

BAB II DASAR TEORI

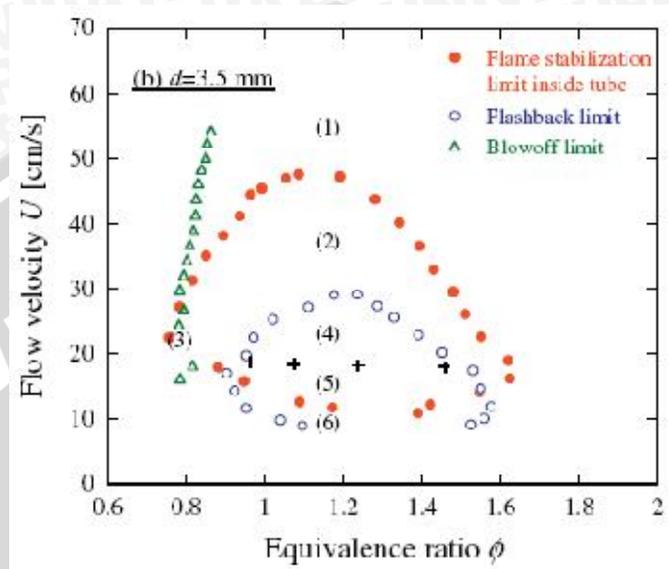
2.1 Penelitian Sebelumnya

Berbagai macam penelitian yang mendukung diantaranya:

(Chou *et al.*, 2010) meneliti tentang pembakaran *porous media* untuk pengaplikasian sistem *micro thermophotovoltaic (micro TPV)* pada *micro (TPV) power generator*. Sistem tersebut menggunakan *PV cells* (sel *Photovoltaic*) untuk mengkonversi radiasi panas dari pembakaran bahan bakar fosil menjadi energi listrik. Tujuan dari penelitian ini untuk mencapai distribusi suhu yang tinggi pada dinding *combustor*. Sehingga dapat menghasilkan densitas energi yang tinggi. Pada penelitian ini didapat bahwa *porous media* dengan signifikan dapat meningkatkan laju perpindahan panas antara dinding *combustor* dan produk pembakaran. Pada *flowrate* campuran H_2/O_2 sebesar 0,008 gr/s dan rasio ekuivalen $\Phi = 0,9$ dengan *SiC (Silicon Carbide)* sebagai *porous media*, didapat energi radiasi pada *micro combustor* sebesar 81,2% lebih besar dibanding tanpa *porous media*. Hal ini membuktikan bahwa adanya *porous media* sebagai *flame holder* dapat dengan signifikan meningkatkan distribusi energi termal antara produk pembakaran dengan dinding *combustor*.

(Yuliati *et al.*, 2012) meneliti tentang pembakaran bahan bakar cair yang terdiri dari campuran 30% volume etanol dan 70% volume heptana dalam sebuah *combustor* berbentuk tabung sempit menggunakan teknik *electrospray*. Bahan bakar cair disuplai keruang bakar menggunakan teknik *electrospray* yang terdiri dari kapiler, *ring extractor*, dan *mesh collector*. *Combustor* ini mempunyai 2 buah *wire mesh* didalamnya, yang pertama berfungsi sebagai *ground* dalam sistem *electrospray* dan pengumpul *droplet*. Sedangkan *wire mesh* yang kedua berfungsi sebagai *flame holder*. *Droplet* bahan bakar menguap di permukaan *mesh* pertama atau didaerah antara 2 *wire mesh*. Dan hasilnya api menyala dengan stabil didalam *glass tube* pada rasio ekuivalen sekitar $\Phi = 0,86-1,7$ dengan *flowrate* sebesar 0,5 mL/jam – 2 mL/jam pada *down stream wire mesh* yang kedua. Studi ini menyimpulkan bahwa *wire mesh* mempunyai peranan penting sebagai *flame holder* agar api menyala dengan stabil pada *combustor* berbentuk tabung yang sempit. Tanpa adanya *wire mesh*, api tidak dapat menyala dengan stabil didalam *combustor*.

(Mikami *et al.*, 2012) meneliti tentang *meso scale combustor* dengan bahan *quartz glass tube* dengan diameter dalam 3,5 mm. Bahan bakar yang digunakan adalah C_3H_8 dengan udara sebagai *oxidizer*. *Combustor* ini menggunakan *single wire mesh* sebagai *flame holder*. Hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Diagram kestabilan api & *flammability limit* dalam *meso-scale combustor* dengan dan tanpa *wire mesh*

Sumber : (Mikami, Yuliati *et al.*, 2012).

Gambar 2.1 menunjukkan diagram kestabilan api dan *flammability limit* dalam *meso-scale combustor*, dengan dan tanpa *wire mesh* didalamnya. Dalam *meso-scale combustor* tanpa *wire mesh* api hanya dapat stabil pada ujung *combustor*. Api stabil ditunjukkan pada daerah disebelah kanan *blow-off limit* dan diatas *flashback limit*. Api mengalami *blow-off* disebelah kiri *blow-off limit*, sedangkan dibawah (didalam) *flashback limit* api mengalami *flashback*. Selanjutnya, dalam *meso-scale combustor* dengan *wire mesh*, api stabil dalam *combustor* didalam daerah *flame stabilitation limit*.

Dalam *meso-scale combustor* api dapat stabil terbatas pada debit/kecepatan reaktan yang rendah, hal ini berhubungan dengan batas mampu nyala/*flammability limit* yang sempit pada kecepatan reaktan yang rendah. Pada gambar 2.1 diagram ini menunjukkan bahwa api stabil dalam *combustor* hanya dapat terjadi pada kecepatan reaktan yang relatif rendah, lebih kecil dari 0.5 m/s. Rendahnya kecepatan reaktan dan sempitnya daerah reaksi pembakaran seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya menghasilkan *meso-scale combustor* dengan laju pembangkitan energi yang rendah. Untuk mendapatkan *combustor*

dengan densitas energi yang tinggi harus bisa mendapatkan kecepatan pembakaran yang lebih tinggi sehingga api tetap stabil pada kecepatan reaktan yang tinggi dan memperluas daerah reaksi dalam *combustor*.

Dari hasil penelitian tersebut kecepatan aliran udara dan bahan bakar yang digunakan masih relatif kecil, sehingga densitas energi yang dibangkitkan juga tidak besar. Maka dari itu dalam penelitian ini digunakan *multiple wire mesh* sebagai *flame holder* yang diharapkan dapat memberikan perluasan daerah *flammability limit* dan meningkatkan stabilitas nyala api pada kecepatan aliran reaktan yang lebih tinggi, sehingga diharapkan akan didapat *meso scale combustor* dengan laju pembangkitan energi yang tinggi pula.

2.2 Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia yang cepat antara pengoksidasi (udara atau oksigen) dan bahan yang dapat terbakar, disertai timbulnya cahaya dan menghasilkan kalor. Agar pembakaran dapat terjadi maka hal-hal berikut harus tersedia dalam jumlah yang sesuai atau tepat, yaitu:

1. Oksigen
2. Bahan bakar
3. Energi aktivasi



Gambar 2.2 Ilustrasi proses Pembakaran.

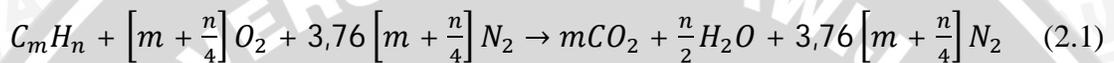
Sumber: Wardana (2008:3)

Bahan bakar merupakan segala substansi yang melepaskan kalor setelah dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur karbon (C) dan *hydrogen* (H). Sedangkan

oksidator adalah segala substansi yang didalamnya mengandung unsur oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan bahan bakar (*fuel*) dengan bantuan dari energi aktivasi.

2.2.1 Reaksi Pembakaran

Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, proses pembakaran akan terjadi apabila unsur-unsur bahan bakar telah teroksidasi dan pada akhirnya akan menghasilkan panas. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara, dimana udara terdiri dari 21% oksigen dan 79% nitrogen, maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon murni C_mH_n dapat ditulis dalam persamaan:



Persamaan ini telah disederhanakan karena cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekuivalen yang tepat dari udara.

2.2.2 Campuran Udara-Bahan Bakar

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

Metode yang dapat digunakan untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*air-fuel ratio*), FAR (*fuel-air ratio*), dan rasio ekuivalen (Φ)

2.2.2.1 Rasio Udara-Bahan Bakar (*Air Fuel Ratio/AFR*)

Dalam suatu proses pembakaran hal yang mempengaruhi sempurna tidaknya pembakaran adalah campuran antara bahan bakar dan udara (oksigen) itu sendiri. Hal tersebut biasanya dihitung menggunakan metode *AFR (air-fuel Ratio)*.

Rasio udara-bahan bakar dapat dihitung menggunakan persamaan berikut, dimana N adalah jumlah mol:

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

2.2.2.2 Rasio Bahan Bakar-Udara (*Fuel Air Ratio/FAR*)

Sedangkan rasio bahan bakar udara merupakan kebalikan dari *AFR*, sehingga perumusannya adalah sebagai berikut:

$$(FAR)_{stoic} = \left(\frac{N_{bahan\ bakar}}{N_{udara}} \right)_{stoic} \quad (2.3)$$

2.2.2.3 Rasio Ekivalen (*Equivalent Ratio Φ*)

Rasio ekivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar stoikiometrik dengan rasio udara-bahan bakar aktual. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{AFR_{stoic}}{AFR_{act}} \quad (2.4)$$

- $\Phi > 1$ 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 (pembakaran sempurna).

2.2.3 Jenis-jenis Pembakaran

Pembakaran dapat dilakukan secara *premixed* maupun secara difusi. Pembakaran *premixed* adalah pembakaran dimana udara dan bahan bakar telah bercampur sebelum memasuki ruang bakar (*combustor*). Sedangkan pembakaran difusi merupakan proses pembakaran yang terjadi dimana bahan bakar yang dialirkan bercampur dengan udara secara difusi dan terbakar dalam ruang bakar (*combustor*). Dalam penelitian ini diamati karakteristik pembakaran *premixed* dalam *meso-scale combustor*.

2.3 Pembakaran *Premixed*

Seperti diuraikan sebelumnya, pembakaran *premixed* adalah pembakaran dimana bahan bakar dan udara telah tercampur sebelum memasuki daerah ruang bakar (*reaction zone*). Pada pembakaran *premixed* terdapat dua zona, yaitu:

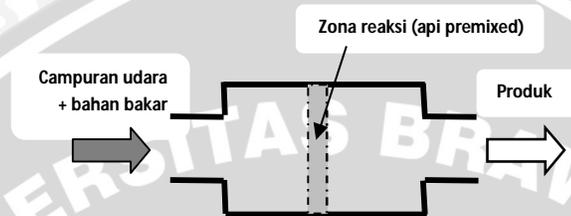
1. Zona pra pemanasan (*preheat zone*)

Preheat zone adalah daerah dimana sedikit panas yang dilepaskan dan masih banyak bahan bakar yang belum terbakar (*unburn fuel*).

2. Zona pemanasan (*Reaction zone*)

Reaction zone adalah daerah dimana sebagian besar energi kimia dilepaskan,

Daerah-daerah tersebut dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut.

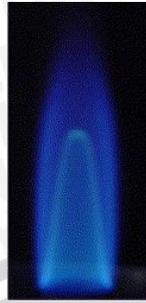


Gambar 2.3 Cara reaktan terbakar pada pembakaran *premixed*

Sumber: Wardana (2008:149).

Pembakaran *premixed* mempunyai keuntungan pada efisiensi pembakarannya yang tinggi, karena reaktan telah bercampur sebelum memasuki daerah pembakaran. Temperatur yang memegang peranan penting dalam pembentukan polutan juga dapat dikontrol dengan cara mengatur perbandingan bahan bakar dan udara. Namun, keamanan merupakan suatu problem, karena bisa saja bahan bakar dan udara dapat segera tercampur walaupun keduanya belum memasuki ruang bakar, dan hal ini dapat menimbulkan kebakaran.

Pada gambar 2.4 merupakan nyala api *premixed* dengan bahan bakar metana dan udara sebagai oksidator. Nyala api *premixed* (*premixed flame*) terdiri atas daerah terang, daerah tersebut menunjukkan tempat terjadinya reaksi (*reaction zone*) dan energi panas dilepaskan. Warna terang ini dapat berubah-ubah tergantung rasio udara dan bahan bakar. Daerah gelap (*dark zone*) merupakan daerah transisi terjadinya perubahan molekul gas yang siap bereaksi pada jarak pemanasan awal (*preheating zone*).



Gambar 2.4 Nyala api pada pembakaran *premixed* (mix of methane-air).

Sumber: T.K. Mishra, *et al.* *Comparison of the structures of methane-air and propane-air partially premixed flames*

Daerah reaksi dibagi menjadi dua daerah yaitu:

1. Daerah reaksi primer, dimana sebagian besar hidrokarbon bereaksi, akibatnya laju reaksi dan temperatur naik secara cepat.
2. Daerah setelah pembakaran (*after burning-region*), dimana terjadi perubahan bentuk produk pertengahan seperti CO dan H₂ menjadi CO₂ dan H₂O dengan laju reaksi lebih lambat dan kenaikan temperatur yang rendah.

2.4 Stabilitas Api

Dalam *meso-scale combustor* kestabilan api merupakan masalah yang krusial. Untuk mendapatkan laju pembangkitan energi yang tinggi dalam ruang bakar yang berukuran kecil, kecepatan reaktan harus besar. Pada percobaan ini, jenis pembakaran yang digunakan adalah pembakaran *premixed*. Pada pembakaran *premixed* api akan stabil bila kecepatan reaktan sebanding dengan kecepatan pembakaran. Tetapi bila kecepatan reaktan lebih kecil dari kecepatan pembakaran, maka akan mengakibatkan terjadinya *flashback*, dan juga bila kecepatan reaktan lebih besar dari kecepatan pembakaran, maka hal tersebut akan mengakibatkan terjadinya *blow-off*.

Penambahan katalis untuk meningkatkan kecepatan pembakaran pernah dilakukan dalam penelitian sebelumnya guna mendapatkan stabilitas pembakaran dan api pada *meso-scale combustor*. Tetapi pemakaian katalis ini membutuhkan biaya yang relatif tinggi, dan apabila penggunaannya dalam jangka panjang hal tersebut akan mengakibatkan pengelupasan lapisan katalis ataupun permukaan katalis lama kelamaan akan terlapisi oleh produk hasil pembakaran. Metode lain yang digunakan untuk meningkatkan stabilitas api adalah dengan menggunakan *external heating* untuk memanaskan dinding luar ruang bakar

dan reaktan, sehingga dapat meningkatkan temperatur dan kecepatan pembakaran. Tetapi bila menggunakan metode ini, kita memerlukan energi tambahan yang jumlahnya cukup besar dibandingkan energi yang dihasilkan oleh pembakaran dalam *meso-scale combustor*.

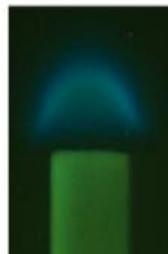
Suatu hal yang sangat penting dalam perencanaan pembakaran gas adalah mencegah terjadinya *flashback* dan *blow-off*. Batas kestabilan nyala api berhubungan erat dengan fenomena *flashback*, *lift-up*, dan *blow-off*.

2.4.1 Fenomena *Flashback*

Flashback terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih besar daripada kecepatan reaktan (campuran udara-bahan bakar), sehingga api terlihat cenderung merambat ke arah tabung bahan bakar (sumber bahan bakar). *Flashback* tidak hanya mengganggu proses pembakaran, tetapi juga dari sisi keamanan bisa menjadi berbahaya karena bisa mengakibatkan terjadinya kebakaran & ledakan.

2.4.2 Fenomena *Lift-off*

Lift-off adalah kondisi dimana nyala api tidak menyentuh permukaan mulut tabung pembakar, tetapi 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 reaktan cukup rendah, ujung bawah nyala api berada sangat dekat dengan ujung tabung pembakar dan hal ini dapat dikatakan api menempel.



Gambar 2.5 Fenomena *lift-off* pada *mini tube nozzle*
Sumber : (J.Chen *et al.*, 2010:2).

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.

2.4.3 Fenomena *Blow-Off*

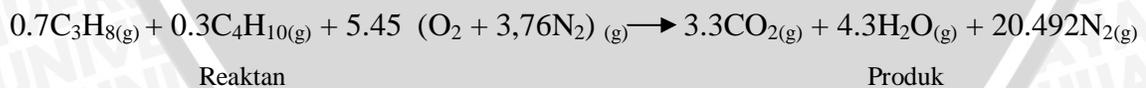
Blow-off merupakan suatu keadaan dimana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran. Maka dari itu pengaturan debit pada bahan bakar dan udara sangat diperlukan, untuk menghindari kondisi seperti ini.

2.5 LPG (*Liquid Petroleum Gas*)

LPG (*Liquid Petroleum Gas*) yang populer di Indonesia dengan sebutan elpiji, didapat dari proses pengolahan gas alam atau dari minyak mentah (*crude oil*). Elpiji yang diproduksi dan dipasarkan di Indonesia oleh PT. Pertamina terdapat tiga jenis, yaitu:

1. Bahan bakar gas elpiji untuk kebutuhan rumah tangga, industri, dan komersial yaitu elpiji campuran propana dan butana, selanjutnya disebut elpiji campuran. Elpiji jenis ini mempunyai kandungan 70 % propana dan 30 % butana.
2. Bahan bakar gas elpiji untuk kebutuhan khusus dan komersial yaitu bahan bakar elpiji propana selanjutnya disebut elpiji propana. Elpiji jenis ini terdiri dari 90 % propana dan *propylene* sedangkan sisanya adalah ethane, ethene, butane, dan butene.
3. Bahan bakar gas elpiji untuk kebutuhan gas komersial yaitu bahan bakar elpiji butana selanjutnya disebut elpiji butana. Jenis ini sebagian besar terdiri dari butane dan butene. Sedangkan sisanya kurang dari 19 % mengandung propane dan *propylene* (Wardana:18).

Sedangkan pada penelitian ini menggunakan elpiji kategori yang pertama, yaitu elpiji campuran. Dengan kandungan 70% gas propana dan 30% butana. Jadi persamaan kimia dari pembakaran stoikiometri LPG dengan udara adalah sebagai berikut :



Suatu zat yang disebut *mercaptan* ditambahkan ke LPG sehingga memberikan bau yang khas, sehingga mudah terdeteksi jika terjadi kebocoran gas.

Berikut adalah keuntungan dan kerugian daripada LPG:

Keuntungan :

1. Mudah digunakan dan dipindahkan.
2. Bersih dan ramah lingkungan.

3. Pembakaran mudah disesuaikan.
4. Berbau khas.

Kerugian :

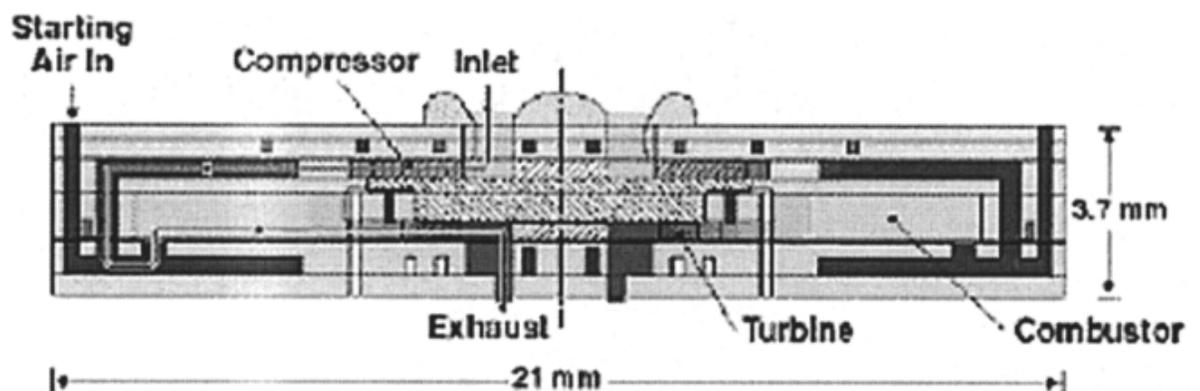
1. Memerlukan tabung yang harganya cukup mahal mengingat tabung terbuat dari baja dan harus mampu menahan tekanan yang tinggi.

2.6 Micro Power Generator

Dalam periode dua puluh tahun terakhir ini, penggunaan peralatan listrik portabel semakin banyak digunakan. Hal tersebut disebabkan oleh semakin meningkatnya mobilitas manusia yang secara tidak langsung menuntut produsen peralatan listrik untuk menciptakan peralatan listrik yang praktis dalam hal pengisian dayanya.

Selama ini kebutuhan akan tenaga listrik portabel dipenuhi dengan menggunakan baterai. Salah satunya adalah baterai lithium, yang mempunyai densitas energi yang rendah dengan waktu penggunaan yang relatif pendek, dibandingkan dengan waktu isi ulang yang relatif panjang. Sumber energi yang dibutuhkan saat ini adalah yang mempunyai densitas energi tinggi dan waktu isi ulang yang relatif cepat, namun sumber energi semacam itu tidak dapat kita temukan pada baterai yang ada di pasar saat ini. Hal ini mendorong penelitian mengenai *micro-power generator*.

Micro-power generator adalah suatu alat untuk membangkitkan energi dengan skala pembangkit yang relatif kecil. *Micro-power generator* diklasifikasikan menjadi dua kategori. Kategori pertama adalah *micro-power generator* yang beroperasi berdasar siklus daya konvensional, contohnya *micro gas turbine*.

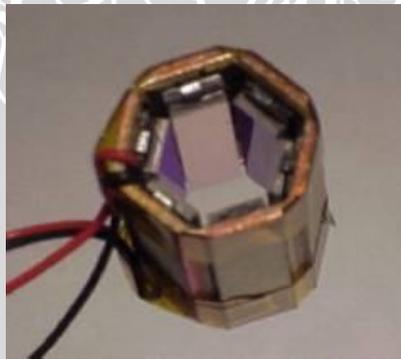


Gambar 2.6 Micro gas Turbine

Sumber: (Fernandez *et al.*, 2002:10)

Alat ini mempunyai diameter sebesar 3,7 mm dan panjang 21 mm dan bekerja dengan cara mengkonversi energi termal menjadi energi mekanik, dan dilanjutkan menjadi energi listrik. Sistem ini bekerja dengan kecepatan yang relatif tinggi sebesar 9000 rpm dengan output bersih sekitar 3,7 W. Namun kekurangan dari sistem ini ada pada masalah *balancing* dan *sealing*.

Kategori yang kedua adalah sistem dengan pembakaran dalam keadaan *steady* yang dihibungkan dengan modul pengkonversi energi panas menjadi listrik. Sistem ini mengkonversi energi panas menjadi energi listrik. Contoh modul pengkonversian energi yang sering digunakan adalah *thermo electric* dan *thermo photo voltaic*. Gambar 2.7 Menunjukkan sebuah prototip *micro-power generator* dengan bahan bakar *hydrogen* dan modul pengkonversi energi *thermo photo voltaic*. Secara garis besar, *micro-power generator* jenis ini terdiri dari 2 bagian, yaitu *micro/meso-scale combustor* dan modul pengkonversi energi panas menjadi energi listrik. *Combustor* berfungsi untuk merubah energi kimia bahan bakar menjadi energi panas melalui proses pembakaran.



Gambar 2.7 Prototip *micro-power generator*
Sumber: (Yang, *et al.*, 2009:2)

2.7 Pembakaran Pada *Micro-scale Combustor*

Bagian yang paling penting pada *micro power generator* adalah *meso-scale combustor*. *Meso scale combustor* merupakan ruang bakar dengan ukuran yang kecil (1 mm -10 mm) apabila dibandingkan dengan ruang bakar konvensional. Pada bagian sebelumnya sudah dijelaskan bahwa *meso scale combustor* akan menghasilkan energi termal yang merupakan energi yang dibutuhkan oleh *micro power generator* untuk dikonversikan

menjadi energi listrik. Karakteristik pembakaran pada *meso scale combustor* sangat mempengaruhi kinerja dari *micro power generator*.

Pada ruang bakar konvensional, alirannya bersifat turbulen dan efek viskos serta difusi dapat diabaikan. Sedangkan pada *meso scale combustor* aliran fluidanya lebih bersifat laminar, sehingga efek viskos serta perpindahan massa dan panas secara difusi menjadi lebih dominan. Selain itu dengan ukuran ruang bakar yang relatif kecil menyebabkan perbandingan antara luas permukaan ruang bakar terhadap volume ruang bakar menjadi lebih besar. Hal tersebut menyebabkan perbandingan antara kehilangan kalor (*heat loss*) terhadap kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran (*heat generation*) menjadi lebih besar, sehingga menghasilkan penurunan temperatur nyala api dan penurunan kecepatan pembakaran yang pada akhirnya dapat mengakibatkan pemadaman api (*flame quenching*).

Karena pada *meso scale combustor* sering terjadi pemadaman api, maka disisipkan sebuah *wire mesh* sebagai *flame holder*. Namun untuk menghasilkan *micro power generator* dengan densitas pembangkitan energi yang tinggi, maka dibutuhkan debit bahan bakar yang besar. Maka dalam penelitian ini akan diteliti lebih lanjut mengenai penggunaan *wire mesh* dengan jumlah lebih dari satu (*multiple wire mesh*) yang diharapkan dapat mencegah terjadinya *blow off*, karena diharapkan *mesh* yang paling luar menjadi penahan untuk api yang menyala pada *mesh* yang paling dalam, agar tidak terjadi *blow off* apabila debit bahan bakar diperbesar. Karena untuk memperoleh densitas pembangkitan energi yang besar, diperlukan debit bahan bakar yang besar pula.

2.8 Hipotesis

Dengan menggunakan *multiple wire mesh* (2 buah *mesh* ditiap *combustor*), diharapkan *mesh* yang kedua dapat mencegah *blow-off*-nya api pada *down stream mesh* yang pertama, sekaligus meningkatkan temperatur disekitar *mesh* kedua. Sehingga kecepatan pembakaran pada *down stream mesh* kedua juga tinggi, dan hal tersebut dapat meningkatkan *flammability limit* pada *combustor*.