

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini perkembangan di bidang teknologi berkembang begitu pesat sehingga para ilmuwan berlomba-lomba untuk melakukan inovasi di bidang teknologi. Khususnya kebutuhan akan pembangkit daya berskala kecil (*micro power generator*) juga terus meningkat seiring meningkatnya penggunaan peralatan listrik portabel seperti *note book computer*, kamera digital, peralatan navigasi dan komunikasi dalam bidang militer, pemutar musik, *handphone*, dan beberapa gadget lainnya. Dimana semua peralatan portabel ini membutuhkan energi yang di kemas dalam bentuk baterai. Sehingga alat-alat portabel di atas sangat bergantung pada kandungan energi yang di simpan di dalam baterai.

Dalam hal ini ketidakmampuan baterai untuk menyimpan energi dalam waktu lama dan membutuhkan waktu yang relatif lama untuk mengisi ulang kembali (*recharge*) menjadi titik lemah pada alat-alat portabel di atas. Selain itu baterai mempunyai dampak yang buruk pada lingkungan ketika di buang ke lingkungan, karena baterai terbuat dari bahan kimia. Oleh karena itu perlu di pikirkan pengembangan teknologi *micro power generator* yang memiliki densitas energi tinggi, memiliki waktu operasi yang relatif panjang dengan waktu isi ulang yang lebih pendek dan juga ramah lingkungan. *Micro power generator* merupakan baterai yang di proyeksikan mampu mengatasi permasalahan yang ada pada baterai generasi sekarang ini. *Micro power generator* terdiri dari *micro/meso-scale combustor* dan alat konversi energi termal menjadi listrik.

Micro/meso-scale combustor dengan pembakaran dan api yang stabil merupakan komponen yang sangat penting dalam *micro power generator*. Tetapi tidak mudah menjaga agar pembakaran berlangsung stabil dalam *micro/meso-scale combustor*. Hal ini karena ukuran ruang bakar yang kecil, sehingga waktu bahan bakar berada dalam ruang bakar (*fuel residence time*) terbatas. Selain itu tingginya laju kehilangan panas (*heat loss*) juga mengakibatkan terjadinya pemadaman api. Untuk mendapatkan kestabilan api dalam *micro-/meso-scale combustor* ini dapat di lakukan dengan cara meningkatkan waktu bahan bakar berada dalam ruang bakar dan meningkatkan kecepatan reaksi pembakaran serta meminimalisasi besarnya *heat loss*.

Heat loss dalam *micro power generator* di pengaruhi beberapa hal diantaranya adalah konduktivitas *termal* dinding *combustor*. Konduktivitas *termal* material dinding *combustor* mempunyai pengaruh yang sangat signifikan terhadap kestabilan api dalam *micro/meso-scale combustor*. Karena konduktivitas termal dinding *combustor* memiliki dua fungsi yang saling berlawanan yaitu menyebabkan *heat loss* dan *heat recirculation*. Apabila konduktivitas termal dinding *combustor* itu tinggi maka perpindahan panas dari *flame* ke dinding *combustor* akan semakin besar yang menyebabkan *heat loss yang terjadi semakin besar*. Hal ini akan mengakibatkan pemadaman api karena adanya penurunan temperatur dan kecepatan pembakaran, walaupun disisi lain juga terjadi peningkatan resirkulasi panas untuk pemanasan awal reaktan. Sebaliknya konduktivitas termal yang terlalu rendah mengakibatkan rendahnya resirkulasi panas dari nyala api untuk pemanasan awal reaktan, hal ini juga tidak baik untuk kestabilan api. Karena itu perlu diketahui nilai konduktivitas termal yang optimal sehingga api dalam *meso scale combustor* bisa stabil dalam batas mampu nyala yang lebih luas.

Beberapa penelitian telah di lakukan untuk memperoleh kestabilan api dalam *micro* atau *meso-scale combustor*. Seperti yang di lakukan Norton, et al, 2003 yang melakukan penelitian numerik mengenai pengaruh konduktivitas termal dalam *combustor* berbentuk plat paralel. Hasil penelitiannya menyatakan bahwa konduktivitas termal material dinding *combustor* mempunyai peranan yang cukup signifikan terhadap kestabilan api, karena sifat ini menentukan besarnya resirkulasi panas ke reaktan yang diperlukan untuk penyalaan dan kestabilan api. Kemudian disusul penelitian yang dilakukan Miesse, et al, 2004. Hasilnya menunjukkan bahwa dalam merancang *micro/meso-scale combustor* perlu didesain agar *heat recirculation* dapat terbentuk dengan sebaik-baiknya sehingga dapat terjadi pembakaran dalam *micro-* atau *meso-scale combustor*. Selanjutnya dalam penelitian yang di lakukan oleh Mikami, et al, 2012 diamati kestabilan api didalam *meso-scale combustor* yang terbuat dari *quartz glass tube*. Peneliti menyisipkan *wire mesh* yang terbuat dari bahan yang memiliki konduktivitas termal tinggi yaitu *stainless steel* untuk meningkatkan *heat recirculation* dalam *combustor*. Hasilnya didapatkan pembakaran yang stabil, karena *wire mesh* mempunyai peranan sebagai *flame holder* yang mengakibatkan terjadinya *heat recirculation* dari *flame* ke reaktan sehingga terjadi pembakaran yang stabil dalam *meso-scale combustor*.

Sehingga, berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka dalam studi eksperimen ini akan diteliti lebih lanjut tentang pengaruh konduktivitas termal dinding *combustor* terhadap karakteristik pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* didalamnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, dirumuskan sebuah permasalahan yaitu: bagaimana pengaruh konduktivitas termal dinding *combustor* terhadap karakteristik pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh*.

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 *liquid petroleoum gas* (LPG).
- 2) Udara atmosfer digunakan sebagai *oxidizer*, disuplai ke *meso-scale combustor* menggunakan kompresor torak.
- 3) Debit bahan bakar dan udara diatur dengan menggunakan *flowmeter* bahan bakar dan udara.
- 4) *Meso-scale combustor* terbuat dari *quartz glass tube*, *stainless steel*, dan *tembaga* dengan diameter dalam 3.5 mm.
- 5) *Wire mesh* terbuat dari *stainless steel* dengan spesifikasi 60 mesh/inchi.
- 6) Proses pembakaran yang berlangsung adalah pembakaran *premixed*.
- 7) Karakteristik pembakaran yang diamati adalah visualisasi api, dan *flammability limit*

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh konduktivitas termal dinding *combustor* terhadap bentuk nyala, stabilitas api dan *flammability limit* dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* didalamnya.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

1. Dapat mengetahui jenis material *meso-scale combustor* yang memiliki daerah kestabilan api dan *flammability limit* paling luas.
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. Diharapkan dapat memberikan dasar untuk perbaikan selanjutnya dalam desain *micro* dan *meso-scale combustor*.

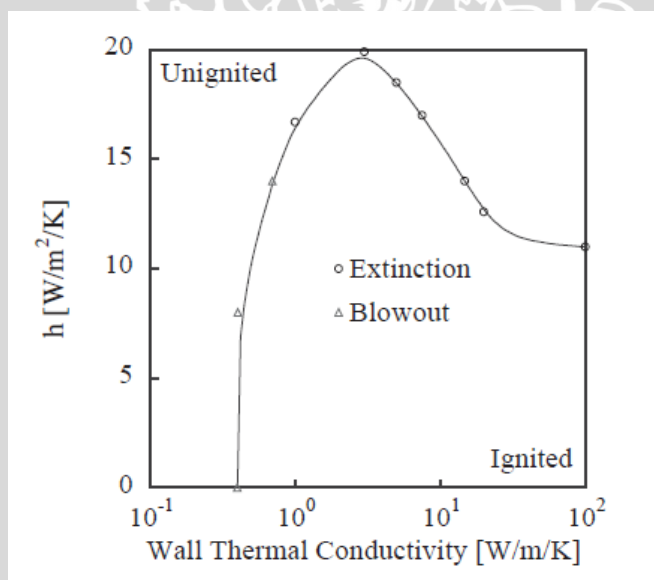


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Norton, et al, 2003 meneliti mengenai pengaruh konduktivitas termal material *combustor* terhadap kestabilan pembakaran premix, hasilnya digambarkan dengan grafik kestabilan api yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Material dengan konduktivitas termal rendah mengakibatkan rendahnya perpindahan panas secara konduksi ke arah *upstream*, menghasilkan kurangnya pemanasan awal reaktan. Hal ini menyebabkan terjadinya *blow-out* karena penyalaan api sulit untuk dilakukan. Sebaliknya material *combustor* dengan konduktivitas termal yang terlalu tinggi mengakibatkan besarnya kehilangan kalor secara konveksi dari dinding *combustor* ke lingkungan, mengakibatkan terjadinya pemadaman api (*extinction*) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Konduktivitas termal yang optimum untuk menghasilkan pembakaran yang stabil dengan *flammability limit* yang lebih luas adalah 3 – 5 W/mK.

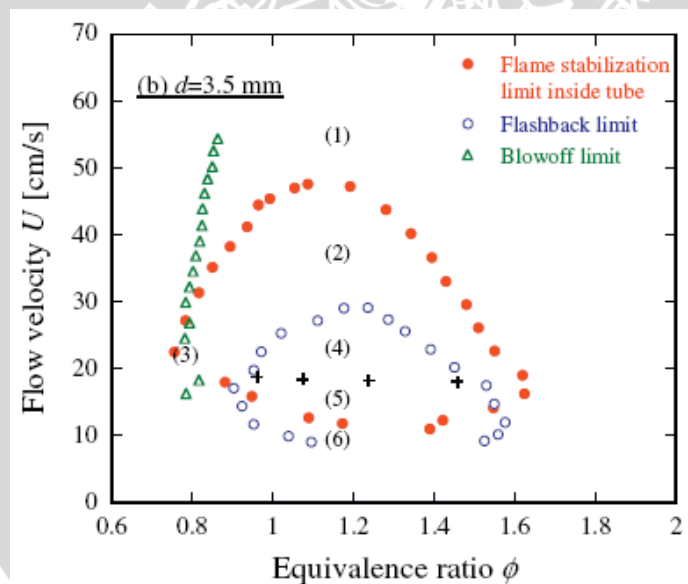


Gambar 2.1. Diagram kestabilan api dalam *micro-combustor*.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan Miesse, et al, 2004 dia membuktikan pembakaran dalam *micro-* atau *meso-scale combustor* memungkinkan terjadi asalkan komposisi dan struktur dari material dinding combustor dikontrol dengan sebaik mungkin. Miesse menyimpulkan bahwa ada tiga syarat agar pembakaran didalam *micro-* atau *meso-scale combustor* dapat terjadi diantaranya adalah *combustor* perlu dirancang dengan sebaik mungkin terisolasi agar heat recirculation dapat terbentuk

dengan sebaik-baiknya sehingga dapat terjadi pembakaran dalam *micro-* atau *meso-scale combustor*. Dari penelitian tersebut ditunjukkan bahwa pembakaran dalam *micro-* atau *meso-scale combustor* dapat terjadi apabila memperhatikan rancangan dari *combustor*.

Kemudian baru-baru ini Mikami, et al, 2012 melakukan penelitian tentang penggunaan *wire mesh* pada *meso-scale combustor* terhadap kestabilan api dan kecepatan pembakaran (*flame propagation*). Dari hasil penelitian tersebut diketahui bahwa dengan menyisipkan sebuah *wire mesh* yang terbuat dari material yang memiliki nilai konduktivitas thermal yang tinggi yakni *stainless steel*, dapat menstabilkan pembakaran dalam *meso-scale combustor* yang terbuat dari material yang terbuat dari bahan yang memiliki nilai konduktivitas rendah yakni *quartz glass tube*. Itu disebabkan karena *wire mesh* memiliki peranan sebagai *flame holder* yang mengakibatkan terjadinya perpindahan panas (*heat recirculation*) dari *flame* ke reaktan sehingga terjadi pembakaran yang stabil dalam *meso-scale combustor*. *Stable flame* terjadi pada *downstream mesh*. Tanpa mesh *stable flame* hanya terjadi pada ujung pipa seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram kestabilan api dan *flammability limit* dalam *meso-scale combustor*
Sumber : (Mikami, et al, 2012 in press)

Dari penelitian ini juga diketahui bahwa kecepatan pembakaran (*flame propagation*) meningkat di daerah sekitar *wire mesh*. Hal ini terjadi karena *wire mesh* dapat meningkatkan perpindahan panas konduksi dari *flame* melalui dinding *combustor* untuk pemanasan awal reaktan, sehingga temperatur dan kecepatan pembakaran juga

meningkat. Sehingga api (pembakaran) menjadi lebih stabil dalam batas nyala tertentu. Seperti yang ditunjukkan pada diagram di

Dalam penelitian ini akan diamati karakteristik pembakaran dalam *meso-scale combustor* yang terbuat dari material yang memiliki nilai konduktivitas thermal yang berbeda-beda dengan *wire mesh* di dalamnya.

2.2 Pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi kimia dan sehari-hari dekat dengan kehidupan kita, bahkan 90% energi di dunia diperoleh dari proses pembakaran fosil, pembakaran sendiri merupakan reaksi eksotermis, reaksi eksotermis ialah reaksi yang membebaskan kalor ke lingkungan.

Ciri-ciri reaksi eksotermis adalah:

- Disertai kenaikan suhu
- Biasanya suhu sistem lebih besar dari suhu lingkungan
- Kalor berpindah dari sistem ke lingkungan
- Biasanya menghasilkan gas contohnya gas CO_2 dan H_2

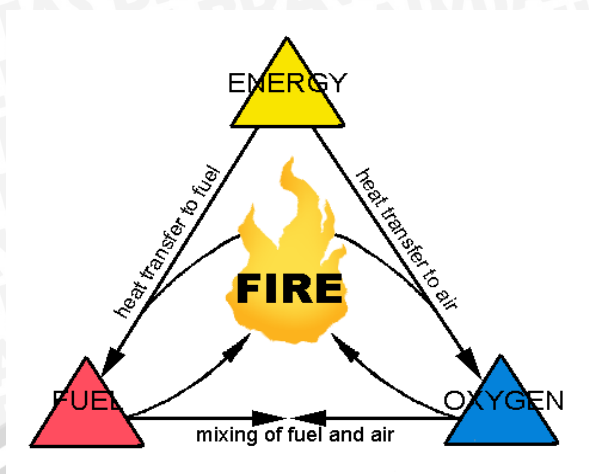
2.2.1 Definisi Pembakaran

Definisi pembakaran yaitu reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen atau udara) yang menghasilkan panas dan cahaya.

Ada tiga syarat utama agar pembakaran bisa terjadi yaitu:

1. Bahan bakar
2. Pengoksidasi (oksigen atau udara)
3. Panas atau energi aktivasi

Berikut ini merupakan sebuah ilustrasi bagaimana pembakaran bisa terjadi.



Gambar 2.3 Ilustrasi proses pembakaran

Sumber : chemical-sciene.blogspot.com

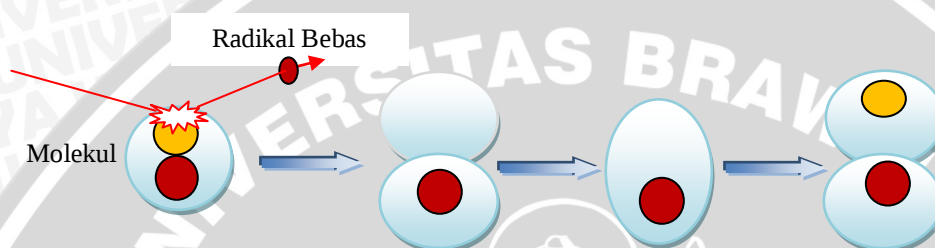
Agar suatu proses pembakaran bisa terjadi perlu adanya energi aktivasi dimana energi ini berfungsi untuk mengaktifkan molekul – molekul bahan bakar, sehingga molekul – molekul tersebut menjadi bermuatan dengan cara melepaskan satu atau beberapa elektron dari kulit terluar atom atau memutuskan ikatan rantai molekul. Akan tetapi yang perlu di perhatikan apabila terlalu banyak atau terlalu sedikit oksidator pada jumlah bahan bakar tertentu akan mengakibatkan tidak terbakarnya bahan bakar dan terbentuk CO. Jumlah oksigen tertentu sangat di butuhkan agar pembakaran dapat terjadi secara sempurna, selain itu dibutuhkan tambahan udara berlebih untuk menjamin pembakaran yang terjadi benar – benar sempurna. Walaupun demikian apabila terlalu banyak tambahan udara berlebih maka akan mengakibatkan kehilangan panas (heat loss) dan buruknya efisiensi.

2.2.2 Reaksi Pada Proses Pembakaran

Pada proses pembakaran terjadi proses kimia kompleks antara bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen atau udara). Kondisi dimana di capai pembakaran yang sempurna yang di sebut pembakaran stoikiometri. Pembakaran stoikiometri dapat di katakan pembakaran sempurna karena semua atom dari bahan bakar dan pengoksidasi bereaksi seluruhnya (sempurna) dan menghasilkan berbagai produk CO₂, H₂O, dan N₂.

Agar reaksi pembakaran bisa berlangsung maka molekul – molekul bahan bakar dibuat bermuatan dengan cara memutus ikatan kimia suatu bahan

bakar menjadi molekul bermuatan yang disebut ion. Molekul bermuatan akibat pemutusan ikatan molekul – molekul disebut radikal bebas. Radikal bebas ini jika menghantam (menumbuk) molekul lainya dapat menyebabkan antara ikatan molekul tersebut merenggang dan mengerut secara electron seperti yang ditunjukan pada gambar 2.2. Dengan tambahan sedikit energi dari luar pada saat jarak ikatan atom dalam keadaan merenggang dapat menyebabkan atom – atom dalam molekul terputus dan bermuatan. Jadi peranan radikal bebas sangat berpengaruh dalam membantu proses reaksi di dalam pembakaran.



Gambar 2.4 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 tripel lebih kuat pada ikatan rangkap dan seterusnya.

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

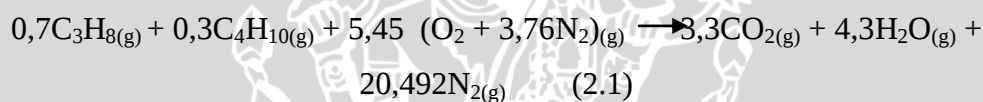
1. Dengan pemanasan bahan bakar terlebih dahulu sebelum melakukan proses pembakaran. Pemanasan ini membuat gerakan molekul – molekul bahan bakar dan pengoksidasi menjadi lebih cepat dan tumbukan antar molekul menjadi sangat keras. Akibatnya beberapa atom dengan ikatan lemah terlepas.
2. Dengan menggunakan katalis, disini katalis berperan untuk merangsang elektron yang mengikat atom dalam molekul bahan bakar agar meninggalkan molekul bahan bakar sehingga molekul pecah dan bermuatan.

3. Mengganggu lintasan elektron pada molekul dengan menggunakan magnet. Dengan diganggunya elektron diharapkan elektron dapat meninggalkan molekul sehingga molekul jadi bermuatan.

Beberapa cara diatas secara langsung mengganggu elektron yang merupakan pengikat molekul agar elektron – elektron meninggalkan molekul dengan tujuan untuk memutus ikatan rantai molekul sehingga menyebabkan turunya energi aktivasi dan pembakaran jadi lebih muda efeknya bahan bakar dapat terbakar secara maksimal.

2.2.3 Pembakaran dan Campuran Stoikiometri

Pembakaran stoikiometri merupakan suatu pembakaran yang terjadi jika semua unsur C, H, dan S yang terkandung dalam bahan bakar bereaksi membentuk CO₂, H₂O, dan SO₂. Pembakaran sempurna dapat dicapai dengan percampuran yang tepat antara bahan bakar dengan oksidator (oksigen). Dibawah ini merupakan contoh pembakaran sempurna pada hidro karbon :



Reaktan

Produk

Pada kondisi yang umum udara yang di pakai untuk mengoksidasi bahan bakar pada kenyataanya mengandung oksigen (O₂), Nitrogen (N₂), Argon (Ar), Karbon dioksida (CO₂), Uap air (H₂O) dan sejumlah gas dalam bagian yang cukup kecil. Udara yang normal merupakan campuran gas – gas meliputi 78% N₂; 20%O₂; 0,94% Ar; 0,03% CO₂ dan gas – gas lainnya dengan konsentrasi yang sangat kecil. Komposisi udara kering yang bersih, dapat dilihat pada tabel 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 % O₂ dan 79% N₂. Oleh karena itu, pada reaksi pembakaran dengan udara, penggunaan 1 mol O₂ akan melibatkan penggunaan $\left(\frac{79,0}{21,0}\right) = 3,76$ mol N₂. Untuk dapat mencapai pembakaran yang sempurna semua atom C diharapkan dapat terbakar menjadi CO₂ dan semua atom H₂ dapat terbakar menjadi H₂O.

2.2.4 Ratio Udara – Bahan Bakar (AFR)

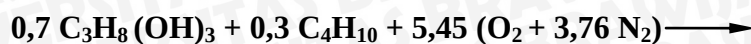
Perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting pula dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran (produk) proses pembakaran.

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

$$(AFR)_{\text{stoic}} = \left(\frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{bahan bakar}}} \right)_{\text{stoic}} \quad (2.2)$$

$$(AFR)_{\text{stoic}} = \left(\frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{bahan bakar}}} \right)_{\text{stoic}} \quad (2.3)$$

Pada pecampuran udara – bahan bakar pada LPG dengan perbandingan komposisi (70% propane dan 30% butane) stoikiometri diperoleh rasio seperti dibawah ini:



$$\text{AFR} = \frac{5,45 (2 \times 16 + 3,76 \times 14 \times 2)}{0,7(12 \times 3 + 8) + 0,3 (4 \times 12 + 10)} = 15,5223 \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}}$$

2.2.5 Rasio Ekuivalen (*Equivalent Ratio*)

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

$$\Phi = \frac{\text{AFR}_s}{\text{AFR}_a} \quad (2-4)$$

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

2.3 Jenis-jenis Pembakaran

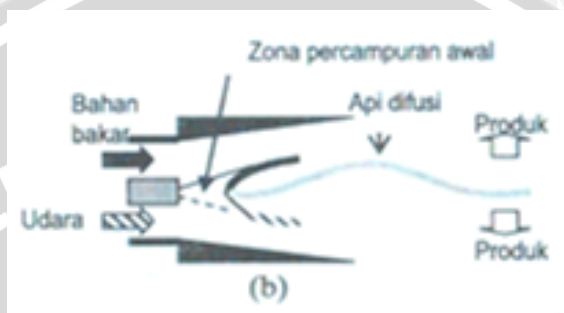
Pembakaran pada umumnya ditentukan oleh dua karakter, karakter yang pertama di tentukan cara reaktan terbakar dalam zona reaksi. Ada dua jenis pembakaran berdasarkan karakteristik yang pertama yakni:

1. Pembakaran *premixed*
2. Pembakaran difusi

Pembakaran *premixed* ialah apabila reaktan (udara – bahab bakar) tercampur sebelum masuk pada zona reaksi. Sedangkan pembakaran difusi percampuran bahan bakar dan udara yang berlangsung di zona reaksi adalah akibat difusi molekul. Dibawah ini merupakan penjelasan dari pembakaran difusi lebih lanjut.

Pada pembakaran difusi, bahan bakar dan udara masuk ke dalam ruang bakar melalui saluran yang berbeda dan keluar dalam bentuk produk setelah terbakar di zona reaksi. Bahan bakar dan udara bercampur di zona reaksi akibat difusi molekul dan setelah bercampur sempurna kemudian terbakar. Sebelum api difusi terbentuk, terlebih

dahulu bahan bakar dan udara bercampur didaerah percampuran awal dan terbakar membentuk api *premixed* sebagian. Api *premixed* pada sisi bahan bakar menjadi kaya bahan bakar dan api yang disisi udara menjadi api kaya udara atau api miskin bahan bakar, peran api premixed sebagai penyetabil api difusi. Api difusi tidak bisa merambat menuju bahan bakar karena kekurangan oksigen demikian juga sebaliknya api difusi tidak bisa merambat menuju udara karena kekurangan bahan bakar. Posisi api difusi berada pada daerah campuran udara bahan bakar stoikiometri.



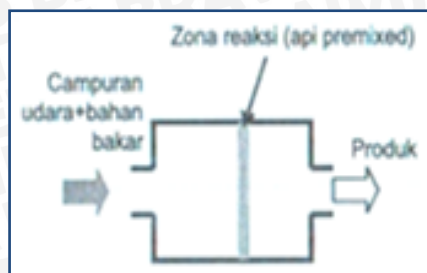
Gambar 2.5 Cara reaktan terbakar pada pembakaran difusi

Sumber : Wardana (2008:149)

Karakter yang kedua ditentukan berdasarkan karakter aliran reaktan yaitu aliran laminar atau aliran turbulen. Pada pembakaran dengan aliran laminar semua proses percampuran dan proses penajlaran reaktan maupun panas terjadi secara molekuler. Dan pada pembakaran dengan aliran turbulen semua proses percampuran dan penajlaran di bantu oleh gerakan – gerakan pusaran turbulen.

2.4 Pembakaran Premixed

Pada pembakaran *premixed* terjadi perambatan gelombang pembakaran yang disebut dengan *flame front*. Gelombang pembakaran merambat ke arah reaktan, dan di belakang gelombang pembakaran terbentuk produk pembakaran. Pada gambar reaktan (bahan bakar dan udara) bercampur sebelum masuk ke zona reaksi. Proses reaksinya berlangsung sangat cepat biasanya pada tekanan tetap. Setelah melewati zona reaksi reaktan menjadi produk. Zona reaksi sangat tipis yang disebut api *premixed*. Api *premixed* akan merambat menuju ke arah reaktan dengan kecepatan unik. Jika kecepatan reaktan sama dengan kecepatan rambatan api maka api (zona reaksi) akan stasioner.



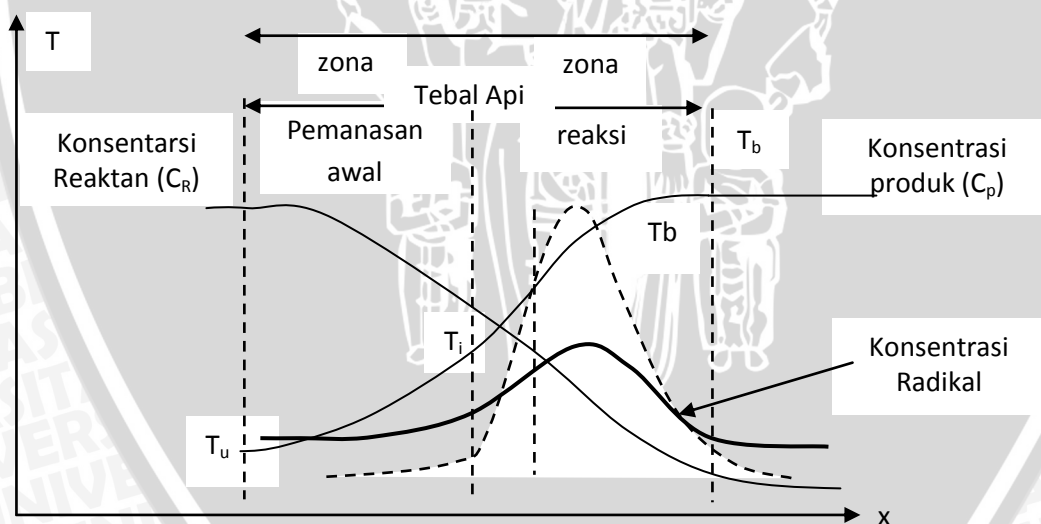
Gambar 2.6 Cara reaktan terbakar pada pembakaran premixed

Sumber : Wardana (2008:149)

Dalam gelombang pembakaran terdapat dua zona yaitu :

1. Zona pemanasan awal (*preheat zona*).
Daerah dimana panas belum terlalu tinggi dan masih banyak bahan bakar yang belum terbakar (*unburn fuel*).
2. Zona reaksi (*reaction zona*) Daerah dimana sebagian besar energy kimia dilepaskan.

Seperti terlihat pada gambar 2.5 berikut :



Gambar 2.7 Detail struktur di dalam api *premixed*.

Sumber: Wardana (2008:155)

Keterangan gambar:

C_R = konsentrasi reaktan

T_i = temperatur intermediate

C_p = konsentrasi produk

T_b = temperatur produk

T = distribusi temperatur

T_u = temperatur reaktan

U = distribusi kecepatan gas

Distribusi konsentrasi reaktan, konsentrasi produk, konsentrasi radikal, temperatur dan kecepatan gas seperti terlihat pada gambar 2.5. Radikal akan selalu muncul pada zona reaksi sebagai konsekuensi dari reaksi tersebut. Dalam api terjadi gradien temperatur, dimana temperatur produk lebih tinggi dari temperatur reaktan. Oleh karena itu berdasarkan hukum termodinamika maka akan terjadi transfer panas dari produk ke reaktan. Transfer panas yang terus menerus tersebut akan meningkatkan temperatur reaktan. Jika temperatur reaktan meningkat maka daerah pemanasan awal akan bergeser ke kiri, sedangkan zona yang terjadi menjadi zona pemanasan awal temperaturnya akan lebih tinggi sehingga terjadi pembakaran. Peristiwa ini terjadi secara kontinyu sehingga api merambat ke arah reaktan. Kecepatan rambatan api tersebut disebut kecepatan pembakaran. Kecepatan pembakaran dalam pembakaran premixed biasanya di beri notasi S_L .

2.4.1 Kecepatan Pembakaran

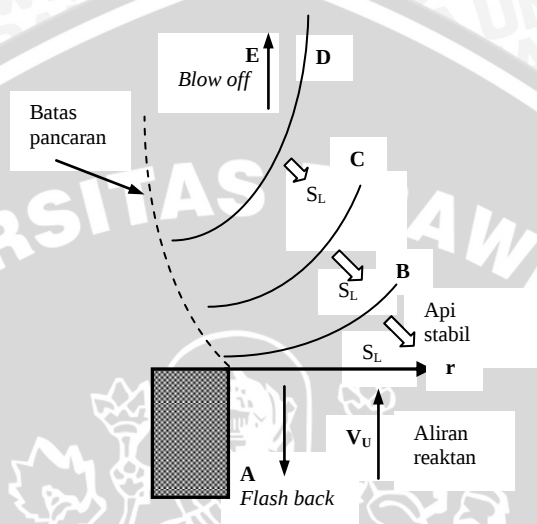
Kecepatan pembakaran merupakan gelombang pembakaran (api) menuju reaktan yang terjadi karena adanya gradien temperatur antara produk yang memiliki temperatur tinggi dan reaktan yang memiliki temperatur rendah, sehingga terjadi transfer panas dari produk ke reaktan. Faktor-faktor yang mempengaruhi kecepatan pembakaran diantaranya adalah :

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

2.4.2 Kestabilan Api dan *Flammability Limit*

Pada pembakaran *premixed*, api akan stabil bila kecepatan reaktan V_U = kecepatan pembakaran S_L . Bila $V_U < S_L$ akan mengakibatkan terjadinya *flash back*. Tetapi sebaliknya, bila $V_U > S_L$ akan mengakibatkan terjadinya *lift-off* atau *blow-off*. Kestabilan api dalam *micro- atau meso-scale combustor* sangat sulit untuk diwujudkan. Kecepatan reaktan harus diperbesar bila ingin mendapatkan

laju pembangkitan energi yang tinggi pada ruang bakar yang kecil. Selanjutnya, dengan ukuran ruang bakar yang kecil laju kehilangan panas (*heat loss*) sangat besar sehingga menyebabkan penurunan dan kecepatan pembakaran yang pada akhirnya mengakibatkan pemadaman api. Oleh karena itu, kestabilan api dalam *micro* atau *meso-scale combustor* menjadi masalah yang sangat krusial.



Gambar 2.8 mekanisme kestabilan api *premixed*
Sumber : Wardana (2008:171)

Menggunakan *external heating* atau menggunakan katalis adalah upaya untuk meningkatkan kecepatan pembakaran, yang dilakukan pada penelitian sebelumnya. Tetapi penggunaan *external heating* atau menggunakan katalis tidak efisien. Karena memerlukan tambahan energi untuk pemanas yang sangat besar ditambah lagi harga katalis yang sangat mahal. Sehingga muncul pemikiran menggunakan *micro- atau meso-scale combustor* tanpa menggunakan *external heating* atau penggunaan katalis.

Suatu hal yang sangat penting dalam perencanaan pembakaran gas adalah mencegah terjadinya *flashback* dan *blow-off*. Batas kestabilan nyala api berhubungan erat dengan fenomena *flashback*, *lift-up*, dan *blow-off*.

2.4.3 Fenomena *Flashback*

Flashback terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih besar daripada kecepatan campuran udara-bahan bakar, sehingga nyala api masuk kesaluran campuran reaktan menuju tabung bahan bakar (sumber bahan bakar), dapat juga disebut sebagai *back fire* atau *light back*. *Flashback* tidak hanya mengganggu

proses pembakaran, tetapi juga dari sisi keamanan bisa menjadi berbahaya karena bisa mengakibatkan terjadinya kebakaran & ledakan.

2.4.4 Fenomena *Lift-off*

Lift-off adalah kondisi dimana nyala api tidak menyentuh permukaan mulut tabung pembakar, tetapi agak stabil pada jarak tertentu dari ujung tabung pembakar. Fenomena nyala api terangkat (*lift-off*) sangat tergantung pada sifat aliran dekat ujung (mulut) tabung pembakar. Apabila kecepatan aliran cukup rendah, ujung bawah nyala api berada sangat dekat dengan ujung tabung pembakar dan hal ini dapat dikatakan api menempel.



Gambar 2.9 Fenomena *lift-off* pada *mini tube nozzle*
Sumber : (J.Chen, *et al*, in press)

Dengan meningkatkan kecepatan aliran hingga mencapai kecepatan kritis, ujung nyala akan meloncat keposisi jauh dari ujung (mulut) pembakar dan nyala dikatakan terangkat. Kondisi nyala terangkat inilah yang dikatakan *lift-off*. Jika kecepatan aliran terus dinaikkan, maka nyala secara kasar akan padam dan kondisi ini tidak diinginkan.

2.4.5 Fenomena *Blow-Off*

Blow-off merupakan suatu keadaan dimana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran. Maka dari itu pengaturan debit pada bahan bakar dan udara sangat diperlukan, untuk menghindari kondisi seperti ini.

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro (*Micro Power Generator*)

Semakin meningkatnya penggunaan alat – alat listrik portabel mendorong berkembangnya pembangkit tenaga listrik skala kecil (*micro – power generator device*) dalam dua dekade terakhir ini. Tenaga listrik untuk peralatan portabel, selama ini di penuhi dengan menggunakan berbagai macam baterai salah satunya adalah baterai litium ion. Baterai ini memiliki densitas energi yang rendah. Oleh karena itu waktu penggunaanya relatif lebih pendek jika dibandingkan dengan waktu isi ulang yang relatif lebih panjang. Saat ini baterai belum dapat memenuhi kebutuhan akan sumber energi dengan densitas yang tinggi dengan waktu isi ulang yang cepat, hal inilah yang mendorong untuk penelitian lebih lanjut mengenai *micro – power generator*.

Micro – power generator ini sendiri di klasifikasikan dalam dua kategori utama (Kyritsis, 2002). Kategori yang pertama meliputi *micro – power generator* yang beroperasi berdasarkan pada siklus daya konvensional, contohnya mesin mikro rotari dan mikro gas turbin. Prinsip dasar pembangkitan energi listrik dalam sistem ini adalah: energi thermal dikonversikan menjadi energi mekanik berdasarkan pada suatu siklus termodinamika tertentu, dilanjutkan dengan energi mekanik dikonversikan menjadi energi listrik menggunakan generator listrik. Sistem ini mencakup peralatan yang bergerak dengan kecepatan yang sangat tinggi, sehingga menyebabkan kehilangan energi karena gesekan dan panas dalam jumlah yang sangat besar. Sistem ini juga memiliki masalah yang cukup serius pada balancing dan sealing. Kategori yang kedua mencakup sistem dengan pembakaran dalam kondisi steady (yang berfungsi sebagai sumber panas), yang dihubungkan dengan modul pengkonversi energi untuk mengkonversikan energi panas menjadi energi listrik.

Dalam hal ini *micro power generator* direncanakan menggunakan bahan bakar fosil yang memiliki densitas energi sekitar 45MJ/Kg, kira – kira 100 kali lebih besar dari pada densitas yang dimiliki baterai litium terbaik yakni sekitar 0.5MJ/Kg. Jika *micro – power generator* dapat membangkitkan listrik dengan efisiensi sebesar 10% maka alat tersebut akan mempunyai densitas energi 10 kali lebih besar dari pada densitas yang dimiliki baterai – baterai di pasaran. Tetapi konsep mengenai *micro – power generator* ini masih merupakan sesuatu yang baru sehingga belum banyak yang mengembangkan konsep ini. Efisiensi dari sistem yang telah berhasil dibuat masih menghasilkan efisiensi yang sangat rendah. Sehingga masih sangat memungkinkan

untuk melakukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan micro – power generator dengan efisiensi dan densitas energi yang tinggi.

2.6 Micro dan Meso-scale Combustor

Meso-scale combustor merupakan ruang bakar yang mempunyai ukuran yang sangat kecil dengan *range* diameter 1-10mm bila dibandingkan dengan ruang bakar pada umumnya seperti yang kita ketahui selama ini seperti ruang bakar motor bensin maupun motor diesel. Sumber energi dari *micro-power generator* adalah energi termal dari *micro- dan meso-scale combustor* yang nantinya dikonversi menjadi energi listrik.

Pembakaran yang stabil dari *micro- atau meso-scale combustor* merupakan hal yang paling penting dalam *micro-power generator*, karena berfungsi untuk merubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas, yang selanjutnya dikonversikan menjadi energi listrik. Dalam *micro- atau meso-scale combustor* menjaga kestabilan api pada saat pembakaran terjadi sangat sulit diwujudkan dikarenakan waktu reaksi (pembakaran) bahan bakar dalam ruang bakar terbatas dan tingginya laju kehilangan panas (*heat loss*) yang mengakibatkan pemadaman api. Untuk memperbaiki stabilitas api dan *flammability limit* dalam *micro- atau meso-scale combustor* banyak dilakukan penelitian menggunakan *micro- atau meso-scale combustor* dengan bahan bakar gas. Beberapa diantaranya yang dilakukan oleh (Yang, et al, 2002) dia menggunakan dinding *combustor* berundak dengan tujuan untuk memperbaiki pencampuran udara – bahan bakar dan memperpanjang waktu bahan bakar berada dalam daerah reaksi pembakaran. Kemudian pada tahun 2007 (Kim, et al, 2007) melakukan penelitian dengan tujuan untuk mengurangi kehilangan kalor dan pemanasan awal reaktan dia menggunakan *swiss – roll combustor*. Pemanasan reaktan (bahan bakar) atau dinding ruang bakar dilakukan untuk meningkatkan stabilitas api dan memperluas *flammability limit*.

Micro- atau meso-scale combustor memiliki ukuran dan komponen – komponen yang sangat kecil dibandingkan ruang bakar pada umumnya mengakibatkan terjadinya karakteristik khusus sehubungan dengan aliran fluida, perpindahan panas, dan proses pembakaran yang ada didalamnya. Dalam *micro- atau meso-scale* memiliki ruang bakar yang berukuran kecil sehingga aliran fluidanya cenderung bersifat laminar, sehingga efek viskos serta perpindahan massa dan panas secara difusi menjadi dominan. Selain itu, dengan ukuran ruang bakar yang kecil membuat perbandingan antara luas

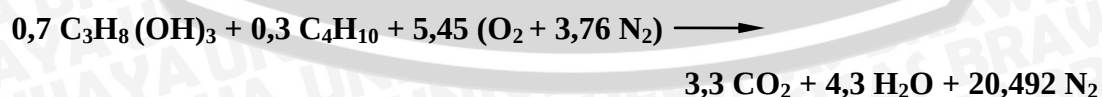
permukaan terhadap volume ruang bakar menjadi lebih besar. Hal ini menyebabkan perbandingan antara kehilangan kalor (*heat loss*) dengan kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran (*heat generator*) menjadi lebih besar serta, sehingga menghasilkan penurunan temperatur nyala api dan penurunan kecepatan pembakaran yang pada akhirnya menyebabkan pemadaman api (*flame quenching*).

Radical quenching merupakan faktor lain yang menyebabkan pemadaman api yang terjadi pada dinding ruang bakar. *Radical quenching* adalah bereaksinya radikal bebas yang menghasilkan kestabilan unsur ketika berada pada dinding ruang bakar. Bertambahnya jumlah radikal bebas akan menurunkan kecepatan pembakaran, hal ini yang pada akhirnya juga akan mengakibatkan pemadaman api.

Dari penjelasan diatas, diketahui bahwa tidaklah mudah untuk mendapatkan pembakaran dann api yang stabil dalam *micro- atau meso-scale combustor*. Oleh karena itu dalam penelitian ini saya mencoba untuk mengubah material dinding *combustor* yang memiliki nilai konduktivitas yang berbeda – beda dengan harapan bisa memperoleh pembakaran dan api yang stabil serta memperluas daerah *flammability limit* dengan mereduksi *heat loss*.

2.7 Liquid Petroleum Gas (LPG)

LPG merupakan bahan bakar berupa gas yang dicairkan (*Liquified Petroleum Gasses*) merupakan produk minyak bumi yang diperoleh dari proses distilasi bertekanan tinggi. Fraksi yang digunakan sebagai umpan dapat berasal dari beberapa sumber yaitu dari Gas alam maupun Gas hasil dari pengolahan minyak bumi (*Light End*). Komponen utama LPG terdiri dari Hidrokarbon ringan berupa Propana (C_3H_8) dan Butana (C_4H_{10}), serta sejumlah kecil Etana (C_2H_6) dan Pentana (C_5H_{12}), dengan perbandingan Propana (C_3H_8) : Butana (C_4H_{10}) = 30 : 70 seta nilai kalor ± 21.000 BTU/lb.dengan persamaan kimia dibawah ini :



LPG digunakan sebagai bahan bakar untuk rumah tangga dan industri. LPG terutama digunakan oleh masyarakat tingkat menengah keatas yang kebutuhannya semakin meningkat dari tahun ketahun karena termasuk bahan bakar yang ramah lingkungan. Sebagai bahan bakar untuk keperluan rumah tangga, LPG harus memenuhi

beberapa persyaratan khusus dengan tujuan agar aman dipakai dalam arti tidak membahayakan bagi si pemakai dan tidak merusak peralatan yang digunakan serta efisien dalam pemakaiannya.

Oleh sebab itu untuk menjaga faktor keselamatan, LPG dimasukkan ke dalam tabung yang tahan terhadap tekanan yang terbuat dari besi baja dan dilengkapi dengan suatu pengatur tekanan. Disamping itu untuk mendeteksi terjadinya kebocoran LPG, maka LPG sebelum dipasarkan terlebih dahulu ditambahkan zat pembau (*odor*) sehingga apabila terjadi kebocoran segera dapat diketahui. Pembau yang ditambahkan harus melarut sempurna dalam LPG, tidak boleh mengendap. Untuk maksud itu digunakan etil merkaptan (C_2H_5SH) atau butil merkaptan (C_4H_9SH). Sedangkan dibidang industri produk elpiji digunakan sebagai pengganti *freon*, *aerosol*, *refrigerant* / *cooling agent*, kosmetik dan dapat pula digunakan sebagai bahan baku produk khusus.

2.7.1 Jenis LPG

Sesuai dengan penggunaannya sebagai bahan bakar elpiji dibedakan atas:

1. LPG Mix

Adalah campuran propane dan butana dengan komposisi antara 70-80% dan 20-30% volume dan diberi odorant (Mercaptant) dan umumnya digunakan untuk bahan bakar rumah tangga.

2. LPG propane dan Elpiji butana.

Adalah elpiji yang masing-masing mengandung propane 95 % dan butana 97,5 % volume dan diberi odorant (mercaptant), umumnya digunakan untuk keperluan industri.

2.7.2 Persyaratan LPG

Syarat-syarat utama dalam pemakaian LPG adalah harus dipenuhinya:

1. Syarat Pembakaran

Pada saat digunakan sebagai bahan bakar untuk kompor LPG harus memberi warna api kompor yang biru dan tidak memberi asap. Agar api kompor berwarna biru, maka komposisi campuran propana dan butana

harus minimum 97,5%. Sebaliknya jika LPG mengandung fraksi C_5^+ (C_6 heavier) lebih dari maksimumnya yaitu 2,0% maka nyala api kompor agak kemerah-merahan. Jadi agar syarat pembakaran menjadi baik maka komposisi C_2 harus maksimum 0,2% vol, C_3 dan C_4 minimum 97,5% vol serta kandungan C_5^+ (C_6 heavier) maksimum 2,0% vol.

2. Syarat Penguapan

Kemampuan menguap adalah sifat penting dalam penggunaan, LPG harus cukup mudah menguap agar mudah dinyalakan diwaktu dingin. Seperti diketahui saat dalam tabung gas LPG adalah berbentuk cair, namun saat dipakai dalam kompor (pada tekanan atmosfer) dengan cepat LPG berubah menjadi gas. Untuk memenuhi persyaratan penguapan maka Tekanan Uap LPG tidak boleh lebih dari 120 psig.

3. Syarat Keselamatan

Dalam pemakaiannya sebagai bahan bakar rumah tangga, jika terjadi kebocoran maka LPG harus cepat dapat dideteksi dengan diberi bau yang khas, agar baunya cepat dikenali saat terjadi kebocoran maka pada LPG diberi campuran Ethyl atau Butyl mercaptan sebanyak 50/100 AG.

Saat masih di pabrik, jika terjadi kebocoran LPG di malam hari akan sangat berbahaya, karena Specific Gravity LPG sama dengan atau lebih besar dari SG udara, maka LPG akan terdistribusi merata di atas tanah pada malam hari.

Untuk menjaga agar cairan LPG tidak merusak tabung gas dalam penyimpanan atau merusak kompor dalam penggunaannya dengan terjadinya proses pengkaratan maka harus ada persyaratan pemeriksaan Copper strip pada 100°F selama 1 jam dengan nilai maksimum No. 1.

4. Syarat Kebersihan

Syarat kebersihan secara umum adalah dibatasinya kandungan air dan kandungan belerang, dimaksudkan agar pada penggunaannya LPG tidak memberikan kotoran sama sekali.

2.7.3 Sifat LPG

Perlu diketahui, gas LPG bersifat *flammable* (mudah terbakar). Dalam batas *flammability*, LPG adalah sumber api yang terbuka. Sehingga letupan (percikan api) yang sekecil apapun dapat segera menyambar gas LPG.

Maka untuk menjaga keamanan pastikan bahwa bau gas LPG telah hilang sama sekali dari dalam rumah, walaupun membutuhkan waktu yang agak lama. Hal ini karena sifat gas LPG yang sangat lamban berputar di udara.

Sebagai bahan bakar, gas LPG mudah terbakar apabila terjadi persenyawaan di udara. Untuk mencegah hal-hal yang tidak diinginkan perlu diketahui beberapa sifat khususnya.

1. Tekanan gas LPG cukup besar, sehingga bila terjadi kebocoran LPG akan membentuk gas secara cepat, memuai dan sangat mudah terbakar.
2. LPG menghambur di udara secara perlahan sehingga sukar mengetahuinya secara dini.
3. Berat jenis LPG lebih besar dari pada udara sehingga cenderung bergerak kebawah.
4. LPG tidak mengandung racun.
5. Daya pemanasannya cukup tinggi, namun tidak meninggalkan debu dan abu (sisa pembakaran).
6. Cara penggunaannya cukup mudah dan praktis.

2.8 Konduktivitas Thermal dan *Heat Loss Management* pada *Meso-scale Combustor*

Konduktivitas thermal atau ketahanan thermal adalah suatu fenomena transport dimana perbedaan temperatur menyebabkan transfer energi thermal dari satu daerah benda panas ke daerah yang sama pada temperatur yang lebih rendah. Panas yang di transfer dari satu titik ke titik lain melalui salah satu dari tiga metode yakni konduksi, konveksi dan radiasi.

2.8.1 Perpindahan Panas Konduksi

Konduksi adalah perpindahan panas dimana panas mengalir dari daerah bersuhu tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah didalam satu medium

(padat, cair, atau gas) atau antara medium – medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung. Perpindahan panas konduksi dapat ditulis dengan persamaan di bawah ini :

$$q = -KA \frac{\delta T}{\delta x}$$

Dimana :

q : laju perpindahan kalor (Btu/h atau W)

k : konduktivitas termal (Btu/h.ft.°F)

A : luas bidang tempat berlangsungnya perpindahan kalor (ft² atau m²)

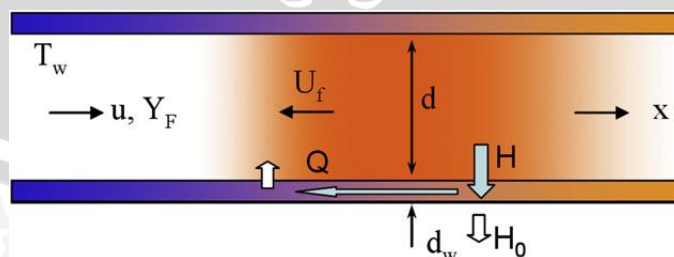
$\frac{\delta T}{\delta x}$: gradien atau landaian suhu (Temperatur gradient) dalam arah perpindahan kalor (°F/ft atau °C/m)

Dua unsur pokok yang menentukan perpindahan panas pada sambungan :

- 1) Konduksi antara zat padat dengan zat padat pada titik singgung
- 2) Konduksi melalui gas yang terkurung pada ruang kosong yang terbentuk pada persinggungan permukaan tidak halus.

2.8.2 Heat Loss Management pada Meso-Scale Combustor

Micro- dan *meso-scale combustor* mempunyai perbandingan permukaan terhadap volume yang relatif tinggi, menghasilkan laju *heat loss* yang tinggi bila dibandingkan terhadap laju perambangkitan kalor volumetric, yang mengakibatkan pemadaman api. Gambar 2.10 menunjukkan skema *heat loss* dan *heat recirculation* dalam *micro-* dan *meso-scale combustor* (Maruta, 2011).



Gambar 2.10 Skema perpindahan panas dari nyala api melalui dinding *combustor* ke campuran udara-bahan bakar dan ke lingkungan.

Ruang bakar (*combustor*) berbentuk pipa dengan diameter dalam d dan diameter luar d_w . Campuran bahan bakar dan udara masuk ke daerah reaksi pembakaran dengan kecepatan u dan fraksi bahan bakar Y_F . Pembakaran terjadi

di daerah reaksi pembakaran, menghasilkan kalor sebesar Q dan *flame* bergerak dengan kecepatan U_f . gas hasil pembakaran dibuang ke lingkungan, dinyatakan dengan x . *Heat loss* dari *flame* (nyala api) dinyatakan dengan H . Sebagian dari *heat loss* (H_0), dikonveksikan ke lingkungan, menyatakan fraksi kalor yang hilang dan cenderung mengakibatkan terjadinya *flame quenching*. Sisanya, sebesar Q , dikonduksikan ke arah *upstream* melalui dinding ruang bakar dan digunakan untuk memanasi reaktan (campuran udara-bahan bakar). Pemanasan awal bahan bakar akan meningkatkan kestabilan pembakaran dan mencegah terjadinya *flame quenching*.

Bila $u = U_f$, maka akan menghasilkan pembakaran stabil pada posisi/titik tertentu dalam ruang bakar. Bila $u > U_f$, api akan mengalami *blow off*, sebaliknya bila $u < U_f$, api akan bergerak ke dalam *combustor* dan akhirnya padam. Phenomena yang disebutkan terakhir disebut *flash back*.

Kestabilan api dapat dicapai bila kecepatan reaktan u dan kecepatan *flame* U_f , mempunyai besar yang relatif sama. Kecepatan *flame* U_f dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti equivalen rasio, temperatur pembakaran, temperatur reaktan, jenis bahan bakar dan lain-lain. Semakin tinggi temperatur reaktan, kecepatan *flame* U_f akan semakin besar. Manajemen *heat loss* dilakukan untuk memaksimalkan fraksi kalor yang dikonduksikan ke arah *upstream* untuk pemanasan awal reaktan (H_0/H) dan meminimalkan fraksi kalor yang hilang ke lingkungan (Q/H).

2.9 Hipotesis

Semakin tinggi konduktivitas termal dinding *combustor* akan mempengaruhi mempengaruhi besarnya *heat recirculation*, dengan meningkatnya *heat circulation* maka diharapkan akan didapatkan pembakaran yang stabil dan semakin luasnya daerah *flammability limit* pada pembakaran dalam *meso-scale combustor*.

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 pada objek yang diteliti. Pada objek yang diteliti akan didapatkan data-data yang kemudian di plot dalam suatu bentuk diagram sehingga membentuk suatu pola kecenderungan tertentu yang nantinya dapat dibandingkan dan diambil suatu kesimpulan tentang objek yang diteliti tersebut.

3.2 Tempat dan waktu pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan pada bulan Oktober 2012 sampai dengan selesai, bertempat di Laboratorium Motor Bakar Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

3.3 Variable Penelitian

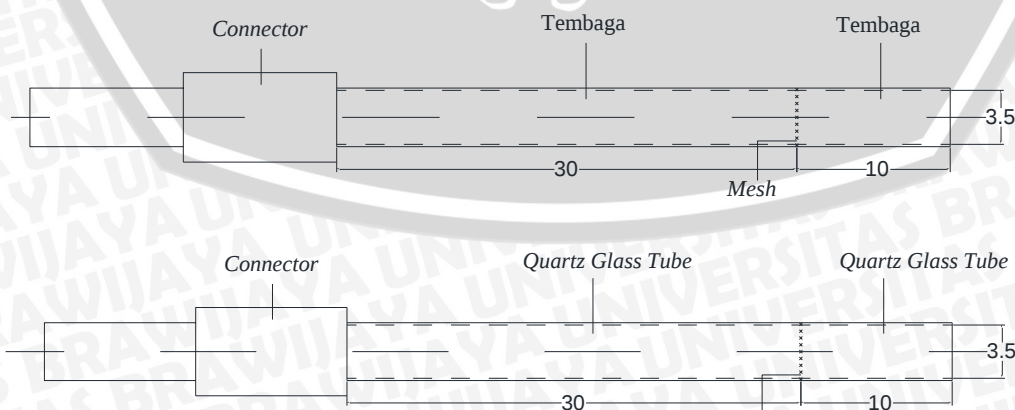
Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

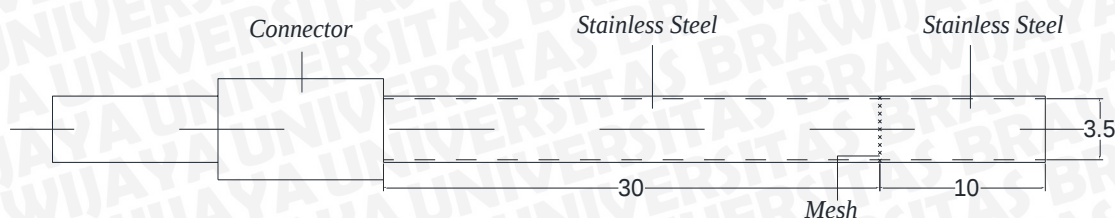
1. Variabel bebas (*independent variable*)

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan sendiri oleh peneliti dan tidak dipengaruhi oleh variabel lain.

Adapun yang merupakan variabel bebas dalam penelitian ini adalah:

- Konduktivitas termal material *combustor* yang terbuat dari: *quartz glass tube*, *stainless steel*, tembaga.





Gambar 3.1 *Meso-Scale Combustor* dengan tiga material dan konduktivitas termal yang berbeda

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 :

- Visualisasi nyala api
- Batas kestabilan api dan *flammability limit*

3. Variabel terkontrol

Parameter yang dijaga tetap atau besarnya dapat ditambah sesuai keinginan peneliti. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah kecepatan bahan bakar dan kecepatan udara.

3.4 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 material *quartz glass tube* (yang tahan temperatur tinggi), *stainless steel*, dan tembaga dengan ukuran diameter dalam 3,5 mm. Konduktivitas termal material tersebut berturut-turut sebesar 1.3; 36 dan 365 W/ (m.K).

2) *Wire mesh*

Wire mesh mempunyai fungsi sebagai *flame holder* dan meningkatkan *heat recirculation* ke reaktan yang belum terbakar. *Wire mesh* terbuat dari *stainless steel* dengan spesifikasi 60 mesh/inch.



Gambar 3.2 Wire mesh dalam meso-scale combustor

Sumber : Dokumen pribadi

3) Kompresor

Alat ini digunakan untuk mengkompresi udara (oksidator) dan mengalirkannya menuju Y-mixer untuk dicampur dengan bahan bakar, kemudian mengalir ke meso-scale combustor.



Gambar 3.3 Kompresor udara.

Sumber : Dokumen pribadi

4) Heat resistant adhesive

Digunakan untuk menyambung/ menghubungkan bagian-bagian meso-scale combustor.

5) Combustor holder

Digunakan sebagai penyangga combustor.



Gambar 3.4 Combustor holder

Sumber: Dokumen Pribadi

6) *Glass Wool*

Digunakan untuk megahambat *heat loss* kelingkungan atau sebagai isolasi panas



Gambar 3.5 *Glass wool*
Sumber : Dokumen pribadi

7) Bahan bakar + tangki bahan bakar.

Digunakan bahan bakar LPG (*Liquid Petroleum Gas*).



Gambar 3.6 *Liquid petroleum gas (LPG)*.
Sumber : Dokumen pribadi

8) *Ignitor*

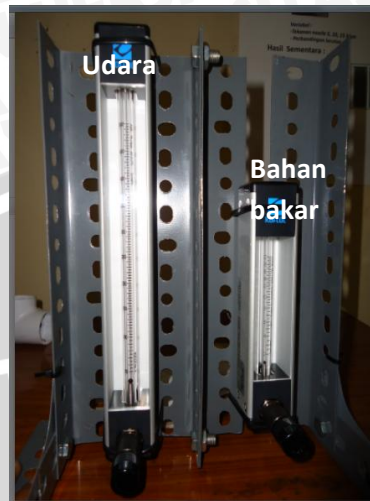
Alat ini digunakan untuk menyalakan api.



Gambar 3.7 *Ignitor*
Sumber : Dokumen pribadi

9) *Flow meter* bahan bakar dan udara

Flow meter digunakan untuk mengukur debit aliran bahan bakar dan udara ke ruang bakar, dengan satuan mL/menit.



Gambar 3.8 *Flow meter* udara dan bahan bakar.

Sumber : dokumen pribadi

10) *Pressure meter* bahan bakar dan udara

Alat ini digunakan untuk mengukur dan mengatur tekanan LPG dan udara.



Gambar 3.9 *Pressure meter* LPG.

Sumber : Dokumen pribadi

11) Kamera

Alat ini digunakan untuk mengambil atau merekam gambar api hasil pembakaran yang terjadi sehingga dapat digunakan untuk analisa visual. Dengan data spesifikasi sebagai berikut:

- Merk : Sony Alpha-300
- Lensa : DT30 mm F2.8 Macro
- ISO range : Auto, 100 - 3200



Gambar 3.10 Kamera dan lensa makro.

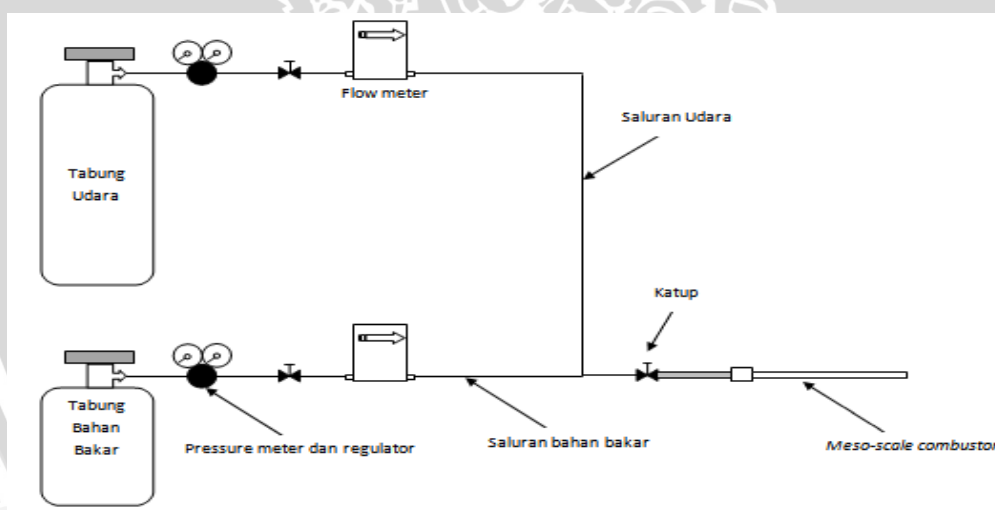
Sumber : Dokumen pribadi

12) Computer note book

Komputer digunakan untuk mengolah, menyimpan dan menampilkan data hasil pengukuran dan pengambilan data.

3.5 Susunan Instalasi penelitian

Peralatan penelitian dirangkai menjadi sebuah instalasi penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar . *Meso-scale combustor* terbuat dari beberapa konfigurasi material dan gambar detailnya ditunjukkan pada Gambar.



Gambar 3.11 Susunan instalasi penelitian

3.6 Metode Pengambilan Data

Bahan bakar dan udara di alirkan ke ruang bakar dari tangki bahan bakar dan tangki udara. Debit bahan bakar dan udara masing-masing diatur dan besarnya debit diukur dengan rotameter. Kestabilan api dan *flammability limit* diperoleh dari pengamatan terjadinya *flash back* dan *blow-off* pada kecepatan reaktan yang berbeda. Pengukuran temperatur api dilakukan pada pusat combustor pada

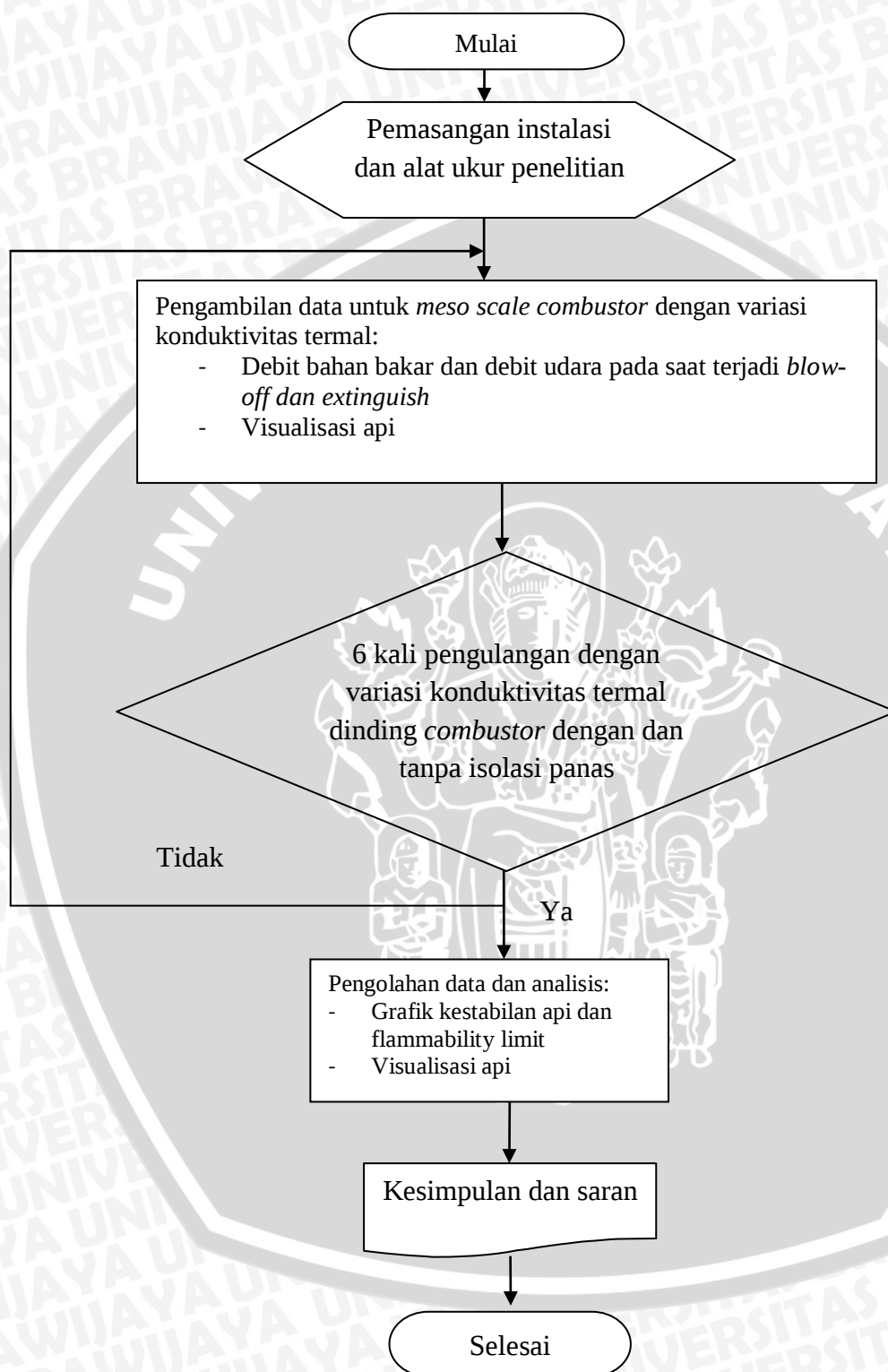
downstream wire mesh dengan jarak 1 mm dan temperatur dinding *combustor* diukur pada jarak 1 mm sebelum wire mesh.

Detail pengambilan data dijelaskan sebagai berikut:

1. Pasang *meso-scale combustor* yang terbuat dari *quartz glass tube*.
2. Aliran bahan bakar di set pada debit 3 ml/menit dan kecepatan udara di set sesuai dengan kondisi stoikiometri.
3. Nyalakan api hingga api menempel di wire mesh.
4. Kecepatan bahan bakar diturunkan secara bertahap hingga api mengalami *blow-off*. Ambil foto untuk setiap kecepatan bahan bakar.
5. Catat rasio ekuivalen (Φ) saat api mengalami *blow-off*.
6. Api dinyalakan kembali pada debit bahan bakar 3 ml/menit dalam keadaan stoikiometri, kemudian kecepatan bahan bakar dinaikan secara bertahap hingga terjadi api padam (*extinguish*). Ambil foto untuk setiap kecepatan bahan bakar.
7. Catat rasio ekuivalen (Φ) saat api padam.
8. Ulangi langkah no 2-7 untuk kecepatan bahan bakar yang lebih besar dengan perubahan debit $\Delta Q = 0,5$ mL/menit sampai api tidak bisa distabilisasi dalam *meso-scale combustor*.
9. Mengulangi langkah no 2 – 8 untuk *meso-scale combustor* yang terbuat dari *stainless steel* dan tembaga
10. Mengulangi langkah no 2 – 8 untuk *meso-scale combustor* yang terbuat dari *stainless steel* dan tembaga dengan isolasi panas
11. Mengulangi langkah no 2 – 8 untuk *meso-scale combustor* pada *combustor* dengan isolasi panas (dengan melapisi *glass wool* pada masing – masing *combustor*)

3.7 Diagram Alir Penelitian

Alur penelitian kali ini dapat dilihat pada gambar 3.9 berikut:



Gambar 3.12 Diagram alir penelitian

BAB VI

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian dan Analisa Data

Dari hasil penelitian yang dilakukan pada pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal dinding combustor diperoleh data yang akan dijelaskan dalam bentuk tabel. Dimana data tersebut merupakan data hasil penelitian tentang debit bahan bakar minimum dan maksimum dimana api stabil dalam *meso-scale combustor* untuk debit udara tertentu. Dalam diagram kestabilan api, setiap debit bahan bakar memiliki batas rasio ekuivalen (Φ) minimum dan maksimum atau dapat disebut *upper limit* dan *lower limit*. *Lower limit* adalah kondisi dimana api masih dapat distabilkan didalam *combustor* pada debit udara tertentu dan debit bahan bakar minimal, sedangkan *upper limit* adalah kondisi dimana api masih dapat distabilkan didalam *combustor* pada debit udara tertentu dan debit bahan bakar maksimal. Pengambilan data dilakukan dalam dua kondisi yang berbeda yaitu pengambilan data pada *combustor* dengan isolasi panas dan pada *combustor* tanpa isolasi panas. Semua data hasil penelitian dan perhitungan, baik pada *combustor* dengan isolasi panas maupun *combustor* tanpa isolasi panas dapat dilihat pada tabel 4.1 – 4.6.

Tabel 4.1 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor quartz glass tube* tanpa isolasi panas.

No.	Q_{udara} (mL/menit)	$Q_{\text{bb min}}$ (mL/menit)	$Q_{\text{bb max}}$ (mL/menit)	$V_{\text{total min}}$ (cm/detik)	$V_{\text{total max}}$ (cm/detik)	Φ_{Lower}	Φ_{Upper}
1	80,82	3,14	4,17	14,55	14,73	1,01	1,34
2	96,04	3,73	5,06	17,29	17,52	1,01	1,37
3	111,76	3,88	5,68	20,04	20,35	0,90	1,32
4	127,98	4,02	6,32	22,90	23,28	0,85	1,28
5	144,7	4,17	7,87	25,83	26,44	0,77	1,41
6	161,92	4,61	8,60	28,89	29,55	0,76	1,38
7	179,64	4,91	9,17	32,01	32,72	0,73	1,32
8	197,86	5,36	10,14	35,25	36,05	0,72	1,33
9	216,58	5,99	10,33	38,60	39,33	0,74	1,24
10	235,8	6,65	10,73	41,96	42,73	0,69	1,18
11	255,52	7,69	10,93	45,68	46,18	0,82	1,11
12	275,74	8,52	11,52	49,31	49,79	0,83	1,08
13	296,46	9,55	11,72	53,04	53,41	0,84	1,03

Tabel 4.2 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor quartz glass tube* dengan isolasi panas.

No.	Q_{udara} (mL/menit)	$Q_{bb \text{ min}}$ (mL/menit)	$Q_{bb \text{ max}}$ (mL/menit)	$V_{total \text{ min}}$ (cm/detik)	$V_{total \text{ max}}$ (cm/detik)	Φ_{Lower}	Φ_{Upper}
1	80,82	2,99	4,47	14,53	14,78	0,96	1,43
2	96,04	3,59	5,21	17,27	17,55	0,97	1,41
3	111,76	3,73	5,83	20,02	20,38	0,87	1,35
4	127,98	3,88	6,99	22,85	23,39	0,79	1,42
5	144,7	4,17	8,42	25,80	26,54	0,75	1,51
6	161,92	4,61	9,17	28,86	29,65	0,74	1,47
7	179,64	4,91	9,75	31,99	32,82	0,71	1,41
8	197,86	5,21	10,33	35,20	36,08	0,68	1,35
9	216,58	5,99	10,73	38,58	39,40	0,72	1,29
10	235,8	6,15	11,12	41,93	42,80	0,68	1,22
11	255,52	7,51	11,72	45,59	46,32	0,76	1,19
12	275,74	8,23	12,11	49,22	49,89	0,77	1,14
13	296,46	8,98	12,50	52,94	53,55	0,79	1,09
14	317,68	9,75	13,84	56,75	57,46	0,80	1,13
15	339,4	10,53	14,03	60,65	61,26	0,80	1,07

Tabel 4.3 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor stainless steel* tanpa isolasi panas.

No.	Q_{udara} (mL/menit)	$Q_{bb \text{ min}}$ (mL/menit)	$Q_{bb \text{ max}}$ (mL/menit)	$V_{total \text{ min}}$ (cm/detik)	$V_{total \text{ max}}$ (cm/detik)	Φ_{Lower}	Φ_{Upper}
1	80,82	3,142	4,32	14,55	14,76	1,009	1,39
2	96,04	3,735	5,21	17,29	17,55	1,009	1,41
3	111,76	3,881	5,83	20,04	20,38	0,901	1,35
4	127,98	4,027	6,48	22,88	23,30	0,816	1,31
5	144,7	4,173	8,05	25,80	26,47	0,748	1,44
6	161,92	4,613	8,79	28,86	29,59	0,739	1,41
7	179,64	4,910	9,36	31,99	32,76	0,709	1,35
8	197,86	5,365	10,14	35,22	36,05	0,703	1,33
9	216,58	5,992	10,53	38,58	39,36	0,718	1,26
10	235,8	6,648	10,93	42,02	42,76	0,731	1,20
11	255,52	7,687	11,32	45,62	46,25	0,780	1,15
12	275,74	8,528	11,91	49,27	49,86	0,802	1,12
13	296,46	9,554	12,11	53,04	53,48	0,836	1,06
14	317,68	9,943	12,31	56,78	57,19	0,812	1,00

Tabel 4.4 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor stainless steel* dengan isolasi panas.

No.	Q_{udara} (mL/menit)	$Q_{bb \text{ min}}$ (mL/menit)	$Q_{bb \text{ max}}$ (mL/menit)	$V_{total \text{ min}}$ (cm/detik)	$V_{total \text{ max}}$ (cm/detik)	Φ_{Lower}	Φ_{Upper}
1	80,82	2,59	3,14	12,41	12,50	0,97	1,18
2	96,04	2,99	4,32	14,53	14,76	0,96	1,39
3	111,76	3,44	5,36	17,24	17,58	0,93	1,45
4	127,98	3,59	6,15	19,99	20,44	0,83	1,43
5	144,7	3,73	6,99	22,83	23,39	0,76	1,42
6	161,92	3,88	8,23	25,75	26,51	0,70	1,48
7	179,64	4,32	8,98	28,81	29,62	0,69	1,44
8	197,86	4,61	9,75	31,93	32,82	0,67	1,41
9	216,58	5,06	10,53	35,17	36,12	0,66	1,38
10	235,8	5,52	10,93	38,49	39,43	0,66	1,31
11	255,52	5,99	11,32	41,91	42,83	0,66	1,25
12	275,74	6,65	11,91	45,44	46,35	0,67	1,21
13	296,46	7,69	12,31	49,12	49,92	0,72	1,16
14	317,68	8,79	13,08	52,91	53,65	0,77	1,14
15	339,4	9,55	13,46	56,72	57,39	0,78	1,10
16	361,62	10,73	13,84	60,68	61,22	0,82	1,06
17	384,34	11,91	14,57	64,74	65,20	0,85	1,05

Tabel 4.5 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor tembaga* tanpa isolasi panas.

No.	Q_{udara} (mL/menit)	$Q_{bb \text{ min}}$ (mL/menit)	$Q_{bb \text{ max}}$ (mL/menit)	$V_{total \text{ min}}$ (cm/detik)	$V_{total \text{ max}}$ (cm/detik)	Φ_{Lower}	Φ_{Upper}
1	80,82	3,59	3,88	14,63	14,68	1,15	1,25
2	96,04	3,88	4,91	17,32	17,50	1,05	1,33
3	111,76	4,32	5,83	20,12	20,38	1,00	1,35
4	127,98	4,47	7,16	22,96	23,42	0,91	1,45
5	144,7	4,61	8,23	25,88	26,51	0,83	1,48
6	161,92	4,47	9,17	28,84	29,65	0,72	1,47
7	179,64	4,76	9,94	31,96	32,86	0,69	1,44
8	197,86	5,06	10,73	35,17	36,15	0,66	1,41
9	216,58	5,52	11,32	38,49	39,50	0,66	1,36
10	235,8	5,83	11,72	41,88	42,90	0,64	1,29
11	255,52	6,99	13,08	45,50	46,55	0,71	1,33
12	275,74	8,23	14,03	49,22	50,22	0,77	1,32
13	296,46	8,79	15,10	52,91	54,00	0,77	1,32
14	317,68	9,75	15,61	56,75	57,76	0,80	1,27
15	339,4	10,33	16,25	60,62	61,64	0,79	1,24
16	361,62	10,73	16,85	64,53	65,60	0,77	1,21
17	384,34	11,32	18,19	68,58	69,77	0,76	1,23

Tabel 4.6 Debit bahan bakar dan udara dimana api dapat menyala dalam *meso-scale combustor* tembaga dengan isolasi panas.

No.	Q_{udara} (mL/menit)	$Q_{\text{bb min}}$ (mL/menit)	$Q_{\text{bb max}}$ (mL/menit)	$V_{\text{total min}}$ (cm/detik)	$V_{\text{total max}}$ (cm/detik)	Φ_{Lower}	Φ_{Upper}
1	80,82	3,44	4,03	14,60	14,71	1,10	1,29
2	96,04	4,17	5,21	17,37	17,55	1,13	1,41
3	111,76	4,17	6,48	20,09	20,49	0,97	1,50
4	127,98	4,32	7,87	22,93	23,54	0,88	1,59
5	144,7	3,97	9,17	25,77	26,67	0,71	1,64
6	161,92	4,32	9,94	28,81	29,79	0,69	1,59
7	179,64	4,61	10,33	31,93	32,93	0,67	1,49
8	197,86	4,91	10,93	35,14	36,19	0,64	1,43
9	216,58	5,06	11,72	38,41	39,57	0,61	1,40
10	235,8	5,36	12,50	41,80	43,04	0,59	1,38
11	255,52	5,52	14,03	45,24	46,72	0,56	1,42
12	275,74	5,99	15,27	48,83	50,44	0,56	1,44
13	296,46	6,82	15,77	52,56	54,12	0,60	1,38
14	317,68	7,51	16,25	56,36	57,88	0,61	1,33
15	339,4	8,42	17,28	60,28	61,82	0,64	1,32
16	361,62	8,98	18,19	64,23	65,83	0,64	1,30
17	384,34	10,33	18,90	68,40	69,89	0,70	1,28

Dalam proses pengambilan data terdapat suatu kondisi yang memungkinkan api masih dapat stabil didalam *combustor*, tetapi data tidak bisa diambil karena keterbatasan flow meter membaca debit udara. *Flow meter* hanya dapat membaca debit udara sampai 384.34mL/menit saja. Sehingga dalam proses pengambilan data pada *combustor* tembaga dengan ataupun tanpa isolasi panas dan pada *combustor stainless steel* dengan isolasi panas yang sebenarnya api masih mungkin dapat stabil pada kecepatan reaktan yang lebih besar, tetapi data tidak bisa diambil karena *flow meter* tidak mampu membaca debit udara lebih dari 384.34mL/menit.

4.2 Perhitungan

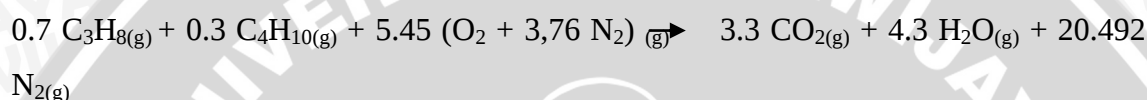
1. Pembakaran Stoikiometri

Pembakaran stoikiometri adalah pembakaran yang terjadi apabila seluruh unsur C yang bereaksi dengan oksigen hanya akan menghasilkan CO_2 , seluruh unsur H menghasilkan H_2O dan seluruh unsur S menghasilkan SO_2 . Parameter yang sering digunakan untuk menghitung jumlah udara dan bahan bakar pada proses pembakaran tertentu adalah rasio udara-bahan bakar atau AFR (*Air Fuel Ratio*). AFR atau rasio udara-bahan bakar adalah rasio jumlah udara di dalam sebuah reaksi terhadap jumlah bahan bakar. Rasio ini dapat dituliskan dengan basis molar (mol udara dibagi dengan

mol bahan bakar) atau dengan basis massa (massa udara dibagi dengan massa bahan bakar). Dalam penelitian ini bahan bakar yang digunakan ialah LPG sehingga untuk menghitung AFR stoikiometri dari bahan bakar LPG dan udara maka terlebih dahulu kita harus menyeimbangkan persamaan kimia dari reaktan dan produk sebagai berikut:

- Kandungan bahan bakar LPG terdiri dari 70% propana (C_3H_8) dan 30% butana (C_4H_{10}).
- *Oxydizer* yakni udara yang terdiri dari 79% nitrogen (N_2) dan 21% oksigen (O_2) berdasarkan prosentase volume dalam udara kering.

Sehingga didapat persamaan reaksi antara bahan bakar (LPG) dan udara sebagai berikut:



Berdasarkan persamaan diatas maka reaksi yang terjadi antara bahan bakar LPG (0.7 mol propana dan 0.3 butana) dan udara (5.45 mol O_2 dan 20.492 mol N_2), menghasilkan 3.3 mol karbondioksida, 4.3 mol hidrogen dan 20.492 mol nitrogen.

Dari persamaan kimia diatas dapat dihitung AFR stoikiometri antara bahan bakar (LPG) dan udara berdasarkan perbandingan mol sebagai berikut:

$$\begin{aligned} AFR &= \frac{N_{air}}{N_{fuel}} \\ &= \frac{5,45(1 + 3,76)}{(0,7 + 0,3)} \\ &= \frac{25,942}{1} \\ &= 25,942 \frac{\text{mol udara}}{\text{mol bahan bakar}} \end{aligned}$$

Menurut hukum Avogadro, gas-gas yang memiliki volume yang sama, pada temperatur dan tekanan yang sama, memiliki jumlah partikel (jumlah mol) yang sama pula. Sehingga perbandingan volume udara dan LPG untuk campuran stoikiometri adalah :

$$AFR = \frac{25,942}{1} \frac{\text{volume udara}}{\text{volume bahan bakar}}$$

Dari persamaan reaksi kimia antara bahan bakar LPG dan udara juga dapat dihitung AFR berdasarkan perbandingan massa.

- Massa udara = $n \times Mr$
 $= 5,45(Mr O_2 + Mr 3,76N_2)$
 $= 5,45[32 + (3,76 \times 28)]$
 $= 5,45(137,176)$
 $= 748,176 \text{ gr.}$
- Massa bahan bakar = $n \times Mr$
 $= 0,7(Mr C_3H_8) + 0,3(Mr C_4H_{10})$
 $= [0,7(36 + 8)] + [0,3(48 + 10)]$
 $= 30,8 + 17,4$
 $= 48,2 \text{ gr.}$

Dengan diketahuinya massa dari bahan bakar (LPG) dan massa udara maka kita dapat menghitung volume dari bahan bakar (LPG) dan udara berdasarkan densitasnya yang nantinya akan digunakan sebagai perhitungan AFR berdasarkan perbandingan volume.

Diketahui :

- Massa jenis udara pada 27° C adalah 0,0012 gr/cm³.
- Massa jenis propana 0,00183 gr/cm³.
- Massa jenis butana 0,00248 gr/cm³.
- Massa jenis LPG (70% propana dan 30% butana) adalah 0,002024 gr/cm³.

Berdasarkan data yang diketahui diatas maka dengan persamaan $\rho = \frac{m}{V}$ kita dapat menghitung volume menggunakan persamaan $V = \frac{m}{\rho}$.

- $V_{\text{udara}} = \frac{m}{\rho}$
 $= \frac{748,176}{0,0012}$
 $= 623.480 \text{ cm}^3$

- $V_{\text{bahan bakar}} = \frac{m}{\rho}$
 $= \frac{48,2}{0,002024} = 23.814,23 \text{ cm}^3$

Sehingga perbandingan volume antara bahan bakar dan udara dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \bullet \quad V_{\text{udara}} &: V_{\text{bahanbakar}} \\ 623.480 \text{ cm}^3 &: 23.814,23 \text{ cm}^3 \\ 26,18 &: 1 \end{aligned}$$

Perbandingan volume udara dan bahan bakar berdasarkan perbandingan mol adalah 25,942 : 1 sedangkan perbandingan volume udara dan bahan bakar berdasarkan perbandingan massa dan adalah 26,18 : 1 dari hasil perhitungan berdasarkan mol dan berdasarkan volume tedapat selisih nilai yang tidak begitu signifikan. Hal itu disebabkan karena kurangnya ketelitian pada saat menentukan nilai densitas pada propana dan butana.

1. Perhitungan Rasio Ekuivalen

Contoh perhitungan rasio ekuivalen dilakukan untuk parameter yang diketahui pada tabel 4.1 no.2 untuk *combustor quartz glass tube* tanpa isolasi panas.

Berikut merupakan parameter-parameter pada *combustor quartz glass tube* dengan dan tanpa isolasi panas :

- Debit udara (Q_{udara}) : 96.04 mL/menit
- Debit bahan bakar ($Q_{\text{bb min}}$) : 3,73 mL/menit
- Debit bahan bakar ($Q_{\text{b max}}$) : 5,06 mL/menit
- $AFR_{\text{stoikiometri}}$ (AFR_{stoic}) : 26

Dari parameter-parameter yang diketahui diatas, maka dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \bullet \quad AFR_{\text{aktual}} (AFR_{\text{act}}) \\ AFR_{\text{act}} &= \frac{Q_{\text{udr}}}{Q_{\text{bb}}} \\ &= \frac{96.04 \text{ mL/menit}}{3.734 \text{ mL/menit}} \\ &= 25.720 \end{aligned}$$

- Rasio Ekuivalen

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{AFR_{stoic}}{AFR_{act}} \\ &= \frac{25,942}{25.720} \\ &= 1.00764\end{aligned}$$

- AFR_{aktual} (AFR_{act})

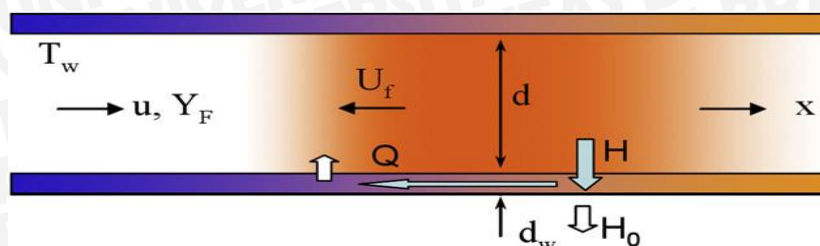
$$\begin{aligned}AFR_{act} &= \frac{Q_{udr}}{Q_{bb}} \\ &= \frac{96.04 \text{ mL/menit}}{5,06 \text{ mL/menit}} \\ &= 18.980\end{aligned}$$

- Rasio Ekuivalen

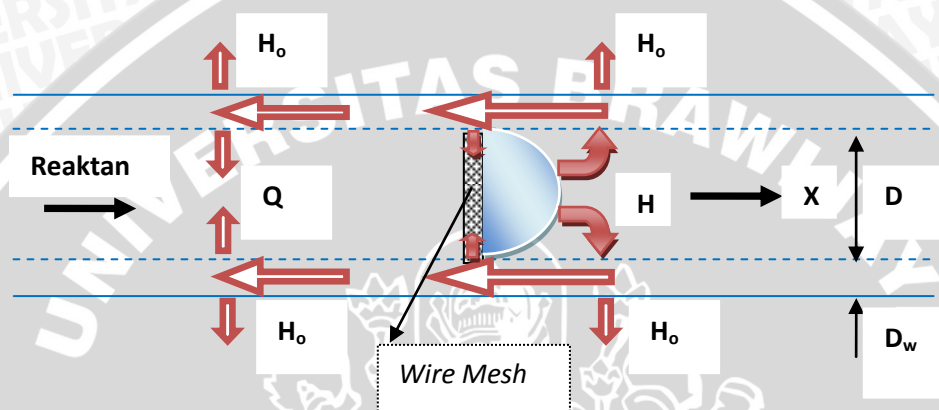
$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{AFR_{stoic}}{AFR_{act}} \\ &= \frac{25,942}{18.980} \\ &= 1.3668\end{aligned}$$

4.3 Pembahasan

Pada penelitian ini diharapkan dapat mengetahui tentang pengaruh konduktivitas termal dinding *combustor* terhadap bentuk nyala api, stabilitas api dan *flammability limit* pada pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* didalamnya. Dalam penelitian sebelumnya yang dilakukan Mikami, et al, 2012 diamati kestabilan api. didalam *meso-scale combustor* yang terbuat dari *quartz glass tube*. Peneliti menyisipkan *wire mesh* yang terbuat dari bahan yang memiliki konduktivitas termal tinggi yaitu *stainless steel* untuk meningkatkan *heat recirculation* dalam *combustor*. Hasilnya didapatkan pembakaran yang stabil, karena *wire mesh* mempunyai peranan sebagai *flame holder* yang mengakibatkan terjadinya *heat recirculation* dari *flame* ke reaktan sehingga terjadi pembakaran yang stabil dalam *meso-scale combustor*. Dalam penelitian ini menggunakan tiga variasi konduktivitas termal dinding *combustor* diantaranya *combustor quartz glass tube*, *combustor stainless steel* dan *combustor tembaga*. Gambar 4.1 menjelaskan secara skematik perpindahan panas (*heat loss* dan *heat recirculation*) dalam *meso-scale combustor* serta peranan konduktivitas termal dinding *combustor*.



Gambar 4.1 Skematik perpindahan panas dalam *meso-scale combustor* tanpa *wire mesh*



Gambar 4.2 Skematik perpindahan panas dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* didalamnya

Gambar 4.1 menjelaskan bagaimana perpindahan panas yang terjadi pada pembakaran dalam *meso-scale combustor* tanpa *wire mesh* di dalamnya. Ruang bakar (*combustor*) berbentuk pipa dengan diameter dalam d dan diameter luar d_w . Campuran bahan bakar dan udara masuk ke daerah reaksi pembakaran dengan kecepatan u dan fraksi bahan bakar Y_F . Pembakaran terjadi di daerah reaksi pembakaran, *flame* bergerak dengan kecepatan U_f . Gas hasil pembakaran dibuang ke lingkungan, mengandung energi yang besarnya dinyatakan dengan x . *Heat loss* dari *flame* (nyala api) ke dinding *combustor* dinyatakan dengan H . Sebagian dari *heat loss* (H_0), dikonveksikan ke lingkungan, menyatakan fraksi kalor yang hilang dan cenderung mengakibatkan terjadinya *flame quenching*. Sisanya, sebesar Q , dikonduksikan ke arah *upstream* melalui dinding ruang bakar dan digunakan untuk memanasi reaktan (campuran udara-bahan bakar). Pemanasan awal bahan bakar akan meningkatkan kestabilan pembakaran dan mencegah terjadinya *flame quenching*.

Bila $u = U_f$, maka akan menghasilkan pembakaran stabil pada posisi/titik tertentu dalam ruang bakar. Bila $u > U_f$, api akan mengalami *blow off*, sebaliknya bila u

$< U_f$, api akan bergerak ke dalam *combustor* dan akhirnya padam. Phenomena yang disebutkan terakhir disebut *flash back*. Kestabilan api dapat dicapai bila kecepatan reaktan u dan kecepatan *flame* U_f mempunyai besar yang relatif sama. Kecepatan *flame* U_f dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti ekuivalen rasio, temperatur pembakaran, temperatur reaktan, jenis bahan bakar dan lain-lain. Semakin tinggi temperatur reaktan, kecepatan *flame* U_f akan semakin besar.

Sedangkan pada Gambar 4.2 menjelaskan bagaimana perpindahan panas yang terjadi pada pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh* di dalamnya. Seperti halnya pada Gambar 4.1 hanya saja pada Gambar 4.2 terdapat *wire mesh* di dalamnya. D menyatakan diameter dalam *combustor*, D_w menyatakan diameter luar *combustor*. Sebagian energi yang dihasilkan dari proses pembakaran yang ikut terbuang bersama gas buang dinyatakan dengan X , sedangkan H menyatakan *heat loss* yang terjadi dari api ke dinding *combustor* secara konveksi. Selanjutnya di konveksikan lagi ke lingkungan. Sebagian dari *heat loss* tersebut di konduksikan ke *wire mesh* dan ke arah *upstream* melalui dinding dinyatakan dengan Q . Panas yang di konduksikan dari dinding *combustor* ke *wire mesh* dan panas yang di konveksikan dari dinding *combustor* ke reaktan mempunyai peranan penting dalam proses pemanasan awal reaktan. Proses tersebut akan menghasilkan temperatur reaktan yang lebih tinggi yang dapat meningkatkan stabilitas pembakaran dalam *meso-scale combustor*.

4.3.1 Visualisasi Nyala Api

A. Visualisasi nyala api *meso-scale combustor* pada rasio ekuivalen $\Phi=1$, tanpa isolasi panas dengan variasi konduktivitas termal yang berbeda.

Gambar 4.1 menunjukkan visualisasi nyala api didalam *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal dinding *combustor* dimulai dengan *combustor* dengan konduktivitas termal rendah, sedang dan tinggi yakni *combustor quartz glass tube*, *stainless steel* dan tembaga. visualisasi nyala api didalam *meso-scale combustor* tersebut diambil pada keadaan stoikiometri atau pada rasio ekuivalen $\Phi=1$ dengan variasi kecepatan reaktan sebesar 17,4; 29,1 and 42,3 cm/detik. Dan gambar di tampilkan dengan 5x pembesaran.

Kecepatan reaktan (cm/detik)	Quartz glass tube	Stainless steel	Tembaga
17,4			
29,1			
42,			
(Φ=1)			

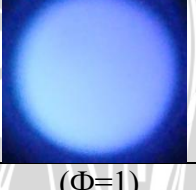
Gambar 4.3 Visualisasi nyala api pada *meso-scale combustor* tanpa isolasi panas pada keadaan stoikiometri.

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa warna api untuk masing-masing *combustor* sama yakni biru. Karena pada saat kondisi stoikiometri atau pada rasio ekuivalen $\Phi=1$ bahan bakar dapat terbakar sempurna, dimana warna biru ini dihasilkan dari emisi radikal OH. Warna biru juga menunjukkan tidak ada proses pembentukan jelaga yang dihasilkan dalam pembakaran *meso-scale combustor*. Kemudian warna api untuk kecepatan reaktan yang semakin besar pada masing-masing *combustor* juga memiliki kecenderungan yang sama yakni dengan bertambahnya kecepatan reaktan warna nyala api dalam *meso-scale combustor* terlihat semakin terang. Hal ini dikarenakan semakin tinggi kecepatan reaktan maka jumlah bahan bakar yang terbakar semakin banyak. Sehingga kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran dan temperatur pembakaran semakin tinggi pula. Hal tersebut yang mengakibatkan nyala api dalam *meso-scale combustor* semakin terang. Pada *combustor quartz glass tube* warna nyala api untuk setiap penambahan kecepatan reaktan terlihat sedikit lebih terang dari pada nyala api pada *combustor stainless steel* dan *combustor tembaga*. Hal tersebut selain disebabkan oleh bertambahnya kalor dan temperatur yang dihasilkan dari proses pembakaran karena bertambahnya kecepatan reaktan, juga disebabkan karena *quartz*

glass tube terbuat dari kaca sehingga nyala api terlihat semakin terang karena pantulan cahaya dari dinding *combustor*.

Pada Gambar 4.3 juga dapat dilihat luas penampang api untuk setiap penambahan kecepatan reaktan pada masing-masing *combustor*. Secara umum api dalam *combustor stainless steel* mempunyai luas penampang yang paling besar bila dibandingkan dengan api dalam *combustor quartz glass tube* dan tembaga, baik pada kecepatan reaktan yang rendah ataupun tinggi. Perbedaan luas penampang api terlihat jelas pada kecepatan reaktan yang lebih kecil dan perbedaan luas penampang semakin berkurang pada kecepatan reaktan yang lebih besar.

Gambar diatas juga menunjukkan bahwa luas penampang api menjadi semakin besar dengan bertambahnya kecepatan reaktan. Pada kecepatan reaktan 17.4cm/detik *combustor* tembaga memiliki luas penampang paling kecil bila dibandingkan dengan luas penampang api pada *combustor stainless steel* dan *combustor quartz glass tube*. Hal ini di sebabkan oleh konduktivitas termal tembaga yang tinggi sehingga panas yang dihasilkan dari proses pembakaran banyak berkurang karena adanya perpindahan panas secara konveksi dari api ke dinding, yang selanjutnya di konveksikan ke lingkungan dan sebagian dikonduksikan ke arah upstream untuk pemanasan awal reaktan. Hal ini menyebabkan terjadinya kehilangan kalor yang menyebabkan temperatur ruang bakar menjadi rendah. Fenomena tersebut mengakibatkan *radical quenching* yang semakin besar. Semakin besar *radical quenching* maka jarak antara api dengan dinding semakin besar dan luas penampang api menjadi semakin kecil. *Radical quenching* itu sendiri adalah berkurangnya jumlah radikal bebas karena bereaksi membentuk unsur yang stabil didaerah dekat dinding *combustor*. Pada kecepatan 29.1cm/detik dan 42.3cm/detik masing-masing juga menunjukkan perbedaan luas penampang api tetapi tidak begitu signifikan bila di bandingkan pada kecepatan reaktan 17.4cm/detik. Hal ini dikarenakan dengan semakin bertambahnya laju alir reaktan atau kecepatan reaktan maka panas dan temperatur yang di hasilkan pada proses pembakaran juga meningkat. Dengan meningkatnya temperatur serta panas yang dihasilkan pada proses pembakaran menyebabkan temperatur nyala api dan ruang bakar juga meningkat sehingga *radical quenching* semakin rendah yang mengakibatkan jarak api dengan dinding *combustor* menjadi semakin dekat. Dalam kondisi ini perbedaan luas penampang api dalam masing-masing *combustor* menjadi lebih kecil.

Kecepatan reaktan (cm/detik)	Quartz glass tube	Stainless steel	Tembaga	Keterangan
17,4				Dengan isolasi panas
				Tanpa isolasi panas
29,1				Dengan isolasi panas
				Tanpa isolasi panas
42,3				Dengan isolasi panas
				Tanpa isolasi panas
(Φ=1)				

Gambar 4.4 Visualisasi nyala api pada *meso-scale combustor* pada keadaan stoikiometri dalam *combustor* dengan dan tanpa isolasi panas. Dengan 3x pembesaran.

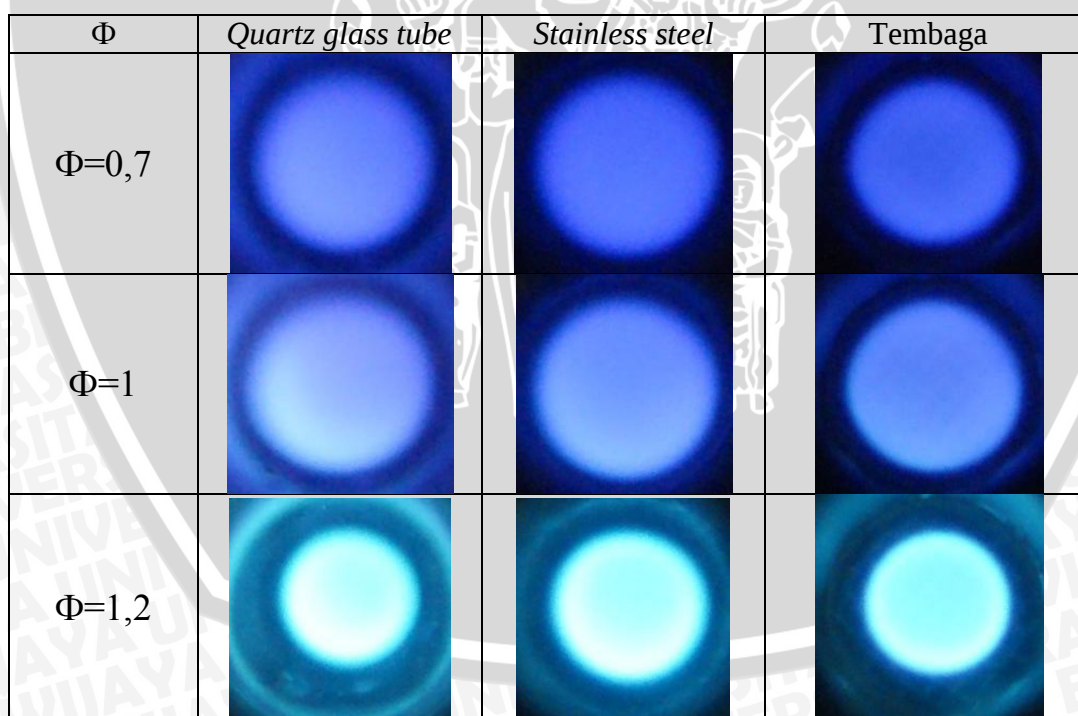
Gambar 4.4 menunjukkan perbedaan nyala api dan luas penampang api pada *combustor* dengan dan tanpa isolasi panas. Pada gambar 4.4 dapat dilihat warna nyala api pada masing-masing *combustor* baik *combustor* tanpa isolasi panas maupun *combustor* dengan isolasi panas memiliki warna yang sama yakni biru, tetapi terlihat semakin terang seiring dengan bertambahnya kecepatan reaktan. Seperti halnya pada Gambar 4.2 hal tersebut dikarenakan semakin tinggi kecepatan reaktan maka kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran dan temperatur semakin tinggi pula. Pada kecepatan reaktan 42,3cm/detik dalam *combustor quartz glass tube* terlihat ada warna agak merah

pada nyala api. Hal ini mungkin dikarenakan pencahayaan atau proses pengambilan fotoyang kurang tepat.

Kemudian pada Gambar 4.4 juga terlihat bahwa luas penampang api pada *combustor* dengan isolasi panas sedikit lebih luas bila dibandingkan dengan *combustor* tanpa isolasi panas. Karena pada *combustor* dengan isolasi panas perpindahan panas secara konveksi dari dinding kelilingungan berkurang karena adanya isolasi. Sehingga dapat menghambat banyaknya panas yang hilang kelilingungan. Sehingga temperatur api dan dinding *combustor* menjadi lebih tinggi dan juga nyala api lebih stabil serta penampang apinya menjadi lebih luas.

B. Visualisasi nyala api pada *meso-scale combustor* dengan konduktivitas termal yang berbeda tanpa isolasi panas dan variasi rasio ekuivalen.

Gambar 4.5 menunjukkan visualisasi nyal api pada pembakaran dalam *meso-scale combustor* dengan konduktivitas termal dinding *combustor* yang berbeda tanpa isolasi panas dan variasi rasio ekuivalen $\Phi=0.7$, $\Phi=1$ dan $\Phi=1.2$ pada kecepatan reaktan sekitar 29.1cm/detik. Dan gambar di tampilkan dengan 5x pembesaran



Gambar 4.5 Visualisasi nyala api pada *meso-scale combustor* dengan variasi rasio ekuivalen, tanpa isolasi panas

Gambar 4.5 menunjukkan visualisasi warna api untuk rasio ekuivalen $\Phi=0.7$ dan $\Phi=1$ hampir sama yakni biru. Karena pada rasio ekuivalen $\Phi=0.7$ dan $\Phi=1$ bahan bakar dapat terbakar sempurna, tetapi pada rasio ekuivalen $\Phi=1$ warna api terlihat sedikit

lebih terang. Hal ini terjadi karena pada jumlah debit udara yang sama bahan bakar pada rasio ekuivalen $\Phi=1$ lebih banyak daripada bahan bakar pada rasio ekuivalen $\Phi=0.7$, meski begitu pada kedua kondisi tersebut bahan bakar dapat terbakar sempurna. Hanya saja pada rasio ekuivalen $\Phi=1$ jumlah energi yang dihasilkan lebih besar sehingga mengakibatkan temperatur lebih tinggi, menyebabkan warna api pada rasio ekuivalen $\Phi=1$ menjadi lebih terang.

Pada Gambar 4.5 terlihat juga visualisasi warna nyala api dengan debit udara yang sama tetapi pada campuran kaya yakni pada rasio ekuivalen $\Phi=1.2$ nyala api berwarna biru kehijauan dan juga luas penampang apinya menjadi lebih sempit. Hal tersebut disebabkan oleh adanya *radical quenching* dijelaskan pada bagian sebelumnya bahwa *radical quenching* adalah berkurangnya jumlah radikal bebas karena membentuk unsur yang stabil di daerah dekat dinding, hal ini yang menyebabkan pemadaman api di daerah dekat dinding. Sehingga luas penampang api untuk masing-masing *combustor* pada campuran kaya menjadi kecil/sempit. Pada ekuivalen rasio $\Phi=0.7$ dan $\Phi=1$ warna nyala api yakni biru hal ini disebabkan karena adanya emisi dari radikal CH yang berwarna biru. Sedangkan pada campuran $\Phi=1.2$ nyala api berwarna biru kehijauan karena pada keadaan ini merupakan campuran kaya bahan bakar, sehingga tidak semua bahan bakar dapat terbakar sempurna karena kurangnya udara sebagai oksidator. Hal tersebut mengakibatkan munculnya molekul C2 yang menyebabkan warna api menjadi biru kehijauan. (Turn, 2000 :256).

Dapat dilihat pada gambar 4.5 bahwa luas penampang api pada rasio ekuivalen $\Phi=1.2$ *combustor* tembaga memiliki luas penampang api paling sempit/terkecil bila dibandingkan dengan *combustor quartz glass tube* dan *stainless steel*. Hal itu disebabkan oleh konduktivitas termal pada *combustor* tembaga adalah yang paling tinggi diantara ketiga *combustor*. Sehingga, banyak panas yang dihasilkan oleh pembakaran pada *combustor* tembaga hilang karena perpindahan panas dalam jumlah besar ke dinding *combustor* sebagai konsekuensi dari konduktivitas termal yang dimiliki oleh *combustor* tembaga.

Selanjutnya karena pada penelitian ini pengambilan data visualisasi nyala api diambil pada dua keadaan yang berbeda yakni pada kondisi *combustor* dengan isolasi panas dan pada *combustor* tanpa isolasi panas. Maka akan dibandingkan visualisasi nyala api pada dua keadaan tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6.

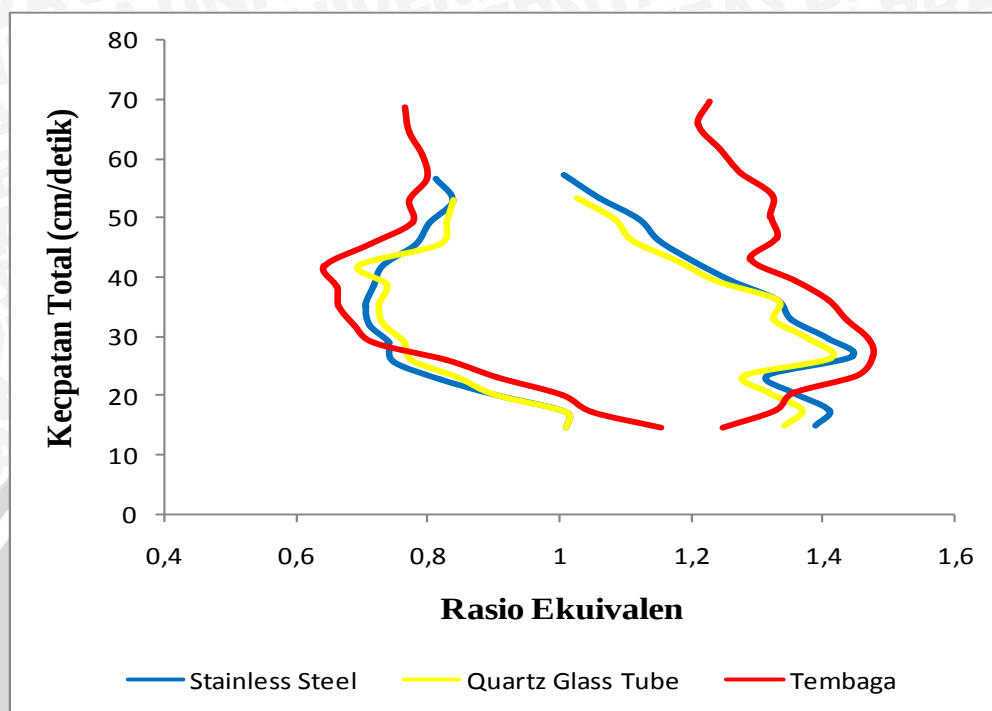
Φ	Quartz glass tube	Stainless steel	Tembaga	Keterangan
$\Phi=0,7$				Dengan isolasi panas
				Tanpa isolasi panas
$\Phi=1$				Dengan isolasi panas
				Tanpa isolasi panas
$\Phi=1,2$				Dengan isolasi panas
				Tanpa isolasi panas

Gambar 4.6 Visualisasi nyala api pada *meso-scale combustor* dengan variasi rasio ekuivalen, dengan dan tanpa isolasi panas. Dengan 3x pembesaran

Gambar 4.6 menunjukkan adanya perubahan luas penampang api pada *combustor* dengan isolasi panas dan *combustor* tanpa isolasi panas rasio ekuivalen $\Phi=0.7$, $\Phi=0.1$ dan $\Phi=1.2$. Pada *combustor* dengan isolasi panas luas penampang apinya terlihat sedikit lebih luas bila dibandingkan dengan luas penampang api pada *combustor* tanpa isolasi panas. Hal ini terjadi karena *heat loss* akibat perpindahan panas dari dinding kelilingungan terhambat oleh adanya isolasi panas (*gass woll*). Sehingga temperatur api dan ruang bakar menjadi lebih tinggi. Temperatur yang lebih tinggi ini dapat menekan terjadinya *radical quenching* dan pemadaman api di sekitar dinding *combustor*. Sehingga jarak antara dinding dan api menjadi lebih kecil dan luas penampang api menjadi lebih besar.

4.3.2 Diagram Kestabilan Api dan *Flammability Limit*

A. Diagram kestabilan api dan flammability limit pada *combustor* dengan variasi konduktivitas termal dinding *combustor* tanpa isolasi panas.



Gambar 4.7 *Flammability limit* pada *meso-scale combustor* dengan variasi konduktivitas termal dinding *combustor* tanpa isolasi panas.

Konduktivitas termal dinding *combustor* memiliki peran penting dalam kestabilan api dalam *meso-scale combustor*. Karena dapat menentukan besarnya *heat loss* dan *heat recirculation* dalam *combustor*. Dimana *heat loss* diakibatkan adanya perpindahan panas dari api ke dinding yang selanjutnya dikonveksikan ke lingkungan akan mengakibatkan *flame quenching*. Sedangkan sebagian panas yang di konduksikan dari dinding menuju daerah *upstream* membantu pemanasan awal reaktan, bagian ini yang dapat menyebabkan kestabilan api dalam *meso-scale combustor*.

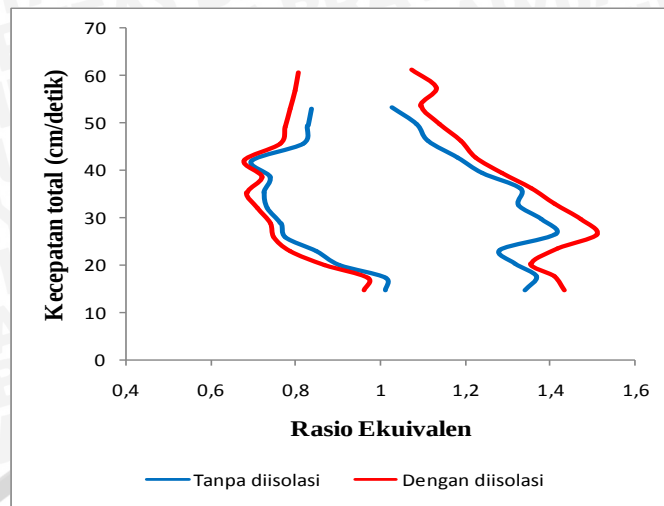
Dalam penelitian ini, *meso-scale combustor* yang memiliki konduktivitas termal tinggi adalah tembaga. Gambar 4.7 menunjukkan bahwa, dalam *combustor* tembaga api dapat stabil pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan kedua *combustor* yang lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa pada kecepatan reaktan yang tinggi kecepatan pembakaran dalam *combustor* tembaga lebih tinggi bila dibandingkan dengan kecepatan pembakaran dalam *combustor quartz glass tube* dan *stainless steel*. Sehingga api dapat stabil dalam *combustor* tembaga pada kecepatan reaktan tinggi.

Gambar 4.7 juga menunjukkan bahwa *combustor* tembaga memiliki daerah *flammability limit* paling sempit pada kecepatan reaktan rendah bila dibandingkan dengan dua *combustor* lainnya yakni *combustor quartz glass tube* dan *combustor stainless steel*. Hal ini disebabkan

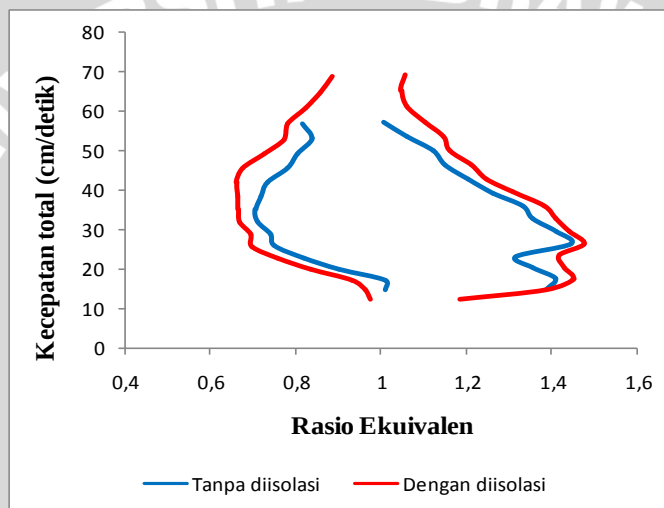
pada kecepatan reaktan rendah energi yang dibangkitkan juga rendah, karena konduktivitas termal *combustor* tembaga yang tinggi, maka rasio kehilangan energi dari api terhadap kalor yang dibangkitkan dalam proses pembakaran menjadi besar. Sehingga temperature api menjadi lebih kecil, demikian juga kecepatan pembakarannya. Akibatnya api mudah padam pada saat kecepatan reaktan rendah. Sedangkan *combustor quartz glass tube* dan *combustor stainless steel* yang memiliki konduktivitas termal rendah dan sedang, pada kecepatan reaktan rendah memiliki perbedaan daerah *flammability limit* yang tidak begitu berbeda. Karena konduktivitas termal rendah dan sedang pada kecepatan reaktan rendah *heat loss* maupun *heat recirculation* yang terjadi tidak begitu besar dan hilangnya energi api yang dibangkitkan api juga tidak begitu besar pula. Sehingga api masih dapat menyala meski pada kecepatan reaktan rendah dengan daerah *flammability limit* yang lebih luas.

Dapat dilihat pada Gambar 4.7 daerah *flammability limit* semakin luas dengan bertambahnya kecepatan reaktan. Pada kecepatan reaktan tinggi *combustor* tembaga memiliki daerah *flammability limit* yang lebih luas bila dibandingkan dengan dua *combustor* lainnya. Hal ini karena pada kecepatan reaktan yang tinggi energi yang di bangkitkan juga semakin besar. Selain itu, pada kecepatan reaktan tinggi perpindahan panas secara konveksi dari dinding combustor ke reaktan yang digunakan untuk proses pemanasan awal reaktan menjadi lebih besar. Hal tersebut disebabkan karena pada daerah *upstream* terdapat aliran reaktan, yang lebih besar dan banyaknya panas yang digunakan untuk pemanasan awal reaktan semakin besar dengan bertambahnya kecepatan reaktan. Jika reaktan sudah memiliki temperatur yang tinggi maka kecepatan pembakaran juga tinggi. Sehingga energi yang dibangkitkan juga meningkat yang mengakibatkan api dapat stabil dalam *meso-scale combustor* pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi. Kestabilan api pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi berarti peningkatan densitas pembangkitan energi pada *meso-scale combustor*, juga berarti peningkatan densitas energi *micro-power generator*.

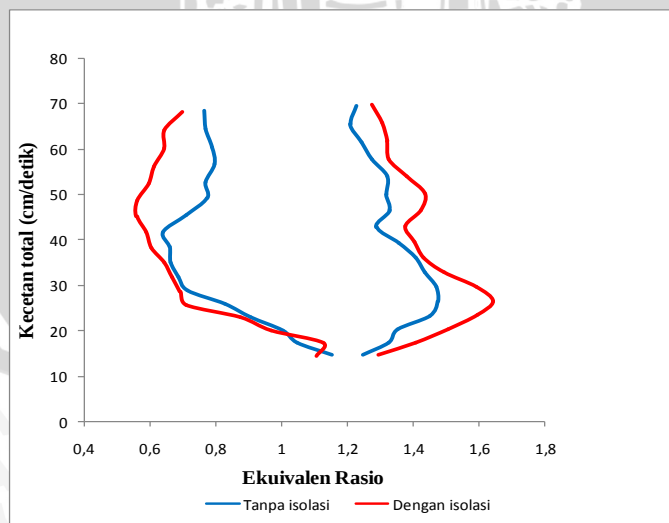
Selanjutnya akan dibahas tentang perbedaan daerah *flammability limit* untuk masing-masing *combustor* pada kondisi dengan isolasi panas dan tanpa isolasi panas. Grafik *flammability limit* untuk setiap *combustor* dengan dan tanpa isolasi panas di tunjukan pada Gambar 4.8.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.8 Flammability limit dalam meso-scale combustor dengan dan tanpa isolasi panas (a) quartz glass tube (b) stainless steel (c) tembaga.

Secara umum penggunaan isolasi panas dapat memperluas daerah *flammability limit* pada masing-masing *combustor* baik pada kecepatan reaktan yang tinggi maupun rendah. Hal tersebut dikarenakan perpindahan kalor dari dinding *combustor* ke lingkungan menjadi lebih kecil karena terhambat oleh adanya isolator dan sebaliknya konduksi kalor ke arah *upstream* untuk pemanasan awal reaktan menjadi lebih besar. Sehingga temperatur reaktan dan pembakaran menjadi lebih tinggi. Demikian juga kecepatan pembakarannya menjadi lebih tinggi. Dengan adanya isolasi panas api dapat stabil pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi.

Gambar 4.8 menunjukkan perubahan luas daerah *flammability limit* pada masing – masing *combustor*. Perubahan daerah *flammability limit* yang lebih signifikan terjadi pada *combustor* tembaga bila dibandingkan dengan dua *combustor* yang lainnya. Seperti telah dijelaskan dalam bagian sebelumnya, kalor yang dihasilkan dalam proses pembakaran secara garis besar dibagi menjadi dua yaitu kalor yang terbuang bersama gas hasil pembakaran dan *heat loss* dari api ke dinding *combustor* secara konveksi. Dimana *heat loss* ke dinding *combustor* ini dibagi lagi menjadi dua yaitu bagian kalor yang hilang ke lingkungan secara konveksi dan sebagian kalor yang digunakan untuk pemanasan awal reaktan melalui konduksi pada dinding *combustor*. Hal ini terjadi karena pada *combustor* tembaga kehilangan dari api ke dinding *combustor* lebih besar bila dibandingkan dengan dua *combustor* lainnya. Selanjutnya bagian kalor dikonveksikan ke lingkungan terhambat karena adanya isolasi panas. Sehingga panas yang hilang ke lingkungan menjadi lebih kecil. Dan bagian panas yang dikonduksikan ke arah *upstream* untuk pemanasan awal reaktan (*heat recirculation*) menjadi lebih besar, mengakibatkan temperatur awal reaktan menjadi lebih tinggi. Semakin tinggi temperatur awal reaktan maka kecepatan pembakaran juga semakin tinggi. Adanya kandungan energi tambahan karena pemanasan awal reaktan dan kecepatan pembakaran yang tinggi dapat meningkatkan kestabilan api. Sehingga api dapat stabil pada daerah yang lebih luas dan pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi. Pada *combustor* quartz glass tube dan stainless steel kalor yang terbawa dalam gas buang lebih besar dan jumlah kalor yang diresirkulasikan untuk pemanasan awal reaktan lebih kecil. Sehingga *flammability limitnya* lebih sempit serta pada kecepatan reaktan yang lebih kecil.

Dari Gambar 4.8 juga dapat diketahui bahwa, pada *combustor* tembaga baik dengan isolasi panas maupun tanpa isolasi panas api dapat stabil pada kecepatan reaktan maksimal yang sama. Sebenarnya api masih mungkin dapat stabil pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi. Tetapi karena keterbatasan *flow meter* dalam membaca debit udara maka data hanya bisa diambil pada debit maksimal yang terbaca oleh flow meter yakni 384,34mL/menit.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Konduktivitas termal dinding *combustor* berpengaruh pada karakteristik pembakaran dalam *meso-scale combustor*, khususnya visualisasi nyala api dan flammability limit. Penelitian tentang pengaruh konduktivitas termal dinding *combustor* terhadap karakteristik pembakaran dalam *meso-scale combustor* menghasilkan kesimpulan sebagai berikut :

- Pada kondisi stoikiometri ($\Phi=1$) warna nyala api cenderung sama yakni berwarna biru. Sedangkan ada kondisi campuran kaya ($\Phi>1$) warna nyala api untuk masing – masing *combustor* sama yakni biru kehijauan. Baik pada *combustor* dengan isolasi panas maupun tanpa isolasi panas.
- Warna api pada masing – masing *combustor* terlihat semakin terang seiring dengan bertambahnya kecepatan reaktan. Baik pada *combustor* dengan isolasi panas maupun tanpa isolasi panas.
- *Combustor* tembaga memiliki luas penampang api paling kecil daripada dua *combustor* lainnya. Meski menggunakan *combustor* dengan isolasi panas maupun tanpa isolasi panas.
- *Combustor* tembaga memiliki daerah *flammability limit* paling luas dibanding dengan dua *combustor* lainnya. Pada *combustor* dengan isolasi panas maupun dengan *combustor* tanpa isolasi panas.
- Dengan adanya isolasi panas pada masing – masing *combustor* dapat meningkatkan *flammability limit* serta api dapat stabil pada kecepatan reaktan yang lebih tinggi

5.3 Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, maka disarankan beberapa hal sebagai berikut :

1. Penelitian yang dipaparkan dalam skripsi ini adalah *meso-scale combustor* menggunakan bahan bakar LPG, oleh karena itu perlu dilakukan penelitian menggunakan bahan bakar lainya.
2. Penelitian ini terkendala alat yaitu *flow meter* udara, karena batas maksimum membaca debit udara hanya mencapai 384.34mL/menit. sehingga disarankan untuk penelitian serupa menggunakan *flow meter* yang mampu membaca debit udara lebih dari 384.34mL/menit.

3. Penelitian ini menggunakan *combustor* homogen yakni memiliki konduktivitas termal dinding daerah *upstream* dan *downstream* sama. Sehingga pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan *combustor* non-homogen dengan perbedaan konduktivitas termal dinding *combustor* yang berbeda pada daerah *upstream* dan *downstream*.

