

Karakteristik Pembakaran Heksana dalam *Meso-Scale Combustor* dengan Penguapan *Liquid Film* dan *Convergence-Divergence Mixer*

Muh Asyrofil Anam, Lilis Yuliati, Nurkholis Hamidi

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jl. Mayjend. Haryono no. 167, Malang, 65145, Indonesia

Email : muhasyrofilanam@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik pembakaran heksana dalam *meso-scale combustor* dengan penguapan *liquid film* dan *convergence-divergence mixer*. Karakteristik pembakaran yang diamati adalah *flame stability limit*, visualisasi bentuk nyala api dan temperatur api. *Meso-scale combustor* terbuat dari quartz glass tube dan dilengkapi dengan *liquid vaporizer*, *convergence-divergence mixer*, dan *flame holder* yang terbuat dari tembaga. Bahan bakar yang digunakan adalah heksana. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *flame stability limit* yang terbentuk berada di daerah batas terendah pada rasio ekuivalen 0.63 dan tertinggi pada rasio ekuivalen 1.56. Adapun kecepatan reaktan di dalam *combustor* yang paling rendah mampu dicapai pada nilai 11.37 cm/s dan yang tertinggi dicapai pada nilai 30.14 cm/s dan visualisasi bentuk nyala api menjadi semakin terang dan lebar seiring dengan kenaikan kecepatan reaktan dan semakin terang seiring dengan penurunan rasio ekuivalen temperatur nyala api semakin meningkat.

Kata Kunci : *Meso-scale combustor*, heksana, *liquid film vaporizer*, *convergence-divergence mixer*, karakteristik pembakaran

Pendahuluan

Saat ini banyak dilakukan penelitian mengenai pembangkit energi listrik berskala mikro yang disebut dengan *micro power generator* (MPG) untuk peralatan listrik *portable* yang telah menjadi kebutuhan yang sangat penting di masyarakat. MPG kini menjadi perhatian khusus bagi para ilmuwan yang berfungsi sebagai pengganti baterai yang memiliki beberapa kekurangan seperti mengandung material kimia yang membahayakan jika dibuang ke lingkungan. *Micro power generator* pada dasarnya dibagi menjadi dua jenis, yaitu *micro power generator* yang menggunakan siklus daya konvensional dan *micro power generator* yang menggunakan modul pengkonversi energi termal menjadi energi listrik (*thermo photo voltaic* atau *thermo electric*).

Meso-scale combustor merupakan komponen utama dari MPG yang proses pembakarannya dilakukan di ruang bakar yang memiliki ukuran relatif kecil. Energi termal dari hasil pembakaran tersebut nantinya akan dikonversikan menjadi energi listrik. Kekurangan dari *meso-scale*

combustor tersebut adalah tidak stabilnya api pada saat pembakaran berlangsung. Ketidakstabilan tersebut disebabkan oleh skala pembakaran yang diperkecil, sehingga perbandingan kerugian kalor (*heat loss*) yang terbuang ke sistem sekitar dan lingkungan dengan energi yang dibangkitkan akan meningkat. Di sisi lain, memperkecil dimensi *combustor* dapat mengakibatkan hasil pembakaran yang lebih tidak sempurna sehingga dapat meningkatkan nilai emisi CO (karbon monoksida) pada *exhaust gas* (Katsuyoshi, et al, 2009).

Pada tahun 2014, Artin meneliti pembakaran pada *meso-scale combustor* menggunakan bahan bakar cair heksana (C_6H_{14}) dengan *preheated multiple fuel inlet* sebagai tempat pemanasan dan penguapan bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan pembakaran bahan bakar cair pada *meso-scale combustor* dapat terjadi secara stabil. Bentuk api tampak tidak simetris terhadap

sumbu *combustor* dan nyala api stabil di dalam *combustor* hanya terjadi pada rasio ekuivalen $\Phi > 1$. Hal ini disebabkan oleh distribusi uap heksana di dalam *combustor* tidak merata ke seluruh daerah sehingga proses pembakaran di dalam *combustor* menjadi tidak homogen.

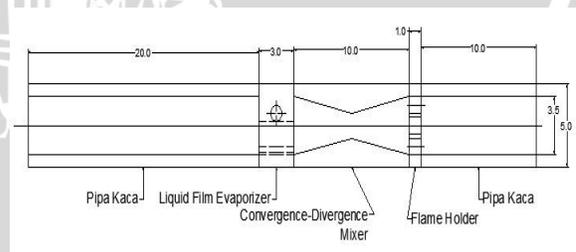
Pada tahun 2015, Febrianto mengembangkan penelitian tersebut dengan melakukan penelitian dengan cara memodifikasi desain saluran yang juga berfungsi sebagai pemanas bahan bakar sebelum memasuki *combustor*. Dalam hal ini, dari yang sebelumnya pada dinding *combustor* hanya terdapat 1 saluran kanal diubah menjadi saluran annular yang mengelilingi dinding *combustor*, selain itu juga diubah arah dari 5 lubang *inlet* yang difungsikan untuk mendistribusikan uap bahan bakar dari yang tadinya searah dengan jari-jari atau radial menjadi tegak lurus dengan jari-jari atau tangensial. Dengan penelitian tersebut didapatkan hasil berupa penggunaan saluran annular dan *inlet* bahan bakar dengan arah tangensial dapat menghasilkan pencampuran bahan bakar dan udara lebih optimal. Hal ini ditunjukkan oleh letak api yang simetris terhadap sumbu *combustor* dan api dapat distabilkan di dalam *combustor* pada rasio ekuivalen $\Phi < 1$ hingga $\Phi > 1$. Tetapi distribusi warna apipada penampang *combustor* masih belum merata. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pencampuran udara – bahan bakar belum homogen sepenuhnya. Selain itu *combustor* mempunyai konstruksi dan desain yang rumit, dan dinding bagian luar annulus sering retak karena panas dan pemuain.

Dari latar belakang diatas, peneliti mencoba mengembangkan *combustor* dengan desain yang lebih sederhana, tetapi dapat menghasilkan pencampuran udara – uap bahan bakar yang homogeny, serta

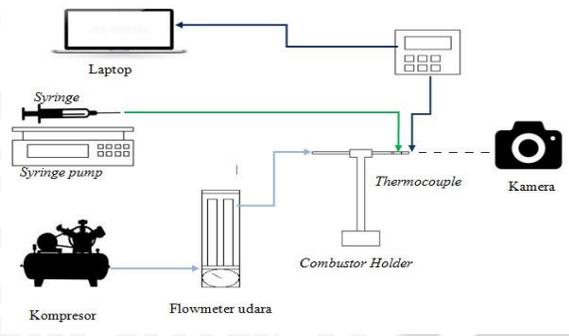
dindingnya tidak mudah retak. Dalam hal ini diamati karakteristik pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan *liquid film vaporizer* berupa saluran sempit yang dihubungkan dengan *convergence-divergence mixer* dan *flame holder*. Diharapkan dengan penggunaan *liquid film vaporizer* dan *convergence-divergence mixer*, bahan bakar cair didalam saluran dapat menguap dan bercampur secara homogen dengan udara sehingga menyebabkan proses pembakaran di dalam *combustor* menjadi homogen dan dapat disejajarkan dengan pembakaran menggunakan bahan bakar gas.

Metode Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah debit bahan bakar (Q_f), dan debit udara (Q_a). Variabel terikatnya adalah batas stabilitas nyala api (*flame stability limit*) di dalam *combustor*, visualisasi bentuk nyala api dan temperatur nyala api. Kemudian variabel terkontrolnya adalah material dari *meso-scale combustor* yaitu tembaga dan *quart glass tube*. Detail *combustor* dapat dilihat pada Gambar 1 dan skema instalasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. *Meso-scale combustor*



Gambar 2. Skema Instalasi penelitian

Gambar 2 menunjukkan instalasi peralatan yang digunakan untuk penelitian ini. Bahan bakar *meso-scale combustor* yaitu heksana dialirkan ke *combustor* dengan menggunakan *syringe pump*, *Syringe pump* dapat diatur debit bahan bakar yang masuk ke *combustor* hingga ketelitian 0,01 ml/hr. Sedangkan udara sebagai oksidator disuplai ke *combustor* dari tangki kompresor, debit udara diatur menggunakan *flowmeter* udara. Pengambilan data dilakukan untuk mengetahui nilai minimum dan maksimum debit bahan bakar udara dimana api menyala dengan stabil di dalam *combustor*. Untuk setiap debit bahan bakar, debit udara divariasikan dari nilai minimum hingga maksimum dimana nyala api di dalam *combustor*.

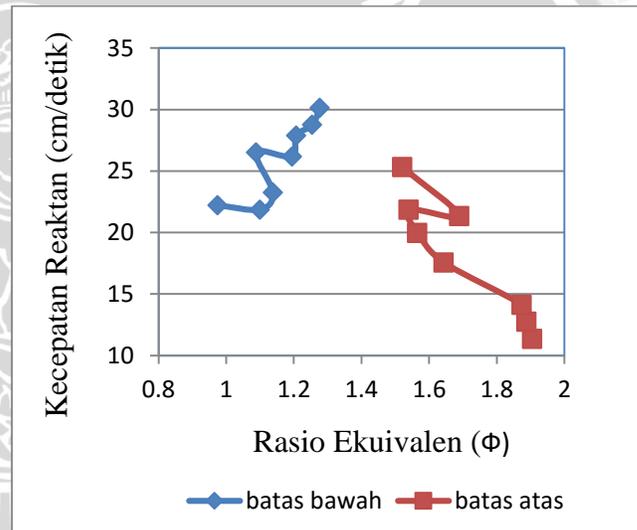
Kamera pada instalasi tersebut berfungsi untuk mengambil gambar visualisasi nyala api. Kamera diletakkan 10 cm di depan mulut dan disamping *combustor*. Pengambilan data visualisasi dan temperatur nyala api dilakukan pada kecepatan reaktan tertentu dengan variasi rasio ekuivalen dan pada rasio ekuivalen tertentu dengan kecepatan reaktan berubah. Untuk mengambil data besar nilai temperatur nyala api menggunakan rangkaian *thermocouple* yang terdiri dari *thermocouple* tipe K, *data logger* dan laptop. *Data logger* berfungsi untuk mengolah data mentah besar temperatur yang terbaca oleh *thermocouple* sehingga

dapat ditampilkan dalam bentuk digital. Pengambilan data temperatur dilakukan pada titik tertentu pada api dimana terjadi temperatur maksimum

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. *Flame Stability Limit*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembakaran dengan nyala api stabil dapat diperoleh di dalam *combustor* dengan *liquid film vaporizer* dan *convergence-divergence mixer*. Gambar berikut menunjukkan daerah kestabilan api di dalam *meso-scale combustor*



Gambar 3. Grafik *flame stability limit* pada *meso-scale combustor* dengan *liquid film vaporizer* dan *convergence-divergence mixer*.

Gambar 3 menunjukkan grafik *flame stability limit* untuk pembakaran heksana pada *meso-scale combustor* dengan *liquid film vaporizer* dan *convergence-divergence mixer*. *Flame stability limit* menunjukkan daerah dimana terjadi pembakaran dengan nyala api di dalam *combustor*. Mekanisme stabilitas nyala api dapat dijelaskan sebagai berikut. Bahan bakar cair, dalam hal ini

heksana, dialirkan ke celah sempit pada *vaporizer*. Pada saat mengalir di *vaporizer*, bahan bakar menguap karena adanya pemanasan reaktan yang berasal dari resirkulasi panas dari nyala api melalui konduksi pada dinding *combustor*. Pada saat penyalaan awal, pemanasan reaktan diperoleh dari *external heater*. Uap bahan bakar mengalir bersama aliran udara dari arah *upstream* melalui *vaporizer* menuju ke saluran konvergen-divergen. Campuran uap bahan bakar udara dialirkan melalui saluran konvergen-divergen untuk meningkatkan proses pencampuran dan homogenitas campuran. Selanjutnya reaktan mengalir melalui *perforated plate flame holder* dan menyala pada *downstream flame holder*.

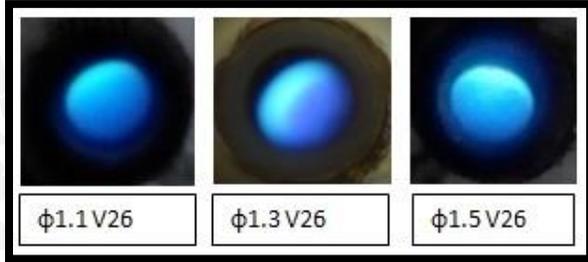
Pembakaran dapat stabil di dalam *meso-scale combustor* pada kecepatan reaktan maksimum 30.14 cm/s dengan rasio ekuivalen 1,27. Apabila kecepatan reaktan ditambah dengan meningkatkan debit udara, maka api bergerak ke arah mulut *combustor*. Ada dua kemungkinan yang mungkin terjadi dimana kemungkinan pertama adalah api bergerak keluar dan menempel di mulut *combustor*. Kemungkinan kedua terjadi jika kecepatan reaktan ditambah secara signifikan, maka api akan meninggalkan mulut *combustor* dan kemudian mati (*blow off*). Hal tersebut terjadi karena kecepatan perambatan api (*flame propagation speed*) lebih kecil daripada kecepatan reaktan. selanjutnya diketahui bahwa pembakaran stabil pada kecepatan reaktan minimum 11,37 cm/s dengan rasio ekuivalen 1,9. Jika kecepatan reaktan dikurangi secara signifikan maka mengalami *flash back*, kemudian api akan mati di dekat *perforated plate* yang berfungsi sebagai *flame holder*. *Flash back* disebabkan oleh kecepatan perambatan api (*flame propagation speed*) lebih besar dari pada kecepatan reaktan. Padamnya api di dekat *flame holder* disebabkan oleh besarnya *heat loss*,

sehingga temperatur api dan kecepatan pembakaran turun, kemudian api padam.

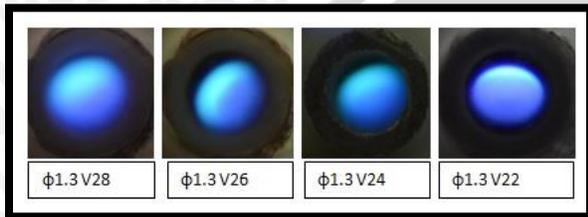
Api stabil di dalam *combustor* pada rasio ekuivalen 0,97 – 1,9. Hal ini menunjukkan bahwa pencampuran udara-uap bahan bakar sudah cukup baik. Dalam penelitian ini pencampuran bahan bakar dimaksimalkan dengan mengubah desain saluran yang dilakukan dengan maksud agar campuran udara dan bahan bakar lebih homogen. Udara dan bahan bakar masuk ke dalam *combustor* melewati *liquid film vaporizer* dan *convergence-divergence mixer*, dimana bagian ini mempunyai temperature yang tinggi karena adanya panas resirkulasi (*heat recirculation*) dari nyala api ke reaktan melalui konduksi pada dinding *combustor*. Sehingga bahan bakar cair segera berubah fase menjadi uap pada *vaporizer* dan kemudian bercampur dengan udara. Selain itu, *heat recirculation* dapat membantu pemanasan awal bahan bakar untuk mencapai temperatur nyala api sehingga tidak terlalu membutuhkan banyak energi aktivasi untuk menyalakan api. Pencampuran udara dan bahan bakar yang cukup baik digambarkan oleh visualisasi nyala api yang akan dijelaskan pada sub bab selanjutnya. Penambahan *liquid film vaporizer* dan *convergence-divergence mixer* memaksimalkan pencampuran bahan bakar dan udara di dalam *combustor* sehingga secara umum pencampuran menjadi semakin merata. Untuk memperluas daerah *flame stability* dapat dilakukan dengan memperbaiki desain *combustor* untuk meningkatkan pencampuran dan homogenitas reaktan, meminimalkan *heat loss* dan meningkatkan resirkulasi panas.

B. Visualisasi Nyala Api

Gambar 4 dan 5 menunjukkan visualisasi nyala api di dalam *meso-scale combustor* dengan variasi rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan.



Gambar 4. Visualisasi bentuk nyala api dengan variasi rasio ekuivalen



Gambar 5. Visualisasi bentuk nyala api dengan variasi kecepatan reaktan.

Secara umum dapat dilihat bahwa api mempunyai bentuk oval mendekati lingkaran, dan warna api kurang seragam. Terdapat jarak antara api dan dinding *combustor*, dan jarak terbesar terjadi pada bagian atas api. Hal ini disebabkan oleh distribusi bahan bakar yang belum merata di dalam ruang bakar. Dari visualisasi nyala api, dapat dikatakan bahwa *combustor* mempunyai pencampuran udara-bahan bakar yang cukup baik, tetapi masih perlu dioptimalkan lagi.

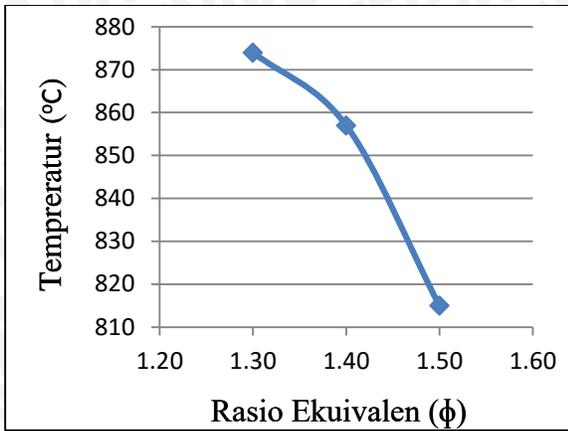
Pada Gambar 4 dapat dilihat semakin tinggi rasio ekuivalen maka luas penampang api semakin kecil dan warna putih pada api semakin dominan. Luas penampang api semakin kecil berarti jarak antara dinding dan api semakin besar. Jarak antara api dan dinding terjadi karena pada daerah dekat dinding *combustor* terjadi *heat loss* dari api ke dinding sehingga temperatur api menjadi rendah dan pada bagian ini api akhirnya padam. Sedangkan warna keputihan pada api disebabkan karena semakin tinggi rasio ekuivalen kandungan bahan bakar yang terdapat di dalam *combustor* akan semakin banyak. Tingginya kandungan bahan bakar

di dalam *combustor* mengakibatkan adanya bahan bakar yang tidak bereaksi dengan udara memenuhi ruang *combustor*. Berbeda halnya dengan rasio ekuivalen yang nilainya semakin rendah, mendekati stoikiometri, menghasilkan pembakaran dengan warna api yang lebih gelap. Kandungan bahan bakar dalam reaktan yang mendekati kondisi stoikiometri mengakibatkan hamper semua bahan bakar dapat bereaksi dengan udara. Hal itu berdampak pada warna api yaitu berwarna biru gelap.

Sedangkan pada gambar 5, dapat dilihat dengan meningkatnya kecepatan reaktan pada rasio ekuivalen yang konstan maka luas penampang api akan semakin besar dan warnanya semakin terang. Hal ini karena meningkatnya kecepatan reaktan mengakibatkan jumlah udara dan bahan bakar di dalam *combustor* semakin banyak. Sehingga proses pembakarannya menghasilkan energy yang lebih besar. Dalam hal ini jumlah energi yang dibangkitkan tiap satuan volume bertambah dan temperatur api menjadi lebih tinggi. Hal inilah yang menyebabkan api menjadi semakin terang.

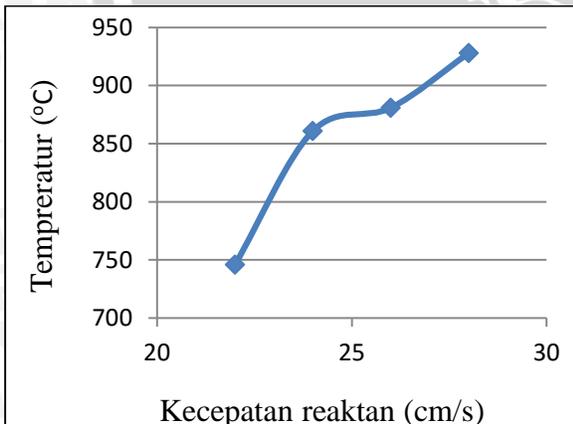
C. Temperatur Nyala Api

Pengambilan data temperatur nyala api dilakukan dengan parameter rasio ekuivalen konstan dengan variasi kecepatan reaktan dan kecepatan reaktan konstan dengan variasi rasio ekuivalen.



Gambar 6. Grafik nilai temperatur pada kecepatan reaktan konstan dan variasi rasio ekuivalen

Gambar 6 menunjukkan grafik hubungan antara temperatur dan rasio ekuivalen dengan variasi kecepatan reaktan. Terlihat bahwa pada rasio ekuivalen 1.3 sampai dengan 1.5 nilai temperatur semakin menurun. Pada kondisi ini reaktan berada pada campuran bahan bakar yang berlebih dan kondisi tersebut dapat menurunkan nilai temperatur api yang lebih rendah daripada rasio ekuivalen sebelumnya.



Gambar 7. Grafik nilai temperatur pada rasio ekuivalen konstan dan variasi kecepatan reaktan

Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan antara rasio ekuivalen konstan dan temperatur dengan variasi kecepatan reaktan. Semakin meningkat kecepatan reaktan maka temperatur api akan semakin

meningkat juga. Hal ini disebabkan oleh jumlah reaktan yang terdiri dari udara dan bahan bakar yang terdapat di dalam *combustor* akan semakin banyak yang berdampak pada kalor yang dilepas dari hasil pembakaran juga semakin banyak. Sehingga temperatur api semakin tinggi.

Dari seluruh data, nilai temperatur maksimal berada pada 928 °C pada kecepatan reaktan 28 cm/s dan rasio ekuivalen 1,3. Nilai tersebut ternyata masih berada dibawah temperatur api hasil pembakaran heksana pada kondisi adiabatik yaitu mencapai 2221 °C pada rasio ekuivalen 1 (*Enginnering Toolbox*, 2015). Rendahnya nilai temperatur dapat disebabkan karena adanya *heat loss* yang terjadi pada dinding *combustor* yang terbuat dari tembaga yang memiliki nilai konduktivitas termal yang cukup tinggi. Panas hasil pembakaran sebagian diserap oleh dinding *combustor* yang kemudian digunakan sebagai *heat recirculation* yang digunakan untuk mengubah fase bahan bakar cair menjadi uap.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapat dari penelitian karakteristik pembakaran bahan bakar cair (heksana) di dalam *meso-scale combustor* dengan penggunaan *liquid film vaporizer* dan *convergence-divergence mixer* adalah sebagai berikut :

1. Nyala api dapat distabilkan di dalam *meso-scale combustor* dengan *liquid film vaporizer* dan *convergence-divergence mixer*.
2. Hasil visualisasi bentuk nyala api menjadi semakin terang dan lebar seiring dengan kenaikan kecepatan reaktan, sebaliknya luas penampang api semakin kecil seiring dengan kenaikan rasio ekuivalen
3. Temperatur api tertinggi berada pada nilai rasio ekuivalen 1.3 dan semakin

meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan reaktan

DAFTAR PUSTAKA

[1]Katsyoshi T., Soichiro K., Taku, M. & Toshiyuki, S. 2009. Development of the “*Micro Combustor*”

[2]Maruta, K. 2010. *Micro and Meso-scale Combustor. Proceedings of The Combustion Institute Volume 33 Issue 1 Page 125-150.*

[3]Pello, C.F. 2002. *Micropower Generation Using Combustion: Issues and Approaches Proceedings of The Combustion Institute Volume 29 Issues 1 Page 883-899.* Barkeley: University of California..

[4]Yuliati, L. Seo, T. & Mikami, M. 2011. *Liquid-Fuel Combustion in a Narrow Tube Using an Electrospray Technique*

[5]Wardana, I.N.G. 2008. *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran.* PT. Danar Wijaya. Malang: Brawijaya University Press.

[6]Artin, R., Wardana, I.N.G., Yuliati, L. 2014. *Karakteristik Pembakaran Heksana pada Mesoscale Combustor dengan Preheated Multiple Fuel Inlet.*

[7]Febrianto, W., Yuliati, L., Hamidi, N. 2015. *Karakteristik Pembakaran Heksana pada Mesoscale Combustor dengan Preheated Multiple Tangential Fuel Inlet.*

[8]Browne. 2011. *Liquid Film Coating: Scientific principles and their technological implication.*

[9] EngineeringToolbox 2015