ratio* dikondisikan dengan menambah atau mengurangi debit udara ketika debit bahan bakar dijaga konstan. Pada *equivalence ratio* yang cukup rendah terjadi *blow-off*.

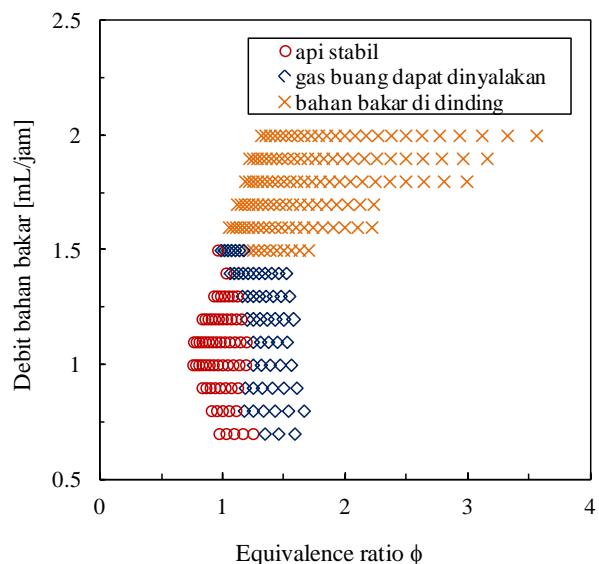


Gambar 5. Visualisasi nyala api dalam *meso-scale combustor* pada $Q_f = 1$ mL/jam dan ϕ yang berbeda.

Batas mampu nyala (*flamability limit*) dan mode pembakaran dalam *meso-scale combustor* ditunjukkan pada Gambar 6. Nyala api dapat distabilkan dalam *combustor* pada debit bahan bakar $Q_f = 0,7 - 1,5$ mL/jam. Pemantik api diletakkan dekat ujung *combustor* untuk mengecek apakah gas buang dapat dinyalakan atau tidak. Pada $\phi = 1$, gas buang tidak dapat dinyalakan, menunjukkan bahwa gas buang hanya mengandung sedikit bahan bakar yang belum terbakar (*unburnt fuel*). Efisiensi pembakaran yang tinggi dapat dicapai dalam kondisi ini. Pengurangan debit udara dengan debit bahan bakar yang konstan, menghasilkan gas buang yang mampu dinyalakan pada ujung *combustor*. Hal ini menunjukkan bahwa campuran kaya bahan bakar tidak dapat terbakar secara sempurna dalam *combustor* karena tidak tersedia cukup udara untuk reaksi pembakaran. Beberapa bahan bakar yang belum terbakar mengalir bersama-sama dengan gas buang dan mampu dinyalakan dengan pemantik api pada ujung *combustor*. Ukuran api pada gas buang semakin meningkat dengan bertambahnya *equivalence ratio* dan debit bahan bakar. Walaupun api dapat distabilkan dalam *combustor*, mode pembakaran ini tidak menguntungkan karena efisiensi pembakarannya

rendah, kehilangan energinya tinggi dan emisi gas buangnya juga tinggi.

Pada debit bahan bakar lebih kecil dari 0,7 mL/jam, api hanya dapat distabilkan pada ujung *combustor*, ketika campuran yang sangat kaya bahan bakar disuplai ke *combustor*. Penurunan *equivalence ratio* mengakibatkan api merambat ke arah *upstream* kemudian mengalami *quenching* (pemadaman) dekat *flame holder mesh*. Pemadaman api pada debit bahan bakar yang rendah dihubungkan dengan fenomena *flash back*. Kecepatan reaktan dan kecepatan pembakaran adalah sangat rendah untuk campuran kaya bahan bakar dengan debit kecil. Kecepatan pembakaran bertambah dengan berkurangnya *equivalence ratio* dan mencapai maksimum di sekitar $\phi \approx 1$. Ketika kecepatan pembakaran lebih tinggi dari pada kecepatan reaktan, api akan merambat dengan cepat ke arah *upstream*, dan kemudian mati di dekat *flame holder mesh*, hal ini disebut *flash back*. Pemadaman api di dekat *mesh* dikarenakan panas yang dibangkitkan dalam proses pembakaran sangat sedikit sehingga temperatur di daerah ini menjadi terlalu rendah untuk mendukung terjadinya pembakaran yang stabil. Pemadaman api juga mungkin disebabkan oleh kehilangan kalor dari api ke dinding *combustor*. Ketika perbandingan antara kehilangan kalor terhadap panas yang dibangkitkan dalam proses pembakaran besar, temperatur api dan kecepatan pembakaran turun dan akhirnya api akan padam.



Gambar 6. *Flammability limit* dan mode pembakaran dalam *meso-scale combustor*

Pada debit bakar yang tinggi, $Q_f = 1,5$ mL/jam atau lebih besar, sebagian droplet menabrak dinding *combustor* dan terakumulasi pada dinding *combustor*. Hal ini karena *electrospray* beroperasi dalam mode *oscillatory* atau *rotating cone jet* dan droplet yang dihasilkan berukuran relatif besar. Dalam mode ini kerucut fluida di ujung kapiler bergerak bolak-balik

atau berputar di sekitar sumbu kerucut, sehingga sebagian droplet menumbuk dinding *combustor* secara langsung. Hal ini mengakibatkan terjadinya akumulasi fluida pada dinding *combustor*. Bila akumulasi fluida terjadi dalam jumlah yang cukup besar, atomisasi dengan metode *electrospray* tidak dapat digunakan. Batas atas untuk debit bahan bakar dimana api stabil dalam *meso-scale combustor* dibatasi oleh stabilitas *electrospray* dan ukuran droplet. Mode *cone jet* yang stabil menguntungkan untuk pencegahan akumulasi bahan bakar pada dinding *combustor* dan ukuran droplet yang kecil diperlukan agar penguapan bahan bakar cair terjadi dalam waktu yang singkat.

Kesimpulan

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui visualisasi api dan *flammability limit* dalam *meso-scale combustor* dengan diameter dalam 3,5 mm. Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pembakaran dengan nyala api biru dalam *meso-scale combustor* terjadi untuk laju aliran bahan bakar sebesar 0,7 – 1,5 mL/jam pada *equivalence ratio* sekitar satu, tanpa ada akumulasi bahan bakar pada dinding *combustor*.
2. Nyala api mempunyai bentuk aksisimetri dengan warna biru dan seragam seperti api pada *combustor* dengan bahan bakar gas.
3. *Mesh* mempunyai peranan yang sangat penting dalam stabilisasi api. *Mesh* mempunyai dua fungsi penting sebagai pengumpul droplet dan pemegang nyala api. Bila tidak menggunakan *mesh*, api tidak bisa distabilisasi dalam *combustor* tanpa menggunakan *external heating*.

Referensi

Bei-Jing, Z., Jian-Hua, W., *Combustion and Flame*, Vol. 157, 2222-2229 (2010).

Benedetto, A.D., Sarli, V.D., Russo, G., *Catalysis Today*, Vol. 147S, S156–S161 (2009).

Chou, S.K., Yang, W.M., Chua, K.J., Li, J., Zhang, K.L., *Applied Energy*, Vol. 88, 1-16 (2011).

Deng, W., Klemic, J.F., Li, X., Reed, M.A., Gomez, A., *Proc. Combustion Institute*, Vol. 31, 2239-2246 (2007).

Fan, Y., Suzuki, Y., Kasagi, N., *Proc. Combustion Institute*, Vol. 32, 3083-3090 (2009).

Fernandez-Pello, A.C., *Proc. Combustion Institute*, Vol. 29, 883-899 (2002).

Kim, N.I., Aizumi, S., Yokomori, T., Kato, S., Fujimori, T., Maruta, K., *Proc. Combustion Institute*, Vol. 31, 3243-3250 (2007).

Kyritsis, D.C., Arias, I.G., Roychoudhury, S., Gomez, A., *Proc. Combustion Institute*, Vol. 29, 965-972 (2002).

Li, J., Chou, S.K., Huang, G., Yang, W.M., Li, Z.W., *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 33, 764-773 (2009).

Li, Z.W., Chou, S.K., Shu, C., Yang, W.M., *Micromechanical Microengineering*, Vol. 15, 207-212 (2005).

Maruta, K., *Proc. Combustion Institute*, Vol. 33, 125-150 (2011).

Sirignano, W.A., Pham, T.K., Dunn-Rankin, D., *Proc. Combustion Institute*, Vol. 29, 25-931 (2002).

Wang, Y., Zhou, Z., Yang, W., Zhou, J., Liu, J., Wang, Z., Cen, K., *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, 1127-1133 (2010).

Yang, W.M., Chou, S.K., Shu, C., Xue, H., Li, Z.W., Li, D.T., Pan, J.F., *Energi Conversion and Management*, Vol. 44, 2625-2634 (2003).

Zhou, J., Wang, Y., Yang, W., Liu, J., Wang, Z., Cen, K., *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, 2373-2378 (2009).