



**KARAKTERISTIK *SPINNING FLAME*  
PADA *MESOSCALE COMBUSTOR***

**SKRIPSI**

Oleh

**Diaz Yuniar Andri Ferdinand M.**

**151910101026**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER**

**2019**



**KARAKTERISTIK *SPINNING FLAME*  
PADA *MESOSCALE COMBUSTOR***

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

**Diaz Yuniar Andri Ferdinand M.**

**151910101026**

**PROGRAM STUDI STRATA I TEKNIK**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS JEMBER**

**2019**

## PERSEMBAHAN

Dengan menyebut nama Allah SWT yang maha pengasih dan penyayang, saya mempersembahkan skripsi ini untuk:

1. Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat, taufiq, dan hidayah-Nya sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik;
2. Nabi Muhammad SAW yang telah membawa umat manusia dari jalan kegelapan menuju jalan terang benderang yaitu Islam;
3. Kedua orang tua saya yaitu Ahmad Mulyono dan Siti Nurul Huda yang tidak pernah lelah memberikan dukungan baik secara moril maupun materiil dan selalu mendoakan saya sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik;
4. Kedua adik saya yaitu Angga Marcello Aditya Fernanda M., dan Chalista Delta Bela Valent Anindita yang selalu menjadi motivasi saya dalam segala kegiatan yang saya lakukan;
5. Tita Dicky Mawarni sebagai kekasih saya yang selalu mendukung dan mendoakan saya hingga riset ini selesai;
6. Teman-teman MRG 6 yang selalu menjadi motivasi saya untuk segera menyelesaikan riset ini;
7. Teman-teman Agency 4 Ace Entertainment yang mendukung saya dan menjadi penghibur saat mengalami jenuh dari awal masuk Universitas Jember hingga saat ini.

## MOTTO

“Barang Siapa yang bersungguh sungguh, sesungguhnya kesungguhan tersebut  
untuk kebaikan dirinya sendiri”

(Surat Al-Ankabut. Ayat 6)

“Yang namanya manusia itu punya semangat hidup, kau tidak bisa mengukur  
seorang sukses dalam sekejap, selama manusia melakukan apa yang bisa ia  
lakukan dia punya hak untuk merasa bangga”

(Tom – One Piece)

“Keajaiban hanya akan datang pada mereka yang memiliki keinginan untuk  
mendapatkannya”

(Emporio Ivankov – One Piece)

“Selama aku masih bernafas, selama aku masih bisa berdiri, aku takkan pernah  
menyerah”

(Natsu Dragneel – Fairy Tail)

“Manusia bisa menjadi lebih hebat dengan belajar dari kegagalannya”

(Rogue – Fairy Tail)

"Orang-orang hebat di bidang apapun bukan baru bekerja karena mereka  
terinspirasi, namun mereka menjadi terinspirasi karena mereka lebih suka bekerja.  
Mereka tidak menyia-nyiakan waktu untuk menunggu inspirasi."

(Ernest Newman)

"Orang-orang yang sukses telah belajar membuat diri mereka melakukan hal yang  
harus dikerjakan ketika hal itu memang harus dikerjakan, entah mereka  
menyukainya atau tidak."

(Aldus Huxley)

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Diaz Yuniar Andri Ferdinand M.

NIM : 151910101026

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “**Karakteristik *Spinning Flame* pada *Mesoscale Combustor***” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 23 Juli 2019

yang menyatakan,

Diaz Yuniar Andri Ferdinand M.

NIM 151910101026

**SKRIPSI**

**KARAKTERISTIK *SPINNING FLAME*  
PADA *MESOSCALE COMBUSTOR***

Oleh

**Diaz Yuniar Andri Ferdinand M.**

**NIM 151910101026**

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Andi Sanata, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Gaguk Jatisukamto, S.T., M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “**Karakteristik *Spinning Flame* pada *Mesoscale Combustor***”

karya Diaz Yuniar Andri Ferdinand M., telah diuji dan disahkan pada :

Hari, tanggal : 23 Juli 2019

Tempat : Ruang Ujian II, Fakultas Teknik, Universitas Jember

Tim Pembimbing

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Andi Sanata, S.T., M.T.

NIP. 197505022001121001

Dr. Gaguk Jatisukamto, S.T., M.T.

NIP. 196902091998021001

Tim Penguji

Penguji I,

Penguji II,

Hary Sutjahjono, S.T., M.T.

NIP. 196812051997021002

Robertus Sidartawan, S.T., M.T.

NIP. 197003101997021001

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M.

NIP 19661215 1995 03 2 001

## RINGKASAN

“**Karakteristik *Spinning Flame* pada *Mesoscale Combustor*””; Diaz Yuniar Andri Ferdinand M., 151910101026; 43 halaman; Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.**

Energi listrik sangat dibutuhkan dalam berbagai aplikasi energi mikro. Sistem manajemen pada stabilitas termal dan kimia diperlukan untuk membangun pembakaran yang stabil, diantaranya meresirkulasi panas melalui dinding saluran. Pembakaran skala mikro saat ini tidak sering mengatasi masalah ini, beberapa upaya telah dilakukan dengan memperhatikan konsentrasi dan temperatur diskontinuitas di dinding. Pada sepuluh tahun terakhir, pembakaran dalam skala mikro dan meso tidak hanya mengamati temperatur api dan dinding namun juga mulai mengamati bentuk dari nyala api itu sendiri, diantaranya yaitu nyala api *spinning*.

Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah metode eksperimental dimana dilakukan pengamatan pada pengaruh karakteristik nyala api *spinning* yaitu kadar Karbon Monoksida (CO) dari sisa hasil pembakaran, temperature api dan dinding, dan jarak api ke *step*. Ruang bakar yang digunakan adalah skala meso dimana diameter inlet 2,8 mm dan diameter outlet 4,7 mm. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah gas butana dan penyuplai udara menggunakan kompresor. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui daerah *spinning flame*, hubungan jarak step terhadap temperatur pembakaran, hubungan karakterisasi visualisasi nyala api dan kadar CO sisa hasil pembakaran di ruang bakar.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nyala api *spinning* muncul pada debit bahan bakar 4,5 - 9,5 ml/min. Temperatur api dan dinding tertinggi yaitu pada  $Q_f = 9,5$  ml/min dan  $Q_a = 325$  ml/min yaitu  $T_{api} = 875^\circ\text{C}$  dan  $T_{dinding} = 175,7^\circ\text{C}$  dengan rasio ekuivalen,  $\phi = 0,95$ . Emisi gas CO tertinggi dihasilkan pada  $Q_a = 8$  ml/min dengan  $Q_f = 270$  ml/min yaitu 41,93 ppm.

Kata Kunci : *Mesoscale Combustor*, *spinning flame*, emisi gas CO



## SUMMARY

*"Characteristics of Spinning Flame at Mesoscale Combustor"; Diaz Yuniar Andri Ferdinand M., 151910101026; 43 pages; Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Jember.*

*Electrical energy is needed in various micro-energy applications. A management system for thermal and chemical stability is needed to build stable combustion, including recirculating heat through the channel walls. Micro-scale combustion currently does not often solve this problem, several attempts have been made to pay attention to the concentration and temperature of discontinuities on the wall. In the last ten years, combustion on a micro and meso scale not only observed the temperature of fire and walls but also began to observe the shape of the flame itself, including the spinning flame.*

*In this study the method is used an experimental method which is carried out to observe the effect of spinning flame characteristics, namely the levels of Carbon Monoxide (CO) from the combustion residue, fire and wall temperatures, and the distance of the fire to step. The combustion chamber that is used the meso scale where the inlet diameter is 2.8 mm and the outlet diameter is 4.7 mm. The fuel is used at this research is butane gas and air supply using a compressor. This study aims to determine the spinning flame area, the relationship of step distance to the combustion temperature, the relationship of characterization of the visualization of the flame and the level of CO remaining from combustion in the combustion chamber.*

*The results showed that spinning flame appeared at a fuel discharge of 4.5 - 9.5 ml/min. The highest fire and wall temperature is at  $Q_f = 9.5$  ml/min and  $Q_a = 325$  ml/min which is  $T_{\text{flame}} = 875^\circ\text{C}$  and  $T_{\text{wall}} = 175.7^\circ\text{C}$  with an equivalent ratio,  $\phi = 0.95$ . The highest CO gas emissions are produced at  $Q_a = 8$  ml/min with  $Q_f = 270$  ml/min which is 41.93 ppm.*

*Keywords: Mesoscale Combustor, spinning flame, CO gas emissions.*

## PRAKATA

Puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Karakteristik *Spinning Flame* pada *Mesoscale Combustor*”. Shalawat dan salam penulis curahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah menunjukkan inspirasi, suri tauladan, dan jalan yang terang bagi umat manusia dalam menjalani kehidupan di dunia. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

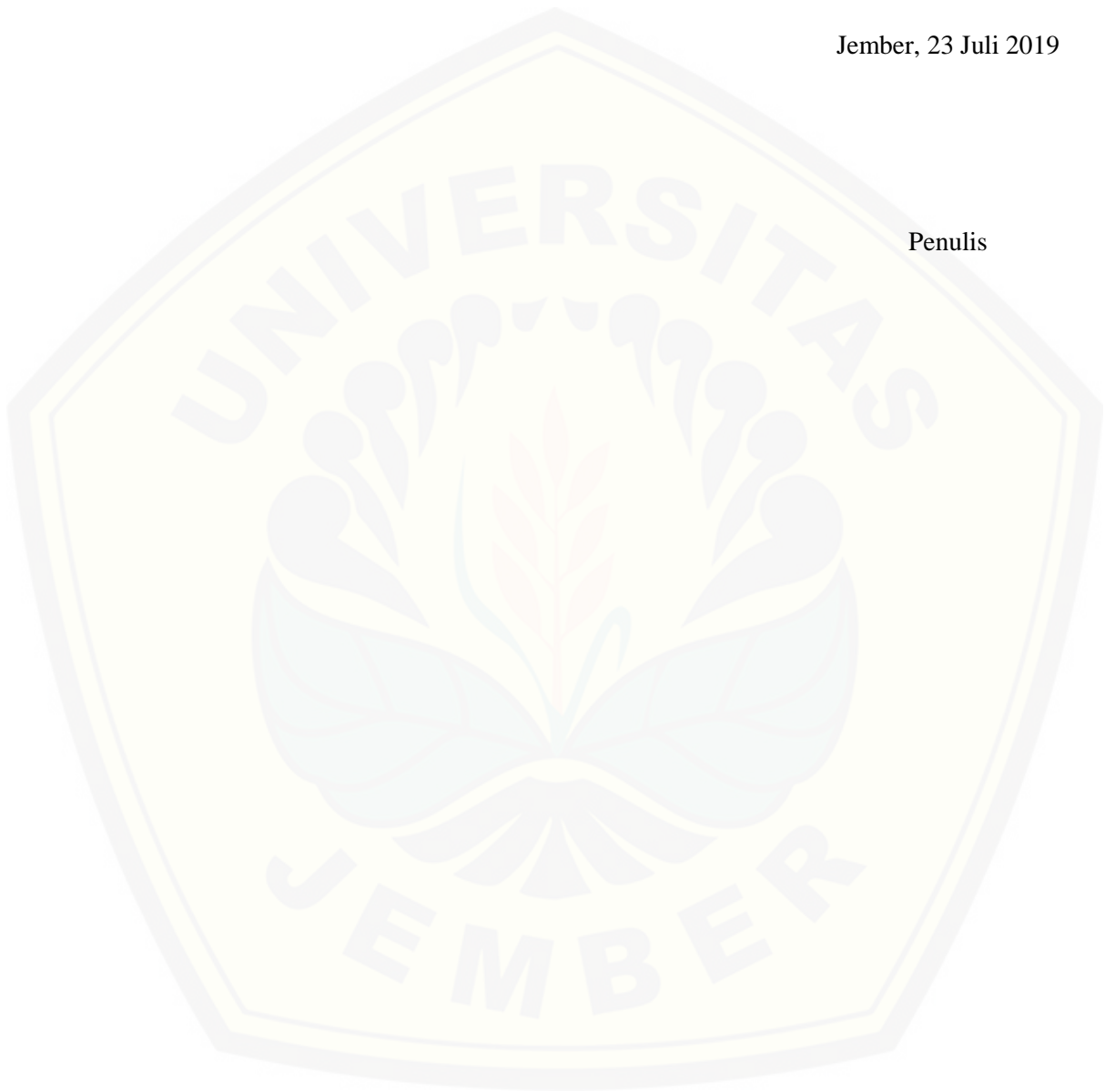
Penyusun skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Andi Sanata, S.T., M.T., yang telah mensupport alat untuk penelitian skripsi ini, membimbing dan membantu saya dalam pelaksanaan skripsi ini hingga dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
2. Bapak Dr. Gaguk Jatisukanto, S.T., M.T., yang membimbing dan membantu saya dalam proses pembuatan skripsi ini;
3. Dosen penguji Bapak Hary Sutjahjono, S.T., M.T., dan Bapak Robertus Sidartawan, S.T., M.T., yang telah berkenan menguji dan mengoreksi skripsi ini;
4. Bapak Imam Sholahuddin, S.T., M.T., selaku Pembina MRG yang selalu membantu dan memberi arahan dalam setiap kesulitan saat penelitian berlangsung.
5. Ibu, Ayah, Adik-adik, dan keluarga yang telah memberikan dukungan secara materiil maupun non materiil;
6. Teman-teman MRG 6 Cebong, GL, Icung, Kempes, Robi, Fery dan wahab yang menjadi pendorong untuk menyelesaikan skripsi ini;
7. Tita Dicky Mawarni sebagai kekasih saya yang selalu mendukung saya;
8. Teman-teman Agency 4 Ace Entertainment Mas Enha, Mas David, Cahyo, Septa, Fajar, Haikal, Mas Dani, Mbak Ajeng, Bintang, dan Acil yang menjadi tempat penghibur dan mendukung saya hingga skripsi ini selesai.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Semoga hasil dari penelitian ini dapat memerikan manfaat bagi dan pembaca.

Jember, 23 Juli 2019

Penulis



DAFTAR ISI

COVER .....	Error! Bookmark not defined.
PERSEMBAHAN.....	ii
MOTTO .....	iii
PERNYATAAN.....	v
PENGESAHAN .....	vii
RINGKASAN .....	viii
SUMMARY.....	ix
PRAKATA .....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB 1. PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Pembakaran .....	4
2.2 Pembakaran <i>Microscale/Mesoscale</i> .....	5
2.3 <i>Air Fuel Ratio (AFR)</i> .....	7
2.4 Rasio Ekuivalen ( $\phi$ ).....	7
2.5 Debit Bahan Bakar ( $Q_f$ ) dan Debit Udara ( $Q_a$ ).....	8
2.6 <i>Micro Power Generation (MPG)</i> .....	9
2.7 <i>Spinning Flame</i> .....	11
2.8 Sensor TGS2442 .....	13
2.9 Penelitian Sebelumnya .....	14
2.10 Hipotesa .....	16
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	17

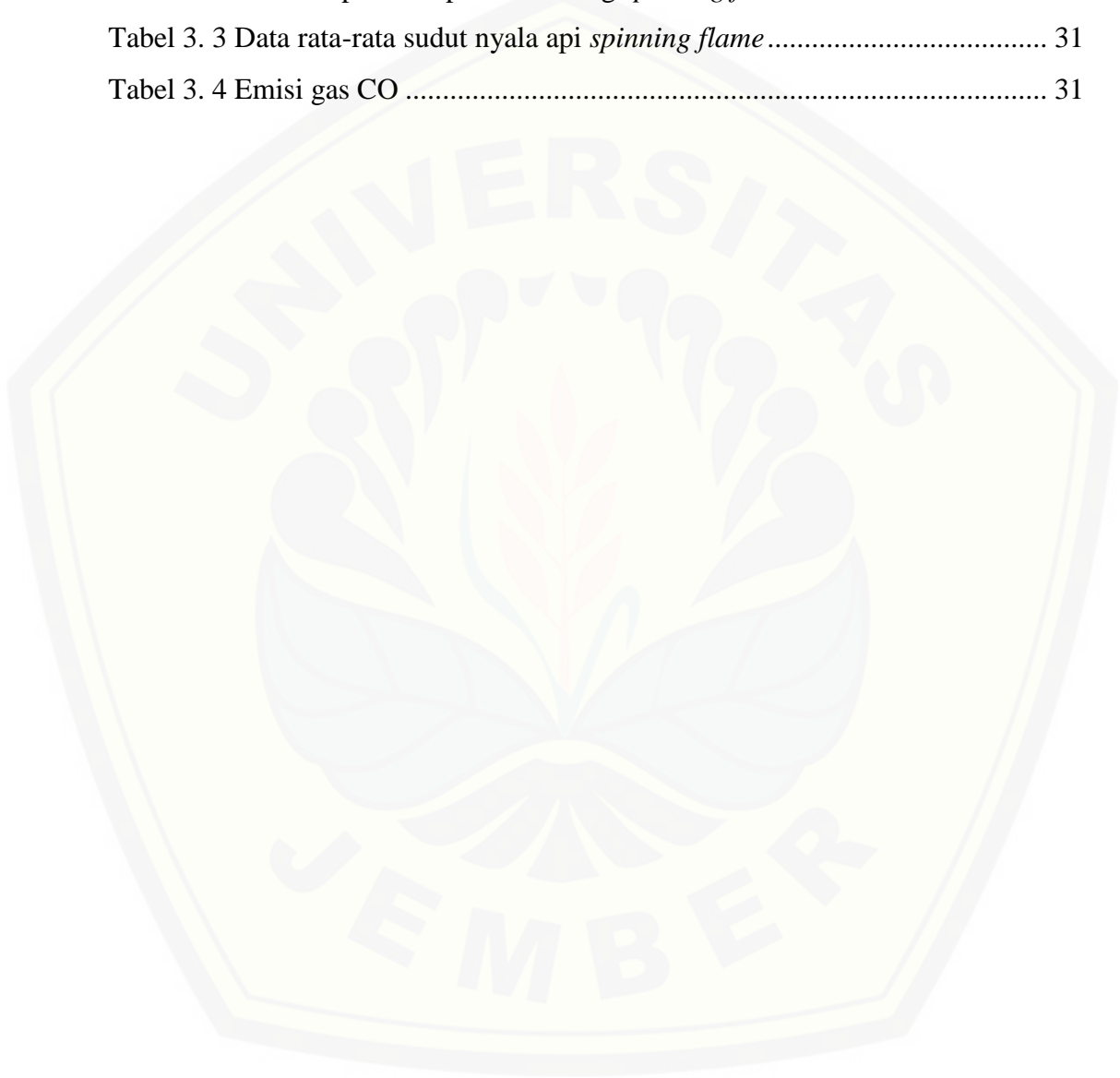
<b>3.1</b>	<b>Metode Penelitian .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Tempat Pengambilan Data .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3</b>	<b>Alat dan Bahan Penelitian .....</b>	<b>17</b>
3.3.1	Peralatan Penelitian .....	17
3.3.2	Bahan .....	24
<b>3.4</b>	<b>Variabel Penelitian .....</b>	<b>26</b>
3.4.1	Variabel Bebas .....	26
3.4.2	Variabel Terikat .....	26
3.4.3	Variabel Control .....	26
<b>3.5</b>	<b>Skema Rangkaian Penelitian Karakterisasi Spinning Flame ..</b>	<b>26</b>
<b>3.6</b>	<b>Prosedur Penelitian .....</b>	<b>28</b>
<b>3.7</b>	<b>Penyajian Data Penelitian.....</b>	<b>31</b>
<b>3.8</b>	<b>Diagram Alir Penelitian Karakterisasi Spinning Flame pada Mesoscale Combustor .....</b>	<b>32</b>
<b>BAB 4.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Data Hasil Zona Nyala Api Spinning .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2</b>	<b>Temperatur Api dan Dinding.....</b>	<b>35</b>
<b>4.3</b>	<b>Data Hasil Emisi Gas Karbon Monoksida (CO) .....</b>	<b>38</b>
<b>BAB 5.</b>	<b>PENUTUP.....</b>	<b>40</b>
<b>5.1</b>	<b>Kesimpulan .....</b>	<b>40</b>
<b>5.2</b>	<b>Saran.....</b>	<b>40</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>42</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>44</b>
<b>Lampiran A.</b>	<b>Perhitungan Data Penelitian.....</b>	<b>44</b>
<b>Lampiran B.</b>	<b>Data Penelitian .....</b>	<b>48</b>
<b>Lampiran C.</b>	<b>Foto Nyala Api Spinning.....</b>	<b>51</b>
<b>Lampiran D.</b>	<b>Datasheet Sensor TGS2442.....</b>	<b>56</b>
<b>Lampiran E.</b>	<b>Spesifikasi Bit Arduino Uno.....</b>	<b>58</b>

**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2. 1 Skema <i>combustor</i> .....	6
Gambar 2. 2 <i>Meso-scale Combustor</i> .....	6
Gambar 2. 3 Macam-macam kerapatan energi .....	10
Gambar 2. 4 Perbandingan spesifikasi kerapatan energi .....	10
Gambar 2. 5 Spinning flame pada keadaan kaya dan miskin .....	11
Gambar 2. 6 Variasi faktor emisi CO untuk <i>microcombustor 3-step</i> .....	12
Gambar 2. 7 Skema diagram a) keadaan stabil, b) keadaan Spinning flame .....	13
Gambar 2. 8 Rangkaian pengaplikasian sensor TGS2442 .....	13
Gambar 3. 1 Mesoscale Combustor .....	17
Gambar 3. 2 <i>Mixer</i> .....	18
Gambar 3. 3 Kompresor udara .....	19
Gambar 3. 4 Flowmeter bahan bakar ( kiri ) dan Flowmeter udara ( kanan).....	20
Gambar 3. 5 Converter (kiri) dan data logger (kanan).....	21
Gambar 3. 6 Sensor TGS2442 .....	22
Gambar 3. 7 Arduino Uno.....	23
Gambar 3. 8 Transistor BD139 dan BD140.....	23
Gambar 3. 9 Skema penelitian .....	27
Gambar 3. 10 Diagram alir.....	32
Gambar 4. 1 Rentang nyala api .....	33
Gambar 4. 2 Rentang nyala api <i>spinning</i> .....	34
Gambar 4. 3 Visualisasi nyala api <i>spinning</i> .....	35
Gambar 4. 4 Temperatur api <i>spinning flame</i> .....	35
Gambar 4. 5 Temperatur dinding <i>combustor</i> pada kondisi <i>spinning flame</i> .....	36
Gambar 4. 6 Korelasi debit bahan bakar dengan sudut nyala api <i>spinning</i> .....	37
Gambar 4. 7 Hubungan debit udara dan bahan bakar terhadap emisi gas CO.....	38

**DAFTAR TABEL**

Tabel 2. 1 Perbandingan skala mikro dan meso (Ju dan Maruta, 2011) .....	5
Tabel 3. 1 Data zona <i>spinning flame</i> .....	31
Tabel 3. 2 Data temperatur api dan dinding <i>spinning flame</i> .....	31
Tabel 3. 3 Data rata-rata sudut nyala api <i>spinning flame</i> .....	31
Tabel 3. 4 Emisi gas CO .....	31



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi listrik sangat dibutuhkan dalam berbagai aplikasi energi mikro seperti: aktuator mikro, sensor, kendaraan dan robot, sehingga menuntut peningkatan pasokan listrik mikro (Ju dan Maruta, 2011; Maruta, 2010). Baterai yang digunakan pada saat ini memiliki energi spesifik yang cukup rendah yaitu baterai alkalin dengan kapasitas energi,  $W = 0,6$  MJ/g dan baterai lithium,  $W = 1,2$  MJ/g, sedangkan dibandingkan dengan hidrogen dan hidrokarbon memiliki kapasitas energi,  $W = 45$  MJ/g (Fernandez-Pello, 2002). Kemajuan terbaru di bidang *Micro Electromechanical Systems* (MEMS) telah mengarah pada kemungkinan generasi baru mesin pembakaran mikro untuk pembangkit listrik atau *Micro Power Generation* (MPG). Pembakaran mikro adalah salah satu komponen penting untuk sistem tenaga mikro yang menggunakan bahan bakar berupa hidrogen dan hidrokarbon sebagai sumber energi (Fernandez-Pello, 2002; Maruta, 2010). Pendekatan inovatif untuk mengubah energi yang tersedia menjadi bentuk yang dapat digunakan menggunakan teknologi mikro dan nanoteknologi dapat berkontribusi terhadap pengembangan energi berkelanjutan dan memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat dalam aplikasi skala kecil (Chou S. K., dkk., 2011).

Sistem manajemen pada stabilitas termal dan kimia diperlukan untuk membangun pembakaran yang stabil di perangkat skala kecil. Salah satu manajemen stabilitas yang efektif adalah resirkulasi panas melalui dinding saluran. Pembakaran skala mikro saat ini sering mengatasi masalah ini, beberapa upaya telah dilakukan dengan memperhatikan konsentrasi dan temperatur diskontinuitas di dinding (Maruta, 2010). Konsep dasar dari karakteristik pembakaran dari ruang bakar skala mikro dan meso memainkan peran penting dalam peningkatan efisiensi sistem dan optimalisasi desain. Volume pembakaran berkurang dalam proses pembakaran skala mikro terutama pada desain ruang bakar yang semakin kecil, dimana hal ini diharapkan mengurangi panas yang hilang melalui dinding ruang bakar mikro (Colangelo, dkk., 2006). Peningkatan



rasio permukaan terhadap volume dalam pembakaran skala meso menyebabkan meningkatnya kehilangan panas dinding dan dapat menyebabkan pemadaman api (Fernandez-Pello, 2002; Vican, dkk., 2002). Pengurangan inersia termal secara signifikan mengurangi waktu respon dinding dan mengarah ke kopling dinding api yang kuat dan perpanjangan batas pembakaran (Ju dan Choi, 2003; Ju dan Xu, 2005). Kopling dinding api ini secara dramatis mengubah sifat perambatan api dan menghasilkan banyak rezim nyala (Ju dan Xu, 2005).

Xu dan Ju (2007) melakukan pengamatan terhadap sistem pembakaran mikro pada bentuk nyala api *spinning* dengan menggunakan metana-udara dan propane-udara. Hasilnya menunjukkan bahwa untuk rasio ekuivalen tetap, ada laju aliran kritis di atas api yang mulai berputar yang membentuk *spinning flame* dan hanya terjadi setelah transisi dari rezim nyala api cepat ke nyala api lambat. Deshpande dan Kumar (2013) pada frekuensi 150 Hz dan Fan, dkk. (2008) pada frekuensi 20 – 70 Hz, mengamati pembentukan *spinning flame* ini tergantung pada laju alir campuran, rasio ekuivalensi dan ukuran step dalam mikro kombustor dengan *sudden expansion*. *Spinning flame* memiliki emisi CO yang lebih rendah sehingga efisiensi pembakarannya lebih tinggi daripada nyala api stabil (Deshpande dan Kumar, 2013).

Penelitian ini membahas pengujian pengaruh rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan pada kombustor skala meso dengan penambahan *sudden expansion* atau perubahan dimensi ruang bakar terhadap karakterisasi *spinning flame*, dimana karakteristik yang diamati adalah temperatur api dan dinding, jarak api ke *step*, sudut api dan emisi CO sisa hasil pembakaran.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan kajian penelitian pada latar belakang tersebut diatas, maka rumusan masalah yang dapat diambil adalah “Bagaimana pengaruh karakteristik *spinning flame* pada proses pembakaran dengan bahan bakar butana pada ruang bakar skala meso dimana karakteristik yang diamati adalah temperatur api dan dinding, jarak api ke *step*, sudut api dan emisi CO sisa hasil pembakaran?”.

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

- 1) Bahan bakar yang digunakan adalah gas butane ( $C_4H_{10}$ ).
- 2) Oksidator yang digunakan adalah udara atmosfer
- 3) Ruang bakar yang digunakan adalah berbentuk silinder bertingkat dengan diameter *inlet* 2,8 mm dan diameter *outlet* 4,7 mm.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah :

- 1) Mengetahui interval debit bahan bakar terbentuknya nyala api *spinning*.
- 2) Mengetahui hubungan jarak step dan temperatur pembakaran.
- 3) Mengetahui pengaruh debit bahan bakar ( $Q_f$ ) dan debit udara ( $Q_a$ ) terhadap emisi gas CO sisa hasil pembakaran di ruang bakar.

### 1.5 Manfaat Penelitian

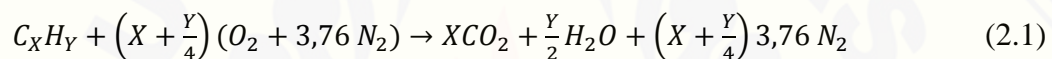
Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Perbaikan efisiensi pembakaran dalam skala meso.
- 2) Pengembangan di bidang teknologi pembakaran.
- 3) Lebih memahami karakterisasi bentuk nyala api *spinning*.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi kimia antara campuran bahan bakar dengan udara yang menghasilkan energi panas dan menyebabkan temperatur menjadi lebih tinggi. Semakin tinggi kandungan bahan bakar maka temperatur semakin tinggi. Keadaan yang dibutuhkan dalam proses pembakaran adalah campuran antara bahan bakar dengan oksidator berupa udara dan adanya pemicu sehingga menghasilkan proses pembakaran. Bahan bakar yang umumnya digunakan pada proses pembakaran biasanya berupa hidrokarbon baik fase gas, padat maupun gas (Fernandez-Pello, 2002; Maruta, 2010). Reaksi kimia pada bahan hidrokarbon dan udara secara umum dapat ditulis sebagai berikut (Ganesan, 2012).



Berdasarkan rumus reaksi kimia pada Persamaan 2.1 maka reaksi kimia pada bahan bakar butana dan udara secara umum dapat ditulis sebagai berikut:



Berdasarkan Persamaan 2.2, dapat dicari nilai  $AFR_{stoikiometri}$  dengan langkah sebagai berikut :

- 1) Mengetahui masing-masing massa atom relative (Ar) atau massa molekul relative (Mr) dimana atom C = 12 gr/mol, O = gr/mol, N = 14 gr/mol, dan H = 1 gr/mol.
- 2) Mengetahui massa jenis ( $\rho$ ) udara dan bahan bakar butane dimana  $\rho$  udara pada 27 °C = 0,0012 gram/cm<sup>3</sup> dan  $\rho$  butana = 0,00248 gram/cm<sup>3</sup>
- 3) Mencari Massa butane dan udara dengan persamaan berikut:

$$m = n \times Mr \quad (2.3)$$

- 4) Mencari nilai  $AFR_{stoikiometri}$  dengan persamaan berikut:

$$AFR_{stoikiometri} = \frac{Massa\ udara}{Massa\ bahan\ bakar} \quad (2.4)$$

## 2.2 Pembakaran *Microscale/Mesoscale*

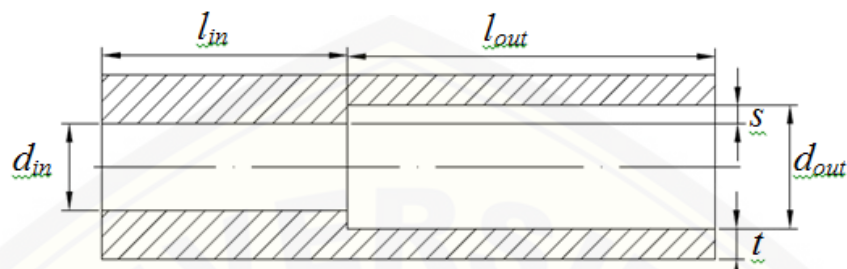
Skala pembakaran yang sering digunakan pada penelitian yang mendefinisikan pembakaran "skala mikro" secara spesifik berbeda, diantaranya adalah skala panjang yang digunakan untuk menentukan dimensi fisik dari ruang bakar. Jika panjang fisik pembakar pada ruang bakar sebesar 1 – 1000  $\mu\text{m}$ , maka pembakaran tersebut disebut dengan pembakaran mikro, sedangkan jika skala panjang fisik sebesar 1 – 10 mm, pembakaran tersebut disebut pembakaran skala meso seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.1 (Ju dan Maruta, 2011; Maruta, 2010).

Tabel 2. 1 Perbandingan skala mikro dan meso (Ju dan Maruta, 2011)

Definition based on	Combustion regime	Length scale
Physical length	Mesoscale Microscale	1–10 mm 1–1000 $\mu\text{m}$
Flame quenching diameter	Mesoscale  Microscale	~ Quenching diameter (equilibrium) Quenching diameter ~ Mean-free path (non-equilibrium)
Device scale	Microscale	Smaller than conventional engine size

Tantangan untuk pembakaran mikro saat ini adalah bagaimana mempertahankan api di ruang bakar mikro dengan ukuran dalam milimeter dan bahkan skala sub-milimeter. Rasio kehilangan panas untuk menghasilkan panas berbanding terbalik dengan panjang karakteristik dari *micro-combustor*. Ruang bakar yang lebih kecil menyiratkan proporsi lebih besar dari kehilangan panas dari zona nyala api, yang berpotensi menyebabkan pendinginan termal. Penyerapan dan penghancuran spesies aktif (radikal) yang dihasilkan selama pembakaran juga berdampak pada stabilitas nyala api, dan efek ini diintensifkan ketika ukuran ruang bakar menurun. Beberapa peneliti menerapkan metode peningkatan pembakaran seperti pemanasan eksternal untuk mengatasi masalah kehilangan panas, sementara yang lain bereksperimen pada pembakaran dikatalisasi dengan niat untuk meminimalkan efek pendinginan radial (Chou S.K., dkk., 2011).

Skema dari ruang bakar digambarkan pada Gambar 2.1, dimana pada gambar tersebut terdapat simbol  $d_{in}$ ,  $d_{out}$ ,  $s$ ,  $t$ ,  $l_{in}$  dan  $l_{out}$  yang mewakili diameter *inlet* ruang bakar, diameter *outlet* ruang bakar, tinggi step, tebal dinding, panjang *inlet* ruang bakar dan panjang *outlet* ruang bakar (Faramarzpour, dkk., 2018).



Gambar 2. 1 Skema *combustor*

Keterangan :

- $l_{in}$  = Panjang *inlet combustor* (mm)
- $l_{out}$  = Panjang *outlet combustor* (mm)
- $d_{in}$  = Diameter *inlet combustor* (mm)
- $d_{out}$  = Diameter *outlet combustor* (mm)
- $s$  = Tinggi step *combustor* (mm)
- $t$  = Tebal dinding *combustor* (mm)

Gambar 2.2 mendeskripsikan bentuk dari *meso-scale combustor* dengan penambahan *sudden expansion* (Chou S. K., dkk., 2011).



Gambar 2. 2 *Meso-scale Combustor* (Chou S. K., dkk., 2011)

### 2.3 Air Fuel Ratio (AFR)

*Air Fuel Ratio* atau rasio udara-bahan bakar adalah reaksi kimia yang ditentukan oleh perbandingan antara massa udara dan massa bahan bakar yang merupakan faktor yang sangat penting untuk proses pembakaran (Song, dkk., 2018). Rohadi (2016) menyatakan bahwa *air fuel ratio* (AFR) actual dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{\rho_a Q_a}{\rho_f Q_f} \quad (2.5)$$

dengan,

- $\dot{m}_a$  = massa alir udara (gram/min)
- $\dot{m}_f$  = massa alir bahan bakar (gram/min)
- $Q_a$  = debit udara (ml/min)
- $Q_f$  = debit bahan bakar (ml/min)
- $\rho_a$  = massa jenis udara (gram/cm<sup>3</sup>)
- $\rho_f$  = massa jenis bahan bakar (gram/cm<sup>3</sup>)

### 2.4 Rasio Ekuivalen ( $\phi$ )

Wan Jianlong, dkk. (2012) mengemukakan bahwa rasio ekuivalen adalah indeks yang umum digunakan untuk menunjukkan secara kuantitatif apakah campuran reaksi kimia antara udara dan bahan bakar dengan membandingkan rasio udara dan bahan bakar stokiometrik dengan rasio udara dan bahan bakar aktual atau sebenarnya dapat dikatakan kelebihan bahan bakar atau kaya bahan bakar ( $\phi > 1$ ), kekurangan bahan bakar atau miskin bahan bakar ( $\phi < 1$ ) atau campurannya sempurna sehingga disebut campuran stokiometrik ( $\phi = 1$ ). Rasio ekuivalen didefinisikan sebagai:

$$\phi = \frac{(AFR)_s}{(AFR)_a} \quad (2.6)$$

dengan,

$\phi$  = Rasio ekuivalen

$(AFR)_s$  = Rasio udara-bahan bakar dalam keadaan stokiometri

$(AFR)_a$  = Rasio udara-bahan bakar dalam keadaan sebenarnya

### 2.5 Debit Bahan Bakar ( $Q_f$ ) dan Debit Udara ( $Q_a$ )

Debit bahan bakar dan debit udara adalah proses dimana pada saat pembakaran terdapat sejumlah bahan bakar dan udara yang mengalir dalam satuan volume per satuan waktu yang masuk ke dalam ruang bakar. Besarnya nilai debit bahan bakar dan udara sangat mempengaruhi temperatur dan sifat pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar (Prabowo, 2017). Semakin besarnya campuran bahan bakar dan udara maka akan meningkatkan suhu ruang pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar (Deshpande dan Kumar, 2013; Xu dan Ju, 2007). Persamaan untuk menghitung debit bahan bakar adalah sebagai berikut (Rohadi, 2016):

$$Q_f = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f} \quad (2.7)$$

Adapun persamaan debit udara sebagai persamaan berikut (Rohadi, 2016):

$$Q_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a} \quad (2.8)$$

Sedangkan untuk menghitung kecepatan reaktan ( $v_r$ ) adalah sebagai berikut (Rohadi, 2016):

$$v_r = \frac{Q_f + Q_a}{\frac{3,14 \times r^2}{100} \text{ cm}^2} \quad (2.9)$$

dengan,

$Q_f$  = debit bahan bakar (ml/min)

$\rho_f$  = densitas bahan bakar (mg/ml)

$\dot{m}_f$  = massa alir bahan bakar (mg/min)

$Q_a$  = debit udara (ml/min)

$\rho_a$  = densitas udara (mg/ml)

$\dot{m}_a$  = massa alir (mg/min)

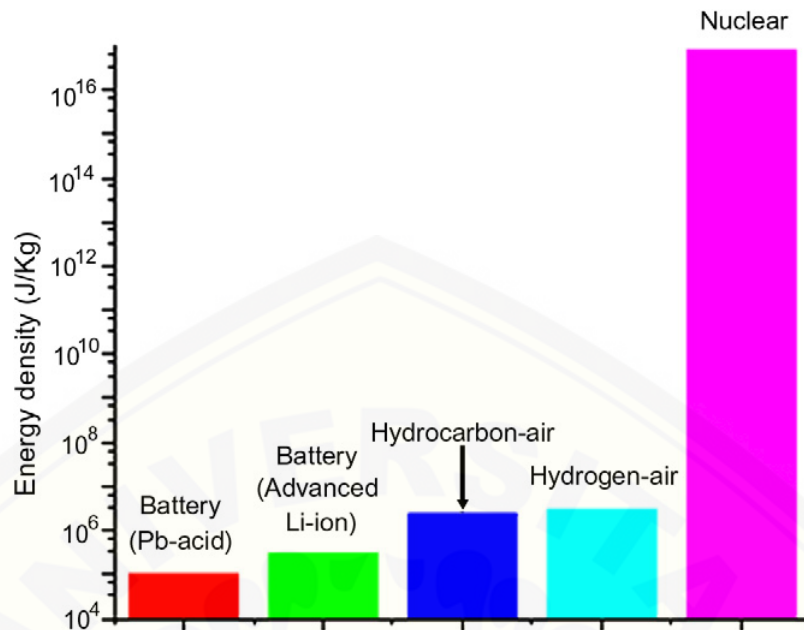
$v_r$  = kecepatan reaktan (cm/s)

## 2.6 Micro Power Generation (MPG)

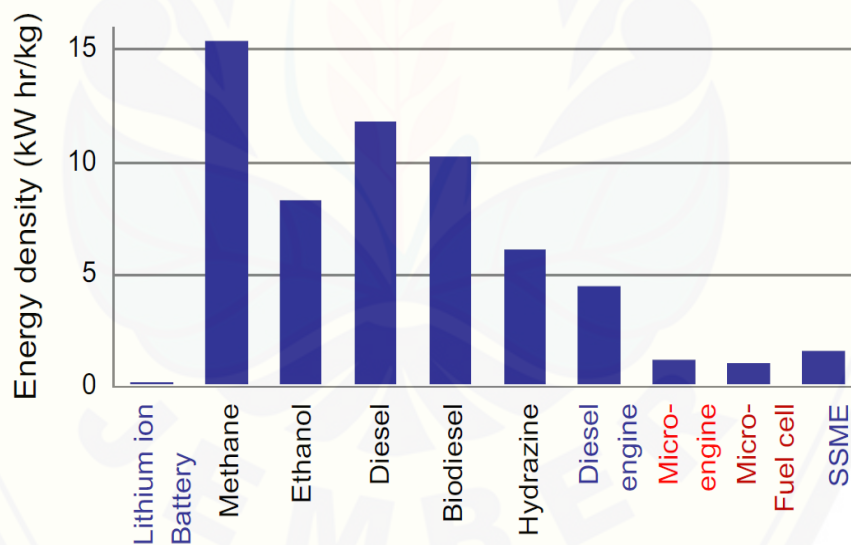
Kemajuan terbaru di bidang *Micro Electromechanical Systems* (MEMS) telah mengarah pada kemungkinan generasi baru mesin pembakaran mikro untuk pembangkit listrik atau disebut *Micro Power Generation* (MPG). Micro Power Generation adalah sistem pembangkit energi dengan skala mikro yang saat ini dalam tahap pengembangan dengan menggunakan proses pembakaran mikro. Pembakaran mikro adalah salah satu komponen penting untuk sistem tenaga mikro yang menggunakan bahan bakar berupa hidrogen dan hidrokarbon sebagai sumber energi (Fernandez-Pello, 2002).

MEMS menggunakan bahan bakar berupa hidrogen dan hidrokarbon yang merupakan sumber energi yang baik dan memiliki kepadatan tinggi. Pemanfaatan proses pembakaran dalam proses pembangkit tenaga memberikan beberapa keuntungan dibandingkan dengan menggunakan baterai diantaranya dalam hal penyimpanan energi per satuan massa dan pembangkit tenaga per satuan volume. Gambar 2.3 menjelaskan tentang macam-macam kerapatan energy dan spesifikasinya ditampilkan pada Gambar 2.4. Keuntungan lain menggunakan bahan bakar hidrokarbon adalah biaya rendah dan memiliki tegangan yang relative lebih konstan (Chou S.K., dkk., 2011; Ju dan Maruta, 2011).





Gambar 2. 3 Macam-macam kerapatan energi (Chou S.K., dkk., 2011)



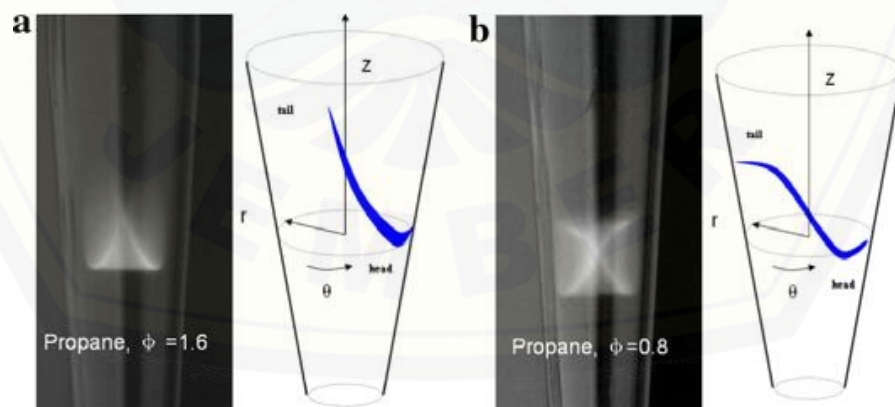
Gambar 2. 4 Perbandingan spesifikasi kerapatan energi (Ju dan Maruta, 2011)

Kekuatan MEMS didefinisikan sebagai mikrosistem untuk pembangkit listrik dan konversi energi, termasuk propulsi dan pendinginan, yang dapat dikategorikan sebagai: (1) mesin termodinamika mikro termasuk *microturbines*, mesin pembakaran internal miniatur dan pendingin mikro; (2) konversi energi langsung *solid-state* termasuk struktur mikro termoelektrik dan fotovoltaik; dan

(3) perangkat pemanen energi getaran termasuk generator mikro piezoelektrik, magnet atau elektrostatik dan pendorong mikro untuk propulsi (Chou S.K., dkk., 2011; Fernandez-Pello, 2002; Ju dan Maruta, 2011).

### 2.7 Spinning Flame

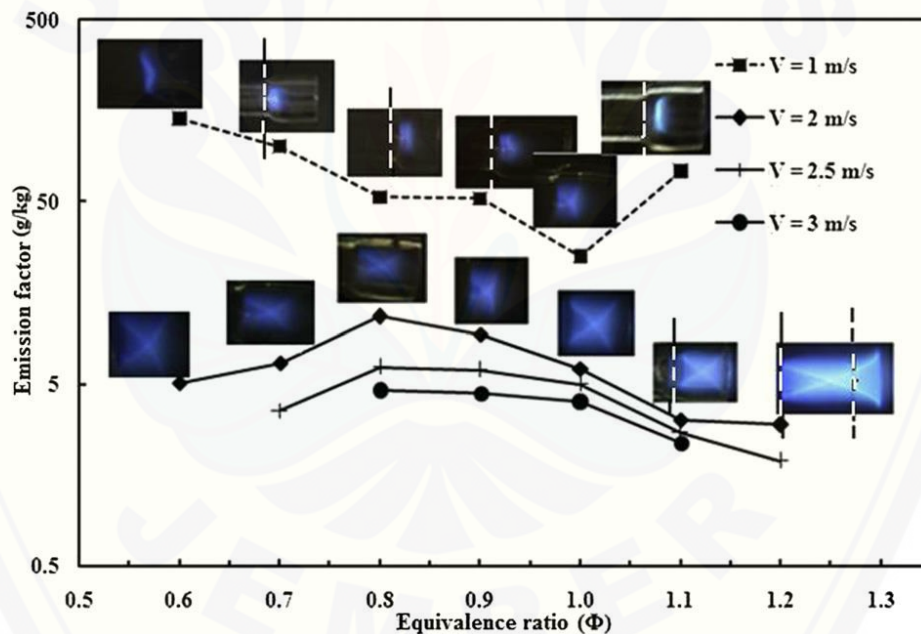
*Spinning flame* adalah api yang berputar searah atau berlawanan dengan jarum jam dengan probabilitas yang sama yang diatur oleh difusi (Xu dan Ju, 2007). Peningkatan rasio permukaan terhadap volume meningkatkan kehilangan panas sehingga perambatan api berubah menjadi nyala api dengan rezim yang besar (Kwon, dkk., 1996; Xu dan Ju, 2007). Rezim tersebut disebabkan oleh lebar saluran dan kecepatan alir. *Spinning flame* tidak langsung terjadi karena kehilangan panas namun perolehan panas dari dinding pada frekuensi tinggi dan rasio permukaan besar sehingga memicu terjadinya *spinning flame*. *Spinning flame* dapat dikendalikan atau dikontrol oleh *wall-thermal coupling* dengan cara memanaskan dan mendinginkan dinding (Deshpande dan Kumar, 2013; Xu dan Ju, 2007). *Spinning flame* ada pada saat laju aliran antara adanya resirkulasi panas dan tanpa resirkulasi panas atau pada saat terjadinya transisi nyala api pada berbagai rasio ekuivalen (Taywade, dkk., 2013).



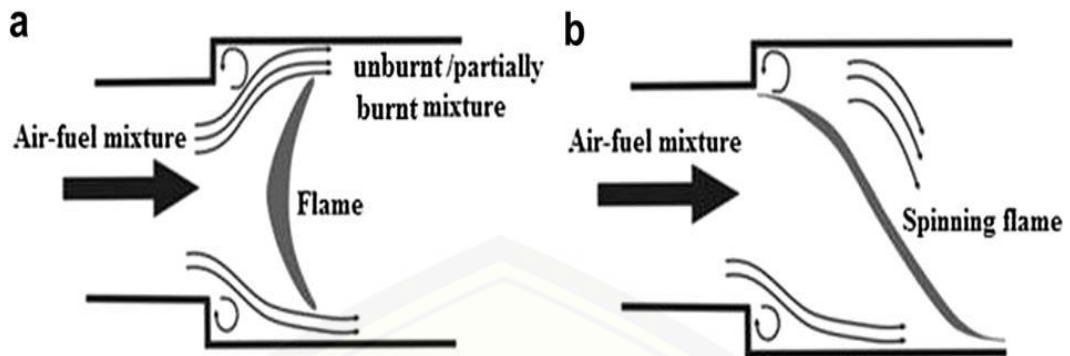
Gambar 2. 5 Spinning flame pada keadaan kaya dan miskin (Xu dan Ju, 2007)

Api *spinning* dapat dikategorikan dalam keadaan kaya dan miskin. Gambar 2.5 menjelaskan keadaan dan bentuk api *spinning* pada keadaan tersebut.

Pada keadaan kaya memiliki rasio ekuivalen yang besar dan kecepatan yang tinggi dengan bentuk geometrinya seperti huruf L, sedangkan pada keadaan miskin berbentuk seperti huruf S dan memiliki rasio ekuivalen dan kecepatan yang lebih rendah namun keduanya terjadi pada frekuensi tinggi dan permukaan yang besar (Deshpande dan Kumar, 2013; Kwon, dkk., 1996; Xu dan Ju, 2007). Api *spinning* memiliki pembakaran yang sempurna dan kadar CO hasil pembakaran sangat rendah mendekati nol pada frekuensi tinggi yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. *Spinning flame* sebenarnya merupakan api tunggal namun karena kecepatan dan frekuensinya tinggi, mengakibatkan terlihat seperti api berbentuk X dengan mata telanjang (Deshpande dan Kumar, 2013; Kwon, dkk., 1996). Gambar 2.7 menunjukkan pengaruh kecepatan alir dalam pembentukan *spinning flame* (Deshpande dan Kumar, 2013).



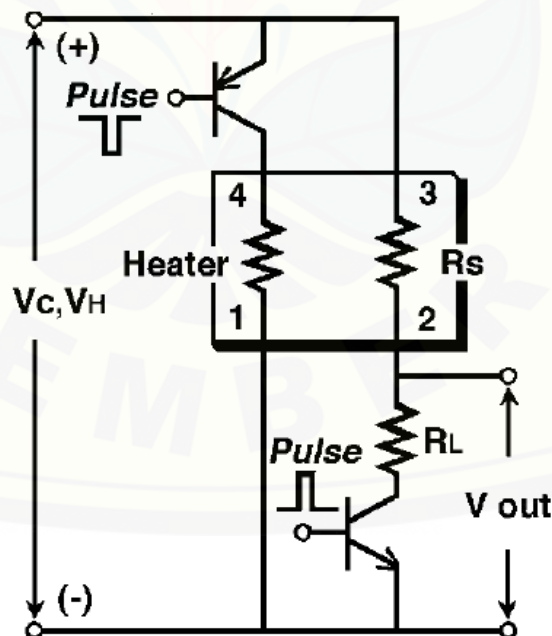
Gambar 2. 6 Variasi faktor emisi CO untuk *microcombustor 3-step* (Deshpande dan Kumar, 2013)



Gambar 2. 7 Skema diagram a) keadaan stabil, b) keadaan Spinning flame (*Deshpande dan Kumar, 2013*)

## 2.8 Sensor TGS2442

Sensor TGS2442 adalah sensor dapat memonitoring adanya gas CO di udara dengan menggunakan struktur multilayer sensor. Konduktivitas sensor akan meningkat seiringnya meningkatnya kandungan CO diudara (Harun, 2016). Sensor ini bekerja pada *circuit voltage* ( $V_C$ ) = 5 V dan *load resistance* ( $R_L$ ) =  $\geq 10$  k $\Omega$ . Rangkaian pengaplikasian pada sensor TGS2442 dapat dilihat pada Gambar 2.8 sebagai berikut.



Gambar 2. 8 Rangkaian pengaplikasian sensor TGS2442 (*Datasheet Lampiran D*)

Berdasarkan gambar rangkaian di atas, dapat dilakukan pengambilan data dengan rumus yang sudah ada pada *datasheet* yang dilakukan dengan langkah sebagai berikut.

- 1) Mencari nilai tegangan *output* ( $V_{out}$ ) dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{out} = \frac{\text{sensor value} \times V_c}{2^n} \quad (2.10)$$

dengan,

*sensor value* = nilai pembacaan dari sensor

$n$  = bit pada pin *micro controller*

$V_c$  = *circuit voltage* (V)

- 2) Mencari nilai resistansi sensor ( $R_s$ ) dengan persamaan berikut:

$$R_s = \frac{V_c \times R_L}{V_{out}} - R_L \quad (2.11)$$

- 3) Mencari nilai resistansi sensor udara bersih ( $R_o$ ) dengan Persamaan 2.11.

- 4) Mencari nilai ratio dengan persamaan sebagai berikut :

$$CO = \frac{R_s}{R_o} \quad (2.12)$$

- 5) Mencari rumus ppm CO dengan memasukkan data yang sudah ada di *datasheet* pada Microsoft Excel.

## 2.9 Penelitian Sebelumnya

Pada penelitian yang dilakukan oleh Deshpande dan Kumar (2013), berbagai campuran bahan bakar campuran-campuran diperkenalkan di dalam tabung ruang bakar mikro. Investigasi eksperimental menunjukkan pembentukan berbagai mode rambat pemintalan nyala yang stabil dan tidak stabil untuk berbagai laju aliran dan rasio campuran kondisi karena kopling dinding termal. Api yang berpilin dengan frekuensi sangat tinggi yaitu 150 Hz telah diamati untuk pertama kalinya dengan berbagai campuran bahan bakar. Frekuensi pemintalan dari nyala api ini hampir dua kali lipat dari nyala api yang diamati dalam pekerjaan sebelumnya. Api yang berpilin diamati untuk campuran campuran metana, LPG, dan propana yang kaya. Pembentukan nyala api yang berpilin ini tergantung pada laju alir campuran, rasio ekuivalensi dan jumlah langkah dalam mikrosibustor. Analisis gas buang dilakukan untuk kondisi operasi yang berbeda.

Diamati bahwa hasilnya bertentangan dengan persepsi umum efisiensi pembakaran rendah dan emisi CO tinggi yang terkait dengan api berpilin, api pemintalan frekuensi tinggi ini menyebabkan pembakaran sempurna dengan hampir nol emisi CO.

Kwon, dkk. (1996) melakukan pengamatan terhadap api *spinning* dan mengemukakan bahwa faktor pengontrol dari api *spinning* adalah suhu awal pencampuran, tingkat ekspansi dan kehilangan panas. Campuran pada keadaan kaya mengakibatkan api X terbentuk jika dilihat dengan mata telanjang namun berbentuk api tunggal dengan menggunakan kamera CCD dengan kecepatan 1/500 s. Kehilangan panas akan meningkat seiring meningkatnya volume ruang bakar. Taywade, dkk. (2013) mengemukakan bahwa *spinning flame* terjadi dengan dan tanpa adanya resirkulasi panas pada berbagai rasio ekuivalen. Pada frekuensi 100-150 api X baru terbentuk. Suhu dinding meningkat dengan meningkatnya kecepatan aliran nyala. Adanya resirkulasi panas membantu meningkatkan temperatur dinding sekitar 100 – 400 K.

Xu dan Ju (2007) juga melakukan penelitian pada nyala api bermassa metana dan propana dengan udara dalam saluran *divergen mesoscale* yang diselidiki secara eksperimental dan teoritis. Penekanannya adalah dampak dari luas penampang variabel dan kopling dinding nyala pada transisi nyala api antara rezim yang berbeda dan onset ketidakstabilan api. Secara eksperimental, untuk pertama kalinya, api yang berpilin diamati dalam pembakaran *mesoscale* untuk campuran metana dan propanadengan udara dalam keadaan miskin dan kaya dalam berbagai rasio ekuivalen. Hasilnya menunjukkan bahwa untuk rasio kesetaraan tetap, ada laju aliran kritis, di atas api yang mulai berpilin. Frekuensi putaran kira-kira sebanding dengan kecepatan nyala. Juga ditemukan bahwa nyala pemintalan hanya terjadi setelah transisi dari rezim nyala api cepat untuk memperlambat rezim api. Pengamatan eksperimental dan analisis teoritis menyarankan bahwa terlepas dari besarnya campuran bilangan Lewis, kopling dinding nyala secara signifikan akan meningkatkan jumlah angka Lewis yang efektif dan mengarah pada mekanisme baru untuk mempromosikan ketidakstabilan difusi termal.

### 2.10 Hipotesa

Hipotesa dari penelitian ini adalah *Spinning flame* terjadi di tengah-tengah zona nyala api . Meningkatnya debit udara pada debit bahan bakar konstan menyebabkan nyala api menjauhi step dan meningkatkan temperatur api maupun dinding dan meeningkatkan debit bahan bakar pada debit udara konstan menyebabkan nyala api mendekati step dan temperatur api dan dinding juga bertambag. Peningkatan debit udara pada debit bahan bakar konstan menyebabkan emisi gas CO akan menurun dan pada peningkatan debit bahan bakar pada debit udara konstan maka emisi gas CO akan meningkat. Semakin besar sudut *spinning* maka gas CO akan menurun dan temperatur akan meningkat.

## BAB 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu metode yang dilakukan untuk mengamati pengaruh visualisasi karakteristik *spinning flame* terhadap temperatur hasil pembakaran dan kadar CO dengan menggunakan ruang bakar skala meso.

### 3.2 Tempat Pengambilan Data

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

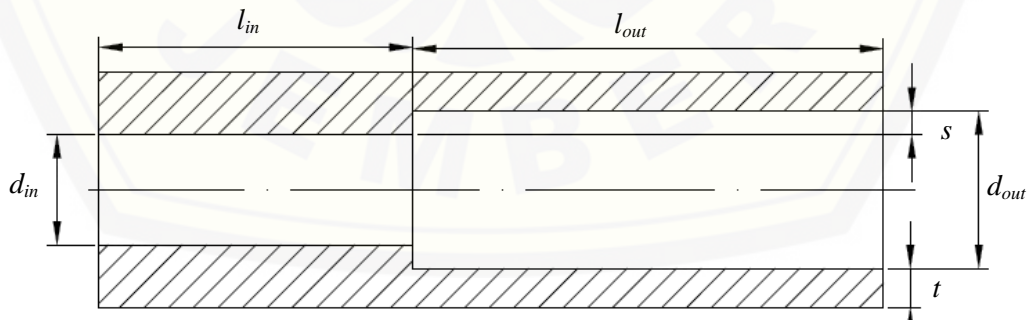
### 3.3 Alat dan Bahan Penelitian

#### 3.3.1 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan beserta fungsinya dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut :

##### 1) *Mesoscale Combustor*

*Mesoscale combustor* digunakan sebagai tempat terjadinya proses pembakaran. Bentuk *mesoscale combustor* yang digunakan pada penelitian ini seperti pada Gambar 3.1 dengan karakteristik tercantum dalam Tabel 3.1



Gambar 3. 1 Mesoscale Combustor



Keterangan :

$$l_{in} = 20 \text{ mm}$$

$$l_{out} = 10 \text{ mm}$$

$$d_{in} = 2,8 \text{ mm}$$

$$d_{out} = 4,7 \text{ mm}$$

$$s = 0,95 \text{ mm}$$

$$t = 1,15 \text{ mm}$$

## 2) *Combustor Holder*

*Combustor holder* digunakan sebagaiudukan dari *mixer* sehingga memudahkan proses penyambungan dengan *combustor*.

## 3) *Mixer*

*Mixer* digunakan sebagai tempat pencampuran antara udara dengan bahan bakar sehingga menghasilkan campuran homogen dan proses pembakaran lebih sempurna. *Mixer* memiliki dua saluran input yaitu sebagai masukan dari bahan bakar dan udara serta satu saluran output sebagai keluaran hasil pencampuran udara dan bahan bakar. Gambar 3.2 menunjukkan bentuk dari *mixer* yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3. 2 *Mixer* (Laboratorium Konversi Energi, UNEJ)

#### 4) Kompresor

Kompresor digunakan untuk menyuplai udara sebagai oksidator yang dialirkan pada proses pembakaran yang terjadi. Penggunaan kompresor lebih memudahkan karena dapat mengatur berapa tekanan yang digunakan. Kompresor yang digunakan adalah seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Kompresor udara (Laboratorium Konversi Energi, UNEJ)

Spesifikasi kompresor :

- Merk : Lakoni Imola 75
- Daya : 0,75 HP
- Daya Listrik : 500 Watt
- Kapasitas Tangki : 10 liter
- Kapasitas Aliran : 120 liter / menit
- Kecepatan Mesin : 2800 rpm
- Kapasitas Tekanan : 8 Bar

#### 5) *Pisco Tube*

*Pisco tube* digunakan sebagai saluran untuk udara dari kompresor dan bahan bakar dari tabung butana menuju *flowmeter* dan *mixer*.

#### 6) *Flowmeter*

*Flowmeter* digunakan untuk mengukur dan mengatur jumlah debit dari suatu aliran fluida. *Flowmeter* yang digunakan ada dua yaitu *flowmeter* untuk

mengukur debit udara dan debit bahan bakar yang digunakan. Gambar alat *flowmeter* ditunjukkan pada gambar 3.4 dimana *flowmeter* udara disebelah kanan dan *flowmeter* bahan bakar disebelah kiri.



Gambar 3. 4 Flowmeter bahan bakar ( kiri ) dan Flowmeter udara ( kanan )  
(Laboratorium Konversi Energi, UNEJ)

Spesifikasi flowmeter :

a. Flowmeter udara

- Merk : Kofloc
- Seri : RK-1250
- Jenis : Flowmeter udara
- Tekanan kerja : 0,1 Mpa
- Aliran maksimal : 500 ml/min
- Aliran minimal : 50 ml/min
- Skala terkecil : 5 ml/min

b. Flowmeter bahan bakar

- Merk : Kofloc
- Seri : RK-1250
- Jenis : Flowmeter propana dan butana
- Tekanan kerja : 0,1 Mpa

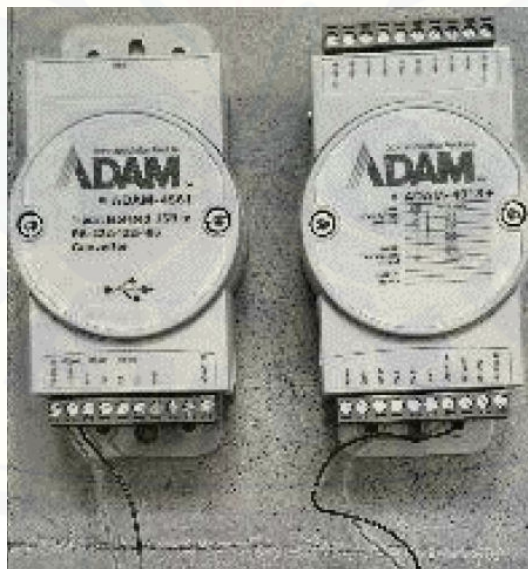
- Aliran maksimal : 20 ml/min
- Aliran minimal : 2 ml/min
- Skala terkecil : 0,5 ml/min

#### 7) *Thermocouple*

*Thermocouple* digunakan sebagai penghubung yang bersentuhan langsung dengan api pada bagian ujungnya dan dihubungkan ke *data logger* untuk mengetahui temperatur pembakaran yang terjadi pada ruang bakar. *Thermocouple* yang digunakan adalah tipe-K yang dapat digunakan untuk pengukuran temperatur hingga 1500°C. Pengukuran dilakukan dengan cara memasukkan *thermocouple* kedalam ruang bakar hingga menyentuh nyala api.

#### 8) Data Logger

Data logger berfungsi untuk menyimpan data dari hasil suatu percobaan atau pengukuran yang menerjemahkan data dari hasil sensor *thermocouple* yang mengukur satuan temperatur ke dalam bentuk grafik. Data logger membutuhkan converter sebelum kemudian terhubung dengan laptop. Data logger dan converter ditunjukkan oleh gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Converter (kiri) dan data logger (kanan) (Laboratorium Konversi Energi, UNEJ)

Spesifikasi data logger:

- Merk : ADAM 4018+ (data logger) dan ADAM 4561 (converter)
- Konsumsi daya : 0,8 Watt @ 10~30 VDC
- Saluran : 8 channel
- Tipe input : Thermocouple, mA
- Voltage :  $\pm 15$  mV

#### 9) Kamera

Kamera digunakan sebagai alat untuk mengambil gambar dari visualisasi nyala api pada ruang bakar. Kamera yang digunakan adalah kamera DSLR (*Digital Single Lens Reflex*) agar hasil yang didapat memiliki kualitas gambar yang baik.

#### 10) Regulator Butana

Regulator butana adalah alat yang digunakan untuk mengatur debit bahan bakar dan tekanan yang dialirkan menuju flowmeter bahan bakar dan sebagai *safety* agar tidak menimbulkan kebocoran.

#### 11) Sensor TGS2442

Sensor TGS2442 berfungsi untuk mendeteksi Karbon Monoksida (CO) dari sisa hasil pembakaran. Gambar 3.6 menunjukkan bentuk dari TGS2442.



Gambar 3. 6 Sensor TGS2442 (Laboratorium Konversi Energi, UNEJ)

#### 12) Lampu LED

Lampu led digunakan dalam pengoperasian sensor yang berfungsi sebagai penanda dalam proses pengambilan data oleh sensor.

### 13) Arduino Uno

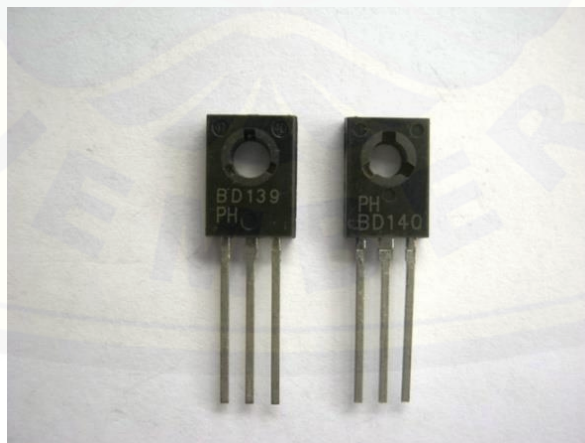
Arduino uno digunakan sebagai *microcontroller* untuk mengontrol pengambilan data dari sensor TGS24442. Arduino uno ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Arduino Uno (Laboratorium Konversi Energi, UNEJ)

### 14) Transistor BD139 dan BD140

Transistor BD139 dan BD140 digunakan sebagai penguat, pemutus dan penyambung, stabilisasi tegangan pada penghubung antara komponen dalam rangkaian sensor. Transistor memiliki 3 terminal yaitu basis (B), emitor (E) dan Collector (C). Gambar 3.8 menunjukkan transistor yang digunakan.



Gambar 3. 8 Transistor BD139 dan BD140 (Laboratorium Konversi Energi, UNEJ)

### 15) Project Board

*Project board* digunakan sebagai penghubung antar komponen-komponen yang saling berhubungan sehingga mempermudah perangkaian, karena dengan menggunakan project board tidak memerlukan proses menyolder.

### 16) Software Arduino 1.6.11

*Software arduino* digunakan untuk membuat suatu perintah atau program berupa script untuk arduino nano dan untuk memunculkan data dari sensor gas CO melalui serial monitor.

### 17) Kabel Jumper

Kabel *jumper* digunakan sebagai penghubung antara komponen yang ditancapkan di Project board.

### 18) Thermogun

*Thermogun* digunakan untuk mengetahui temperatur dari dinding ruang bakar.

### 19) Software AdamApax

*Software* ini digunakan untuk memonitoring temperature api yang di *coupling* dengan *data logger*.

## 3.3.2 Bahan

### 1) Gas Butana

Pada penelitian kali ini bahan bakar yang digunakan adalah menggunakan gas butane. Gambar 3.9 berikut menampilkan tabung gas butana yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3. 9 Tabung gas butana

## 2) Seal Tape

*Seal tape* digunakan untuk mengisolasi sambungan antara *combustor* dengan *combustor holder* agar tidak menyebabkan kebocoran saat penyambungan. Gambar 3.10 menampilkan *seal tape* yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3. 10 Seal tape

## 3) Korek api

Korek api digunakan sebagai pemantik proses pembakaran yang terjadi di ruang bakar. Gambar 3.11 menunjukkan korek api yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3. 11 Korek api



### **3.4 Variabel Penelitian**

#### **3.4.1 Variabel Bebas**

Variabel bebas adalah parameter penelitian yang divariasikan dalam penelitian dan faktor yang mempengaruhi hasil penelitian. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- 1) Debit bahan bakar.
- 2) Debit udara.

#### **3.4.2 Variabel Terikat**

Variabel terikat adalah parameter penelitian yang hasilnya dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

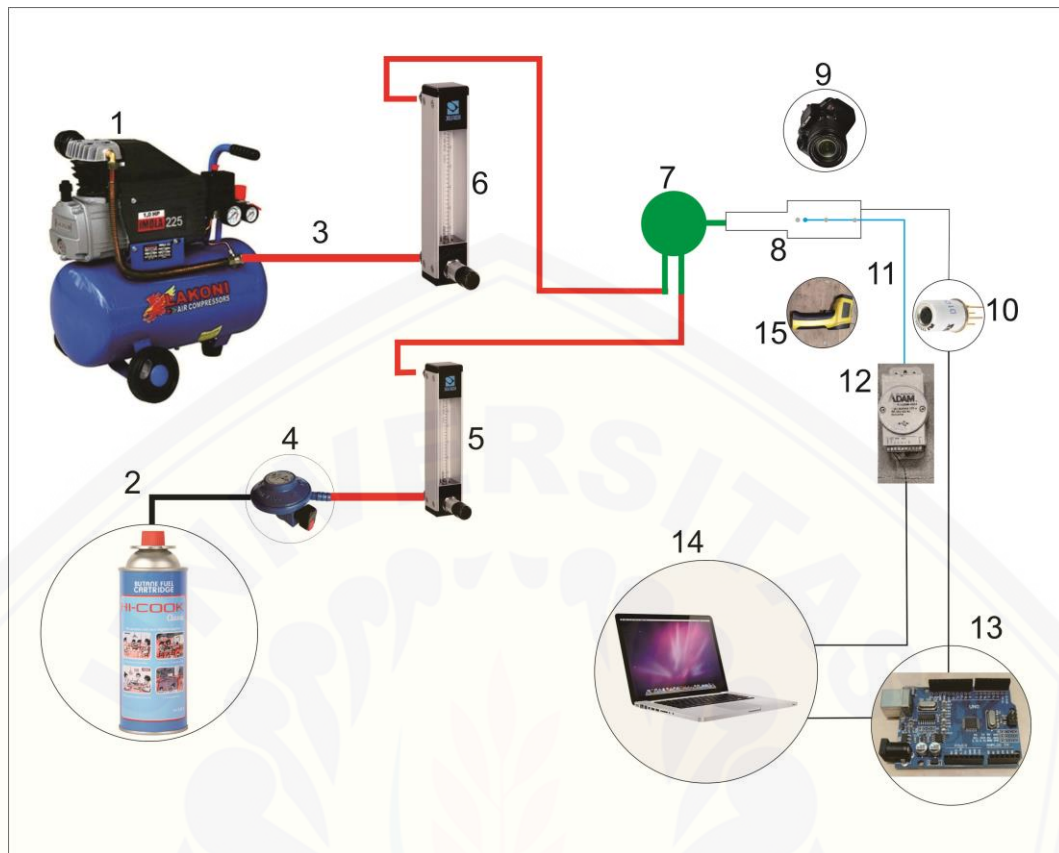
- 1) Rentang nyala api
- 2) Temperatur api dan dinding
- 3) Visualisasi nyala api
- 4) Emisi gas CO

#### **3.4.3 Variabel Control**

Variabel control adalah variabel kendali sehingga hubungan antara variabel bebas dan terikat tetap konstan. Variabel control dalam penelitian ini adalah kelembaban udara.

### **3.5 Skema Rangkaian Penelitian Karakterisasi Spinning Flame**

Skema rangkaian pada penelitian kali ini ditampilkan pada Gambar 3.10 sebagai berikut.



Gambar 3. 12 Skema penelitian

Keterangan :

- |                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1) Kompresor                    | 9) Kamera                   |
| 2) Butana                       | 10) Sensor TGS2442          |
| 3) <i>Pisco tube</i>            | 11) <i>Thermocouple</i>     |
| 4) Regulator                    | 12) Data Logger             |
| 5) <i>Flowmeter</i> bahan bakar | 13) <i>Micro controller</i> |
| 6) <i>Flowmeter</i> udara       | 14) Laptop                  |
| 7) <i>Mixer</i>                 | 15) <i>Thermogun</i>        |
| 8) <i>Meso combustor</i>        |                             |

Diatas adalah gambar skema penelitian yang digunakan dalam penelitian ini. Bahan bakar yang digunakan adalah butana. Pada proses awal, bahan bakar disuplai dari tabung butana dan udara disuplai dari kompresor, selanjutnya akan menuju ke *flowmeter* dan dilakukan pengaturan debit yang akan digunakan lalu

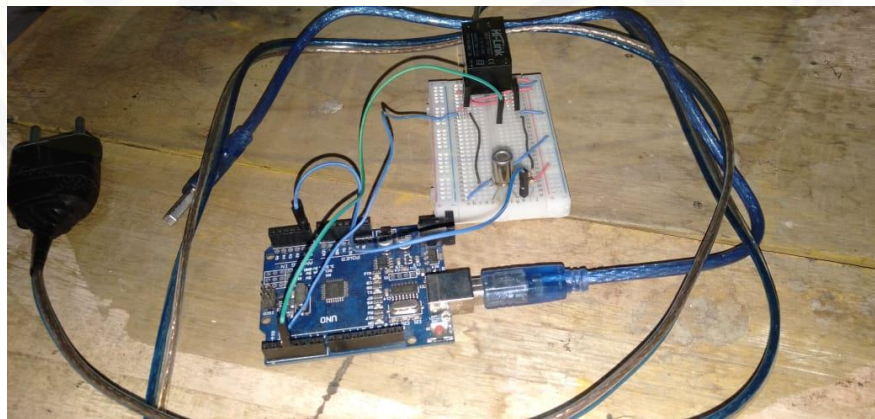
akan masuk ke *mixer* dan terjadi proses pencampuran homogen antara bahan bakar dengan udara. Campuran udara dan bahan bakar selanjutnya akan masuk kedalam ruang bakar dan dinyalakan dengan pemantik yaitu korek api.

Proses pengambilan data pada karakteristik nyala api yang pertama dilakukan dengan pengambilan visualisasi nyala api dengan menggunakan kamera DSLR yang diletakkan disamping ruang bakar dengan jarak 15 cm. Data visualisasi nyala api kemudian diolah untuk menentukan jarak nyala api ke step dan sudut *spinning flame*. Proses pengambilan data temperatur api yaitu dengan menggunakan termokopel yang dihubungkan dengan *data logger*. Hasil pengambilan data dimunculkan di laptop dengan mengambil temperatur selama 10 detik dihitung dari titik stabilnya lalu di rata-rata dengan 3 kali pengulangan, sedangkan temperatur dinding diambil menggunakan *thermogun*. Pengambilan data gas CO yaitu dengan menggunakan *microcontroller* dan sensor TGS2442 sebagai sensor pendeteksi. Data hasil sensor CO dimunculkan melalui serial monitor pada *software* arduino.

### 3.6 Prosedur Penelitian

Dalam pengambilan data hasil penelitian dalam proses pembakaran di ruang bakar skala meso, dilakukan dengan langkah sebagai berikut.

- 1) Menyiapkan keseluruhan peralatan dan bahan penelitian yang akan diujikan.
- 2) Merangkai rangkaian sensor emisi gas CO seperti pada Gambar 3.11 sebagai berikut.



Gambar 3. 13 Rangkaian sensor emisi gas CO

- 3) Merangkai *thermocouple* pada *adam Data Logger* seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.12 sebagai berikut.



Gambar 3. 14 Rangkaian *thermocouple*

- 4) Merangkai seluruh alat dan bahan sesuai dengan Gambar 3.10.
- 5) Pastikan selang bahan bakar dan udara tidak terjadi kebocoran.
- 6) Nyalakan kompresor dan buka tuasnya lalu *setting* debit udara pada *flowmeter* udara dengan mengoperasikan katup *flowmeter* hingga bola pejal penunjuk debit skala paling atas
- 7) Buka regulator butana agar bahan bakar mengalir lalu *setting* debit bahan bakar pada *flowmeter* bahan bakar hingga bola pejal menunjuk debit dengan skala paling atas.
- 8) Memulai reaksi pembakaran pada ruang bakar dengan memantik korek api pada *nozzle* ruang bakar.
- 9) Ketika api sudah menyala, lakukan pengaturan debit bahan bakar dari debit terendah hingga dari nyala api hingga debit tertinggi hingga tidak ada lagi nyala api yang muncul di dalam ruang bakar.
- 10) Lakukan pengamatan kestabilan terbentuknya nyala api hingga mencapai keadaan stasioner.
- 11) Visualisasikan hasil nyala api dengan menggunakan kamera DSLR.
- 12) Pengambilan data temperatur api menggunakan *thermocouple type-K* yang dilakukan selama 10 detik dimulai dari titik stabilnya dan dirata-rata dengan 3 kali pengulangan.

- 13) Pengambilan data temperatur dinding menggunakan *thermogun* yang ditembakkan pada dinding dimana api menyala dengan 3 kali pengulangan.
- 14) Pengambilan data gas CO menggunakan sensor TGS2442 yang dikontrol dengan Arduino uno. Perintah program yang digunakan ditampilkan pada Gambar 3.9 sebagai berikut.



```
sket_coba$
#define pinSensor A0 // mendefinisikan bahwa pin yang digunakan
                        // untuk membaca sensor adalah pin A0
int senCO = 0;

void setup()
{
  Serial.begin (9600);
  pinMode (2, OUTPUT); //heater
  pinMode (3, OUTPUT); //check point
}

long RL = 10000; //hambatan yang digunakan di sensor
long Ro = 1610; //

void loop()
{
  GetCO ();
  //Serial.print ("sensorvalue : ");
  //Serial.println (senCO); //

  int sensorvalue = analogRead (pinSensor); // membaca nilai ADC dari sensor
  float Vout= sensorvalue*5.0/1024;
  //Serial.print ("Vout : ");
  //Serial.print (Vout);
  //Serial.println (" volt");
  //Serial.println ();

  float Ra = ( 5.0 * RL / Vout) - RL;
```

Gambar 3. 15 Script sensor TGS2442

- 15) Pengolahan data visualisasi nyala api untuk mencari jarak step nyala api dan sudut *spinning flame* menggunakan *software Autocad*.
- 16) Buat laporan penelitian.

### 3.7 Penyajian Data Penelitian

Data yang dihasilkan dari proses penelitian pengaruh debit bahan bakar dan debit udara terhadap rasio ekuivalen dan kecepatan reaktan diolah menggunakan *software* Microsoft Excell 2010. Hasil data tersebut ditampilkan dalam bentuk tabel yang ditunjukkan pada Tabel 3.2 sampai Tabel 3.4 dan bentuk grafik.

Tabel 3. 1 Data zona *spinning flame*

No	$Q_f$ FM (mL/min)	$Q_f$ Aktual (mL/min)	$Q_a$ FM (mL/min)	$Q_a$ Aktual (mL/min)	$V_{reaktan}$ (cm/s)	$\phi$

Tabel 3. 2 Data temperatur api dan dinding *spinning flame*

No	$Q_f$ FM (ml/min)	$Q_f$ Aktual (ml/min)	$Q_a$ FM (ml/min)	$Q_a$ Aktual (ml/min)	$T_{Api}$ (°C)	$T_{Dinding}$ (°C)

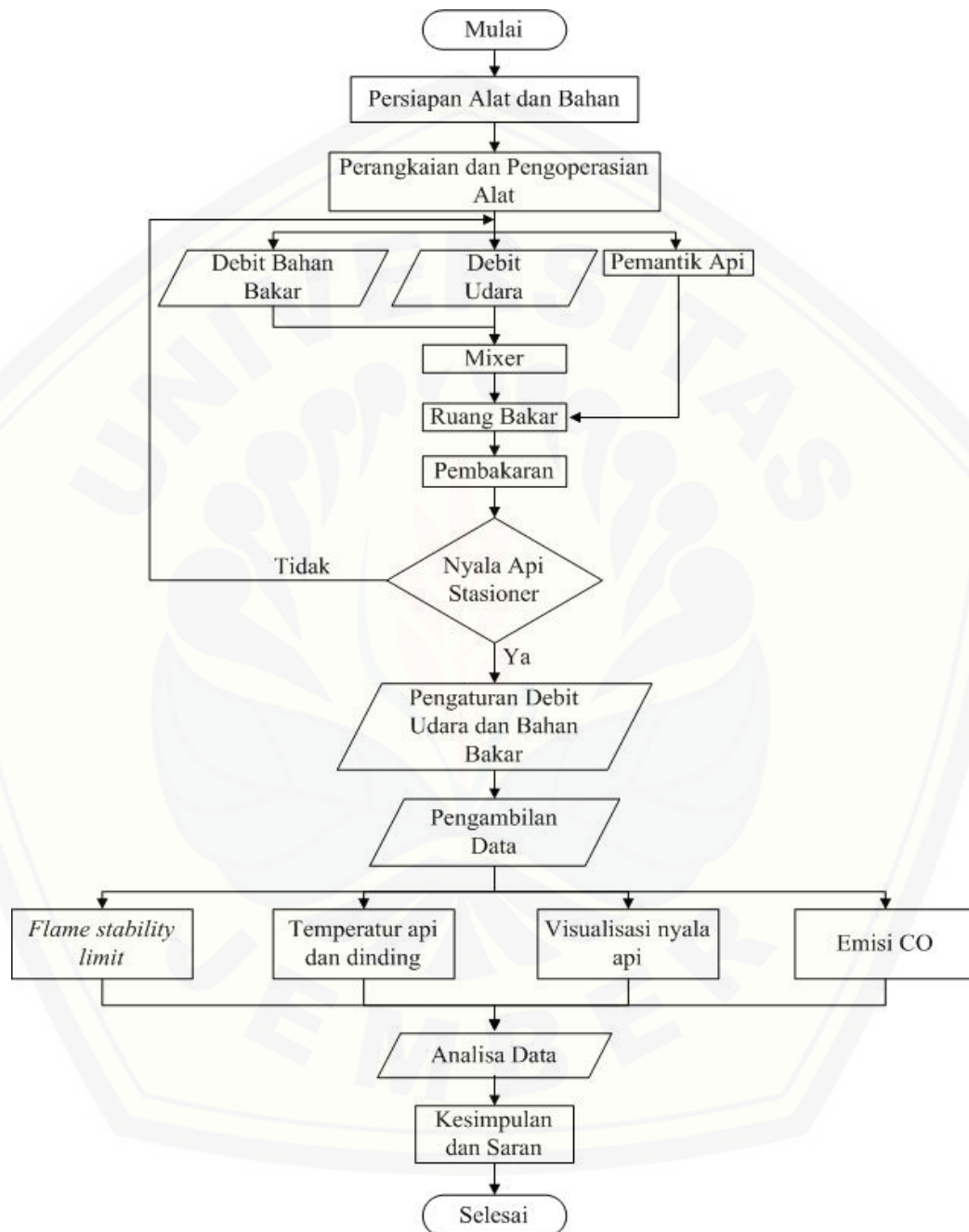
Tabel 3. 3 Data rata-rata sudut nyala api *spinning flame*

No	$Q_f$ (mL/min)	Sudut (°)

Tabel 3. 4 Emisi gas CO

No	$Q_f$ (ml/min)	$Q_a$ (ml/min)	Gas Concentration (PPM)

### 3.8 Diagram Alir Penelitian Karakterisasi Spinning Flame pada Mesoscale Combustor



Gambar 3. 16 Diagram alir

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan maka didapat kesimpulan sebagai berikut.

- 1) Daerah nyala api *spinning* terjadi pada interval debit bahan bakar,  $Q_f = 4,5 - 9,5$  ml/min.
- 2) Temperatur api *spinning* dan dinding *combustor* dipengaruhi oleh jarak nyala api *spinning* terhadap step. Interval temperatur api *spinning* ( $T_{Api}$ ) dan dinding *combustor* ( $T_{dinding}$ ) cenderung bertambah besar dengan penambahan jarak api terhadap step. Pengecualian terjadi pada debit bahan bakar,  $Q_f = 9,5$  ml/min untuk debit udara,  $Q_a = 310$  ml/min, hal ini disebabkan karena terjadi *flashback* pada nyala api. Temperatur api *spinning* dan dinding *combustor* tertinggi terjadi pada debit bahan bakar  $Q_f = 9,5$  ml/min untuk debit udara  $Q_a = 325$  ml/min, dengan rasio ekuivalen,  $\phi = 0,95$  yaitu  $T_{api} = 875^\circ\text{C}$  dan  $T_{dinding} = 175,7^\circ\text{C}$ .
- 3) Penambahan debit bahan bakar cenderung meningkatkan emisi gas CO, sebaliknya penambahan debit udara akan menurunkan emisi gas CO. Emisi gas CO tertinggi terjadi pada nyala api *spinning* dengan debit bahan bakar,  $Q_f = 8$  ml/min untuk debit udara,  $Q_a = 270$  ml/min dengan emisi gas CO yang dihasilkan yaitu 41,93 ppm.

### 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, untuk mengembangkan penelitian ini maka disarankan untuk:

- 1) Penelitian selanjutnya tidak hanya membahas tentang zona nyala api *spinning* saja namun semua jenis nyala api yang terjadi pada proses pembakaran.
- 2) Emisi gas yang diamati tidak hanya CO saja namun juga membahas Hidro Carbon (HC)
- 3) Penelitian selanjutnya diharapkan menggunakan oksidator dari tabung oksigen.



- 4) Melakukan perbandingan antara *mesoscale combustion* dan *macroscale combustion* terhadap kadar CO yang dihasilkan dengan bahan bakar dan oksidator yang sama.



**DAFTAR PUSTAKA**

- Chou S. K., Yang W. M., Chua K. J., Li J., dan Zhang K. L. 2011. Development of Micro Power Generators – A Review. *Applied Energy*. Vol. (88):1-16.
- Colangelo G., Risi A. d., dan Laforgia D. 2006. Experimental Study of A Burner With High Temperature Heat Recovery System for TVP Applications. *Energy Conversion and Management*. Vol. (47):1196-1206.
- Deshpande A. A., dan Kumar S. 2013. On the Formation of Spinning Flames and Combustion Completeness for Premixed Fuel-air Mixtures in Stepped Tube Microcombustors. *Applied Thermal Engineering*. Vol. (51):91-101.
- Fan A., Minaev S., Kumar S., Liu W., dan Maruta K. 2008. Regime Diagrams and Characteristics of Flame Patterns in Radial Microchannels with Temperature Gradients. *Combustion and Flame*. Vol. (153):479-489.
- Faramarzpour H., Mazaheri K., dan Alipoor A. 2018. Effect of Backward Facing Step on Radiation Efficiency in a Micro Combustor. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol. (132):129-136.
- Fernandez-Pello A. C. 2002. Micropower generation using combustion: Issues and approaches. *Proceedings of the Combustion Institute*. Vol. (29):883-899.
- Ganesan V. 2012. *IC Engines*. Fourth Edition. New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited.
- Harun D. 2016. *Simulator Monitoring Dan Pembersih Gas Karbon Monoksida Pada Ruang Berbasis Mikrokontroler ATmega8535*. Yogyakarta: Politeknik Muhammadiyah Yogyakarta.
- Ju Y., dan Choi C. W. 2003. An Analysis of Sub-limit Flame Dynamics Using Opposite Propagating Flames in Mesoscale Channels. *Combustion and Flame*. Vol. (133):483-493.
- Ju Y., dan Maruta K. 2011. *Microscale Combustion: Technology Development and Fundamental Research*. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. (37):669-715.
- Ju Y., dan Xu B. 2005. Theoretical and Experimental Studies on Mesoscale Flame Propagation and Extinction. *Proceedings of the Combustion Institute*. Vol. (30):2445-2453.

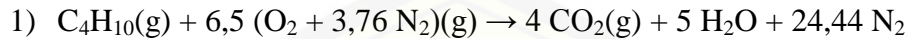
- Kwon M. J., Lee B. J., dan Chung S. H. 1996. An Observation of Near-Planar Spinning Premixed Flames in a Sudden Expansion Tube. *Combustion and Flame*. Vol. (105):180-188.
- Maruta K. 2010. Micro and mesoscale combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*. Vol. (33):125-150.
- Prabowo E. R. 2017. Karakteristik Distribusi Temperatur pada *Meso Combustor* dengan *Sudden Expansion*. Universitas Jember.
- Rohadi A. I. 2016. *Pengaruh Panjang Saluran Sudden Expansion Terhadap Karakteristik Pembakaran pada Meso-Scale Combustor*. Jember: Universitas Jember.
- Song K., Hao T., dan Xie H. 2018. Disturbance Rejection Control of Air–Fuel Ratio with Transport-Delay in Engines. *Control Engineering Practice*. Vol. (79):36 - 49.
- Taywade U. W., Deshpande A. A., dan Kumar S. 2013. Thermal Performance of a Micro Combustor with Heat Recirculation. *Fuel Processing Technology*. Vol. (109):179-188.
- Vican J., Gajdeczko B. F., Dryer F. L., Milius D. L., Aksay I. A., dan Yetter R. A. 2002. Development of a Microreactor as a Thermal Source for Microelectromechanical Systems Power Generation. *Proceedings of the Combustion Institute*. Vol. (29):909-916.
- Wan J., Fan A., Liu Y., Yao H., Liu W., dan Gou X. 2015. Experimental Investigation and Numerical Analysis on Flame Stabilization of CH<sub>4</sub>/Air Mixture in a Mesoscale Channel with Wall Cavities. *Combustion and Flame*. Vol. (162):1035-1045.
- Wan J., Fan A., Maruta K., Yao H., dan Liu W. 2012. Experimental and Numerical Investigation on Combustion Characteristics of Premixed Hydrogen/Air Flame in a Micro-Combustor with a Bluff Body. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. (37):19190-19197.
- Xu B., dan Ju Y. 2007. Experimental Study of Spinning Combustion in a Mesoscale Divergent Channel. *Proceedings of the Combustion Institute*. Vol. (31):3285–3292.

## LAMPIRAN

## Lampiran A. Perhitungan Data Penelitian

1. Perhitungan  $AFR_{stoikiometri}$ 

a. Diketahui :



2) Massa atom relatif (Ar)

$$C = 12 \text{ gram/mol}; H = 1 \text{ gram/mol}; O = 16 \text{ gram/mol}; N = 14 \text{ gram/mol}.$$

3)  $\rho_{udara}$  pada  $30^\circ C = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$ .4)  $\rho_{butana} = 0,002417 \text{ gram/cm}^3$ .

b. Ditanya :

$$AFR_{stoikiometri} = \dots?$$

c. Penyelesaian :

$$\begin{aligned}
 1) \text{ Massa bahan bakar} &= n \times Mr \\
 &= 1 \times Mr C_4H_{10} \\
 &= 1 \times (48+10) \\
 &= 58 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2) \text{ Massa udara} &= n \times Mr \\
 &= 6,5 (Mr O_2 + 3,76 Mr N_2) \\
 &= 6,5 (32 + 3,76 (28)) \\
 &= 6,5 \times 137,28 \\
 &= 892,32 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3) \text{ AFR}_{stoikiometri} &= \frac{\text{Massa udara}}{\text{Massa bahan bakar}} \\
 &= \frac{892,32}{58} \\
 &= 15,38
 \end{aligned}$$

2. Perhitungan  $AFR_{aktual}$ 

a. Diketahui :

1)  $\rho_{butana} = 0,002417 \text{ gram/cm}^3$

2)  $\rho_{udara} = 0,001205 \text{ gram/cm}^3$

3)  $Q_f = 6,02 \text{ ml/min}$

$$4) Q_a = 202,59 \text{ ml/min}$$

- b. Karena perbedaan fase antara bahan bakar dan udara, maka keduanya harus diubah terlebih dahulu menjadi massa alir ( $\dot{m}$ ).

$$1) \dot{m}_f = \rho_{butana} \times Q_f = 0,002417 \text{ gr/cm}^3 \times 6,02 \text{ ml/min} = 0,01455034 \text{ gr/min}$$

$$2) \dot{m}_a = \rho_{udara} \times Q_a = 0,001205 \text{ gram/cm}^3 \times 202,59 \text{ ml/min} = 0,24387995 \text{ gr/min}$$

- c. Nilai  $AFR_{actual}$

$$AFR_{actual} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$$

$$AFR_{aktual} = \frac{0,24387995 \text{ gr/min}}{0,01455034 \text{ gr/min}} = 16,77$$

### 3. Perhitungan rasio equivalen ( $\phi$ )

- a. Diketahui :

$$1) AFR \text{ aktual} = 16,77$$

$$2) AFR \text{ stoikiometri} = 15,38$$

- b. Ditanya :

$$\phi = \dots\dots?$$

- c. Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{AFR_{stoikiometri}}{AFR_{aktual}} \\ &= \frac{15,38}{16,76} \\ &= 0,92 \end{aligned}$$

### 4. Perhitungan kecepatan total reaktan (v)

- a. Diketahui

$$1) Q_a = 202,59 \text{ ml/min}$$

$$2) Q_f = 6,02 \text{ ml/min}$$

$$3) \rho_{butana} = 0,002417 \text{ gram/cm}^3$$

$$4) D_{in \text{ Combustor}} = 2,8 \text{ mm}$$

5)  $r_{in \text{ Combustor}} = 1,4 \text{ mm}$

b. Ditanya

$$v = \dots\dots?$$

c. Penyelesaian

$$\begin{aligned} v_{reaktan} &= \frac{\frac{Q_f + Q_a}{60}}{\frac{3,14 \times r^2}{100} \text{ cm}^2} \\ &= \frac{6,02 + 202,59 \text{ ml/min}}{\frac{60}{\frac{3,14 \times 1,4^2}{100} \text{ cm}^2}} \\ &= 56,48 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

### 5. Perhitungan sensor value

a. Diketahui :

1) Bit pin : 10 bits :  $2^{10} = 1024$

2)  $V_{out} = 3,19 \text{ V}$

3)  $V_c = 5 \text{ V}$

b. Dicari :

$$\text{Sensor value} = \dots\dots?$$

c. Penyelesaian :

$$\begin{aligned} V_{out} &= \frac{\text{sensor value} \times V_c}{2^n} \\ \text{sensor value} &= \frac{1024 \times 3,19 \text{ V}}{5 \text{ V}} \\ &= 653,312 \end{aligned}$$

### 6. Perhitungan ratio sensor CO

a. Diketahui :

1)  $R_o = 1610$

2)  $R_s = 5659,7$

b. Dicari :

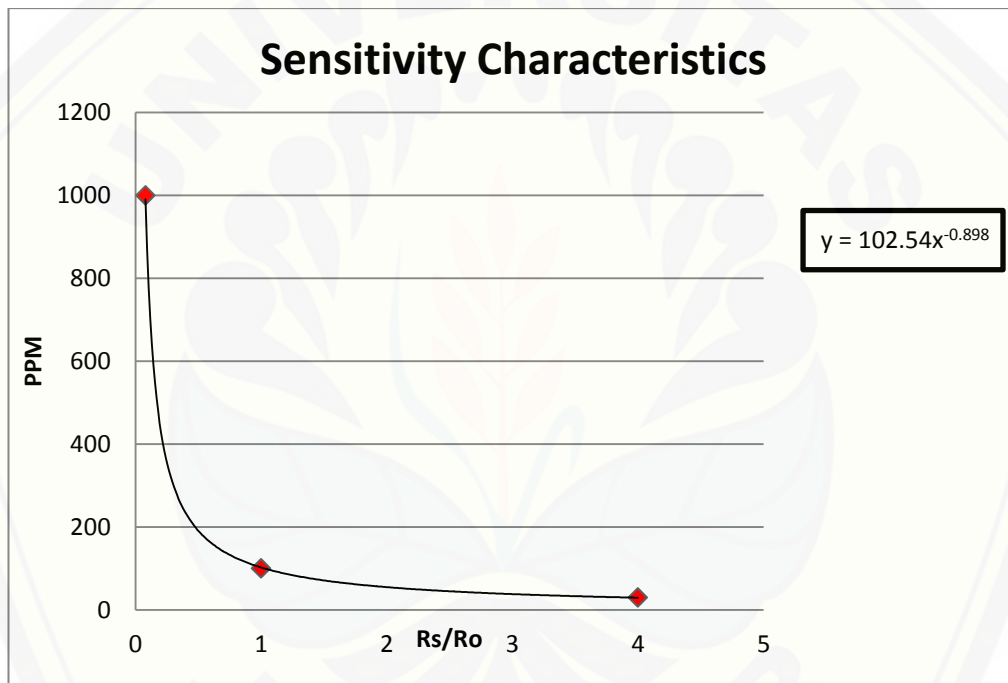
$$R_s/R_o = \dots\dots?$$

c. Penyelesaian :

$$\begin{aligned} R_s/R_o &= \frac{5659,7}{1610} \\ &= 3,52 \end{aligned}$$

### 7. Perhitungan gas concentration (PPM)

Berdasarkan data yang ada pada *datasheet* dan sudah diolah pada Microsoft Excel, maka di dapat rumus persamaan untuk mencari PPM sebagai berikut.



a. Dicari :

$$\text{PPM} = \dots?$$

b. Penyelesaian :

$$\begin{aligned} y &= 102.54x^{-0.898} \\ &= 102.54 \times 3,52^{-0.898} \\ &= 33,16 \text{ ppm} \end{aligned}$$

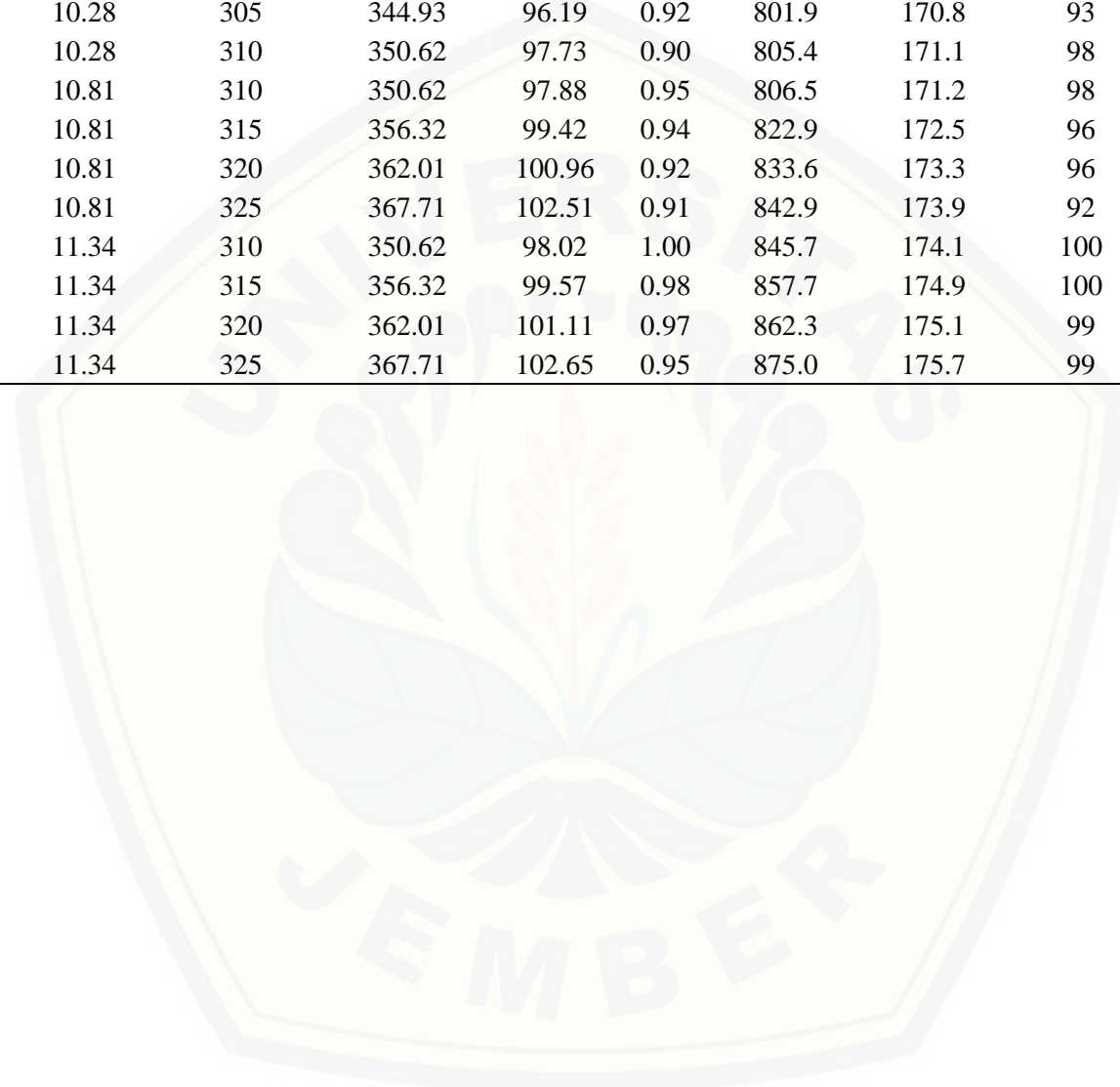
## Lampiran B. Data Penelitian

No	Q <sub>f</sub> Flowmeter (ml/min)	Q <sub>f</sub> Aktual (ml/min)	Q <sub>a</sub> Flowmeter (ml/min)	Q <sub>a</sub> Aktual (ml/min)	v (cm/s)	φ	T <sub>Api</sub> (°C)	T <sub>Dinding</sub> (°C)	Sudut Api (°)	Jarak (mm)	Gas CO (PPM)
1	4.5	6.02	185	208.22	58.02	0.89	592.6	139.1	46	2.35	33.22
2	4.5	6.02	190	213.92	59.56	0.87	600.8	140.8	54	2.87	32.64
3	4.5	6.02	195	219.61	61.10	0.85	605.8	141.8	62	3.67	32.19
4	4.5	6.02	200	225.31	62.65	0.82	613.0	143.3	56	4.58	31.60
5	4.5	6.02	205	231.01	64.19	0.80	613.8	143.5	62	5.89	31.18
6	5.0	6.55	185	208.22	58.16	0.97	600.1	140.7	37	1.79	36.62
7	5.0	6.55	190	213.92	59.71	0.95	605.2	141.7	49	2.09	36.34
8	5.0	6.55	195	219.61	61.25	0.92	613.2	143.4	57	2.48	35.78
9	5.0	6.55	200	225.31	62.79	0.90	632.3	147.1	59	2.81	35.11
10	5.0	6.55	205	231.01	64.33	0.88	639.5	148.5	57	3.75	34.57
11	5.0	6.55	210	236.70	65.88	0.85	644.3	149.4	53	4.76	33.89
12	5.0	6.55	215	242.40	67.42	0.83	653.4	151.0	65	5.79	33.31
13	5.0	6.55	220	248.09	68.96	0.81	658.6	151.9	62	6.57	32.78
14	5.0	6.55	225	253.79	70.50	0.80	664.7	153.0	58	7.75	32.18
15	5.5	7.09	195	219.61	61.39	1.00	616.6	144.1	50	2.14	39.36
16	5.5	7.09	200	225.31	62.93	0.97	636.1	147.9	53	2.25	38.69
17	5.5	7.09	205	231.01	64.48	0.95	643.9	149.3	60	2.56	38.01
18	5.5	7.09	210	236.70	66.02	0.92	645.9	149.7	66	2.84	37.28
19	5.5	7.09	215	242.40	67.56	0.90	662.8	152.7	68	3.50	36.73
20	5.5	7.09	220	248.09	69.11	0.88	672.3	154.2	74	3.97	35.67
21	5.5	7.09	225	253.79	70.65	0.86	680.7	155.6	70	4.77	35.29
22	5.5	7.09	230	259.49	72.19	0.84	683.5	156.1	60	5.82	34.69



23	5.5	7.09	235	265.18	73.73	0.82	694.6	157.8	72	6.83	34.06
24	5.5	7.09	240	270.88	75.28	0.81	699.2	158.5	67	7.70	33.42
25	6.0	7.62	215	242.40	67.71	0.97	664.2	152.9	65	2.94	40.04
26	6.0	7.62	220	248.09	69.25	0.95	696.6	158.2	65	3.34	39.25
27	6.0	7.62	225	253.79	70.79	0.93	704.6	159.3	72	4.03	38.52
28	6.0	7.62	230	259.49	72.33	0.91	705.5	159.5	77	4.62	37.87
29	6.0	7.62	235	265.18	73.88	0.89	707.5	159.7	75	5.35	37.18
30	6.0	7.62	240	270.88	75.42	0.87	711.1	160.3	78	6.19	36.45
31	6.0	7.62	245	276.57	76.96	0.85	713.0	160.5	71	7.20	35.71
32	6.0	7.62	250	282.27	78.50	0.83	714.2	160.7	75	8.35	34.96
33	6.5	8.15	235	265.18	74.02	0.95	707.9	159.8	76	5.22	40.21
34	6.5	8.15	240	270.88	75.56	0.93	714.2	160.7	73	5.48	39.46
35	6.5	8.15	245	276.57	77.11	0.91	716.6	161.0	81	5.79	38.39
36	6.5	8.15	250	282.27	78.65	0.89	718.6	161.3	80	5.82	37.91
37	6.5	8.15	255	287.97	80.19	0.87	723.4	162.0	78	6.37	37.11
38	6.5	8.15	260	293.66	81.73	0.86	727.6	162.5	80	7.68	36.65
39	7.0	8.68	245	276.57	77.25	0.97	734.5	163.4	82	4.59	41.59
40	7.0	8.68	250	282.27	78.79	0.95	745.2	164.8	87	5.10	40.81
41	7.0	8.68	255	287.97	80.33	0.93	752.3	165.7	82	6.54	39.97
42	7.5	9.21	260	293.66	82.02	0.97	763.4	167.0	81	6.39	41.88
43	7.5	9.21	265	299.36	83.56	0.95	765.2	167.2	82	7.03	40.93
44	7.5	9.21	270	305.05	85.11	0.93	770.1	167.7	84	7.94	40.06
45	8.0	9.74	275	310.75	86.79	0.97	771.9	167.9	87	6.43	41.93
46	8.0	9.74	280	316.45	88.34	0.95	800.3	170.7	84	7.22	40.95
47	8.0	9.74	285	322.14	89.88	0.93	800.3	170.7	88	7.75	39.97
48	8.5	10.28	300	339.23	94.65	0.93	801.3	170.8	96	7.44	39.04

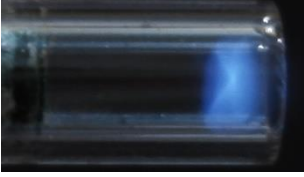




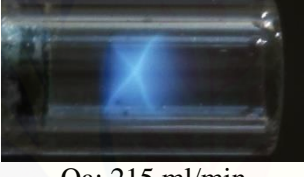
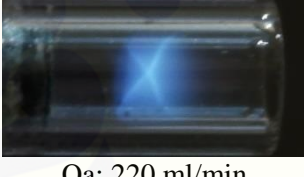
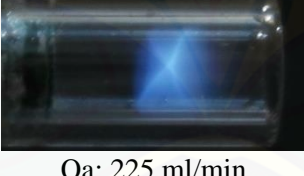
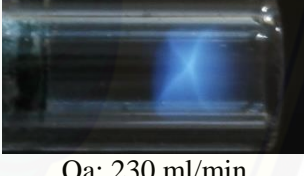
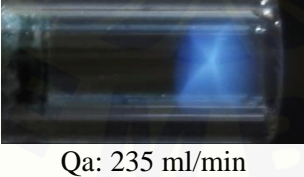
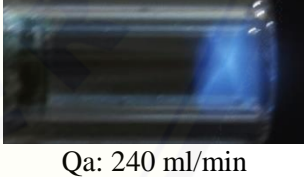
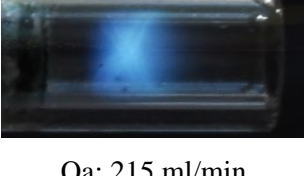
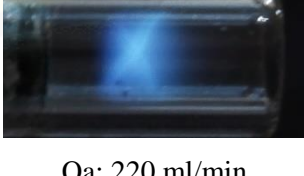
49	8.5	10.28	305	344.93	96.19	0.92	801.9	170.8	93	8.39	38.29
50	8.5	10.28	310	350.62	97.73	0.90	805.4	171.1	98	9.06	37.32
51	9.0	10.81	310	350.62	97.88	0.95	806.5	171.2	98	7.83	38.94
52	9.0	10.81	315	356.32	99.42	0.94	822.9	172.5	96	8.34	38.51
53	9.0	10.81	320	362.01	100.96	0.92	833.6	173.3	96	8.96	37.47
54	9.0	10.81	325	367.71	102.51	0.91	842.9	173.9	92	9.60	36.33
55	9.5	11.34	310	350.62	98.02	1.00	845.7	174.1	100	7.82	41.76
56	9.5	11.34	315	356.32	99.57	0.98	857.7	174.9	100	7.62	40.62
57	9.5	11.34	320	362.01	101.11	0.97	862.3	175.1	99	7.66	39.52
58	9.5	11.34	325	367.71	102.65	0.95	875.0	175.7	99	8.13	38.28

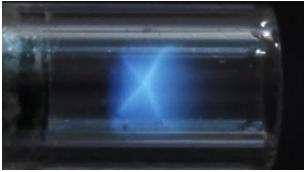
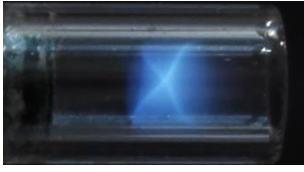
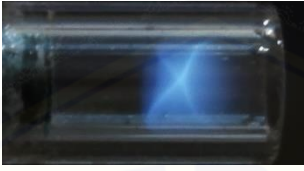
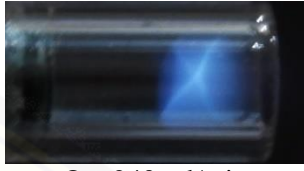




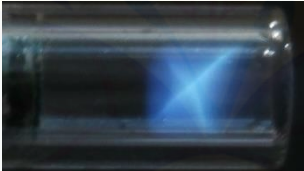
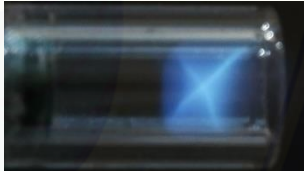
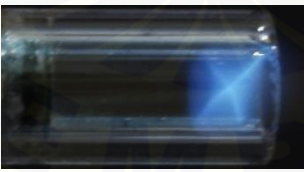
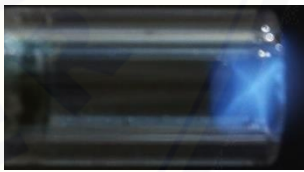
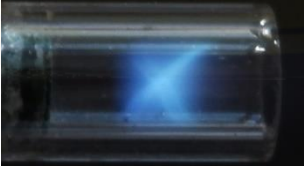
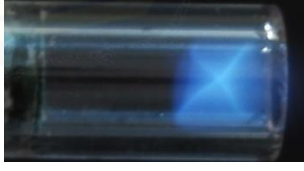



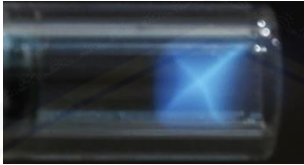
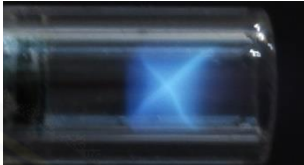
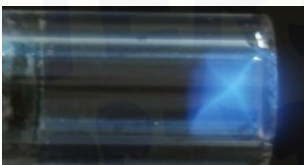

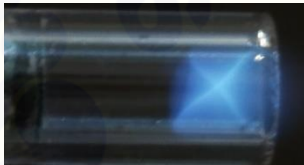
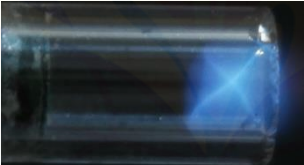
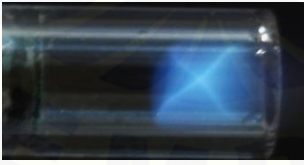
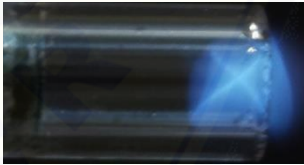
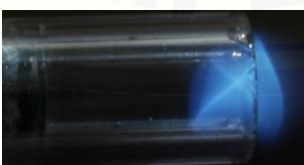
## Lampiran C. Foto Nyala Api Spinning

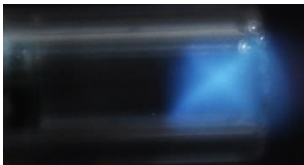
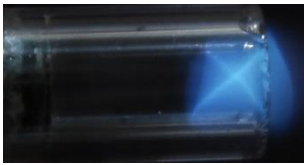
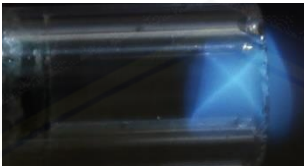
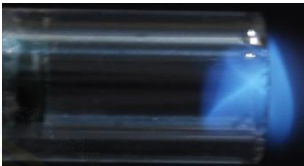
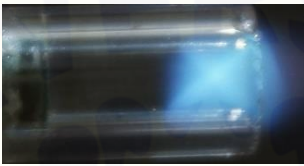
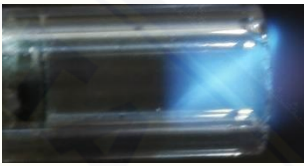
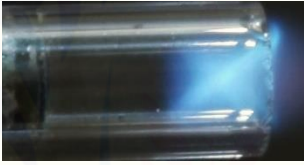
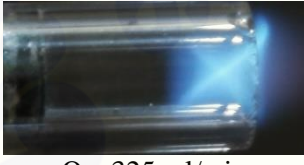
Tabel 1. Foto nyala api *spinning*

$Q_f$ (ml/min)	Foto Nyala Api <i>Spinning</i>	
4,5 ml/min	 <p data-bbox="644 629 834 663">Qa: 185 ml/min</p>	 <p data-bbox="1067 629 1257 663">Qa: 190 ml/min</p>
	 <p data-bbox="644 842 834 875">Qa: 195 ml/min</p>	 <p data-bbox="1067 842 1257 875">Qa: 200 ml/min</p>
	 <p data-bbox="644 1061 834 1095">Qa: 205 ml/min</p>	
5 ml/min	 <p data-bbox="644 1279 834 1312">Qa: 185 ml/min</p>	 <p data-bbox="1067 1279 1257 1312">Qa: 190 ml/min</p>
	 <p data-bbox="644 1491 834 1525">Qa: 195 ml/min</p>	 <p data-bbox="1067 1491 1257 1525">Qa: 200 ml/min</p>
	 <p data-bbox="644 1704 834 1738">Qa: 205 ml/min</p>	 <p data-bbox="1067 1704 1257 1738">Qa: 210 ml/min</p>
	 <p data-bbox="644 1917 834 1951">Qa: 215 ml/min</p>	 <p data-bbox="1067 1917 1257 1951">Qa: 220 ml/min</p>

		
	Qa: 220 ml/min	
5,5 ml/min		
	Qa: 195 ml/min	Qa: 200 ml/min
		
	Qa: 205 ml/min	Qa: 210 ml/min
		
	Qa: 215 ml/min	Qa: 220 ml/min
		
	Qa: 225 ml/min	Qa: 230 ml/min
		
	Qa: 235 ml/min	Qa: 240 ml/min
6 ml/min		
	Qa: 215 ml/min	Qa: 220 ml/min

	 <p>Qa: 225 ml/min</p>	 <p>Qa: 230 ml/min</p>
	 <p>Qa: 235 ml/min</p>	 <p>Qa: 240 ml/min</p>
	 <p>Qa: 245 ml/min</p>	 <p>Qa: 250 ml/min</p>
6,5 ml/min	 <p>Qa: 235 ml/min</p>	 <p>Qa: 240 ml/min</p>
	 <p>Qa: 245 ml/min</p>	 <p>Qa: 250 ml/min</p>
	 <p>Qa: 255 ml/min</p>	 <p>Qa: 260 ml/min</p>
7 ml/min	 <p>Qa: 245 ml/min</p>	 <p>Qa: 250 ml/min</p>

	 Qa: 255 ml/min	
7,5 ml/min	 Qa: 260 ml/min	 Qa: 265 ml/min
	 Qa: 270 ml/min	
8 ml/min	 Qa: 275 ml/min	 Qa: 280 ml/min
	 Qa: 285 ml/min	
8,5 ml/min	 Qa: 300 ml/min	 Qa: 305 ml/min
	 Qa: 310 ml/min	

9 ml/min	 <p>Qa: 310 ml/min</p>	 <p>Qa: 315 ml/min</p>
	 <p>Qa: 320 ml/min</p>	 <p>Qa: 325 ml/min</p>
9,5 ml/min	 <p>Qa: 310 ml/min</p>	 <p>Qa: 315 ml/min</p>
	 <p>Qa: 320 ml/min</p>	 <p>Qa: 325 ml/min</p>

Lampiran D. Datasheet Sensor TGS2442



## TGS 2442 - for the detection of Carbon Monoxide

**Features:**

- \* Low power consumption
- \* High sensitivity/selectivity to carbon monoxide (CO)
- \* Miniature size
- \* Low sensitivity to alcohol vapor
- \* Long life and low cost
- \* Low humidity dependency

**Applications:**

- \* CO detectors
- \* Air quality controllers
- \* Indoor parking lot ventilation

TGS 2442 utilizes a multilayer sensor structure. A glass layer for thermal insulation is printed between a ruthenium oxide (RuO<sub>2</sub>) heater and an alumina substrate. A pair of Au electrodes for the heater are formed on a thermal insulator. The gas sensing layer, which is formed of tin dioxide (SnO<sub>2</sub>), is printed on an electrical insulation layer which covers the heater. A pair of Au electrodes for measuring sensor resistance are formed on the electrical insulator. Activated charcoal is filled between the internal cover and the outer cover for the purpose of reducing the influence of noise gases.

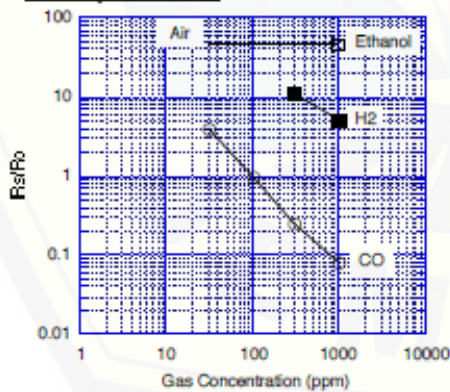
TGS 2442 displays good selectivity to carbon monoxide, making it ideal for CO monitors. In the presence of CO, the sensor's conductivity increases depending on the gas concentration in the air. A simple pulsed electrical circuit operating on a one second circuit voltage cycle can convert the change in conductivity to an output signal which corresponds to gas concentration.



The figure below represents typical sensitivity characteristics, all data having been gathered at standard test conditions (see reverse side of this sheet). The Y-axis is indicated as sensor resistance ratio (Rs/Ro) which is defined as follows:

- Rs = Sensor resistance of displayed gases at various concentrations
- Ro = Sensor resistance in 100ppm CO

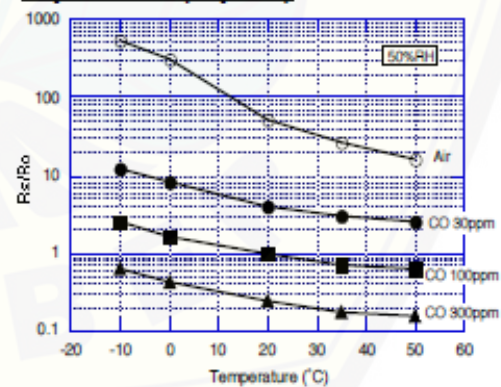
**Sensitivity Characteristics:**



The figure below represents typical temperature and humidity dependency characteristics. Again, the Y-axis is indicated as sensor resistance ratio (Rs/Ro), defined as follows:

- Rs = Sensor resistance at 30ppm, 100ppm and 300ppm of CO at various temperatures and 50%R.H.
- Ro = Sensor resistance at 300ppm of CO at 25°C and 50% R.H.

**Temperature/Humidity Dependency:**



**IMPORTANT NOTE:** OPERATING CONDITIONS IN WHICH FIGARO SENSORS ARE USED WILL VARY WITH EACH CUSTOMER'S SPECIFIC APPLICATIONS. FIGARO STRONGLY RECOMMENDS CONSULTING OUR TECHNICAL STAFF BEFORE DEPLOYING FIGARO SENSORS IN YOUR APPLICATION AND, IN PARTICULAR, WHEN CUSTOMER'S TARGET GASES ARE NOT LISTED HEREIN. FIGARO CANNOT ASSUME ANY RESPONSIBILITY FOR ANY USE OF ITS SENSORS IN A PRODUCT OR APPLICATION FOR WHICH SENSOR HAS NOT BEEN SPECIFICALLY TESTED BY FIGARO.



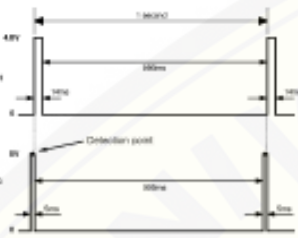
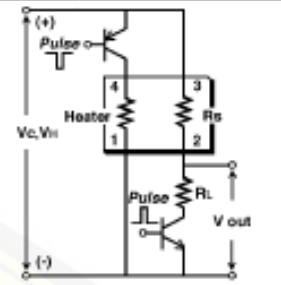
**Basic Measuring Circuit:**

Circuit voltage (Vc) is applied across the sensing element which has a resistance (Rs) between the sensor's two electrodes (pins No. 2 and No. 3) and a load resistor (RL) connected in series. The sensing element is heated by the heater which is connected to pins No. 1 and No. 4.

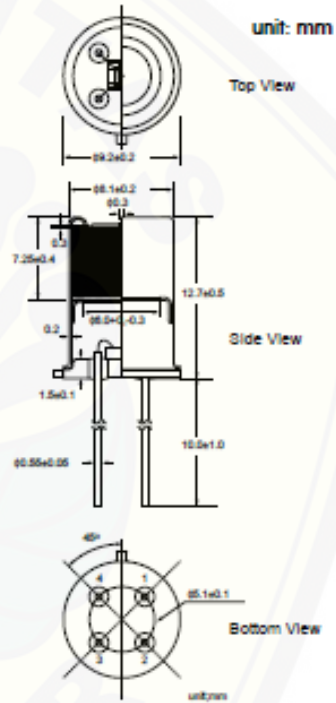
**Heating cycle:**—The sensor requires application of a 1 second heating cycle which is used in connection with a circuit

voltage cycle of 1 second. Each Vh cycle is comprised by 4.8V being applied to the heater for the first 14ms, followed by 0V pulse for the remaining 986ms. The Vc cycle consists of 0V applied for 995ms, followed by 5.0V for 5ms. For achieving optimal sensing characteristics, the sensor's signal should be measured after the midpoint of the 5ms Vc pulse of 5.0V (for reference, see timing chart below).

**NOTE:** Application of a Vc pulse condition is required to prevent possible migration of heater materials into the sensing element material. Under extreme conditions of high humidity and temperature, a constant Vc condition could result in such migration and cause long term drift of Rs to higher values. A 5ms Vc pulse results in significantly less driving force for migration than a constant Vc condition, rendering the possibility of migration negligibly small.



**Structure and Dimensions:**



**Specifications:**

Model number		TGS 2442
Sensing element type		M1
Standard package		TC-5 metal can
Target gases		Carbon monoxide
Typical detection range		30 – 1000 ppm
Standard circuit conditions	Heater voltage cycle	Vh = 4.8V ± 0.2V DC, 14ms Vh = 0.0, 986ms
	Circuit voltage cycle	Vc = 0V for 995ms, Vc = 5.0V ± 0.2V DC for 5ms
	Load resistance	RL = variable (>10kΩ)
Electrical characteristics under standard test conditions	Heater resistance	Rh = 17 ± 2.5Ω at room temp.
	Heater current	Ih = approx. 203mA (in case of Vh)
	Heater power consumption	Ph = approx. 14mW (ave.)
	Sensor resistance	Ra = 13.3kΩ – 133kΩ in 100ppm of carbon monoxide
Standard test conditions	Sensitivity (change ratio of Ra)	β = 0.13 – 0.31
	Test gas conditions	Carbon monoxide in air at 20±2°C, 85±5%RH
	Circuit conditions	Same as Std. Circuit Condition (above)
Conditioning period before test		2 days or more

Sensor resistance (Ra) is calculated with a measured value of Vout as follows:

$$R_a = \frac{V_{cc} R_L}{V_{out}} - R_L$$

The value of sensitivity (β) is calculated with two measured values of Ra as follows:

$$\beta = \frac{R_a(100\text{ppm})}{R_a(10\text{ppm})}$$

For information on warranty, please refer to Standard Terms and Conditions of Sale of Figaro USA Inc.

REV: 07/07

FIGARO USA INC.  
121 S. Wilke Rd. Suite 300  
Arlington Heights, IL 60006  
Tel: 847-832-1701  
Fax: 847-832-1705  
email: figarousa@figarosensor.com

**Lampiran E. Spesifikasi Bit Arduino Uno**

BOARD	OPERATING VOLTAGE	USABLE PINS	MAX RESOLUTION
Uno	5 Volts	A0 to A5	10 bits
Mini, Nano	5 Volts	A0 to A7	10 bits
Mega, Mega2560, MegaADK	5 Volts	A0 to A14	10 bits
Micro	5 Volts	A0 to A11*	10 bits
Leonardo	5 Volts	A0 to A11*	10 bits
Zero	3.3 Volts	A0 to A5	12 bits**
Due	3.3 Volts	A0 to A11	12 bits**
MKR Family boards	3.3 Volts	A0 to A6	12 bits**