

**STUDI EKSPERIMENTAL MENGENAI NYALA API DAN GAS
HASIL PEMBAKARAN PADA *MESO SCALE COMBUSTOR*
DENGAN MATERIAL *NON-HOMOGEN***

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Disusun oleh :

ZENDY RANDY PRADIKA

NIM. 0910623019-62

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2014

LEMBAR PERSETUJUAN

STUDI EKSPERIMENTAL MENGENAI NYALA API DAN GAS HASIL PEMBAKARAN PADA *MESO SCALE COMBUSTOR* DENGAN MATERIAL *NON-HOMOGEN*

SKRIPSI KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

ZENDY RANDY PRADIKA

NIM. 0910623019-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

LILIS YULIATI, ST., MT., Dr. Eng
NIP. 19750702 200003 2 001

MEGA NUR SASONGKO, ST., MT., Dr. Eng
NIP. 19740930 200912 1 001

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI EKSPERIMENTAL MENGENAI NYALA API DAN GAS
HASIL PEMBAKARAN PADA *MESO SCALE COMBUSTOR*
DENGAN MATERIAL *NON-HOMOGEN***

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

ZENDY RANDY PRADIKA

NIM. 0910623019-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 30 Januari 2014

MAJELIS PENGUJI

Skripsi I

Skripsi II

Purnami, ST., MT.
NIP. 19770707 200812 1 005

Ir. Suharto, MT.
NIP. 19531030 198212 1 001

Skripsi III

Ir. Ari Wahjudi, MT.
NIP. 19680324 199802 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng.
NIP. 19740121 199903 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis bisa menyelesaikan penyusunan Skripsi ini dengan baik.

Penyusunan laporan ini tidak akan terselesaikan dengan baik tanpa adanya bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan ini, dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kepada Kepala Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng.
2. Kepada Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Purnami, ST., MT.
3. Kepada KKDK Konversi Energi Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D.
4. Dosen Pembimbing I Skripsi Dr. Eng. Lilis Yulianti, ST., MT.
5. Dosen Pembimbing II Skripsi Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
6. Kedua Orang Tua Saya Bapak Agus Waluyo dan Ibu Sri Ekowati.
7. Kedua Saudara saya Aryska Farra Erdyanna dan Nabilla Dihni Amilia.
8. Kepada Teman-teman seperjuangan “Black Mamba M’09” .
9. Teman-teman “Destroyer FUTSAL” yang menemani dalam suka maupun duka.
10. Teman-teman SMA yang banyak mendukung dan menginspirasi banyak hal.
11. Teman-teman di Surabaya yang sudah banyak membantu.
12. Teman-teman futsal SD ASTRO gresik yang selalu menghibur di setiap liburan.
13. Semua pihak yang sudah mendukung secara moral maupun materil yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis berharap kepada pembaca untuk memberikan saran maupun kritik yang bersifat membangun. Atas saran dan kritik tersebut, sebelumnya penulis ucapkan terima kasih.

Penulis berharap penyusunan skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang berkepentingan. Amin.

Malang, 14 Januari 2014

Penulis



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2 Pembakaran.....	6
2.2.1 Reaksi Pembakaran.....	7
2.2.2 Klasifikasi Pembakaran	10
2.3 Pembakaran <i>Premixed</i>	11
2.4 <i>Micro Power Generator</i>	12
2.5 <i>Micro- dan meso-scale combustor</i>	14
2.6 Kestabilan Api dan <i>Flammability Limit</i>	16
2.7 Perpindahan panas pada <i>Micro dan Meso-Scale Combustor</i>	17
2.7.1 Konduksi.....	17
2.7.2 Konveksi	18
2.7.3 Radiasi	19
2.8 Hipotesis	19

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	20
3.1 Metode Penelitian	20
3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan	20
3.3 Variabel Penelitian.....	20
3.4 Skema Instalasi Penelitian	22
3.5 Peralatan Penelitian.....	22
3.6 Metode Pengambilan Data.....	26
3.7 Diagram Alir Penelitian	28
BAB IV PEMBAHASAN	29
4.1 Data Hasil Penelitian	29
4.1.1 Pengujian gas hasil pembakaran pada $V_{Total} = 39$ cm/det dilakukan pada rasio ekuivalen (ϕ) = 0.8, 1 dan 1.2.....	29
4.1.2 Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada Rasio Ekuivalen (ϕ) = 1 dengan Variasi Kecepatan Reaktan $V_{Total} = 20, 39, 53$ dan 69 cm/det.....	32
4.2 Grafik dan Pembahasan	34
4.2.1 Hubungan temperatur nyala api, gas hasil pembakaran dan temperatur dinding dengan kecepatan reaktan dan rasio ekuivalen pada <i>combustor</i> dengan konduktivitas termal dinding berbeda.....	33
4.2.2 Hubungan kandungan gas hasil pembakaran dengan kecepatan reaktan dan rasio ekuivalen pada <i>meso-scale combustor</i> dengan konduktivitas termal dinding berbeda	41
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran	45
DAFTAR PUSTAKA	46

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
2.1	Diagram kestabilan api & <i>flammability limit</i> dalam <i>meso-scale combustor</i> dengan dan tanpa <i>wire mesh</i>	5
2.2	Ilustrasi proses pembakaran	6
2.3	Keadaan molekul ketika tertabrak radikal bebas	7
2.4	Cara reaktan terbakar pada pembakaran difusi	11
2.5	Cara reaktan terbakar pada pembakaran <i>premixed</i>	12
2.6	Densitas Energi tiap Sumber Energi	13
2.7	<i>Micro gas turbine</i>	13
2.8	<i>Prototipe micro-power generator</i>	14
2.9	Mekanisme kestabilan api <i>premixed</i>	16
3.1	<i>Meso-scale combustor</i> dengan material <i>non-homogen</i>	21
3.2	Skema instalasi alat penelitian	22
3.3	<i>Wire mesh</i>	23
3.4	Kompresor	23
3.5	<i>Liquified Petroleum Gas</i>	24
3.6	Ignitor	24
3.7	<i>Flow meter</i>	25
3.8	Pressure meter LPG	25
3.9	Skema penempatan sensor <i>thermocouple</i> pada <i>meso-scale combustor</i>	26
3.10	Diagram alir penelitian	28
4.1	Hubungan temperatur nyala api terhadap V_{total} reaktan pada $\phi = 1$ dalam <i>meso-scale combustor</i> dengan variasi konduktivitas termal	34
4.2	Hubungan temperatur gas buang terhadap V_{total} reaktan pada $\phi = 1$ dalam <i>meso-scale combustor</i> dengan variasi konduktivitas termal	35
4.3	Temperatur dinding setelah <i>wire mesh</i> terhadap V_{total} reaktan pada $\phi = 1$ dalam <i>meso-scale combustor</i> dengan variasi konduktivitas termal	36
4.4	Temperatur dinding <i>combustor</i> sebelum <i>mesh</i> terhadap V_{total} reaktan pada $\phi = 1$ dalam <i>meso-scale combustor</i> dengan variasi konduktivitas termal	37

4.5 Hubungan temperatur nyala api terhadap rasio ekuivalen () pada $V_{total} = 39$ cm/detik dalam <i>meso-scale combustor</i> dengan variasi konduktivitas termal 38	
4.6 Temperatur dinding <i>combustor</i> sebelum <i>mesh</i> terhadap rasio ekuivalen () pada $V_{total} = 39$ cm/detik dalam <i>meso-scale combustor</i> dengan variasi konduktivitas	39
4.7 Hubungan temperatur gas buang terhadap rasio ekuivalen () pada $V_{total} = 39$ cm/detik dalam <i>meso-scale combustor</i> dengan variasi konduktivitas termal 39	
4.8 Temperatur dinding setelah <i>wire mesh</i> terhadap rasio ekuivalen () pada $V_{total} = 39$ cm/detik dalam <i>meso-scale combustor</i> dengan variasi konduktivitas termal	40
4.9 Hubungan komposisi CO ₂ (%) terhadap V_{total} reaktan dalam <i>meso-scale combustor</i> pada = 1	41
4.10 Hubungan komposisi CO (%) terhadap V_{total} reaktan dalam <i>meso-scale combustor</i> pada = 1	42
4.11 Hubungan komposisi CO ₂ (%) terhadap rasio ekuivalen () dalam <i>meso-scale combustor</i> pada $V_{total} = 39$ cm/det	43
4.12 Hubungan komposisi CO (%) terhadap rasio ekuivalen () dalam <i>meso scale combustor</i> pada $V_{total} = 39$ cm/det	43

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
2.1	Kompisisi Udara Kering	8
3.1	Tabel nilai Q_{bb} dan Q_{udara} dengan rasio ekuivalen () = 1	27
3.2	Tabel nilai Q_{bb} dan Q_{udara} dengan $V_{Total} = 39$ cm/det	27
4.1	Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada $V_{Total} = 39$ cm/det pada <i>combustor</i> dengan material dinding <i>quartz glass tube – quartz glass tube</i>	31
4.2	Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada $V_{Total} = 39$ cm/det pada <i>combustor</i> dengan material dinding <i>stainless steel – quartz glass tube</i>	31
4.3	Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada $V_{Total} = 39$ cm/det pada <i>combustor</i> dengan material dinding <i>copper – quartz glass tube</i>	31
4.4	Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada rasio ekuivalen () = 1 pada <i>combustor</i> material dinding <i>quartz glass tube – quartz glass tube</i>	32
4.5	Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada rasio ekuivalen () = 1 pada <i>combustor</i> dengan material dinding <i>stainless steel – quartz glass tube</i>	33
4.6	Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada rasio ekuivalen () = 1 pada <i>combustor</i> dengan material dinding <i>copper – quartz glass tube</i>	33

RINGKASAN

ZENDY RANDY PRADIKA, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2014, *Studi eksperimental mengenai nyala api dan gas hasil pembakaran pada meso scale combustor dengan dinding non-homogen*, Dosen Pembimbing : Lilis Yulianti dan Mega Nur Sasongko

Seiring dengan berkembangnya jaman semakin meningkat pula kebutuhan manusia akan sumber energi, salah satunya energi listrik. Pembangkit energi listrik dalam skala kecil (*micro power generator*) juga terus berkembang seiring meningkatnya penggunaan peralatan listrik *portable* seperti *notebook computer*, kamera digital, pemutar musik, *handphone*, dan beberapa *gadget* lainnya. Oleh karena itu diperlukan solusi energi portabel yang mampu memenuhi kebutuhan zaman. *Micro power generator* merupakan solusi untuk pembangkit energi portabel. Di dalam *micro power generator* mempunyai *meso-scale combustor* sebagai salah satu komponen penting.

Penelitian ini mengamati tentang pengaruh konduktivitas termal *meso-scale combustor* dinding *non-homogen* terhadap temperatur api, temperatur dinding, temperatur dan komposisi gas hasil pembakaran secara eksperimental. Dinding *combustor* terdiri dari *quartz glass tube - quartz glass tube*, *stainless steel - quartz glass tube* dan *copper - quartz glass tube*. *Combustor* memiliki diameter dalam sebesar 3,5 mm. *Wire mesh* sendiri terbuat dari *stainless steel* yang berada di 10 mm dari ujung *combustor*. Bahan bakar pada *combustor* menggunakan *Liquid Petroleum gas* (LPG). Api stabil di dalam *meso-scale combustor* dekat *wire mesh*.

Temperatur nyala api dan gas hasil pembakaran dalam *meso-scale combustor* yang terbuat dari *copper - quartz glass tube* tinggi dari pada temperatur api dan gas hasil pembakaran pada *combustor stainless steel - quartz glass tube* dan *quartz glass tube - quartz glass tube*. Hal ini menunjukkan penggunaan kombinasi *copper* dan *quartz glass tube* menghasilkan *heat loss* yang minimum dan *heat recirculation* yang maksimum, sehingga pada debit reaktan yang sama temperatur apinya paling tinggi. Untuk komposisi gas hasil pembakaran *copper - quartz glass tube* memiliki pembakaran yang lebih sempurna dikarenakan memiliki nilai penurunan komposisi CO yang lebih tinggi dibanding *stainless steel - quartz glass tube* dan *quartz glass tube*. Dengan semakin tinggi nilai konduktivitas termal maka *heat recirculation* yang terjadi di *combustor* semakin besar dan energi aktivasi pembakaran awal semakin tinggi. Oleh karena itu komposisi yang dihasilkan lebih rendah CO.

Kata kunci : temperatur nyala api, temperatur dan komposisi gas hasil pembakaran, *meso-scale combustor*, material *non-homogen*.



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan berkembangnya jaman semakin meningkat pula kebutuhan manusia akan sumber energi, salah satunya energi listrik. Pembangkit energi listrik dalam skala kecil (*micro power generator*) juga terus berkembang seiring meningkatnya penggunaan peralatan listrik *portable* seperti *notebook computer*, kamera digital, pemutar musik, *handphone*, dan beberapa *gadget* lainnya. Dimana semua peralatan *portable* ini membutuhkan energi yang dikemas dalam bentuk baterai. Sehingga baterai sangat dibutuhkan untuk menyimpan energi yang nantinya digunakan untuk memberi suplai energi untuk alat-alat *portable* diatas. Dengan kemampuan baterai untuk menyimpan energi dalam waktu yang tidak terlalu lama dan membutuhkan waktu lama untuk mengisi ulang kembali energinya (*recharge*) menjadi titik lemah pada alat-alat *portable* di atas. Selain itu *baterai* mempunyai dampak yang buruk buat lingkungan ketika dibuang kelingkungan, karena *baterai* terbuat dari bahan-bahan kimia. Oleh karena itu perlu dipikirkan pengembangan teknologi untuk mencari sumber tenaga pengganti baterai. *Micro power generator* yang memiliki densitas energi tinggi, memiliki waktu operasi relatif panjang dengan waktu isi ulang energi yang lebih pendek dan juga ramah lingkungan diharapkan mampu menjadi sumber energi listrik portabel. *Micro power generator* ini merupakan baterai yang diproyeksikan mampu mengatasi permasalahan yang ada pada baterai generasi sekarang ini.

Dalam *micro-power generator* bagian yang sangat penting adalah *meso-scale combustor*. Dimana *meso-scale combustor* adalah ruang bakar yang memiliki ukuran yang sangat kecil bila dibandingkan dengan ruang bakar pada umumnya yang ada pada saat ini. Dalam *meso-scale combustor* proses terjadinya pembakaran dengan api yang stabil sangatlah sulit didapatkan, hal ini dikarenakan terbatasnya waktu bahan bakar berada dalam ruang bakar (*fuel residence time*) dan besarnya *heat loss* dari api kelingkungan (Fernandez-Pelo, 2002). Api dapat dikatakan stabil jika tetap stasioner pada posisi tertentu. Api yang stabil dapat dicapai dengan meningkatkan *fuel residence time* dan kecepatan reaksi pembakaran serta dengan cara mengurangi *heat loss*.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui mekanisme kehilangan kalor dan pengaruhnya terhadap kestabilan api dalam *micro* dan *meso-scale combustor*. Konduktivitas termal dari material *micro-/meso-scale combustor* mempunyai pengaruh yang sangat signifikan terhadap kestabilan api (Norton, et al, 2003; Miesse, et al, 2004). Konduktivitas termal menentukan besarnya perpindahan panas dari *flame* ke dinding *combustor*. Perpindahan panas ini mengakibatkan *heat loss* dari *flame* yang cenderung memadamkan api, sekaligus perpindahan panas konduksi ke reaktan (*heat recirculation*) yang cenderung menstabilkan api. Kestabilan pembakaran dalam *meso-scale combustor* yang terbuat dari *quartz glass tube*, yang memiliki konduktivitas termal rendah, dapat diwujudkan dengan menyisipkan *mesh* yang terbuat dari material dengan konduktivitas termal yang tinggi yaitu *stainless steel* (Mikami, et al, 2013). *Mesh* mengakibatkan terjadinya *heat recirculation* dari *flame* ke reaktan sehingga terjadi pembakaran yang stabil dalam *meso-scale combustor*. (Ramadhan, et al 2013), melakukan penelitian mengenai visualisasi api dan *flammability limit* pada *meso-scale combustor* yang terbuat dari material dengan konduktivitas termal yang berbeda (dinding *combustor* non-homogen). Hasil dari penelitian tersebut ialah, variasi tembaga-*quartz glass tube* memiliki daerah *flammability limit* paling luas dibanding dengan dua variasi lainnya dengan isolasi maupun tanpa isolasi. Penggunaan isolasi panas pada masing-masing *combustor* sendiri bertujuan untuk meningkatkan *flammability limit* serta kestabilan api pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi. Tetapi dalam penelitian tersebut belum diamati bagaimana pengaruh penggunaan dinding *combustor* non homogen terhadap temperatur api dan komposisi gas hasil pembakaran.

Oleh karena itu penulis menganggap penting untuk meneliti pengaruh konduktivitas termal pada dinding *non-homogen* terhadap temperatur api, temperatur dinding, temperatur dan komposisi gas hasil pembakaran. Dari data temperatur beberapa parameter tersebut diharapkan dapat diperkirakan besarnya *heat recirculation* dan *heat loss* pada *meso-scale combustor*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, dirumuskan sebuah permasalahan yaitu bagaimana pengaruh konduktivitas termal material pada dinding *combustor non-homogen* terhadap temperatur api, dinding dan gas hasil pembakaran, serta komposisi gas hasil pembakaran.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menjadikan penelitian ini lebih terarah maka penulis akan memberikan batasan-batasan masalah yang meliputi hal-hal berikut ini :

- 1) *Bahan bakar yang digunakan adalah LPG (Liquified Petroleum Gas).*
- 2) Udara atmosfer digunakan sebagai *oxidizer*, disuplai ke *meso-scale combustor* menggunakan kompresor torak.
- 3) Debit bahan bakar dan udara diatur dengan menggunakan *flow meter*.
- 4) *Meso-scale combustor* terbuat dari *quartz glass tube*, *stainless steel* dan tembaga dengan diameter dalam 3.5 mm.
- 5) *Wire mesh* berbahan *stainless steel* dengan ukuran *60 mesh/inch*.
- 6) Proses pembakaran yang berlangsung adalah pembakaran *premixed*.
- 7) Karakteristik pembakaran yang di amati adalah temperatur api, temperatur dinding, dan temperatur serta komposisi gas hasil pembakaran.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah mengetahui bagaimana pengaruh konduktivitas termal material pada dinding *combustor non-homogen* terhadap temperatur api, temperatur dinding, temperatur gas hasil pembakaran pada *meso-scale combustor* dan mengetahui komposisi gas hasil pembakaran pada *meso-scale combustor* dengan variasi material dinding *non-homogen* yang mempunyai konduktivitas termal yang berbeda-beda.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Dapat mengetahui gabungan material dengan konduktivitas termal yang berbeda pada dinding *meso-scale combustor* yang memiliki temperatur pembakaran paling tinggi, pembakaran yang lebih stabil serta komposisi gas buang yang lebih baik.
2. Dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dan juga mengurangi emisi yang tidak diinginkan dalam gas buang, sebagai efek dari meningkatnya stabilitas api dan pembakaran.
3. Mendapatkan *meso-scale combustor* dengan pembakaran yang stabil dan densitas pembangkitan energi yang tinggi.
4. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi penelitian berikutnya dalam bidang *micro* dan *meso-scale combustor*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Norton, et al, (2003) melakukan penelitian mengenai pengaruh konduktivitas termal terhadap kestabilan api dalam *micro-scale combustor*. Hasil penelitian ini menunjukkan pengaruh konduktivitas termal terhadap kestabilan api dan besarnya *heat recirculation* yang terjadi dari api ke dinding *combustor*.

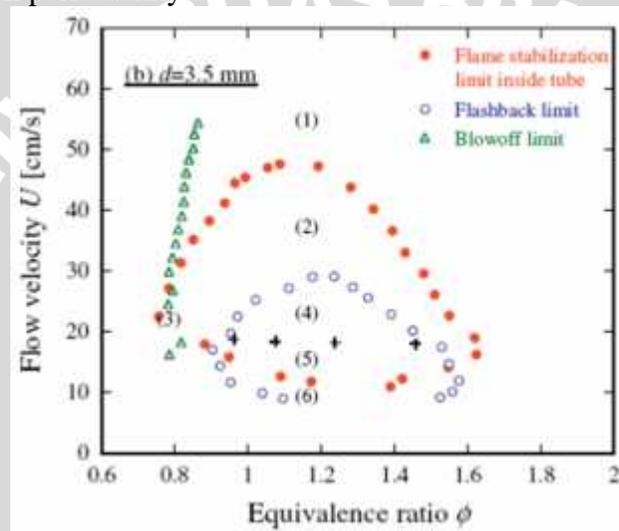
Miesse, et al, (2004) dalam penelitiannya mengungkapkan walaupun pembakaran dalam ruang bakar mikro (*micro-scale combustor*) sulit terjadi, tetapi pembakaran dalam *micro-scale combustor* dapat terjadi apabila komposisi dan struktur material dari dinding *combustor* dibuat sebaik mungkin. Dalam penelitian ini disimpulkan bahwa ada syarat-syarat agar pembakaran dapat dilakukan pada *micro-scale combustor* sebagai berikut:

1. Material dinding yang digunakan harus mampu mencegah terjadinya radikal *quenching*.
2. Desain *combustor* dibuat agar dapat terjadi *heat recirculation* sehingga pembakaran di dalam *meso-scale combustor* dapat berlangsung.
3. Mengontrol aliran di dalam *combustor* agar temperatur yang dihasilkan tidak merusak dinding *combustor*.

Dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan bahwa pembakaran dalam *meso-scale combustor* dapat terjadi dengan memperhatikan desain dan konstruksi dari *combustor* dengan syarat-syarat yang telah dipaparkan.

Mikami et. al. (2013) meneliti tentang pengaruh penggunaan *wire mesh* dalam *meso-scale combustor* terhadap kecepatan pembakaran (*flame propagation*). Dari hasil penelitian dapat diketahui bahwa di daerah sekitar *wire mesh* terjadi peningkatan kecepatan pembakaran, karena di dalam *wire mesh* terjadi perpindahan panas secara konduksi dari api ke dinding *combustor* yang digunakan untuk energi aktivasi awal pada reaktan, sehingga kecepatan pembakaran dan temperatur dalam *micro-scale combustor* meningkat. Gambar

2.1 menunjukkan diagram kestabilan api dan *flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan dan tanpa *wire mesh*. Pada *meso-scale combustor* yang tidak menggunakan *wire mesh*, api hanya dapat stabil di ujung *combustor*. Api stabil diatas *flashback limit* dan disebelah kanan *blow-off limit*. Disebelah kiri *blow-off limit* api akan *blow-off* dan padam. Di dalam *flashback limit* api akan padam karena terjadi *flashback*. Selanjutnya, dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* api dapat distabilkan di dalam *combustor* dekat *wire mesh* dan di ujung pipa. Api stabil dalam *combustor* di dalam daerah *flame stabilization limit*. Dimana daerah api stabil dalam *combustor* sebagian berhimpit dengan daerah *flashback* dan perluasannya.



Gambar 2.1 Diagram kestabilan api & *flammability limit* dalam *meso-scale combustor* dengan dan tanpa *wire mesh*
Sumber : Mikami, et al, 2013

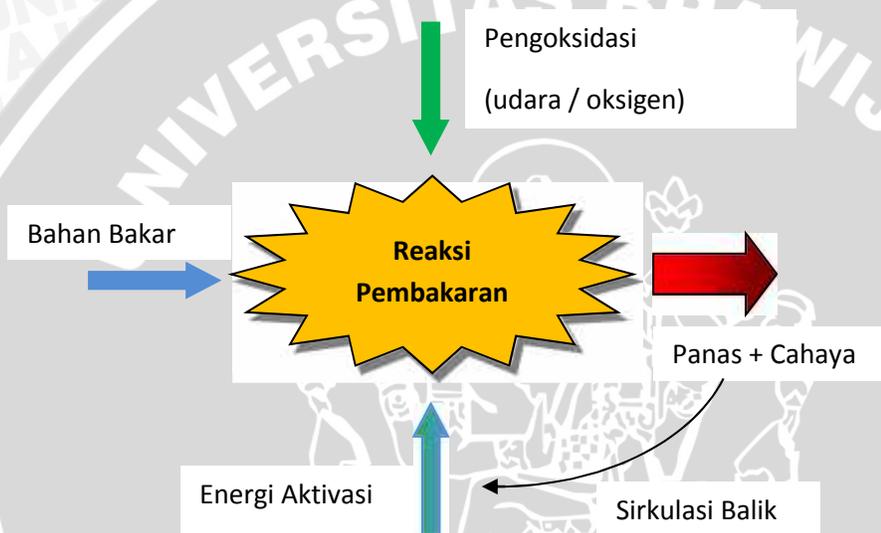
Islami et.al. (2013) melakukan penelitian tentang pengaruh konduktivitas termal dinding *combustor* terhadap visualisasi api, *flammability limit* dan stabilitas api pada *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* didalamnya. Dengan menggunakan tiga variasi dinding *combustor non-homogen* yaitu *quartz glass tube - quartz glass tube*, *copper - quartz glass tube*, *stainless steel - quartz glass tube* dan perbandingan antara *combustor* dengan isolasi dan tanpa isolasi. Hasil dari penelitian tersebut ialah, variasi *quartz glass tube*-tembaga memiliki daerah *flammability limit* paling luas dibanding dengan dua variasi lainnya dengan isolasi maupun tanpa isolasi. Penggunaan isolasi panas pada masing-masing *combustor* sendiri bertujuan untuk meningkatkan *flammability limit* serta kestabilan api pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi.

2.2 Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen atau udara) yang menghasilkan panas dan cahaya. Ada tiga hal yang harus tersedia agar pembakaran bisa terjadi, yaitu :

1. Bahan Bakar
2. Oksidator (segala substansi yang mengandung oksigen)
3. Energi aktivasi

Gambar 2.1 merupakan sebuah ilustrasi bagaimana pembakaran bisa terjadi.



Gambar 2.2 Ilustrasi proses pembakaran.

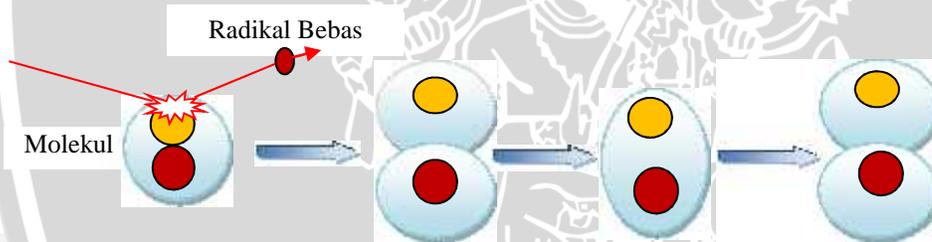
Sumber: Wardana (2008:3)

Agar suatu proses pembakaran dapat berlangsung perlu adanya energi aktivasi dimana energi ini berfungsi untuk mengaktifkan molekul – molekul bahan bakar. Akan tetapi yang perlu diperhatikan apabila terlalu sedikit oksidator pada jumlah bahan bakar tertentu dapat mengakibatkan tidak terbakarnya bahan bakar dan terbentuk CO. Jumlah oksigen tertentu dibutuhkan agar pembakaran dapat terjadi secara sempurna. Walaupun demikian apabila terlalu banyak tambahan udara berlebih maka dapat mengakibatkan kehilangan panas dan buruknya efisiensi.

2.2.1 Reaksi Pembakaran

Pada proses pembakaran terjadi reaksi kimia yang kompleks antara bahan bakar dan pengoksidasi. Kondisi dimana dicapai pembakaran yang sempurna disebut dengan pembakaran stoikiometri, maka pembakaran stoikiometri dapat dikatakan pembakaran yang mana semua atom dari bahan bakar dan pengoksidasi bereaksi seluruhnya (sempurna) menghasilkan berbagai produk CO_2 , H_2O , dan N_2 .

Reaksi pembakaran bisa berlangsung dengan cara memutus ikatan kimia suatu bahan bakar menjadi molekul bermuatan atau disebut ion. Molekul bermuatan akibat pemutusan ikatan molekul-molekul disebut radikal bebas. Radikal bebas jika menghantam (menumbuk) molekul lainnya dapat menyebabkan jarak ikatan molekul tersebut merenggang dan mengerut seperti terlihat pada Gambar 2.3. Dengan tambahan sedikit energi dari luar pada saat jarak ikatan atom dalam keadaan merenggang dapat menyebabkan atom-atom dalam molekul terputus dan bermuatan. Jadi radikal bebas sangat berperan membantu proses reaksi di dalam pembakaran.



Gambar 2.3 Keadaan molekul ketika tertabrak radikal bebas.
Sumber: Wardana (2008:5).

Berdasarkan hukum Newton bahwa besar gaya tarik menarik dua buah masa berbanding terbalik dengan jaraknya. Semakin kecil jarak antar atom maka ikatan antar atomnya semakin kuat, sebaliknya jika jarak antar atom semakin renggang maka ikatan antar atomnya semakin lemah. Ikatan rangkap lebih kuat dari pada ikatan tunggal, dan ikatan triple lebih kuat dari pada ikatan rangkap dan seterusnya.

Ada beberapa cara untuk memutus ikatan atom dalam molekul atau membuat molekul bermuatan diantaranya adalah:

1. Dengan pemanasan, gerakan molekul-molekul bahan bakar dan pengoksidasi menjadi lebih cepat dan tumbukan molekul menjadi sangat keras. Akibatnya beberapa atom dengan ikatan lemah lepas.

2. Merangsang elektron yang mengikat atom-atom dalam molekul dengan katalis sehingga ikatan atom akan putus atau elektron dirangsang oleh katalis supaya meninggalkan molekul sehingga molekul tersebut menjadi pecah dan bermuatan.
3. Mengganggu elektron dengan medan magnet sehingga tidak lagi mengorbit pada inti atom dan meninggalkan molekul sehingga ikatan atom dalam molekul lepas dan molekul menjadi bermuatan.

Cara-cara ini akan secara langsung mengganggu elektron yang merupakan pengikat molekul. Jika elektron-elektron meninggalkan molekul maka molekul tersebut akan bermuatan atau bahkan pecah menjadi beberapa molekul atau atom yang bermuatan.

a. Pembakaran Stoikiometri

Pembakaran stoikiometri adalah pembakaran dimana semua atom dari bahan bakar dan udara beraksi secara kimia untuk menjadi produk. Pengoksidasi yang paling lazim adalah udara. Pada kondisi yang umum udara yang dipakai untuk mengoksidasi bahan bakar pada kenyataannya mengandung oksigen (O_2), nitrogen (N_2), argon (Ar), karbon dioksida (CO_2), uap air (H_2O) dan sejumlah gas dalam bagian yang cukup kecil. Udara yang normal merupakan campuran gas-gas meliputi 78,03% N_2 ; 20,99% O_2 ; 0,94% Ar ; 0,03% CO_2 sedangkan gas-gas lainnya sangat kecil konsentrasinya. Komposisi udara kering yang bersih, dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Komposisi Udara Kering

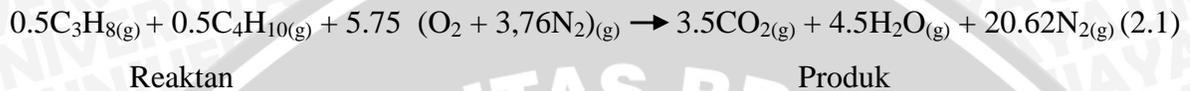
Udara	Proporsi Volume %		Proporsi masa %	
	Aktual	Penggunaan	Aktual	Penggunaan
Nitrogen	78,03	79	75,45	76,8
Oksigen	20,99	21	23,20	23,2
Argon	0,94	0	1,30	0
CO_2	0,03	0	0,05	0
Gas lainnya	0,01	0	-	0

Sumber : Wardana (2008)

Agar lebih memudahkan perhitungan dalam reaksi pembakaran, dapat dipakai asumsi udara terdiri 21% volum O_2 dan 79% volum N_2 . Oleh karena itu, pada reaksi

pembakaran dengan udara, penggunaan 1 mol O_2 akan melibatkan penggunaan $\frac{79}{21} = 3,76$ mol N_2 . Untuk dapat mencapai pembakaran yang sempurna semua atom C diharapkan dapat terbakar menjadi CO_2 dan semua atom H dapat terbakar menjadi H_2O .

Dalam penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah LPG. LPG biasanya terdiri dari 50% gas propane dan 50% butane. Jadi persamaan kimia dari pembakaran stoikiometri dari LPG dengan udara adalah sebagai berikut:



b. Rasio Udara – Bahan Bakar (Air Fuel Ratio / AFR)

Dalam suatu proses pembakaran beberapa hal penting yang perlu diperhatikan antara lain bahan bakar, udara (oksigen) kalor, dan reaksi kimia. Selain itu, perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting pula dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran (produk) proses pembakaran.

Rasio udara/bahan bakar (*air-fuel ratio*) dari suatu reaksi dapat dihitung dengan persamaan berikut, dimana N adalah jumlah mol dan M adalah massa molekul:

$$AFR = \frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{Bahan Bakar}}} \quad \text{Wardana (2008:24)} \quad (2.2)$$

Atau:

$$AFR = \frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{Bahan Bakar}}} \quad \text{Wardana (2008:24)} \quad (2.3)$$

c. Rasio Ekuivalen (*Equivalence Ratio*,)

Metode ini termasuk juga metode yang umum digunakan. Rasio ekuivalen merupakan perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual sebagai berikut :

$$= \frac{AFR_{\text{Stoikiometri}}}{AFR_{\text{aktual}}} \quad \text{Wardana (2008:25)} \quad (2-4)$$

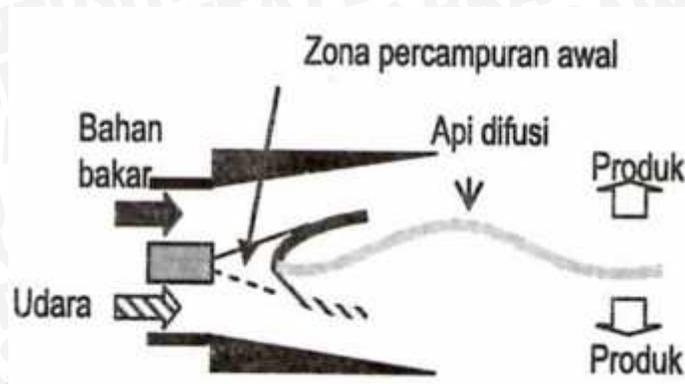
- > 1 terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran kaya bahan bakar (*rich-fuel mixture*)
- < 1 campurannya disebut sebagai campuran miskin bahan bakar (*lean-fuel mixture*)
- $= 1$ merupakan campuran stoikiometri

2.2.2 Klasifikasi Pembakaran

Pembakaran umumnya ditentukan oleh banyak karakter, karakter yang pertama ditentukan cara reaktan terbakar didalam zona reaksi. Jika reaktan (bahan bakar dan udara) bercampur sebelum masuk ke zona reaksi maka pembakaran tersebut adalah pembakaran *premixed*. Sedangkan apabila reaktan tidak tercampur sebelum terbakar maka pembakaran ini termasuk pembakaran difusi karena pencampuran bahan bakar dan udara yang berlangsung di zona reaksi akibat difusi molekul.

Pembakaran *premixed* merupakan reaksi pembakaran dimana bahan bakar dan udara dicampur dahulu sebelum dialirkan ke ruang bakar. Pembakaran *premixed* mempunyai keuntungan pada efisiensi pembakarannya yang tinggi, karena reaktan telah bercampur sebelum memasuki daerah reaksi pembakaran (*reaction zone*). Temperatur pembakaran yang memegang peranan penting dalam pembentukan polutan juga dapat dikontrol dengan mudah dengan cara mengatur perbandingan bahan bakar dan udara.

Pada pembakaran difusi, tidak terjadi percampuran dahulu antara bahan bakar dan udara sebelum masuk ke ruang bakar. Bahan bakar dan udara masuk melalui saluran yang berbeda di ruang bakar. Bahan bakar bercampur di ruang bakar diakibatkan karena adanya difusi antar molekul dan setelah tercampur sempurna langsung terbakar. Percampuran bahan bakar dan udara terjadi di daerah percampuran awal sebelum api difusi terbentuk dan terbakar membentuk api *premixed* sebagian. Api *premixed* sendiri yang dekat dengan bahan bakar cenderung kaya bahan bakar dan api *premixed* yang dekat dengan udara cenderung miskin bahan bakar, api *premixed* sendiri berfungsi sebagai penyetabil api difusi. Kelebihan api difusi adalah api tidak bisa merambat ke sisi bahan bakar karena tidak adanya oksigen untuk pembakaran dan begitu pula sebaliknya. Posisi api difusi pada daerah campuran udara dan stoikiometri dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Cara reaktan terbakar pada pembakaran difusi
Sumber: Wardana (2008:149)

2.3 Pembakaran Premixed

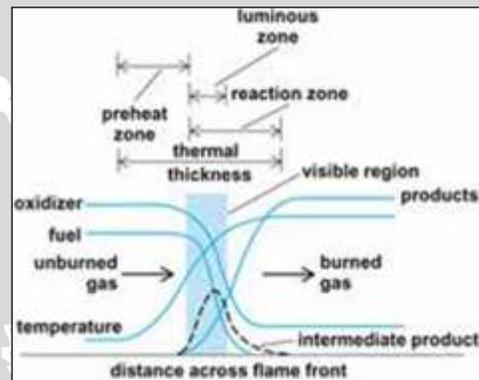
Pembakaran *premixed* adalah pembakaran dimana percampuran antara bahan bakar dan udara atau biasa disebut reaktan terjadi sebelum reaktan memasuki ruang bakar dengan memiliki perbandingan tertentu (dinyatakan dengan *equivalence ratio*). Kecepatan reaktan saat memasuki ruang bakar dinyatakan dengan V_U , dan kecepatan perambatan api yang arahnya berlawanan dengan arah kecepatan reaktan dinyatakan S_L . Reaktan bereaksi di daerah yang sangat sempit disebut *reaction zone*. Sebelum memasuki *reaction zone*, reaktan mendapatkan pemanasan awal di daerah *preheat zone*, yang didapat dari kalor radiasi nyala api atau kalor konduksi dari dinding-dinding ruang bakar.

Produk atau gas hasil pembakaran mempunyai temperatur yang lebih tinggi dari pada temperatur reaktan yang belum terbakar. Oleh karena itu akan terjadi perpindahan kalor dari produk ke reaktan akibat temperatur produk yang lebih tinggi. Perpindahan panas secara terus menerus tersebut akan meningkatkan temperatur reaktan. Dan apabila temperatur reaktan meningkat maka daerah pemanasan awal akan mengalami pergeseran ke kiri, sedangkan zona pemanasan memiliki temperatur yang lebih tinggi terjadi pembakaran. Peristiwa ini terjadi secara terus-menerus sehingga api bisa merambat ke arah reaktan. Kecepatan rambatan api disebut juga kecepatan pembakaran, dinyatakan dengan notasi S_L . cara reaktan terbakar dalam pembakaran *premixed* ditunjukkan pada gambar 2.5.

Kecepatan pembakaran merupakan gelombang pembakaran (api) menuju reaktan yang terjadi karena adanya gradien temperatur antara produk yang memiliki temperatur

tinggi dan reaktan yang memiliki temperatur rendah, sehingga terjadi transfer panas dari produk ke reaktan. Faktor-faktor yang mempengaruhi kecepatan pembakaran diantaranya adalah :

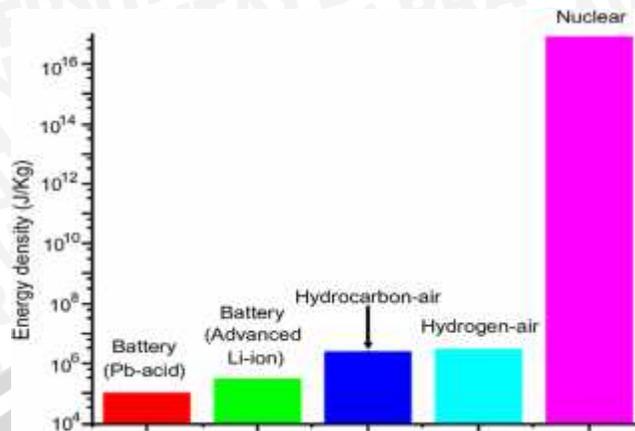
- Turbulensi aliran untuk pengadukkan bahan bakar dan udara.
- Luas daerah kontak reaksi antara bahan bakar dan udara.
- Temperatur pembakaran.
- Katalis



Gambar 2.5 Cara reaktan terbakar pada pembakaran *premixed*
Sumber: Wardana (2008:149)

2.4. Micro Power Generator

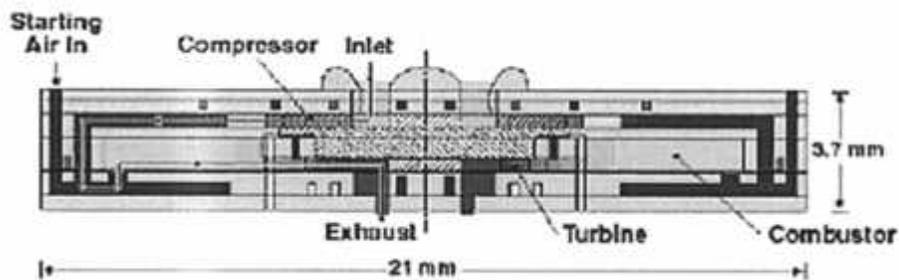
Sumber energi listrik dengan densitas energi yang lebih tinggi diperlukan untuk memenuhi kebutuhan dari peralatan elektronik portable (*handphone, camera* dan *tablet pc*). Oleh karena itu perkembangan penelitian banyak berfokus untuk menemukan pengganti baterai kimia yang saat ini digunakan. Baterai kimia sendiri memiliki kandungan energi yang rendah yang sudah tidak dapat memenuhi kebutuhan sekarang, baterai kimia juga memiliki dampak lingkungan yang serius dikarenakan meninggalkan limbah yang tidak bisa diolah dan dapat mencemari lingkungan. Baterai dengan bahan bakar hidrokarbon cair merupakan salah satu alternative solusi pengganti baterai kimia yang dikembangkan secara luas dengan mengacu pada desain yang memungkinkan untuk menjadi sumber energi listrik yang *portable*.



Gambar 2.6 Densitas Energi tiap Sumber Energi
Sumber: Chou (2011:5)

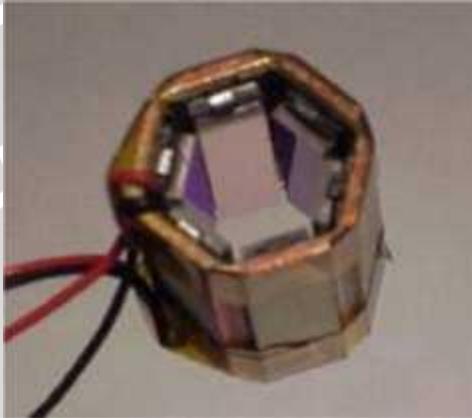
Dimulainya penelitian pembakaran dalam *micro-power generator* dapat ditelusuri kembali ke sekitar dua dekade yang lalu. Hal ini juga diketahui bahwa sistem tenaga menggunakan hidrogen atau bahan bakar hidro-karbon menawarkan kepadatan energy 100 kali lebih tinggi dibandingkan dengan baterai, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.

Micro-power generator adalah alat pembangkit energi dengan skala yang lebih kecil. *Micro-power generator* terbagi atas 2 klasifikasi umum yang pertama *micro-power generator* bekerja berdasarkan siklus daya konvensional seperti *micro-gas turbine* dan *micro-rotary engine*. *Micro-gas turbine* seperti Gambar 2.7 memiliki sistem kerja mengkonversikan energi termal dari pembakaran menjadi energi mekanik dan selanjutnya dari perputaran turbin bisa disalurkan ke generator listrik dan dapat menghasilkan listrik. Sistem ini bekerja dengan kecepatan tinggi hingga 9000 rpm dengan memiliki output daya sebesar 3,7 W. Namun efisiensi dari *micro-gas turbine* hanya 0,2 %. Hal ini disebabkan karena rasio kompresi yang rendah akibat *balancing* dan *sealing*.



Gambar 2.7 *Micro gas turbine*
Sumber: Fernandez, et al, 2002: 10

Dan yang kedua yaitu sistem yang terdiri dari combustor dengan pembakaran *steady* yang berfungsi sebagai pembangkit kalor, yang selanjutnya dikonversikan dengan alat pengkonversi yang merubah energi panas menjadi energi listrik. *Thermo-electric* dan *thermo-photo voltaic* merupakan salah satu alat pengkonversi energi panas menjadi energi listrik. Gambar 2.8 menunjukkan prototype *micro-power generator* dan *thermo-photo voltaic* sebagai rangkaian pembangkit berskala mikro.



Gambar 2.8 Prototype *micro-power generator*
Sumber: Yang, et al, 2009: 2

2.5 Micro-dan Meso-scale Combustor

Perkembangan *micro-* atau *meso-scale combustor* dengan pembakaran yang stabil diperlukan sebagai bagian *micro-power generator* yang mengubah energi kimia ke energi panas pembakaran. Kelemahan dari *micro* atau *meso-scale combustor* adalah terjadi pembakaran yang tidak stabil diakibatkan oleh terbatasnya waktu reaksi (pembakaran) dalam *combustor*, dan tingginya *heat loss*. Beberapa penelitian salah satunya dilakukan Yang et, al 2002 Tentang dinding *combustor* berundak digunakan untuk memperbaiki pencampuran bahan bakar dan udara dan memperpanjang waktu bahan bakar dalam daerah reaksi pembakaran. (Kim et, al 2007). Meneliti mengenai *swiss-roll combustor* yang berfungsi untuk mengurangi *heat loss* yang terjadi dan meningkatkan pemanasan pada reaktan. Pemanasan awal digunakan untuk meningkatkan stabilitas api dan memperluas daerah *flammability limit*.

Micro- atau *meso-scale combustor* memiliki komponen yang ukurannya lebih kecil dibandingkan ruang bakar lain, sehingga memiliki karakteristik yang khusus dengan aliran

fluida dan perpindahan panas yang terjadi, dan proses pembakaran yang terjadi berbeda dengan ruang bakar konvensional. Karakteristik ruang bakar konvensional sendiri memiliki *Reynold number* dan *Peclet number* yang mempunyai nilai yang lebih besar dari *micro-atau meso scale combustor*. Perbedaan lainnya aliran dalam ruang bakar konvensional turbulen maka efek konvektif. Dengan semakin kecil ukuran *micro- atau meso-scale combustor* panjang karakteristik *Reynold number* dan *Peclet number* bernilai kecil. Dan aliran fluida lebih laminar, sehingga efek viskositas serta perpindahan massa dan panas secara difusi menjadi dominan. Berkurangnya ukuran ruang bakar mengakibatkan perbandingan luas permukaan terhadap volume ruang bakar menjadi lebih besar. Dan mengakibatkan perbandingan antara kehilangan kalor (*heat loss*) terhadap kalor hasil pembakaran menjadi lebih besar. Sehingga terjadi penurunan temperatur nyala api dan kecepatan pembakaran yang akhirnya mengakibatkan pemadaman api (*flame quenching*).

Radical quenching yang terjadi pada dinding ruang bakar merupakan salah satu faktor terjadinya pemadaman api. *Radical quenching* sendiri adalah : radikal bebas yang bereaksi dan menghasilkan unsur stabil ketika berada pada dinding ruang bakar. Semakin berkurangnya radikal bebas yang terjadi pada pembakaran sejalan dengan turunnya kecepatan pembakaran yang terjadi. Bila terus terjadi *radical quenching* sendiri bisa mengakibatkan pemadaman api.

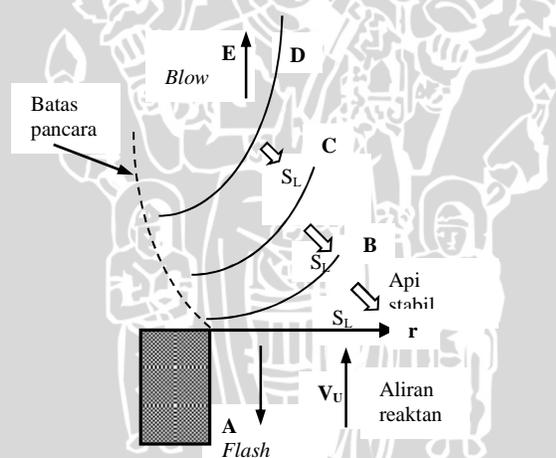
Salah satu cara agar pembakaran lebih sempurna adalah dengan memperbesar waktu bahan bakar berada dalam ruang bakar (*fuel residence time*) t_f , dibanding waktu yang diperlukan untuk reaksi pembakaran (*chemical reaction time*) t_c . Perbandingan antara (*fuel residence time*) t_f dan (*chemical reaction time*) t_c juga disebut *Damkohler Number* (Da). Nilai (Da) $\gg 1$ agar terjadi pembakaran yang lebih sempurna. Tetapi nilai Da pada ruang bakar sering kali kecil dikarenakan *fuel residence time* menjadi kecil dan *chemical reaction time* berkebalikan menjadi lebih besar. Akibatnya pembakaran dalam ruang bakar berukuran kecil menjadi tidak sempurna dan sering terjadi pemadaman api.

Dapat ditarik kesimpulan dari beberapa paparan di atas bahwa untuk mendapatkan pembakaran yang stabil dalam ruang bakar berukuran kecil sulit dilakukan. Tetapi pembakaran sempurna sendiri dapat terjadi pada debit bahan bakar yang relatif kecil, dimana *fuel residence time* masih relatif besar. Oleh karena itu energi kalor yang didapat

pada *micro-* atau *meso-scale combustor* dan densitas energi pada rangkaian *micro-power generator* juga rendah. Banyak dilakukan penelitian untuk mendapatkan pembakaran dan nyala api yang lebih stabil untuk mendapatkan laju pembangkitan energi yang didapat dari pembakaran lebih besar dengan beberapa rekayasa yang telah dilakukan.

2.6 Kestabilan Api dan *Flammability Limit*

Micro- atau *meso-scale combustor* dengan pembakaran *premixed* sendiri memiliki kelemahan pada kestabilan api pada ruang bakar. Api dikatakan stabil apabila kecepatan reaktan $V_U =$ kecepatan pembakaran S_L . bila kecepatan reaktan lebih besar dari kecepatan pembakaran ($V_U > S_L$) api akan mengalami *flash back*. Sebaliknya apabila kecepatan reaktan lebih kecil dari kecepatan pembakaran ($V_U < S_L$) maka api akan mengalami *blow off* atau *lift off*. *Heat loss* yang terjadi pada ruang bakar kecil sangatlah besar sehingga mengakibatkan terjadinya penurunan temperatur dan kecepatan pembakaran pada ruang bakar kecil, kecepatan reaktan harus besar agar laju pembangkitan energi menjadi tinggi.



Gambar 2.9 Mekanisme kestabilan api *premixed*
Sumber : Wardana (2008:171)

Banyak penelitian yang lebih mendalam untuk dapat menghasilkan rentang *flammability limit* yang lebih luas dan kestabilan api pada *micro-* atau *meso-scale combustor*. Salah satu solusinya adalah dengan menggunakan *external heating* dan katalis, yang bertujuan untuk meningkatkan kecepatan pembakaran. Dilihat dari efisiensinya penggunaan *external heating* diperlukan energi tambahan yang cukup besar dan kurang efisien. Dan apabila digunakan katalis kendala dari katalis sendiri terletak pada harga

katalis yang sangat mahal walaupun dari segi efisiensi energi cukup ada peningkatan. Oleh karena itu diharapkan penelitian lain dari *micro-* atau *meso scale combustor* dapat ditemukan pembakaran yang stabil tanpa menggunakan energi tambahan.

api stabil pada *micro-* atau *meso-scale combustor* hanya dapat dilakukan pada kecepatan rendah. Dimana berhubungan tentang *flammability limit* yang sempit pada kecepatan pembakaran yang rendah. Sempitnya daerah reaksi dan rendahnya kecepatan reaktan mengakibatkan pembangkitan energi pada *micro-* atau *meso-scale combustor* menjadi rendah. Untuk dapat membuat pembangkitan energi yang lebih tinggi maka perlu menaikkan kecepatan pembakaran yang lebih tinggi sehingga api tetap stabil pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi dan memperluas daerah reaksi pada *micro-* atau *meso-scale combustor*.

2.7 Perpindahan panas pada *Micro*-dan *Meso-scale Combustor*

Terdapat tiga macam perpindahan kalor yang fundamental, yaitu konduksi atau hantaran (*conduction*), konveksi (*convection*), dan radiasi (*radiation*). Untuk tiap-tiap rumus yang digunakan akan dijabarkan pada sub-bab berikut:

2.7.1 Konduksi

Gradien suhu (*temperature gradient*) yang terdapat dalam suatu bahan homogen akan menyebabkan terjadinya perpindahan kalor secara konduksi di dalam medium itu, yang lajunya dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$q = -KA \frac{dT}{dx} \quad \text{Pitts (1996:2)} \quad (2.5)$$

Dimana :

q : laju perpindahan kalor (J/s atau Watt)

K : konduktivitas termal (J/s.m.°C)

A : luas penampang perpindahan kalor (m²)

$\frac{dT}{dx}$: gradien atau landaian suhu (Temperatur gradient) dalam arah perpindahan kalor (°C/m)

Perpindahan panas secara konduksi pada *micro-combustor* terjadi pada dinding *combustor* dari daerah sekitar nyala api ke arah *upstream*, yang selanjutnya dikonversikan ke reaktan.

2.7.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi antara suatu permukaan dengan fluida yang mengalir di atasnya ketika ada perbedaan temperatur. Molekul-molekul pada fluida melakukan perpindahan panas. Persamaan laju perpindahan panas konveksi dapat dituliskan sebagai berikut :

$$q_{\text{konv}} = h A (T_s - T) \quad \text{Pitts (1996:2)} \quad (2.6)$$

Dimana :

q = Laju perpindahan panas konveksi (W)

h = koefisien perpindahan panas konveksi (W/m.K)

A = Luas bidang kontak (m²)

T_s = Temperatur Permukaan (K)

T = Temperatur fluida (K)

Perpindahan panas secara konveksi pada *micro-combustor* terjadi saat *heat loss* api ke dinding dan *heat loss* dari dinding *combustor* yang mengalir ke lingkungan. *Heat loss* dari dinding juga digunakan sebagai energi aktivasi reaktan.

2.7.3 Radiasi

Radiasi merupakan perpindahan panas melalui perambatan gelombang elektromagnetik. Yang dapat berlangsung baik dalam medium maupun dalam ruang hampa. Perbedaan radiasi dengan konduksi dan konveksi adalah laju perpindahan panas radiasi lebih efisien dalam ruang hampa. Persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$q_x = \epsilon \sigma (T_s^4 - T^4) \quad \text{Pitts (1996:3)} \quad (2.6)$$

Dimana :

- q_x = Laju perpindahan panas radiasi (W/m^2)
- ϵ = Emisitas Material
- σ = Konstanta Stefan – Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ C}^4$)
- T_s = Temperatur absolute dari permukaan (K)

2.8 Hipotesis

Nilai konduktivitas termal yang semakin tinggi pada material dinding *combustor* pada bagian *upstream* berbanding lurus dengan besarnya *heat recirculation*, sehingga semakin meningkatnya *heat recirculation* akan didapatkan pembakaran yang stabil, nilai temperatur dinding, temperatur api, temperatur gas hasil pembakaran yang lebih tinggi dan pembakarannya akan lebih sempurna, ditunjukkan dengan rendahnya kandungan CO dalam gas hasil pembakaran.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian eksperimental nyata (*true experimental research*) yang langsung digunakan ke objek yang diteliti. Dari hasil penelitian didapatkan data-data yang kemudian di plot dalam suatu diagram sehingga membentuk suatu pola kecenderungan tertentu yang nantinya dapat dibandingkan dan diambil suatu kesimpulan tentang objek yang diteliti.

3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

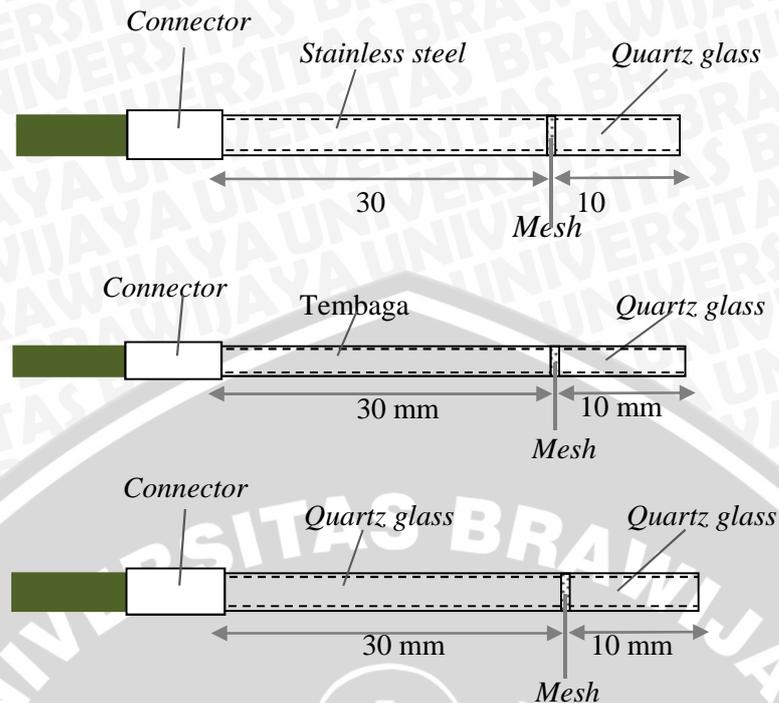
Penelitian ini dilakukan pada bulan September 2013 sampai dengan Desember 2013, bertempat di Laboratorium Mesin-mesin Fluida Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

1. Variabel bebas (*independent variable*)

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah konduktivitas termal dinding *meso-scale combustor* yang divariasikan dengan menggunakan *copper - quartz glass tube*, *stainless steel - quartz glass tube*, dan *quartz glass tube - quartz glass tube*. Konduktivitas termal setiap bahan adalah *quartz glass tube* : 1.4 W/(mK), *stainless steel* : 20 W/(mK) dan tembaga : 385 W/(mK). Konfigurasi *meso-scale combustor* dengan konduktivitas termal yang berbeda ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Meso-scale combustor dengan material non-homogen

2. Variabel terikat (*dependent variable*)

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas dan besarnya dapat diketahui setelah penelitian dilakukan. Adapun variabel terikat dalam penelitian ini yaitu :

- a. Temperatur nyala api.
- b. Gas buang yang dihasilkan : temperatur dan komposisinya.
- c. Temperatur dinding : *upstream* dan *downstream wire mesh*.

3. Variabel terkontrol

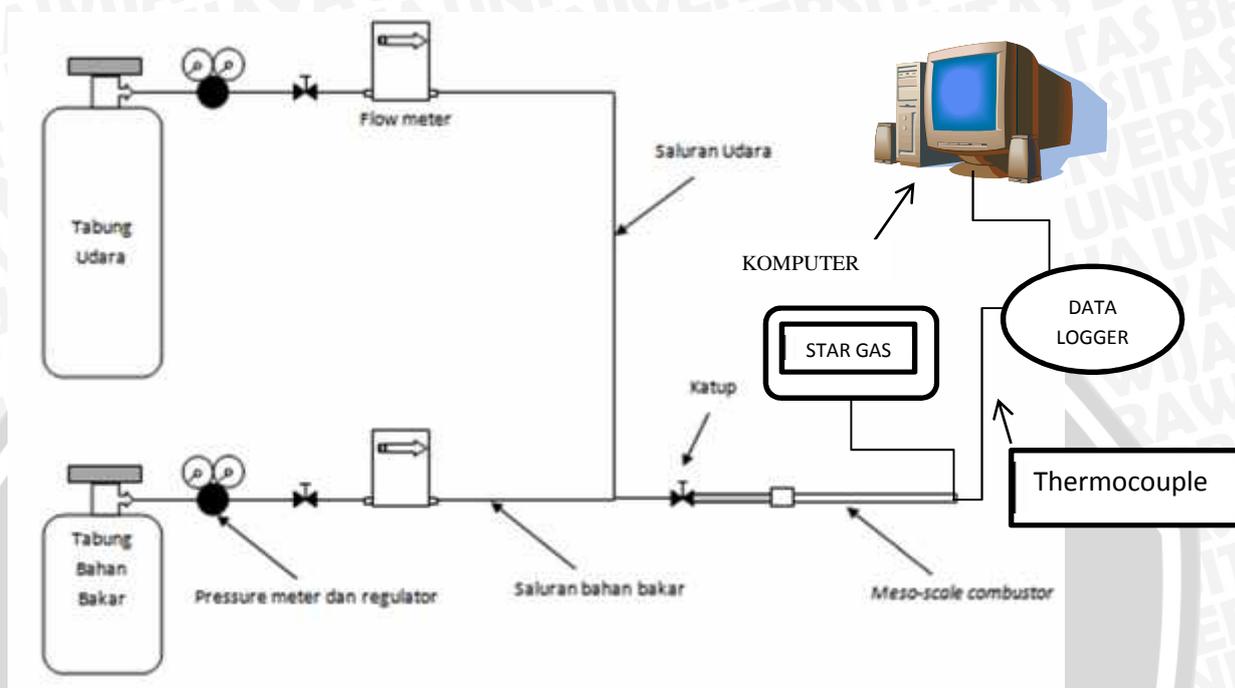
Parameter yang dijaga agar tidak berubah nilai (tetap) atau bisa diubah sesuai kebutuhan penelitian. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah kecepatan total reaktan (V_{tot}) dan rasio ekuivalen (ϕ). Penelitian dilakukan pada kondisi :

- Rasio ekuivalen (ϕ) = 1 pada kecepatan total reaktan (V_{tot}) sebesar, 20, 39, 53 dan 69 cm/det.
- Kecepatan total reaktan tetap, $V_{tot} = 39$ cm/det dan rasio ekuivalen (ϕ) = 0.8, 1, 1.2.

Besarnya rasio ekuivalen dan besarnya kecepatan reaktan ditentukan berdasarkan hasil penelitian sebelumnya mengenai *flammability limit* dalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal dinding *combustor* non homogen.

3.4 Skema Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian *meso-scale combustor* terbuat dari beberapa konfigurasi material dan gambar detail dari skema instalasi penelitiannya ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.2 Skema instalasi alat penelitian

3.5 Peralatan Penelitian

Untuk mengetahui pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat, dilakukan penelitian dengan peralatan sebagai berikut:

1. *Meso-scale combustor*

Meso-scale combustor dibuat dari beberapa material dengan konduktivitas termal yang berbeda satu dengan yang lain dengan panjang 40 mm dan diameter dalam 3.5 mm. *Quartz glass tube* yang bersifat tahan temperatur tinggi, tembaga dan *stainless steel* digunakan sebagai bahan *combustor*. Detail susunan *meso-scale combustor* dapat dilihat pada gambar 3.1.

2. *Wire mesh*

Fungsi *wire mesh* pada *combustor* adalah sebagai pemanas awal reaktan yang belum terbakar atau meningkatkan *heat recirculation* dan sebagai *flame holder* (pemegang api). *Wire mesh* sendiri terbuat dari *stainless steel* dengan spesifikasi 60 *mesh/inch* seperti ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Wire mesh

3. Kompresor

Alat untuk mengkompresi udara (oksidator) dan mengalirkan menuju *meso-scale combustor* yang nantinya akan bercampur dengan LPG dahulu di *Y connector* sebelum menuju ke *combustor*.



Gambar 3.4 Kompresor

4. *Heat resistant adhesive*

Alat penghubung untuk masing-masing bagian *meso-scale combustor*.

5. *Combustor holder*

Alat untuk meletakkan/pemegang *combustor*.

6. Bahan bakar + tangki bahan bakar

Digunakan bahan bakar LPG (*Liquified Petroleum Gas*)



Gambar 3.5 *Liquidified Petroleum Gas*

7. *Ignitor*

Alat untuk menyalakan atau menghasilkan api sebagai energi aktivasi pertama untuk *combustor*.



Gambar 3.6 *Ignitor*

8. *Flow meter* LPG dan udara

Alat untuk mengatur dan mengukur debit aliran udara dan bahan bakar yang masuk ke *combustor*.



Gambar 3.7 Flow meter

9. *Pressure meter* LPG dan udara

Alat ini digunakan untuk mengukur dan mengatur tekanan LPG dan udara yang mau dialirkan ke *combustor*.



Gambar 3.8 *Pressure meter* LPG

10. *Thermocouple*

Alat atau sensor untuk mengukur temperatur api, temperatur dinding maupun temperatur gas buang.

11. *Data logger* (ADC) + komputer

Digunakan untuk pencatatan dan pengumpulan data temperatur, dilakukan dengan menghubungkan *thermocouple*, ADC dan komputer. *Thermocouple* menghasilkan data berupa beda temperatur yang selanjutnya menimbulkan beda tegangan pada ADC, selanjutnya ADC merubah data ini menjadi bentuk digital yang selanjutnya diolah, disimpan dan ditampilkan oleh komputer. Pencatatan data dilakukan secara otomatis oleh sistem *data logger*.

12. *Flexible hose*, katup dan klem.

Sistem penghubung dan menjadi saluran bahan bakar dan udara dari tempat penyimpanannya menuju ke ruang bakar.

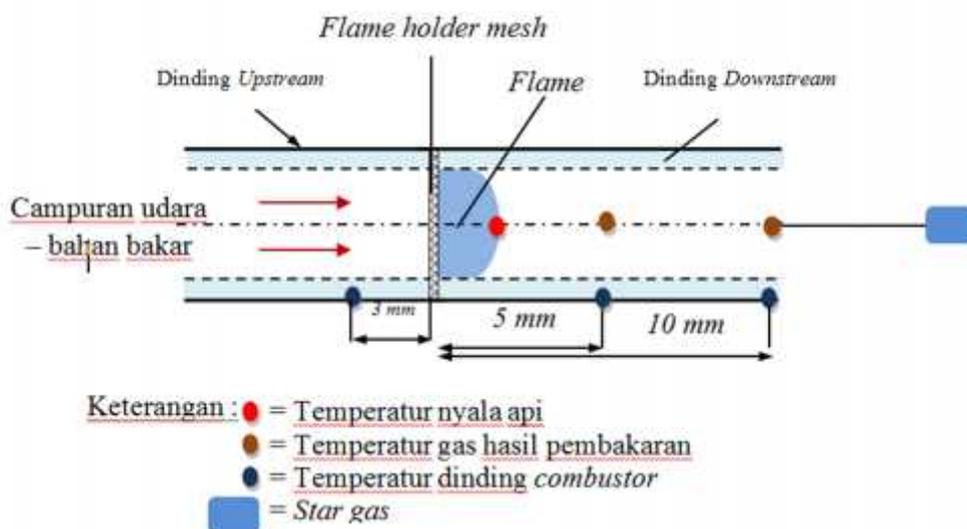
13. Stargas

Alat untuk menganalisa komposisi gas buang.

3.6 Metode Pengambilan Data

Langkah - langkah yang dilakukan untuk pengambilan data temperatur nyala api, dinding *combustor* dan gas buang serta komposisi gas hasil pembakaran adalah sebagai berikut:

1. Pasang *meso-scale combustor* dengan variasi dinding *non-homogen quartz glass tube – quartz glass tube*.



Gambar 3.9 Skema penempatan sensor *thermocouple* pada *meso-scale combustor*

2. Aliran udara dan bahan bakar ke *combustor* di atur dengan rasio ekuivalen () = 1 dan $V_{tot} = 39$ cm/detik, yaitu $Q_{udara} = 216.7$ mL/menit dan $Q_{bb} = 8.4$ mL/menit.
3. Nyalakan api, kemudian ukur dan catat temperatur nyala api, temperatur dinding dan temperatur gas hasil pembakaran. Titik pengukuran temperatur ditunjukkan pada Gambar 3.9.
4. Kemudian pasang ujung pipa *combustor* ke penampung star gas untuk menganalisa komposisi gas hasil pembakaran.
5. Berdasarkan data *flammability limit* dari penelitian sebelumnya, langkah no. 3 dan 4 dilakukan untuk kecepatan total reaktan yang lain sebesar 20, 53 dan 69

cm/detik pada rasio ekuivalen $\phi = 1$. Kondisi ini diperoleh dengan mengatur kecepatan udara dan bahan bakar seperti pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Tabel nilai Q_{bb} dan Q_{udara} dengan rasio ekuivalen $(\phi) = 1$

No	V_{tot} (cm/det)	Q_{bb} (mL/menit)	Q_{udara} (mL/menit)
1	20	4,062	111,178
2	39	7,921	216,8
3	53	10,763	294,596
4	69	14,014	383,566

6. Ulangi langkah no. 3 dan 4 untuk nilai rasio ekuivalen $(\phi) = 0,8$ dan $1,2$ pada kecepatan reaktan sebesar 39 cm/detik. Kondisi ini diperoleh dengan mengatur kecepatan udara dan bahan bakar seperti pada tabel 3.2 .

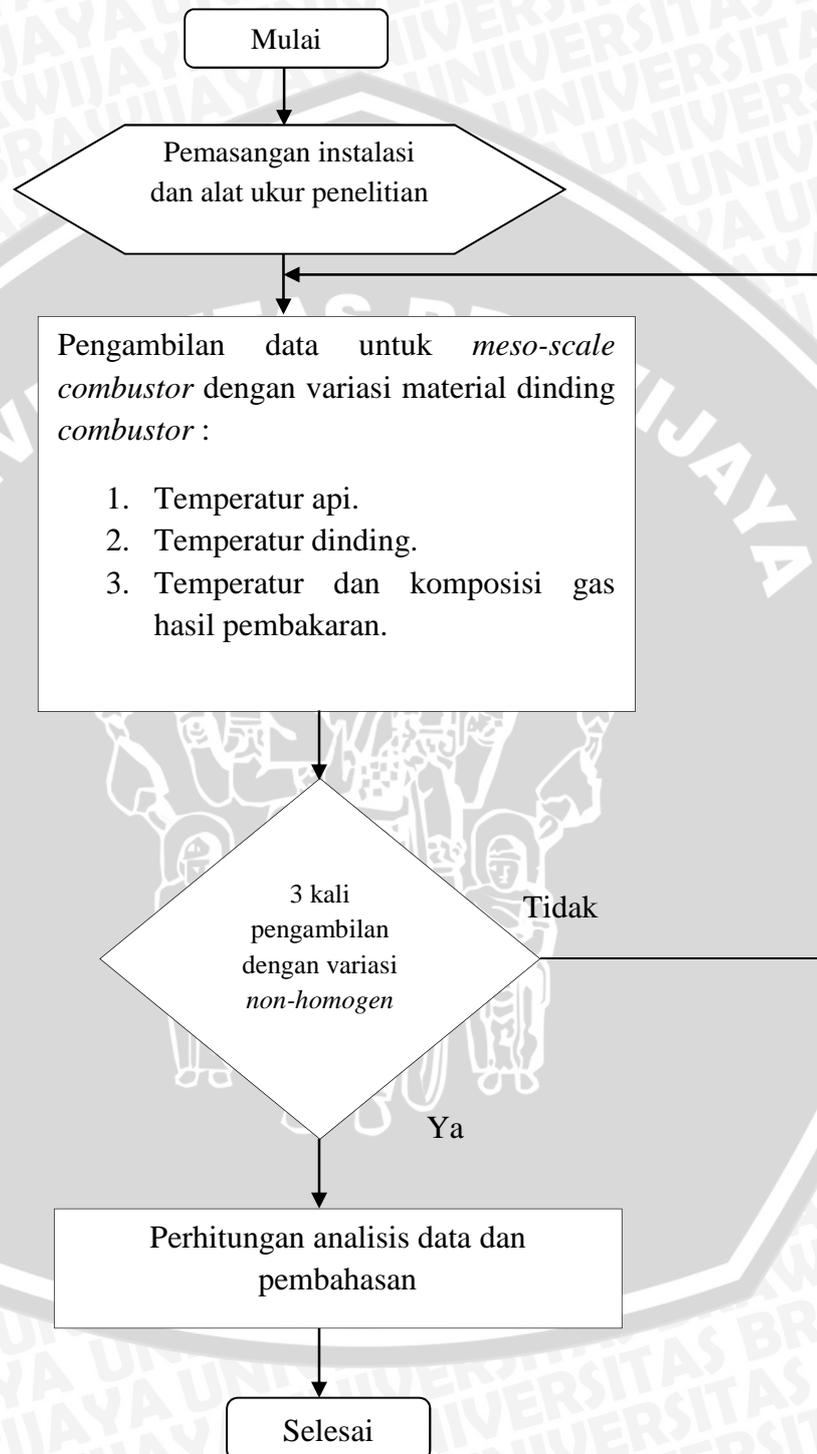
Tabel 3.2 Tabel nilai Q_{bb} dan Q_{udara} dengan $V_{Total} = 39$ cm/det

No	<i>Equivalent ratio</i> (ϕ)	Q_{bb} (mL/menit)	Q_{udara} (mL/menit)
1	0,8	6,336	217,09
2	1	7,921	218,63
3	1,2	9,505	215,568

7. Ulangi langkah no 1- 6 untuk variasi dinding *combustor* tembaga – *quartz glass* dan *stainless steel* – *quartz glass*.

3.7 Diagram Alir Penelitian

Alur penelitian kali ini dapat dilihat pada gambar 3.10 berikut:



Gambar 3.10 Diagram alir penelitian

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

4.1.1 Pengujian gas hasil pembakaran pada $V_{Total} = 39$ cm/det dilakukan pada rasio ekuivalen () = 0,8, 1 dan 1.2

Untuk pengujian pada $V_{Total} = 39$ cm/det dilakukan pada rasio ekuivalen () = 0,8, 1 dan 1.2. pengambilan data dilakukan pada debit bahan bakar maupun debit udara seperti dicantumkan pada Tabel 4.1, 4.2 dan 4.3 akan dijelaskan melalui contoh perhitungan berikut:

Perhitungan AFR



Reaktan

Produk

$$AFR = \frac{N_{udara}}{N_{Bahan\ Bakar}}$$

$$AFR = \frac{27,37}{1}$$

$$AFR = 27,37$$

Untuk bahan bakar gas perbandingan jumlah mol volume AFR = volume udara :
volume bahan bakar = 27,37 : 1

1. Perhitungan debit udara Q_{udara} (mL/menit) untuk kecepatan total reaktan $V_{Total} = 39$

$$V_{Total} = \frac{Q_{bb} + Q_{udara}}{60 (3,14 \cdot \frac{1,75^2}{100})}$$

$$39 = \frac{Q_{bb} + Q_{udara}}{60 (3,14 \cdot \frac{1,75^2}{100})}$$

$$225,022 = Q_{bb} + Q_{udara}$$

Untuk campuran stoikiometri $Q_{udara} = 27,37 \times Q_{bb}$

$$225,022 = Q_{bb} + Q_{bb} \cdot 27,37$$

$$Q_{bb} = \frac{225,022}{28,37}$$

$$Q_{bb} = 7,931$$

$$Q_{udara} = 225,022 - 7,931$$

$$Q_{udara} = 217,09 \text{ (mL/menit)}$$

$$\text{Untuk campuran } \Phi = 0,8 \quad Q_{udara} = 34,212 \times Q_{bb}$$

$$225,022 = Q_{bb} + Q_{bb} \cdot 34,212$$

$$Q_{bb} = \frac{225,022}{35,212}$$

$$Q_{bb} = 6,39$$

$$Q_{udara} = 225,022 - 6,39$$

$$Q_{udara} = 218,63 \text{ (mL/menit)}$$

$$\text{Untuk campuran } \Phi = 1,2 \quad Q_{udara} = 22,8 \times Q_{bb}$$

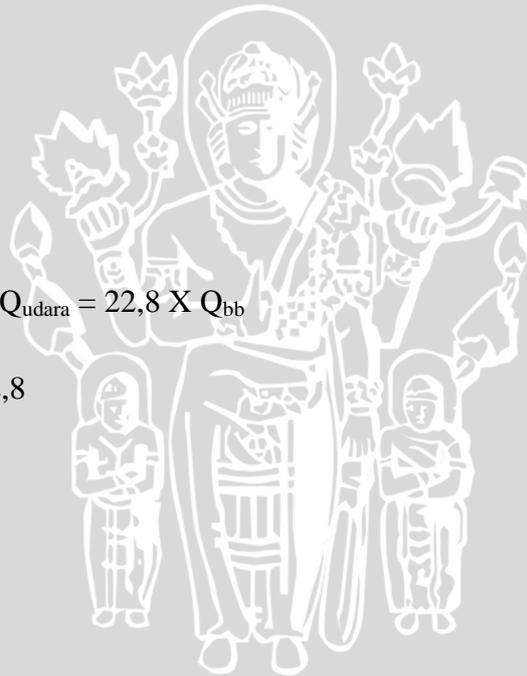
$$225,022 = Q_{bb} + Q_{bb} \cdot 22,8$$

$$Q_{bb} = \frac{225,022}{23,8}$$

$$Q_{bb} = 9,454$$

$$Q_{udara} = 225,022 - 9,454$$

$$Q_{udara} = 215,568 \text{ (mL/menit)}$$



Tabel 4.1 Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada $V_{\text{Total}} = 39$ cm/det pada combustor dengan material dinding *quartz glass tube – quartz glass tube*

No		(Q_{bb}) mL/menit	(Q_{udara}) mL/menit	Temperatur api ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatur dinding ($^{\circ}\text{C}$)			Temperatur gas hasil pembakaran ($^{\circ}\text{C}$)		Emisi gas buang (%)	
					Sebelum <i>mesh</i>	Sesudah <i>mesh</i>		5mm	10mm	CO_2	CO
						5mm	10mm				
1	0.8	6,336	217,09	950,076	249,226	330,32	295,25	668,93	514,69	8,45	4,99
2	1	7,921	218,63	1019,328	303,645	364,21	334,51	677,26	524,18	10,9	0,83
3	1.2	9,505	215,568	1005,547	266,984	352,14	319,54	672,54	519,48	5,62	7,82

Tabel 4.2 Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada $V_{\text{Total}} = 39$ cm/det pada combustor dengan material dinding *stainless steel – quartz glass tube*

No		(Q_{bb}) mL/menit	(Q_{udara}) mL/menit	Temperatur api ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatur dinding ($^{\circ}\text{C}$)			Temperatur gas hasil pembakaran ($^{\circ}\text{C}$)		Emisi gas buang (%)	
					Sebelum <i>mesh</i>	Sesudah <i>mesh</i>		5mm	10mm	CO_2	CO
						5mm	10mm				
1	0.8	6,336	217,09	990,474	268,47	345,26	315,26	690,50	553,81	8,72	4,72
2	1	7,921	218,63	1031,408	315,47	379,24	347,55	755,41	595,75	11.18	0.62
3	1.2	9,505	215,568	1022,578	276,54	361,24	330,88	705,48	567,24	5.83	7.61

Tabel 4.3 Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada $V_{\text{Total}} = 39$ cm/det pada combustor dengan material dinding *copper – quartz glass tube*

No		(Q_{bb}) mL/menit	(Q_{udara}) mL/menit	Temperatur api ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatur dinding ($^{\circ}\text{C}$)			Temperatur gas hasil pembakaran ($^{\circ}\text{C}$)		Emisi gas buang (%)	
					Sebelum <i>mesh</i>	Sesudah <i>mesh</i>		5mm	10mm	CO_2	CO
						5mm	10mm				
1	0.8	6,336	217,09	1007,034	275,456	355,12	325,75	726,26	575,65	9,1	4,34
2	1	7,921	218,63	1046,063	325,245	385,69	360,54	780,81	665,72	11,4	0,4
3	1.2	9,505	215,568	1030,54	288,354	365,21	348,12	750,35	645,26	6,05	7,39

4.1.2 Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada Rasio Ekuivalen () = 1 dengan Variasi Kecepatan Reaktan $V_{Total} = 20, 39, 53$ dan 69 cm/det

Pengujian gas hasil pembakaran pada rasio ekuivalen () = 1 dengan variasi kecepatan reaktan $V_{Total} = 20, 39, 53$ dan 69 cm/det. untuk pengambilan debit bahan bakar maupun debit udara akan pada Tabel 4.4, 4.5 dan 4.6 akan dijelaskan melalui contoh perhitungan berikut:

1. Perhitungan Debit udara Q_{udara} (mL/menit) dan Q_{bb} (mL/menit) pada $V_{Total} = 39$:

$$V_{Total} = \frac{Q_{bb} + Q_{udara}}{60 \left(3,14 \cdot \frac{1,75^2}{100} \right)}$$

$$39 = \frac{Q_{bb} + Q_{udara}}{60 \left(3,14 \cdot \frac{1,75^2}{100} \right)}$$

$$225,022 = Q_{bb} + Q_{udara}$$

Untuk campuran stoikiometri $Q_{udara} = 27,37 \times Q_{bb}$

$$225,022 = Q_{bb} + Q_{bb} \cdot 27,37$$

$$Q_{bb} = \frac{225,022}{28,37}$$

$$Q_{bb} = 7,931$$

$$Q_{udara} = 225,022 - 7,931$$

$$Q_{udara} = 217,09 \text{ (mL/menit)}$$

Tabel 4.4 Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada rasio ekuivalen () = 1 pada *combustor* material dinding *quartz glass tube – quartz glass tube*

No	V_{total} (cm/det)	(Q_{bb}) mL/menit	(Q_{udara}) mL/menit	Temperatur api (°C)	Temperatur dinding(°C)			Temperatur gas hasil pembakaran (°C)		Emisi gas buang (%)	
					Sebelum <i>mesh</i>	Sesudah <i>mesh</i>		5mm	10mm	CO ₂	CO
						5mm	10mm				
1	20	4,062	111,178	835,403	290,32	350,32	312,65	545,69	291,36	11,32	0,48
2	39	7,931	217,09	1019,328	303,645	364,21	334,51	677,26	524,18	10,97	0,83
3	53	4,062	111,178	1135,842	318,954	377,48	335,74	912,93	737,64	10,69	1,11

Tabel 4.5 Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada rasio ekuivalen () = 1 pada *combustor* material dinding *stainless steel – quartz glass tube*

No	V _{total} (cm/det)	(Q _{bb}) mL/menit	(Q _{udara}) mL/menit	Temperatur api (°C)	Temperatur dinding(°C)			Temperatur gas hasil pembakaran (°C)		Emisi gas buang (%)	
					Sebelum <i>mesh</i>	Sesudah <i>mesh</i>		5mm	10mm	CO ₂	CO
						5mm	10mm				
1	20	4,062	111,178	908,209	308,774	366,26	321,54	625,41	425,54	11,47	0,33
2	39	7,931	217,09	1031,408	315,479	379,34	347,55	755,41	595,75	11,18	0,62
3	53	10,763	294,596	1185,963	323,568	381,26	358,21	976,09	807,60	10,87	0,93
4	69	14,014	383,566	1238,911	332,564	392,14	367,25	1102,6	895,19	10,45	1,35

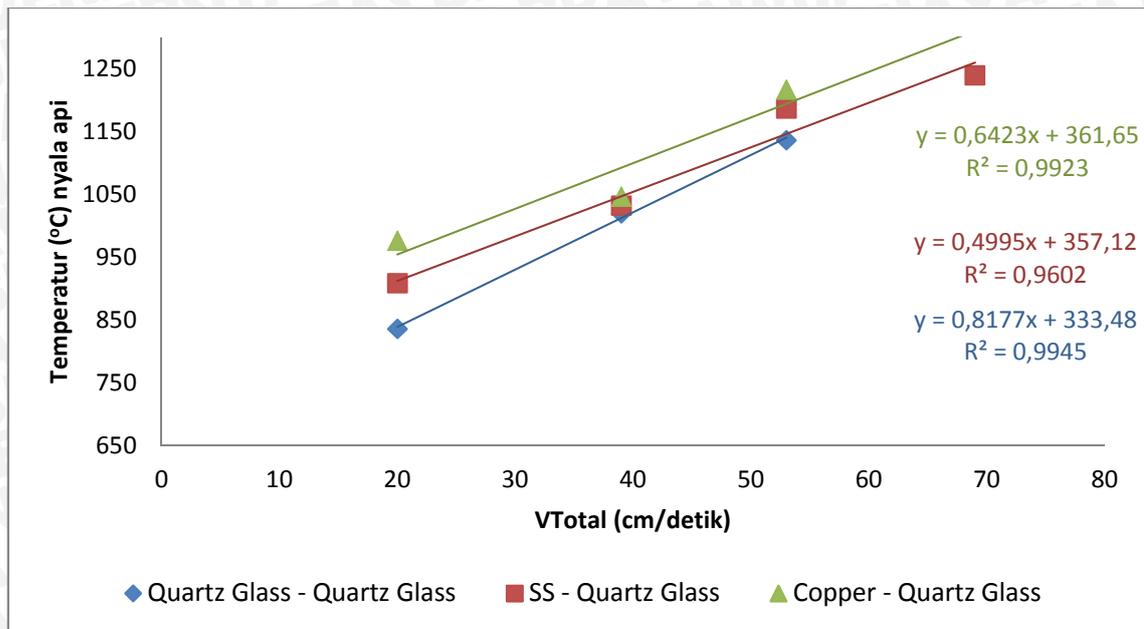
Tabel 4.6 Pengujian gas hasil pembakaran dan temperatur pada rasio ekuivalen () = 1 pada *combustor* Material dinding *copper – quartz glass tube*

No	V _{total} (cm/det)	(Q _{bb}) mL/menit	(Q _{udara}) mL/menit	Temperatur api (°C)	Temperatur dinding(°C)			Temperatur gas hasil pembakaran (°C)		Emisi gas buang (%)	
					Sebelum <i>mesh</i>	Sesudah <i>mesh</i>		5mm	10mm	CO ₂	CO
						5mm	10mm				
1	20	4,062	111,178	975,519	319,544	374,58	340,56	675,4	481,2	11,53	0,27
2	39	7,931	216,8	1046,0633	325,245	385,69	354,21	780,8	665,7	11,4	0,4
3	53	10,763	294,596	1215,968	333,458	397,32	362,23	1008	875,3	11,24	0,56
4	69	14,014	383,566	1313,517	349,245	405,26	377,21	1215	1076	11,06	0,74

4.2 Grafik dan Pembahasan

4.2.1 Hubungan temperatur nyala api, gas hasil pembakaran dan temperatur dinding dengan kecepatan reaktan dan rasio ekuivalen pada *combustor* dengan konduktivitas termal dinding berbeda

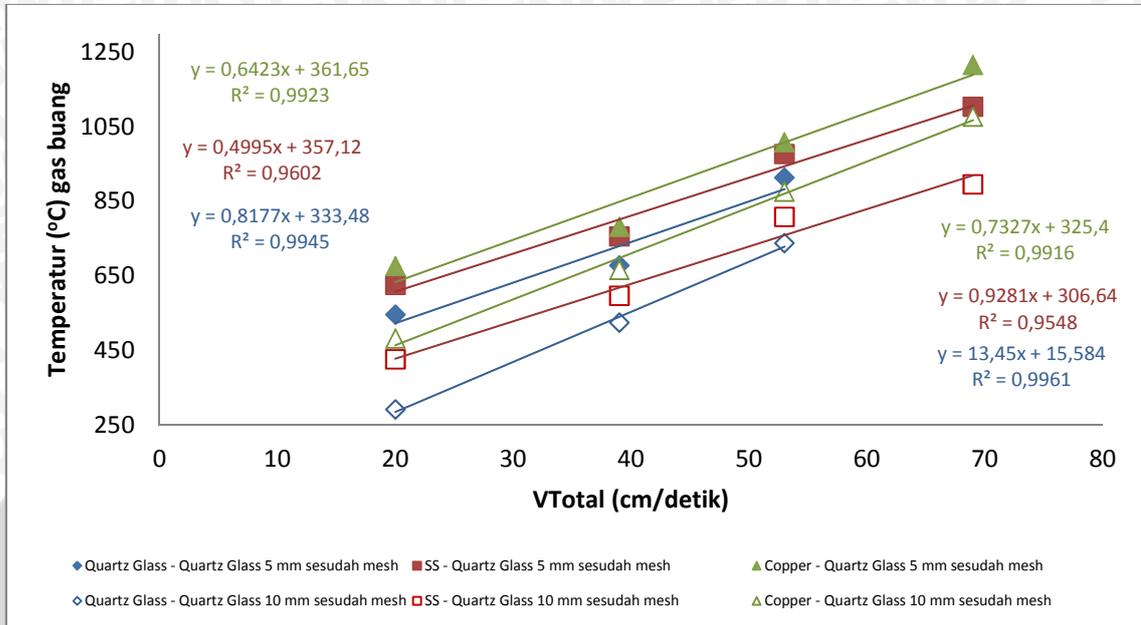
Pada pembahasan temperatur nyala api akan disajikan pada Gambar 4.1 menunjukkan temperatur nyala api dan Gambar 4.2 dengan variasi konduktivitas termal dinding *combustor*, yaitu *copper*, *stainless steel* dan *quartz glass tube*. Data diambil diambil pada rasio ekuivalen =1 atau pada keadaan stoikiometri dengan variasi kecepatan reaktan sebesar 20; 39; 53 dan 69 cm/detik.



Gambar 4.1 Hubungan temperatur nyala api terhadap V_{total} reaktan pada $\phi = 1$ dalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal

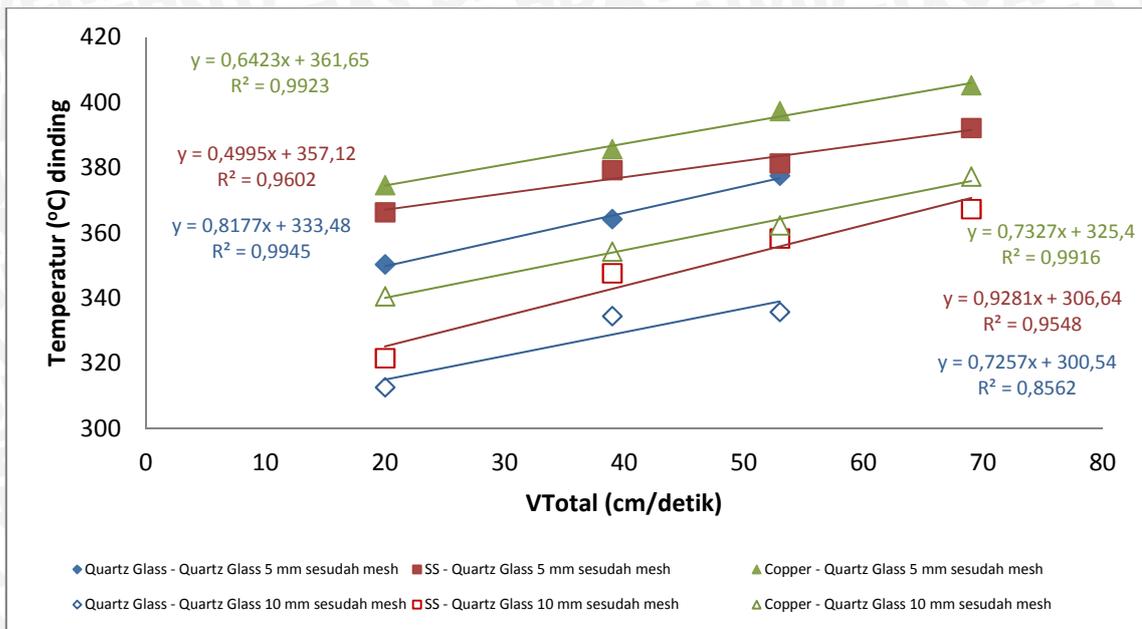
Kecenderungan data yang didapat pada Gambar 4.1 menunjukkan hubungan temperatur nyala api terhadap kecepatan total, dimana *combustor copper-quartz glass tube* memiliki temperatur nyala api yang tertinggi, kemudian berturut-turut *stainless steel - quartz glass tube* dan *quartz glass tube - quartz glass tube*. Besarnya temperatur nyala api sangat dipengaruhi oleh kecepatan pembakaran. Untuk mendapatkan kecepatan pembakaran yang tinggi, *heat recirculation* harus lebih besar dari pada *heat loss*. *Combustor stainless steel* mempunyai konduktivitas termal 20 W/(mK) sedangkan *quartz glass tube* 1.4 W/(mK) dan tembaga 385 W/(mK). Sehingga dengan konduktivitas termal sebesar 385 W/(mK) panas nyala api yang dikonveksikan ke dinding sebagian besar dikonduksikan ke *upstream* sebagai pemanas awal reaktan (*heat recirculation*), sebagian yang lain dikonveksikan oleh dinding *combustor* ke lingkungan (*heat loss*). Temperatur nyala api *combustor quartz glass tube - quartz glass tube* mempunyai nilai yang paling rendah karena *quartz glass tube - quartz glass tube* mempunyai nilai konduktivitas termal yang paling rendah. sehingga perpindahan panas dari nyala api ke dinding *combustor* secara konveksi menjadi lebih rendah. Kalor dari nyala api ke dinding *combustor* secara konveksi menjadi lebih rendah. Kalor yang terkonduksi ke dinding *upstream* dan diteruskan ke reaktan secara konveksi. Nilai konduktivitas termal dinding *upstream* juga mempengaruhi kalor yang terkonveksi ke reaktan. Jadi dengan kalor yang terkonveksi ke reaktan yang semakin kecil maka temperatur api menjadi lebih rendah. Sedangkan untuk temperatur nyala api *combustor*

stainless steel - quartz glass tube tidak lebih besar dari *combustor copper-quartz glass tube* dikarenakan konduktivitas termal *stainless steel* maupun *quartz glass tube* lebih kecil dari pada *copper* sehingga perpindahan kalor dari dinding ke *upstream* lebih sulit terjadi, sehingga memiliki *heat recirculation* yang lebih kecil.



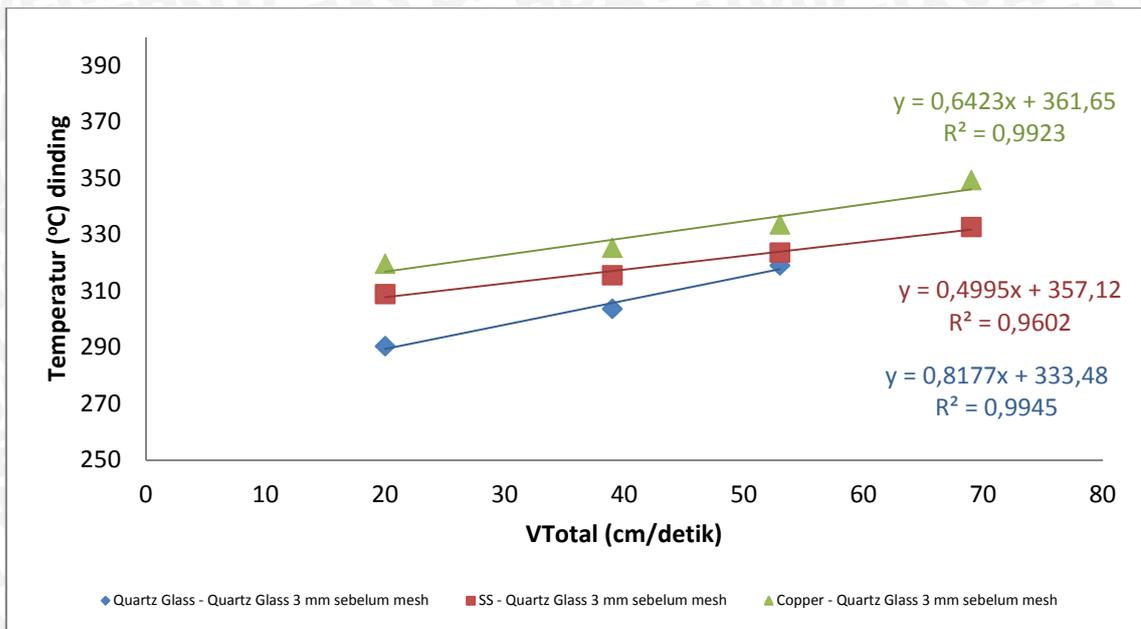
Gambar 4.2 Hubungan temperatur gas buang terhadap V_{total} reaktan pada $\phi = 1$ dalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal

Gambar 4.2 menunjukkan grafik hubungan temperatur gas hasil pembakaran pada jarak 5 mm dan 10 mm dari *wire mesh*. Dari grafik tersebut terlihat bahwa temperatur gas hasil pembakaran pada *combustor copper - quartz glass tube* masih memiliki nilai tertinggi. Hal ini dikarenakan nilai nilai temperatur nyala api *copper - quartz glass tube* memiliki konduktivitas termal pada dinding *upstream* yang paling tinggi. Kalor yang terkonveksi ke reaktan juga semakin tinggi sehingga temperatur nyala api menjadi yang paling tinggi. Pada temperatur gas buang juga menjadi yang paling tinggi. Hal ini dikarenakan pada dinding *downstream* semua *combustor* memakai dinding *quartz glass tube* yang sama, sehingga kalor yang terkonveksi ke dinding rendah diakibatkan konduktivitas termal *quartz glass tube* yang kecil.



Gambar 4.3 Temperatur dinding setelah *wire mesh* terhadap V_{total} reaktan pada $\phi = 1$ dalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa *combustor copper – quartz glass tube* memiliki nilai temperatur dinding setelah *mesh* yang tertinggi. Dikarenakan *copper – quartz glass tube* memiliki temperatur nyala api yang paling tinggi. Dari gambar 4.3 dapat menjelaskan mengapa *combustor tembaga* memiliki nilai temperatur gas hasil pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan *combustor stainless steel - quartz glass tube* maupun *quartz glass tube - quartz glass tube*. Hal ini dikarenakan *copper* mempunyai nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan *stainless steel - quartz glass tube* maupun *quartz glass tube - quartz glass tube*. Dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi maka perpindahan panas nyala api kedinding *combustor* juga semakin besar. Hal tersebut menyebabkan temperatur dinding *combustor copper* setelah *wire mesh* juga besar. Sehingga temperatur gas hasil pembakaran yang berjarak 5 mm dan 10 mm dari *wire mesh* tidak hanya dipengaruhi oleh nilai temperatur nyala api pada *quartz glass tube* yang lebih tinggi tetapi juga konduktivitas termal dinding *combustor*. Konduktivitas termal material dinding *combustor* memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap temperatur gas hasil pembakaran. Semakin tinggi temperatur gas hasil pembakaran juga berbanding lurus dengan nilai temperatur dinding setelah *mesh*.



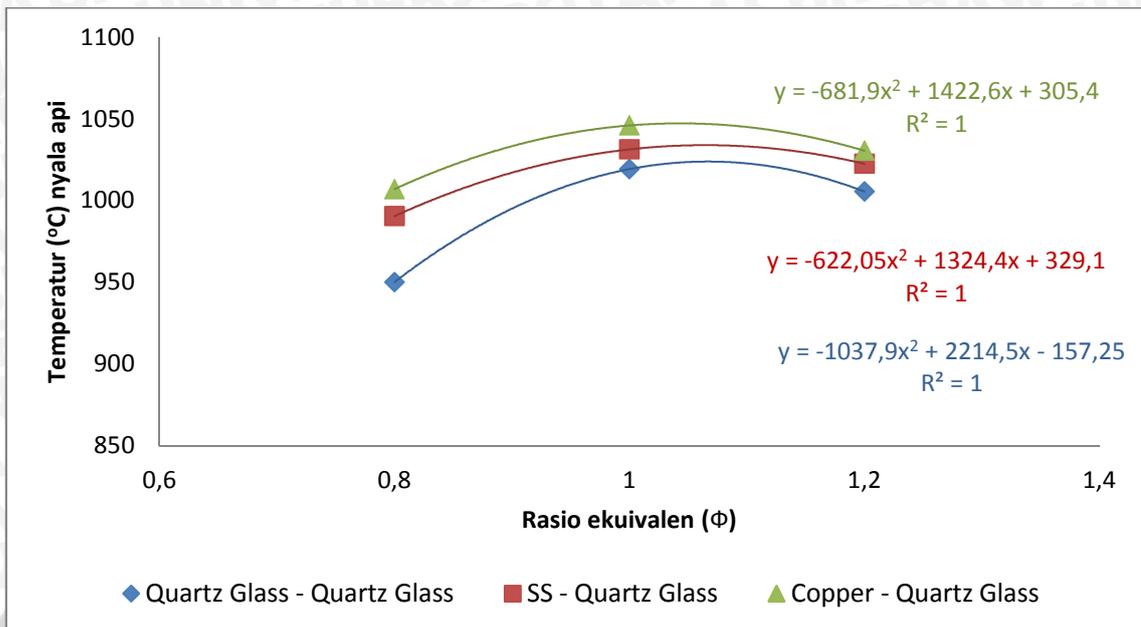
Gambar 4.4 Temperatur dinding *combustor* sebelum *mesh* terhadap V_{total} reaktan pada $= 1$ dalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa nilai temperatur dinding *combustor* sebelum *mesh* pada *combustor stainless steel* memiliki nilai tertinggi. Pengambilan data dilakukan pada jarak 3 mm sebelum *mesh*. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa kalor nyala api pada *combustor copper – quartz glass tube* yang dikonveksikan kedinding *combustor* sebagian besar dikonduksikan ke *upstream* sebagai pemanas awal reaktan sehingga meningkatkan kecepatan pembakaran dengan meningkatnya kecepatan pembakaran maka didapatkan nilai temperatur nyala api dan temperatur gas hasil pembakaran yang tinggi karena pembakaran yang terjadi lebih stabil.

Temperatur nyala api, gas hasil pembakaran dan temperatur dinding *combustor* untuk kecepatan reaktan yang semakin besar pada masing-masing *combustor* juga memiliki kecenderungan yang sama. Dengan bertambahnya kecepatan reaktan maka temperatur nyala api, gas hasil pembakaran dan temperatur dinding *combustor* dalam *meso-scale combustor* cenderung meningkat. Semakin tinggi kecepatan reaktan maka jumlah bahan bakar yang terbakar semakin banyak sehingga kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran semakin besar. Dengan meningkatnya kalor yang dihasilkan pada proses pembakaran menyebabkan temperatur ruang bakar juga meningkat

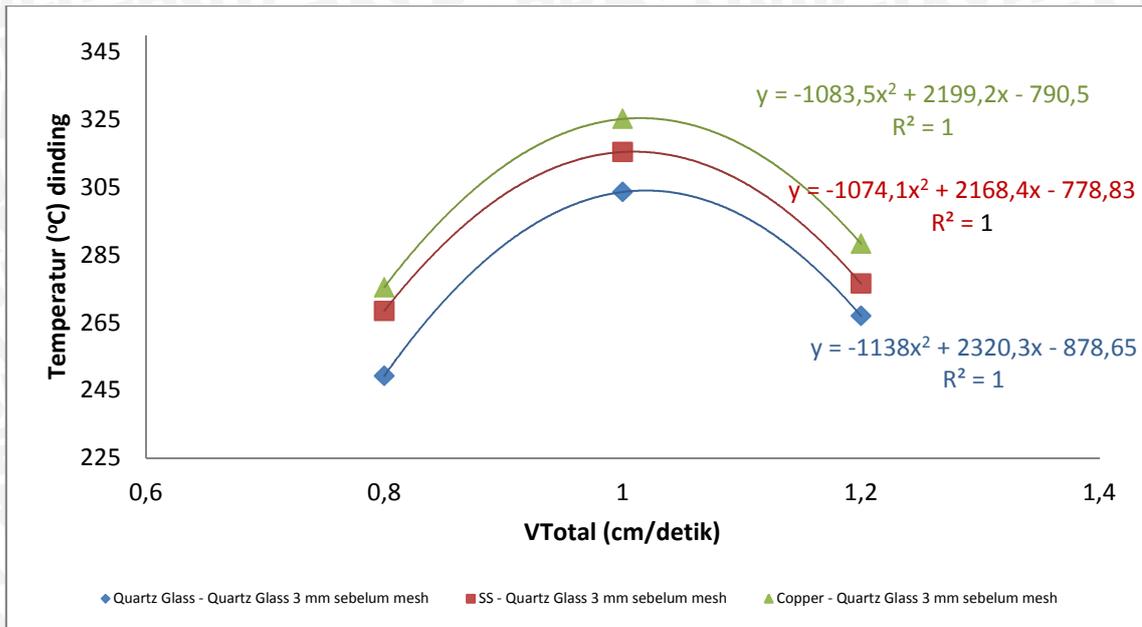
Gambar 4.5 – 4.7 menunjukkan temperatur nyala api, gas hasil pembakaran dan temperatur dinding *combustor* dalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal dinding *combustor* dengan variasi debit bahan bakar dan debit

udara dijaga tetap atau pada rasio ekuivalen $\phi = 0.8$, $\phi = 1$ dan $\phi = 1.2$ dengan kecepatan total reaktan $V_{\text{total}} = 39$ cm/det.

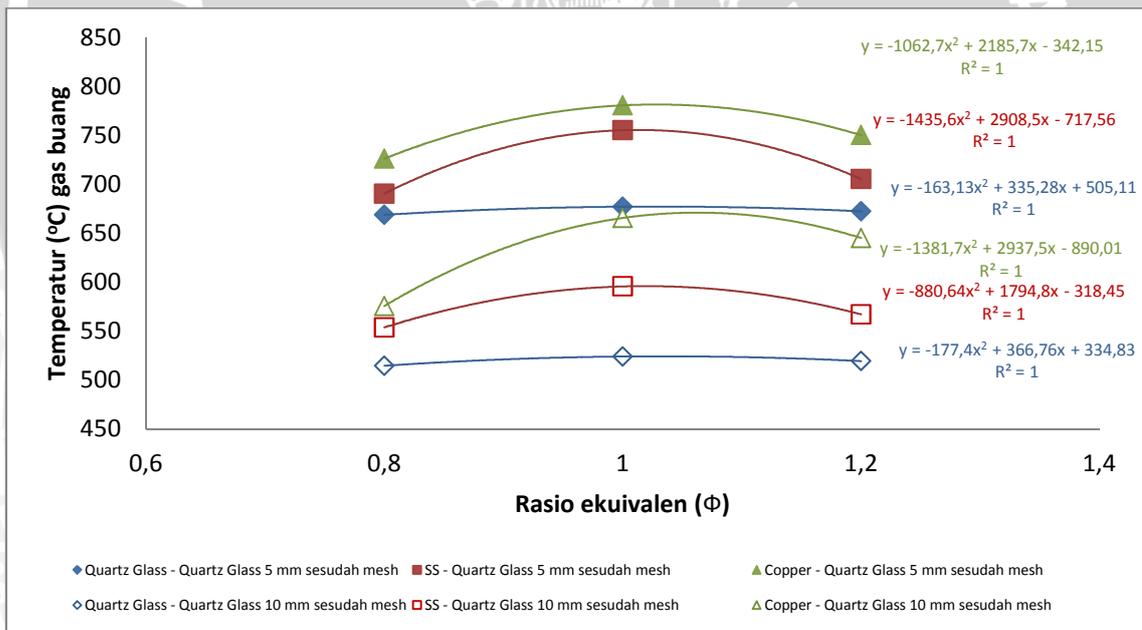


Gambar 4.5 Hubungan temperatur nyala api terhadap rasio ekuivalen (ϕ) pada $V_{\text{total}} = 39$ cm/detik dalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal

Temperatur nyala api, gas hasil pembakaran dan temperatur dinding *combustor copper* memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan *combustor stainless steel* dan *quartz glass tube* dan tembaga pada rasio ekuivalen $\phi = 0.8$, $\phi = 1$ maupun $\phi = 1.2$. Hal tersebut menunjukkan *heat recirculation* pada *combustor copper* lebih besar. Temperatur nyala api pada *combustor copper* lebih tinggi dari pada *stainless steel* dan *quartz glass tube*, karena pada *combustor copper* memiliki nilai *heat recirculation* yang lebih besar dari pada *stainless steel* dan *quartz glass tube*. Hal ini terlihat pada Gambar 4.6 yang menunjukkan temperatur dinding *combustor* sebelum *wire mesh*, dimana pengambilan data dilakukan pada jarak 3 mm sebelum *mesh*.

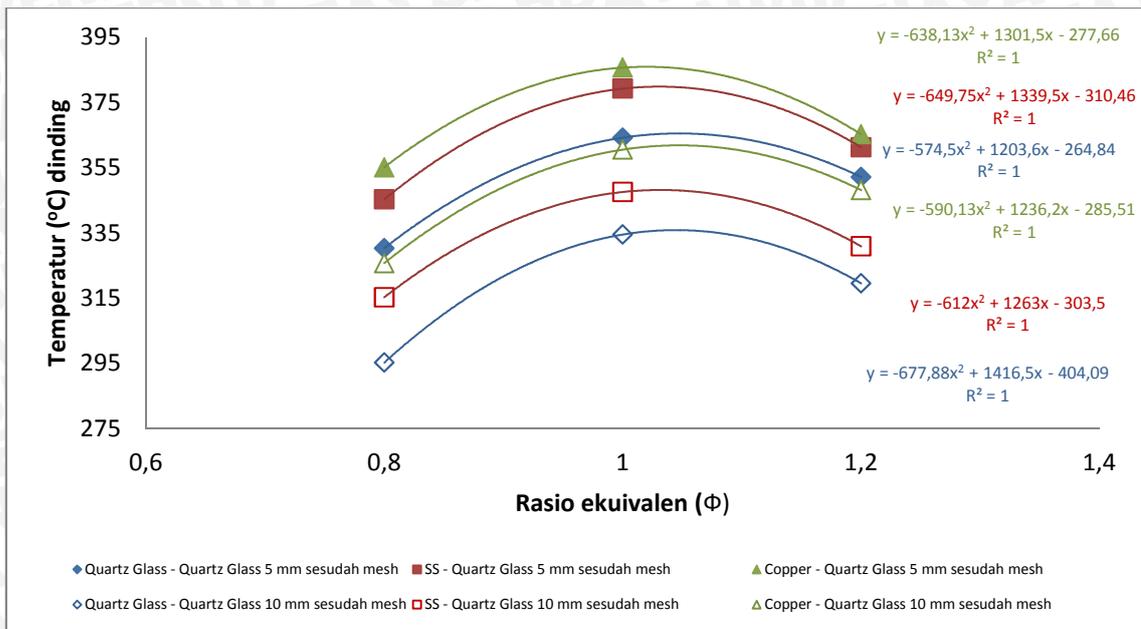


Gambar 4.6 Temperatur dinding *combustor* sebelum *mesh* terhadap rasio ekuivalen () pada $V_{total} = 39$ cm/detik dalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal



Gambar 4.7 Hubungan temperatur gas buang terhadap rasio ekuivalen () pada $V_{total} = 39$ cm/detik dalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal

Gambar 4.7 menunjukkan *combustor copper* memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi dari *stainless steel* maupun *quartz glass tube*. Sehingga kalor gas hasil pembakaran lebih mudah dikonveksikan ke dinding. Hal ini terlihat pada gambar 4.8.



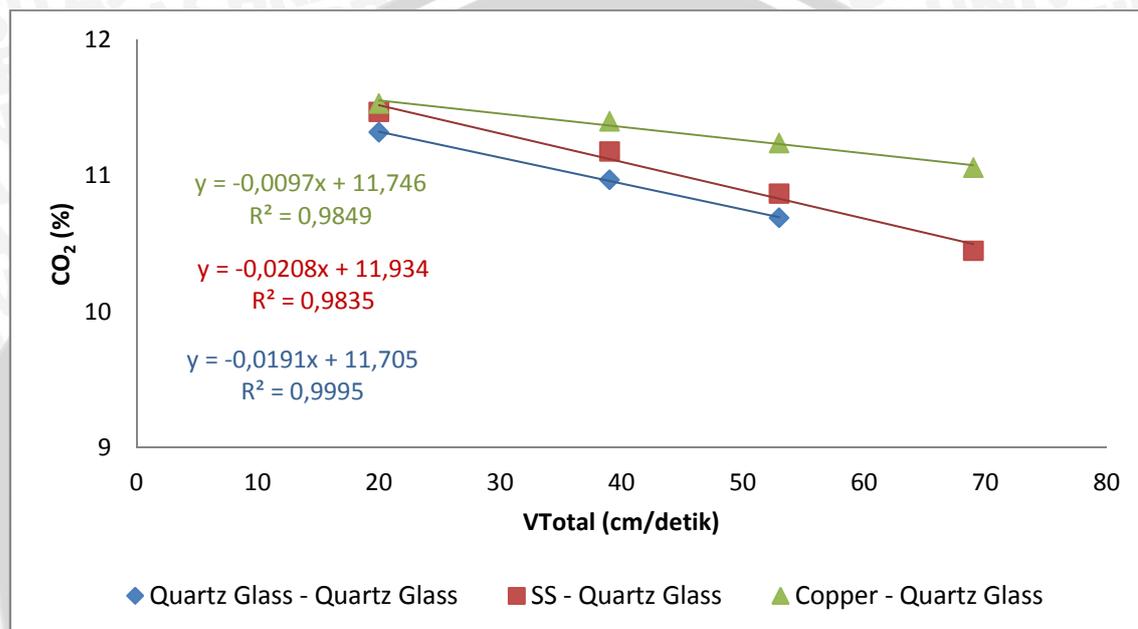
Gambar 4.8 Temperatur dinding setelah *wire mesh* terhadap rasio ekuivalen () pada $V_{total} = 39$ cm/detik dalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal

Pada Gambar 4.5 - 4.8 terlihat temperatur nyala api gas hasil pembakaran dan temperatur dinding untuk rasio ekuivalen $=1$ lebih tinggi dibanding rasio ekuivalen $=0.8$ dan $=1.2$. Karena pada rasio ekuivalen $=1$ atau pada keadaan stoikiometri bahan bakar dapat terbakar sempurna. Apabila semua bahan bakar dapat terbakar sempurna maka akan meningkatkan temperatur nyala api. Dengan semakin meningkatnya temperatur nyala api maka besarnya *heat recirculation* juga akan meningkat. Besarnya temperatur nyala api tidak hanya dipengaruhi oleh konduktivitas termal dinding *combustor* tetapi juga pembakaran yang terjadi.

Pada debit udara yang sama dan campuran kaya bahan bakar pada rasio ekuivalen $=1.2$ temperatur nyala api, gas hasil pembakaran dan temperatur dinding terlihat lebih kecil dibanding pada rasio ekuivalen $=1$, karena pada keadaan rasio ekuivalen $=1.2$ merupakan campuran kaya akan bahan bakar sehingga tidak semua bahan bakar dapat terbakar sempurna akibat kurangnya udara sebagai oksidator. Hal tersebut mengakibatkan temperatur menurun. Sedangkan pada campuran miskin atau pada rasio ekuivalen $=0.8$ memiliki temperatur nyala api, gas hasil pembakaran dan temperatur dinding yang paling rendah. Meskipun pada $=0.8$ bahan bakar terbakar seluruhnya akan tetapi pada rasio ekuivalen $=0.8$ jumlah energi yang dihasilkan lebih kecil sehingga mengakibatkan temperatur nyala api, gas hasil pembakaran dan temperatur dindingnya paling rendah.

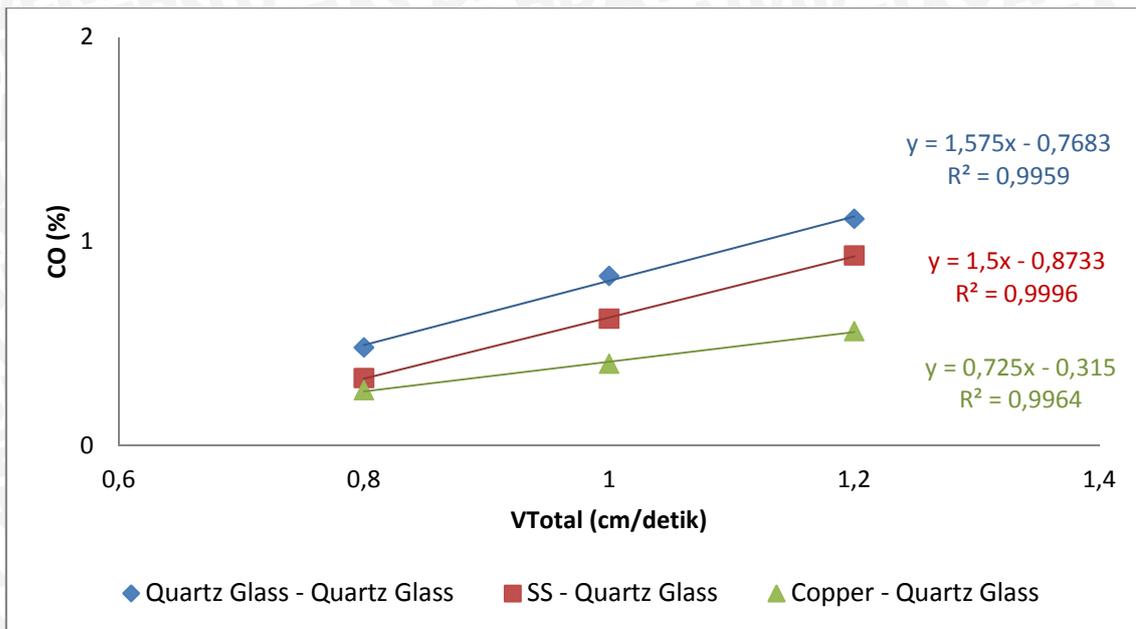
4.2.2 Hubungan kandungan gas hasil pembakaran dengan kecepatan reaktan dan rasio ekuivalen pada *meso-scale combustor* dengan konduktivitas termal dinding berbeda

Gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan komposisi gas hasil pembakaran pada pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan konduktivitas termal dinding *combustor* yang berbeda dengan variasi kecepatan reaktan sebesar 20; 39; 53 dan 69 cm/detik pada rasio ekuivalen $\phi = 1$ atau pada keadaan stoikiometri.



Gambar 4.9 Hubungan komposisi CO₂ (%) terhadap V_{total} reaktan dalam *meso-scale combustor* pada $\phi = 1$

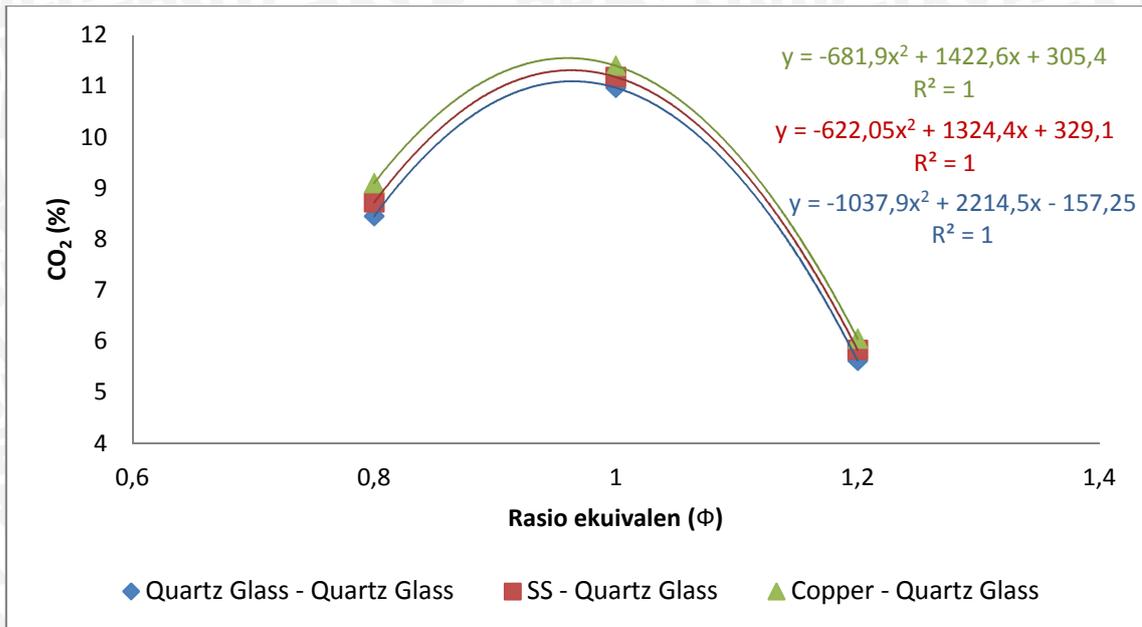
Gambar 4.9 menunjukkan kandungan CO₂ dinding *combustor copper* mempunyai nilai yang lebih tinggi dibandingkan *combustor* dengan material *quartz glass tube* dan *stainless steel*. Hal ini dikarenakan *combustor copper* mempunyai nilai temperatur nyala api yang paling tinggi sehingga pembakaran yang terjadi lebih stabil. Sedangkan untuk kecepatan reaktan yang semakin besar pada masing-masing *combustor* mengakibatkan kandungan CO₂ *meso-scale combustor* semakin menurun dan CO yang dihasilkan meningkat. Agar pembakaran terjadi secara sempurna, waktu bahan bakar berada dalam ruang bakar harus lebih besar dari pada waktu yang diperlukan untuk reaksi pembakaran. Dengan semakin tinggi kecepatan reaktan maka kemampuan bahan bakar berada diruang bakar semakin rendah dan waktu yang diperlukan untuk reaksi pembakaran lebih besar.



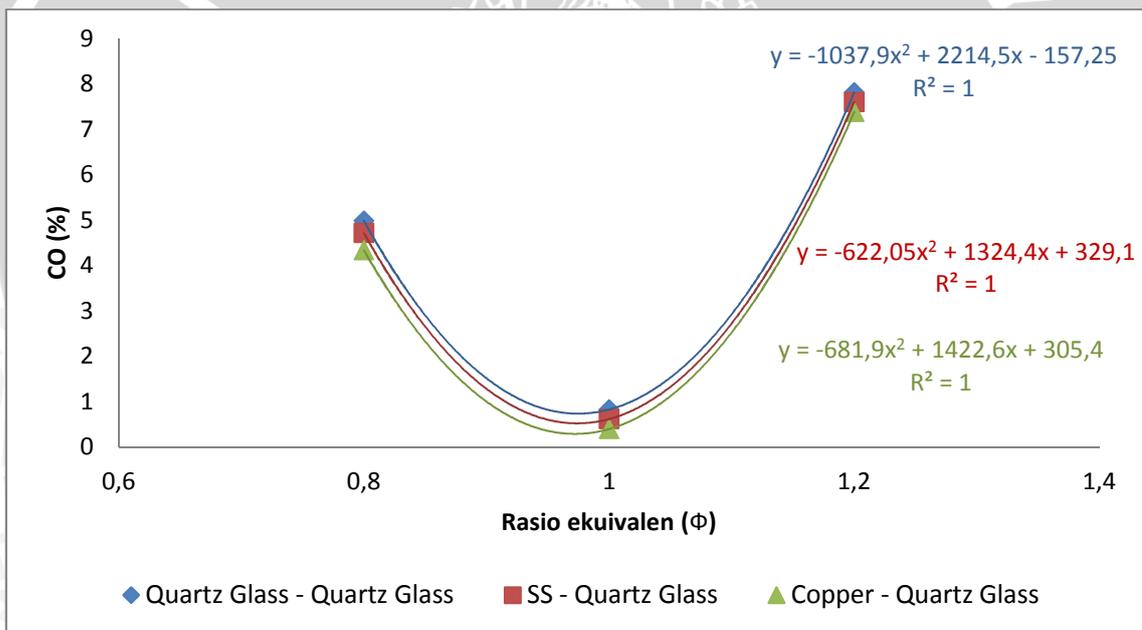
Gambar 4.10 Hubungan komposisi CO₂ (%) terhadap V_{total} reaktan dalam *meso-scale combustor* pada $\phi = 1$

Pada gambar 4.10 yang menunjukkan grafik hubungan kandungan CO terhadap V_{total} reaktan dalam *meso-scale combustor* pada rasio ekuivalen (ϕ) = 1 kandungan CO pada *combustor copper* memiliki nilai yang paling rendah dibandingkan dengan dinding *combustor stainless steel* dan *quartz glass tube*. Hal ini menunjukkan bahwa pembakaran yang terjadi pada *meso-scale combustor* dengan material *copper* lebih stabil dari *combustor stainless steel* dan *quartz glass tube*. Dari gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan bahwa pembakaran pada *combustor copper* terjadi lebih sempurna, karena memiliki nilai kandungan CO₂ yang tertinggi dan CO terendah.

Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan komposisi gas hasil pembakaran pada pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan konduktivitas termal dinding *combustor* yang berbeda dengan variasi debit bahan bakar dan debit udara dijaga tetap atau pada rasio ekuivalen $\phi = 0.8$, $\phi = 1$ dan $\phi = 1.2$ dengan kecepatan reaktan 32.6 cm/detik.



Gambar 4.11 Hubungan komposisi CO₂ (%) terhadap rasio ekuivalen () dalam *meso-scale combustor* pada $V_{total} = 39$ cm/det



Gambar 4.12 Hubungan komposisi CO (%) terhadap rasio ekuivalen () dalam *meso-scale combustor* pada $V_{total} = 39$ cm/det

Gambar 4.11 menunjukkan hubungan komposisi CO₂ (%) dan gambar 4.12 menunjukkan CO (%) terhadap variasi rasio ekuivalen () pada kecepatan total reaktan $V_{total} = 39$ cm/detik. Pada kondisi rasio ekuivalen () = 0,8 kandungan CO terlihat paling rendah. Hal ini disebabkan karena pada kondisi rasio ekuivalen () = 0,8 debit bahan bakar lebih sedikit dari pada jumlah debit bahan bakar pada rasio ekuivalen () = 1 dan 1.2 atau bisa disebut miskin bahan bakar sehingga terlalu banyak oksigen pada saat proses pembakaran. Meskipun secara teoritis pada kondisi rasio ekuivalen () = 0.8

dan 1 bahan bakar dapat terbakar sempurna. Hanya saja pada rasio ekuivalen () = 1 jumlah energi yang dihasilkan lebih besar. Sedangkan dengan debit udara yang sama dan pada campuran kaya yakni pada rasio ekuivalen () = 1.2 kandungan CO₂ rendah dan kandungan CO yang lebih besar dibandingkan pada kondisi yang lain. Hal tersebut disebabkan oleh kurangnya udara sebagai oksidator pada saat proses pembakaran sehingga banyak CO yang terbentuk.

Pada gambar diatas terlihat bahwa kandungan CO₂ *combustor copper* memiliki nilai yang paling tinggi dan kandungan CO paling rendah dibanding *combustor stainless steel* dan *quartz glass tube*. Hal tersebut menunjukkan kecepatan pembakaran *combustor copper* lebih besar. Dengan semakin bertambahnya kecepatan pembakaran maka panas dan temperatur yang dihasilkan pada proses pembakaran juga meningkat. Peningkatan temperatur serta panas yang dihasilkan pada proses pembakaran menyebabkan temperatur nyala api dan ruang bakar juga meningkat sehingga pembakarannya lebih stabil dan komposisi gas hasil pembakarannya akan rendah CO dan CO₂ yang dihasilkan lebih besar.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa konduktivitas termal dinding combustor berpengaruh pada temperatur nyala api, gas hasil pembakaran dan kandungan gas hasil pembakaran dalam meso-scale combustor dimana:

- Variasi *copper – quartz glass tube* memiliki temperatur nyala api, temperatur gas hasil pembakaran dan temperatur dinding paling tinggi dibanding dua combustor yang lain.
- Variasi *copper – quartz glass tube* memiliki kandungan CO yang paling rendah dan kandungan CO₂ yang paling tinggi.
- Pada kondisi stoikiometri ($\phi = 1$) temperatur nyala api, gas hasil pembakaran dan dinding yang mempunyai nilai paling tinggi. Sedangkan komposisi gas hasil pembakaran yang paling rendah CO pada kondisi rasio ekuivalen = 0,8.

5.2 Saran

- Agar dapat dilakukan pengujian dengan bahan bakar yang lain sehingga bisa didapat perbandingan dengan penelitian yang sudah ada.
- Agar dapat dilakukan pengujian dengan *micro-combustor* selain bentuk silinder yang dapat memaksimalkan *heat recirculation* yang terjadi.
- Agar menggunakan bahan isolasi pada dinding sehingga dapat memaksimalkan *heat recirculation* yang terjadi.



DAFTAR PUSTAKA

- Chou, S.K., W.M. Yang, K.J. Chua, J. Li, K.L. Zhang, “*Development of Micro Power Generators – A Review*”, J. Applied Energy, 88 (2011) p. 1–16.
- Fernandez-Pello, A.C., “*Micropower Generation using Combustion: Issues and Approaches*”, Proceedings of the Combustion Institute, 29 (2002) p. 883–899.
- Kim, N.I., Aizumi, S., Yokomori, T., Kato, S., Fujimori, T., Maruta, K., “*Development and Scale Effects of Small Swiss-Roll Combustors*”, Proceedings of the Combustion Institute, 31 (2007) p. 3243–3250.
- Maruta, K., “*Micro and Mesoscale Combustion*”, Proceedings of the Combustion Institute, 33 (2011) p. 125-150.
- Matsui, K., Yuliati, L., Seo, T., Mikami, M., “*A Study of Stabilization of Pre-mixed Propane/Air flames in Narrow Quartz Glass Tubes*”, 48th Japanese Combustion Symposium, Fukuoka, Japan, 2010.
- Miesse, C.M., Masel, R.I., Jensen, C.D., Shannon, M.A., Short, M., Submillimeter-scale combustion, AIChE J., 50 (2004) 3206-3214.
- Norton, D.G., Vlachos, D.G., “*Combustion Characteristics and Flame Stability at the Microscale: a CFD Study of Premixed Methane/Air Mixtures*”, J. Chemical Engineering Science, 58 (2003) p. 4871 – 4882.
- Yang, W.M., Chou, S.K., Shu, C., Li, Z.W., Xue, H., “*Combustion in Micro-Cylindrical Combustors with and without a Backward Facing Step*”, J. Applied Thermal Engineering, 22 (2002) p. 1777-1787.
- Yuliati, L., Matsui, K., Maeda, Y., Seo, T., Mikami, M., “*Study on Electrospayed Liquid Fuel Combustion in a Narrow Tube: Flammability Limit and Flame Visualization*”, Combustion and Flame 159 (2011) 462-464.
- Yuliati, L., Seo, T., Mikami, M., “*Liquid-fuel Combustion in a Narrow Tube Using an Electro spray Technique*”, Combustion and Flame 159 (2012) 462-464.
- Zhou, J., Wang, Y., Yang, W., Liu, J., Wang, Z., Cen, K., “*Improvement of Micro-Combustion Stability through Electrical Heating*”, J. Applied Thermal Engineering, 29 (2009) p. 2373–2378.