

ANALISIS OUTPUT ENERGI PEMBAKARAN CAMPURAN PREMIXED BUTANA-UDARA PADA MESO SCALE COMBUSTOR DENGAN SUDDEN EXPANSION DAN PLATE HOLDER SEBAGAI FLAME HOLDER

Andi Sanata¹, Gaguk Jatisukamto¹, Hafidh Risvie Ardhian^{2*}

¹Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember, Jalan Kalimantan 37, Jember, 69121

²Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember, Jalan Kalimantan 37, Jember, 68121

Email: *hafidhrisvieardhian@gmail.com

ABSTRAK

Pembakaran skala meso merupakan salah satu bentuk pengembangan teknologi yang menggunakan bahan bakar fosil sebagai sumber energinya. Pembakaran ini berpotensi menghasilkan energi panas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik skala mikro atau disebut Micro Power Generator (MPG). Penelitian dilakukan dengan mengamati pengaruh variasi diameter outlet ruang bakar dengan penambahan pemuaian mendadak dan pelat sebagai penahan api pada ruang bakar skala meso terhadap jumlah energi panas yang dihasilkan secara eksperimen. Penelitian ini dilakukan pada dua variasi diameter outlet yaitu 8 mm, 10 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi rasio ekivalen (Φ) = 1, ruang bakar dengan diameter outlet 10 mm menghasilkan total keluaran energi dan efisiensi tertinggi masing-masing sebesar 325,46 Watt dan 9,77%.

Keywords: Pembakar skala meso, penahan api, pelat, pemuaian mendadak.

PENDAHULUAN

Penduduk yang terus bertambah dan meningkatnya laju pembangunan serta pola hidup masyarakat yang juga mengalami peningkatan mengakibatkan konsumsi energi di Indonesia terus meningkat dari tahun ke tahun, dengan demikian sumber daya alam yang mampu menghasilkan energi semakin terkuras, karena sebagian besar sumber energi berasal dari sumber daya yang tidak terbarukan, misalnya minyak bumi, gas dan batubara. Masalah tersebut akhirnya memacu para ilmuwan untuk terus melakukan riset penelitian dan pengembangan yang berkaitan dengan pembakaran. Salah satu bentuk pengembangannya dengan melakukan pengurangan dimensi pada pengaturan pembakaran serta mengubah menjadi sumber energi terdahulu menjadi gas [1].

Meso-scale combustor atau pembakaran pada saluran ruang bakar dengan diameter sebesar 1-10 mm merupakan salah satu wujud pengembangan teknologi pemanfaatan bahan bakar fosil. Desain, dimensi dan jenis material *combustor* tentunya berpengaruh terhadap energi panas hasil proses pembakaran.

Penambahan saluran *sudden expansion* pada *combustor* dapat membantu pencampuran antara bahan bakar dan udara sebelum terjadi proses pembakaran, selain itu juga berguna untuk mengatur posisi nyala api [2].

Panjang saluran *sudden expansion/backward facing step* dapat mempengaruhi pembakaran pada *meso scale combustor*. Hasil penelitian tersebut yakni nyala api semakin meningkat seiring bertambahnya panjang ruang bakar pada *sudden expansion* [3]. Ukuran diameter outlet dengan *sudden expansion* pada *combustor* berpengaruh terhadap distribusi temperatur yang dihasilkan [4].

Pengaruh diameter *combustor* yang divariasikan dengan bentuk silinder terhadap kestabilan api dan kecepatan pembakaran menyatakan bahwa kestabilan api semakin kecil berbanding lurus dengan ukuran D_{out} *combustor*. Keadaan ini karena laju kehilangan panasnya (*heat loss*) lebih tinggi sedangkan waktu nyala api yang sangat singkat akibat dari peningkatan volume dengan bertambahnya perbandingan luas permukaan.

Pengaruh *backward facing step/sudden expansion* terhadap stabilitas pembakaran pada area kontak silinder *meso scale combustor*. Oksidator dan bahan bakar yang digunakan adalah udara dan butana (C_4H_{10}). Material yang digunakan pada *inlet meso scale combustor* berbahan dasar tembaga, sedangkan material pada *outlet combustor* menggunakan *quartz glass*. Penggunaan *quartz glass* bertujuan untuk memudahkan pengamatan terkait visualisasi nyala api dan posisi nyala api [5].

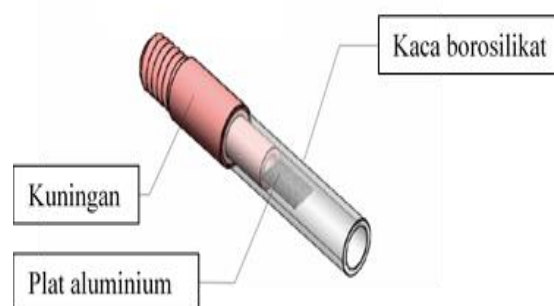
Pengaruh perbedaan D_{out} pada dua *meso scale combustor* ($D_{out} = 2$ mm dan $D_{out} = 3$ mm) terhadap temperatur dinding. Hasilnya menunjukkan bahwa *meso scale combustor* $D_{out} = 2$ mm menghasilkan suhu yang lebih tinggi pada dinding combustor $D_{out} = 2$ mm dibandingkan dengan suhu dinding pada *meso scale combustor* $D_{out} = 3$ mm [6].

Merujuk dari penelitian sebelumnya, pada tugas akhir ini dilakukan penelitian terhadap jumlah energi panas pada pembakaran skala *meso* dengan tambahan *sudden expansion* dan *plate* sebagai *flame holder*. Pengujian pada skripsi ini diuji dengan cara memberikan variasi diameter *outlet* yang digunakan pada saluran ruang bakar.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu metode yang dilakukan dengan mengamati pengaruh variasi diameter *outlet combustor* dengan penambahan *sudden expansion* dan *plate flame holder* pada *meso scale combustor* terhadap jumlah energi panas yang dihasilkan secara eksperimental, sedangkan metode pengolahan data yang digunakan pada penelitian ini ialah dengan menghitung menggunakan rumus, dimana dilakukan pengambilan data dalam bentuk suhu terlebih dahulu dengan cara menggunakan kawat *thermocouple* dan *data logger* sebelum dilakukan penyajian data. Selanjutnya dilakukan penghitungan energi *output total* dan efisiensi pembakaran pada masing-masing *meso scale combustor*.

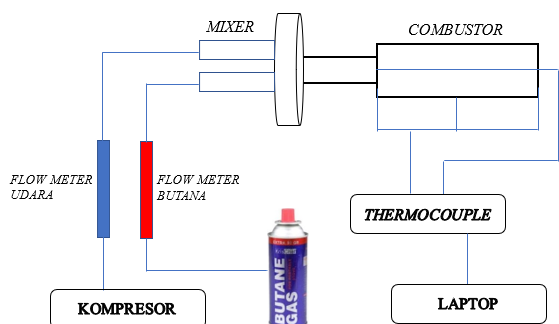
Combustor yang digunakan ini terdiri dari empat komponen yaitu komponen masukan (*input*) yang terbuat dari kuningan, dinding pipa *combustor*, plat aluminium dan keluaran (*output*) yang berbahan kaca borosilikat. Sketsa dimensi *meso scale combustor* dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. *Meso-scale combustor*

Bahan bakar yang digunakan ialah gas butana dengan udara sebagai oksidator yang disuplai kompresor dengan tekanan tetap, yakni 1 atm. Bahan bakar dan udara disalurkan menuju *flow meter* dengan jenis yang berbeda, yaitu *flow meter* bahan bakar dan *flow meter* udara. *Flow meter* difungsikan sebagai media pengatur debit dari aliran bahan bakar dan udara, dimana nilai debit tersebut dapat diubah-ubah dengan kisaran tertentu sesuai dengan spesifikasi *flow meter* dari *flow meter* bahan bakar dan udara yang sudah diatur nilai debitnya, disalurkan menuju *mixer* agar terjadi pencampuran homogen antara bahan bakar dan udara.

Selanjutnya campuran bahan bakar dan udara dialirkan menuju *combustor* skala *meso* sebagai bahan dasar dalam reaksi pembakaran di dalam *combustor*. Hasil data suhu dari proses pembakaran dicatat menggunakan *data logger* yang sudah dipasang kawat *thermocouple*. Data yang diambil berupa suhu dinding dan suhu nyala api. Skema peralatan dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Skema alat penelitian

METODE PENGAMBILAN DATA

Pengujian dilakukan dengan cara memvariasikan nilai debit bahan bakar dan debit udara dimana api dapat menyala dengan stabil pada beberapa variasi *meso-scale combustor* dengan *flame holder sudden expansion* dan plat aluminium. metode yang dilakukan dengan mengamati pengaruh variasi diameter *outlet combustor* dengan penambahan *sudden expansion* dan *plate flame holder* pada *meso scale combustor* terhadap jumlah energi panas yang dihasilkan secara eksperimental, sedangkan metode pengolahan data yang digunakan pada penelitian ini ialah dengan menghitung menggunakan rumus dimana dilakukan pengambilan data dalam bentuk suhu terlebih dahulu dengan cara menggunakan kawat *thermocouple* dan *data logger* sebelum dilakukan penyajian data. Selanjutnya dilakukan penghitungan energi *output* total dan efisiensi pembakaran pada masing-masing *meso scale combustor*.

Setelah dilakukan pengujian *output* energi hasil dari pembakaran *meso scale combustor*, didapatkan data berupa debit *flow meter* (Q_f), dan debit udara (Q_a), yang didapatkan dari penghitungan rasio ekuivalen (ϕ) = 1 dan dapat pula ditentukan kecepatan reaktan ($v_{reaktan}$). Data yang sudah didapat dapat ditampilkan seperti pada tabel berikut.

Tabel 1. Data nyala api debit bahan bakar (Q_f) 11,87 ml/min – 567,07 ml/min dengan $\Phi = 1$.

Combustor	Q_f (ml/min)	Q_a (ml/min)	Φ	v (cm/s)
$\varnothing_{out} = 8$ mm	11,87	185,44	1,00	12,59
	12,40	202,53	1,00	13,18

	12,93	219,61	1,00	13,76
	13,46	236,70	1,00	15,33
	13,99	316,45	1,00	15,91
	14,52	333,53	1,00	16,50
	15,05	350,62	1,00	17,08
	15,58	367,71	1,00	17,66
	16,11	384,80	1,00	18,25
	16,64	401,89	1,00	18,83
	17,17	447,45	1,00	19,42
$\varnothing_{out} = 10$ mm	11,87	367,71	1,00	8,06
	12,40	384,80	1,00	8,43
	12,93	401,89	1,00	8,81
	13,46	447,45	1,00	9,81
	13,99	464,54	1,00	10,18
	14,52	481,63	1,00	10,56
	15,05	498,72	1,00	10,93
	15,58	515,81	1,00	11,31
	16,11	532,89	1,00	11,68
	16,64	549,98	1,00	12,05
	17,17	567,07	1,00	12,43

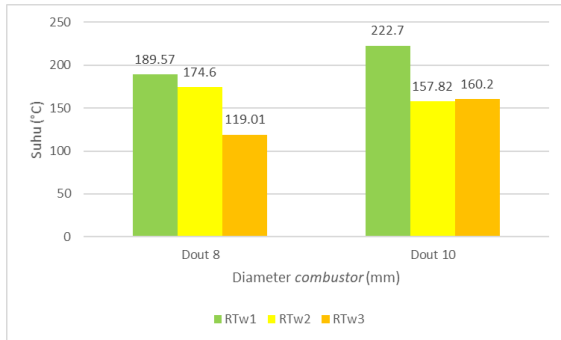
Langkah selanjutnya adalah dengan membuat grafik perbandingan seluruh suhu *output* pada setiap ukuran diameter *outlet meso scale combustor* agar dapat memahami lebih mudah dalam menggambarkan suhu *output* yang terjadi di dalam *meso scale combustor*. Visualisasi grafik distribusi suhu *output* pada penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu distribusi rata-rata suhu pada suhu dinding (RT_w) dan suhu maksimal api (T_i).

1. Suhu Dinding dan Nyala Api pada Masing-masing *Combustor*

Data yang tersaji pada Tabel 1 kemudian diolah menjadi grafik yang menampilkan hubungan antara nilai rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan. Tabel tersebutlah yang menjadi dasar analisa penghitungan energi *output* di dalam *combustor* dengan *sudden expansion* dan *plate aluminium* sebagai *flame holder*.

Tabel 2. Data hasil pengukuran rata-rata suhu dinding

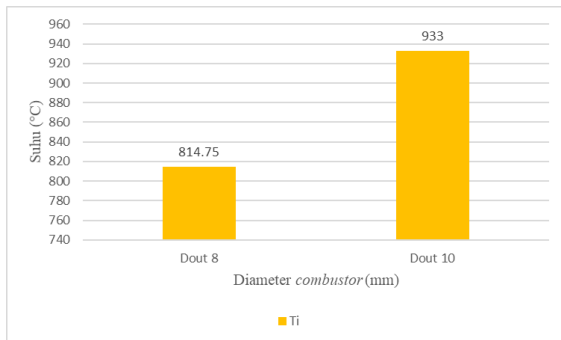
D_{out} Meso Scale	RT_w (°C)			
Combustor (mm)	RT_{w1}	RT_{w2}	RT_{w3}	RT_{w123} (°C)
8	189,57	174,60	119,01	161,06
10	222,70	157,82	160,20	180,24



Gambar 3. Suhu nyala api setiap combustor

Tabel 3. Data hasil pengukuran rata-rata suhu nyala api

D_{out} Meso Scale Combustor (mm)	T_i (°C)	Rata-rata (°C)
8	814,75	607,20
10	933,00	749,75



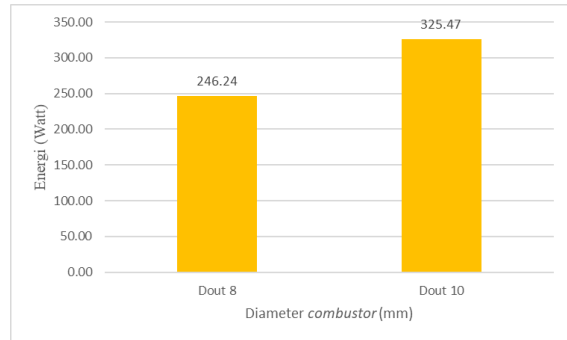
Gambar 4. Suhu nyala api masing-masing combustor

2. Energi Output dan Efisiensi pada Masing-masing Combustor

Setelah dilakukan pengambilan data suhu pada dinding dan nyala api dimana data tersebut beracuan pada Tabel 1 sebelumnya. Kemudian dilakukan pengolahan data menggunakan software Microsoft Excel sehingga didapatkan data seperti yang ditampilkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Tabel 4. Energi output total meso scale combustor

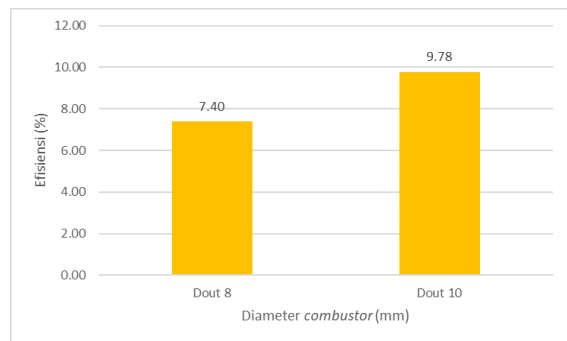
D_{out} Meso Scale Combustor (mm)	Energi Output (Watt)	\dot{Q}_{13} (Watt)	Energi Output Total (Watt)
8	219,13	27,10	246,24
10	293,36	32,52	325,46



Gambar 5. Energi output total terhadap masing-masing variasi D_{out}

Tabel 5. Efisiensi pembakaran pada meso scale combustor

D_{out} Meso Scale Combustor (mm)	Energi Output Total (Watt)	Efisiensi Pembakaran (%)
8	246,24	7,39
10	325,46	9,77



Gambar 6. Efisiensi pembakaran terhadap masing-masing variasi D_{out}

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Suhu Dinding dan Nyala Api

Tabel 2 menampilkan hasil pengujian suhu pada dinding (T_w) kedua meso scale combustor dan pada Gambar 3 ditampilkan perbandingan rata-rata T_w terhadap kedua meso scale combustor, dapat dilihat bahwa suhu pada dinding meso scale combustor $D_{out} = 10$ mm lebih besar.

Berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat bahwa suhu titik puncak untuk suhu api berbeda-beda tiap meso scale combustor dengan plate. Semakin besar diameter outlet meso scale combustor, semakin tinggi pula puncak apinya (T_i). $D_{out} = 8$ mm, suhu ruang bakar tertinggi yang tercatat adalah sebesar 814,75 °C. $D_{out} = 10$ mm, suhu api yang tertinggi adalah sebesar 933,00 °C.

Suhu api rata-rata kedua *meso scale combustor* berdasarkan Gambar 4.5, rata-rata T_i tertinggi dihasilkan oleh *meso scale combustor* dengan $D_{out} = 10$ mm yaitu sebesar $749,75$ °C, adapun untuk rata-rata T_i terendah dihasilkan oleh *meso scale combustor* dengan $D_{out} = 8$ mm.

2. Energi Output dan Efisiensi pada Masing-masing Combustor

Data yang sudah diperoleh berupa suhu dinding dan suhu api diolah terlebih dulu dengan melakukan penghitungan beban hambatan termal pada *meso scale combustor*, selanjutnya, dilakukan penghitungan energi pada suhu dinding dan suhu nyala api untuk memperoleh nilai energi output total dan efisiensi pada masing-masing *meso scale combustor*.

Masing-masing *meso scale combustor* mempunyai dua jenis hambatan termal, yaitu hambatan termal konduksi dinding *meso scale combustor* dan hambatan termal konveksi dinding *meso scale combustor* ke lingkungan, kemudian hasil dari penghitungan tersebut dijumlahkan sehingga didapatkan nilai hambatan termal total dari setiap *meso scale combustor*. Hasil penghitungan hambatan termal pada *meso scale combustor* ditunjukkan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Beban hambatan termal *meso scale combustor*

Diameter Meso Combustor (mm)	Hambatan Termal (°K/W)
8	4,82
10	4,00

Penghitungan energi input didapat dari penghitungan besar energi reaksi pembakaran secara stoikiometri gas butana. Hasil dari penghitungan secara stoikiometri gas butana secara stoikiometri sebesar 3.328 Kj/mol. Reaksi eksoterm menggunakan pemakaian notasi (-) sebagai pembeda, sehingga hasilnya adalah -3.328 Kj/mol.

Energi pembakaran pada *meso scale combustor* didapat melalui penghitungan data temperatur nyala api dan data temperatur lingkungan terhadap hambatan

termal total. Satuan yang digunakan untuk hasil energi output yaitu Watt (W). Data hasil penghitungan *meso scale combustor* disajikan pada Tabel 7 di bawah.

Tabel 7. Energi output *meso scale combustor*

NO	D_{out} Meso Scale Combustor (mm)	Energi Output Pembakaran (Watt)
1	8	219,13
2	10	293,36

Perpindahan panas konduksi terjadi pada dinding *meso scale combustor*, sehingga, penghitungan panas konduksi digunakan untuk menghitung jumlah energi panas dinding luar *meso scale combustor*. Penghitungan dilakukan di dinding *meso scale combustor* pada titik dinding 1 (T_{w1}), titik dinding 2 (T_{w2}), dan titik dinding 3 (T_{w3}). Selanjutnya, hasil perhitungan daerah titik dinding 1 dan titik dinding 2 serta titik dinding 2 dan titik dinding 3 ini dijumlahkan untuk mendapatkan energi panas total keseluruhan pada dinding *meso scale combustor* yang direpresentasikan dengan \bar{Q}_{13} . Hasil penghitungan energi kalor dinding *meso scale combustor* ditampilkan pada Tabel 8 di bawah.

Tabel 8. Energi output dinding luar *meso scale combustor*

D_{out} Meso Scale Combustor (mm)	\bar{Q}_{12} (Watt)	\bar{Q}_{23} (Watt)	\bar{Q}_{13} (Watt)
8	12,65	14,44	27,10
10	15,19	17,33	32,52

Penghitungan energi output total *meso scale combustor* didapat dengan cara melakukan penjumlahan hasil penghitungan energi output dan energi pada dinding (\bar{Q}_{13}) *meso scale combustor*. Tabel 9 di bawah ini menampilkan hasil penghitungan energi output total pada kedua *meso scale combustor*.

Tabel 9. Energi output total *meso scale combustor*

D_{out} Meso Scale Combustor (mm)	Energi Output (Watt)	\bar{Q}_{13} (Watt)	Energi Output Total (Watt)
8	219,13	27,10	246,24
10	293,36	32,52	325,46

Cara untuk memperoleh nilai efisiensi pembakaran dari masing-masing *meso scale combustor* adalah dengan dilakukan penghitungan dengan membandingkan energi *output* yang dihasilkan dengan energi *input*. Tabel 10 dapat dilihat untuk mengetahui hasil penghitungan efisiensi pembakaran.

Tabel 10. Efisiensi pembakaran pada *meso scale combustor*

D_{out} Meso Scale Combustor (mm)	Energi Output Total (Watt)	Efisiensi Pembakaran (%)
8	246,24	7,39
10	325,46	9,77

Langkah selanjutnya dilakukan uji T untuk mengetahui apakah perbedaan rata-rata antara *meso scale combustor* cukup signifikan atau tidak. Penghitungan nilai P dilakukan dengan menggunakan *software* Minitab versi 19 dan diperoleh nilai yaitu P-value sebesar 0,0001 terhadap nilai $\alpha = 0,05$ yang mana P-value memiliki nilai lebih kecil terhadap nilai α yang berarti bahwa perbedaan rata-rata energi *output* total dan efisiensi pada masing-masing *combustor* adalah signifikan.

KESIMPULAN

Berdasar tahapan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *combustor* dengan D_{out} 10 mm menghasilkan energi *output* total dan efisiensi yang lebih baik dari D_{out} 8 mm. Hasil penelitian yang didapatkan tidak sesuai dengan hipotesis, yang mana seharusnya semakin kecil D_{out} , semakin besar energi *output* total dan efisiensinya. Hal tersebut terjadi dikarenakan ada beberapa nyala api yang hanya menyala di satu sisi *plate* pada dinding *meso scale combustor* $D_{out} = 8$ mm yang menyebabkan suhu dinding lebih kecil yang pada akhirnya mempengaruhi jumlah energi *output* total dan efisiensi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Ju, Y. dan K. Maruta. 2011. Microscale combustion: Technology development

and fundamental research. Progress in Energy and Combustion Science. 37: 669-715.

- [2] Yang, W. M., S. K. Chou, C. Shu, Z. W. Li, dan H. Xue. 2003. Research on microthermophotovoltaic power generators. Solar Energy Materials and Solar Cell. 80: 95-104.
- [3] Rohadi, A. I. 2016. Pengaruh Panjang Saluran Sudden Expansion terhadap Karakteristik Pembakaran pada Meso-scale Combustor. Jember. Teknik Mesin Universitas Jember.
- [4] Mikami, M., Maeda, Y., Matsui, K., Seo, T., dan Yuliati, L. 2012. *Combustion of Gaseous and Liquid Fuels in Meso-Scale Tubes with Wire Mesh*. Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University, Japan.
- [5] Sanata, A., Nyoman Gede Wardana, I., Yuliati, L., & Sasongko, M. N. 2019. Effect of backward facing step on combustion stability in a constant contact area cylindrical meso-scale combustor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(8-97), 51-59.
- [6] Li, S.K. Chou, G. Huang, W.M. Yang dan Z.W. 2009. Study on premixed combustion in cylindrical micro combustors : Transient flame behavior and well heat flux. Experimental Thermal and Fluid Science. 33 : 764-773.