

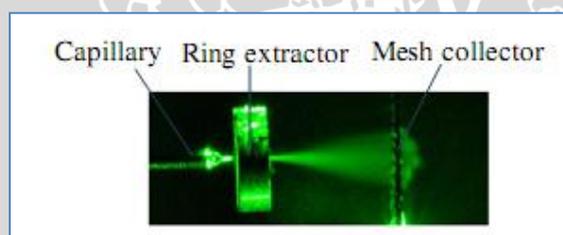
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

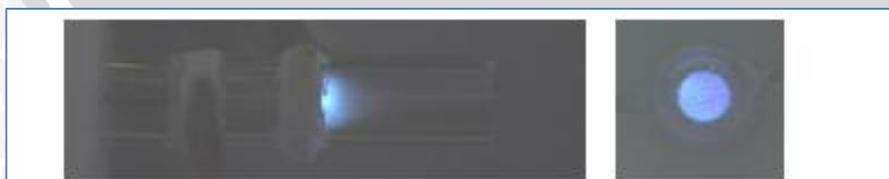
#### 2.1 Hasil Penelitian Sebelumnya

Yuliati, *et al*, (2012) telah melakukan eksperimen yang mempelajari kemungkinan terjadinya pembakaran bahan bakar cair yang stabil pada *meso-scale combustor*. *Meso-scale combustor* yang digunakan berbentuk *tube* berdiameter 3.5 mm didalamnya dipasangkan *wire mesh* sebagai media pembantu *heat recirculation* sekaligus sebagai *flame holder*. Mereka melakukan pengujian dengan bahan bakar *liquid* campuran antara 70% n-heptana dan 30% etanol, bahan bakar cair tersebut kemudian diatomisasi menjadi *droplet* menggunakan *electrospray* (Gambar 2.1).

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa pembakaran bahan bakar cair pada *meso-scale combustor* dapat terjadi secara stabil dengan debit bahan bakar 1 ml/jam (Gambar 2.2). Dari penelitian didapat kesimpulan bahwa pengaplikasian *wire mesh* pada *combustor* memiliki pengaruh yang besar terhadap kestabilan api. Selain itu debit bahan bakar yang digunakan juga harus sangat rendah, karena apabila debit bahan bakar terlalu tinggi dapat mengakibatkan permukaan *combustor* basah dan akhirnya akan mematikan api.



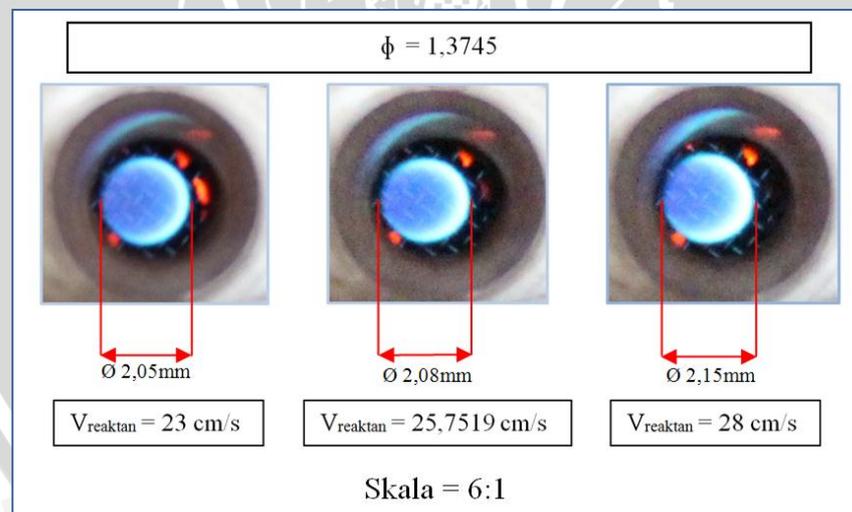
Gambar 2.1 Proses atomisasi bahan bakar cair menggunakan *electrospray*  
Sumber : Yuliati, *et al*, (2012)



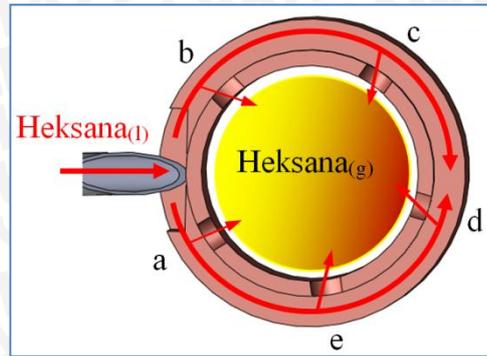
Gambar 2.2 Pembakaran bahan bakar cair pada *meso-scale combustor* dengan menggunakan *electrospray*  
Sumber : Yuliati, *et al*, (2012)

Artin, et, al, (2014) telah meneliti pembakaran bahan bakar cair heksana ( $C_6H_{14}$ ) pada *meso-scale combustor* dengan metode *preheated multiple fuel inlet* menggunakan tembaga dan *quartz glass tube* dengan diameter dalam sebesar 3.5 mm. Heksana diinjeksikan ke sebuah saluran pada dinding *combustor* dengan ukuran lebar 2 mm dan tinggi 0.5 mm yang berfungsi sebagai tempat pemanasan dan penguapan bahan bakar. Setelah menguap bahan bakar didistribusikan ke bagian dalam *combustor* melalui 5 buah lubang *inlet* yang masing - masing berdiameter 0.5 mm. Pada bagian dalam *combustor* juga terdapat dua buah *mesh* yang berfungsi untuk meratakan distribusi uap heksana dan juga berperan sebagai *flame holder*.

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa pembakaran bahan bakar cair pada *meso-scale combustor* dapat terjadi secara stabil dengan debit bahan bakar 1.4 ml/jam. Dari penelitian didapat kesimpulan bahwa visualisasi bentuk nyala api menunjukkan bahwa nyala api menjadi semakin terang dan lebar seiring dengan kenaikan kecepatan reaktan dan semakin menyempit seiring dengan kenaikan rasio ekuivalen. Bentuk api pada penelitian ini tampak tidak simetris terhadap sumbu *combustor*. Hal ini dikarenakan distribusi uap heksana di dalam *combustor* tidak merata keseluruhan bagian sehingga menyebabkan proses pembakaran di dalam *combustor* menjadi tidak homogen.



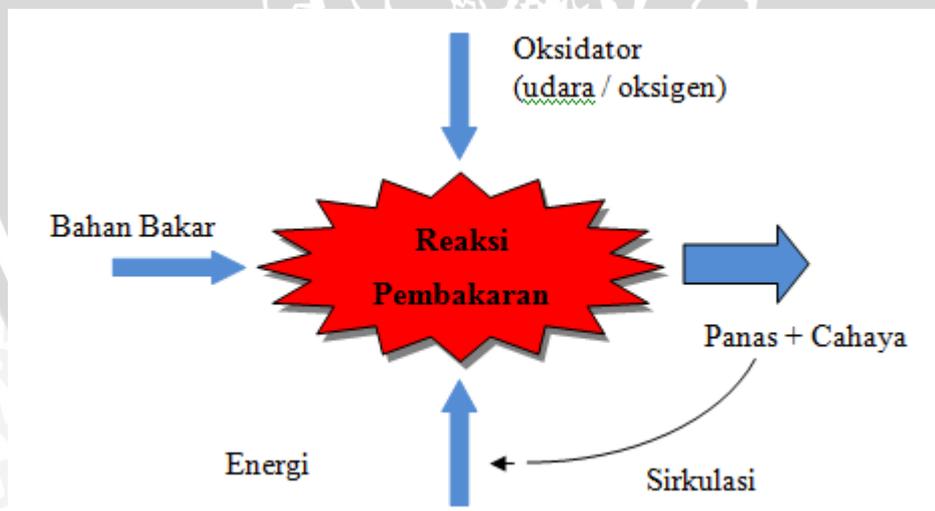
Gambar 2.3 Visualisasi bentuk nyala api pada nilai rasio ekuivalen 1.3745 dengan kecepatan reaktan bervariasi  
 Sumber: Artin, et al, (2014)



Gambar 2.4 Ilustrasi persebaran uap heksana di dalam *meso-scale combustor*  
 Sumber: Artin, et, al, (2014)

## 2.2 Pembakaran

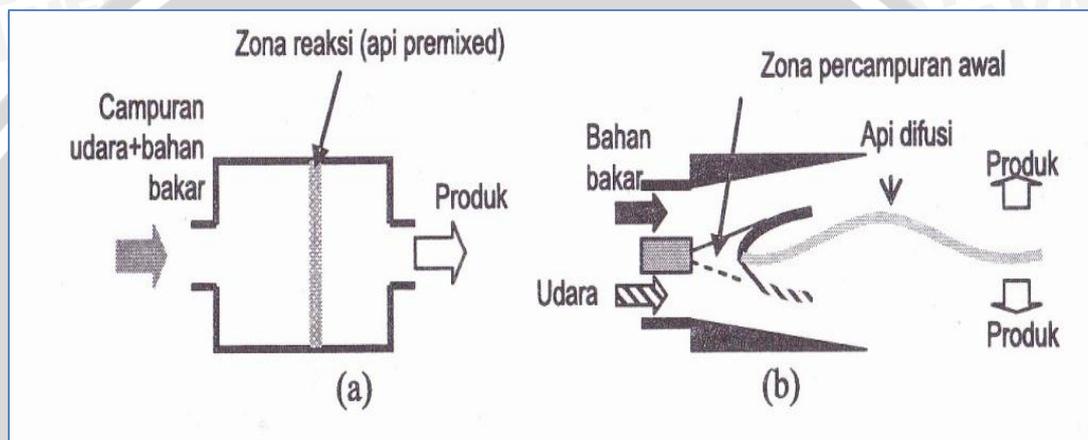
Pembakaran adalah reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen atau udara) yang menghasilkan panas dan cahaya. Proses pembakaran bisa berlangsung jika ada bahan bakar, pengoksidasi dan panas atau energi aktivasi. Energi aktivasi adalah energi yang dipakai untuk mengaktifkan molekul penyusun bahan bakar, sehingga molekul tersebut melepaskan elektron pada kulit terluarnya dan berikatan membentuk molekul baru dengan oksidator. Ilustrasi sederhana yang menjelaskan proses pembakaran dapat dilihat pada Gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2.5 Ilustrasi proses pembakaran  
 Sumber: Wardana (2008)

### 2.2.1 Klasifikasi Pembakaran

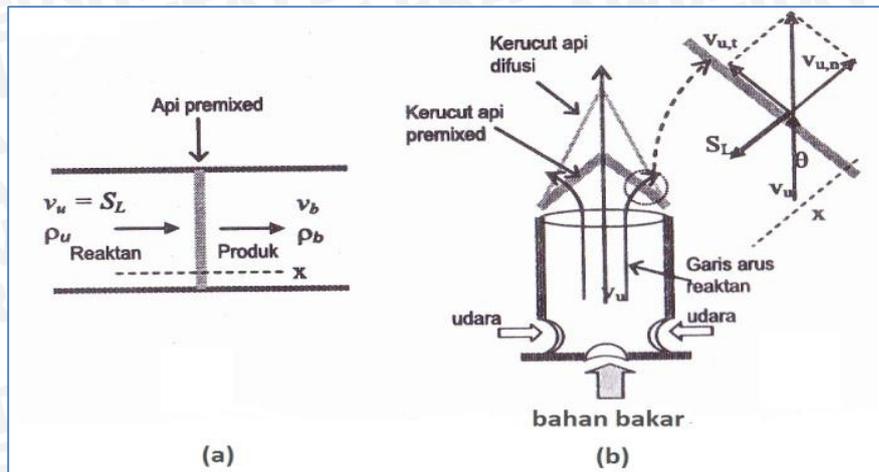
Pembakaran dapat dilakukan secara *premixed* dan secara difusi. Pembakaran secara *premixed* adalah pembakaran dimana bahan bakar (*fuel*) bercampur secara sempurna terlebih dahulu sebelum dialirkan ke ruang *combustor* dan kemudian terbakar, sedangkan proses pembakaran secara difusi merupakan proses pembakaran yang terjadi dimana bahan bakar yang dialirkan akan tercampur dengan udara di ruang *combustor* dan menyala di tempat yang sama. Dalam penelitian kali ini pembakaran *premixed*-lah yang menjadi topik.



Gambar 2.6 (a) Pembakaran *premixed* (b) Pembakaran difusi  
Sumber : Wardana (2008)

### 2.2.2 Pembakaran *Premixed*

Api *premixed* sendiri sebenarnya dibagi lagi menjadi dua jenis menurut jenis alirannya yaitu api *premixed* laminar dan api *premixed* turbulen. Pada laporan penelitian ini akan lebih dibahas mengenai api *premixed* laminar karena api *premixed* laminar yang digunakan pada saat penelitian. Bentuk api *premixed* laminar yang paling khas adalah api bunsen dan api yang merambat di dalam tabung *combustor*. Kedua jenis api *premixed* laminar tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7 (a) Pembakaran *premixed* pada *tube* (b) Pembakaran bunsen  
Sumber : Wardana (2008)

Bentuk api *premixed* laminar yang merambat didalam tabung *combustor* berbentuk lembar datar tipis dan merambat tegak lurus ke arah reaktan. Sedangkan pada api bunsen, api *premixed* berbentuk kerucut dengan dinding kerucut merupakan permukaan api (Wardana, 2008).

Pada gambar 2.7 (a) diatas dapat dilihat bahwa vektor kecepatan rambatan api *premixed* ( $S_L$ ) di dalam tabung sejajar dengan vektor kecepatan reaktan ( $V_u$ ) dan vektor kecepatan produk ( $V_b$ ). Sedangkan untuk api *premixed* bunsen, garis arus reaktan membelok ke dekat api akibat perubahan densitas gas dan mengalir ke luar tegak lurus dengan permukaan api. Penurunan densitas gas yang terjadi sekitar 10 kali lebih rendah akibat kenaikan suhu yang cukup signifikan. Karena sifat fluida yang cenderung mengalir dari densitas tinggi ke rendah maka gas akan berbelok menuju api secara tegak lurus. Penguraian vektor pada api *premixed* bunsen dapat dilihat pada gambar 2.7 (b).

Pembakaran *premixed* memiliki keuntungan yaitu memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pembakaran difusi, hal ini karena reaktan telah bercampur terlebih dahulu dengan udara sebelum memasuki daerah reaksi sehingga perbandingan udara dan bahan bakar bisa diatur sampai titik stoikiometrinya.

### 2.2.3 Reaksi Kimia Pada Proses Pembakaran

Untuk menggambarkan suatu reaksi kimia adalah dengan menggunakan persamaan reaksi yang terdiri dari pereaksi (reaktan) dan hasil reaksi (produk). Persamaan reaksi harus mengikuti hukum perbandingan massa, yaitu massa zat sebelum reaksi dengan hasil reaksi harus sama. Untuk memenuhi hukum kekekalan massa, maka

jumlah atom sebelum dan sesudah reaksi haruslah sama. Perbedaan komposisi pada masing-masing komponen berpengaruh pada terjadinya reaksi yang mana memberi dampak pada fenomena fisik seperti perpindahan panas dan perpindahan massa. Rumus reaksi pembakaran secara sederhana dituliskan sebagai berikut.



Pada faktanya reaksi pembakaran sempurna sangatlah sulit terjadi karena oksidator yang digunakan adalah dari udara bebas yang kandungannya tidak hanya oksigen saja, melainkan gas-gas lain yang terkandung didalamnya.

Tabel 2.1 Komposisi Udara Kering

Macam gas	Volume %	Massa %
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	78,088	75,527
Oksigen (O <sub>2</sub> )	20,949	23,143
Argon (Ar)	0,930	1,282
Karbondioksida	0,030	0,045
	99,997	99,997

Dari tabel 2.1 diatas didapat presentase kandungan gas di udara dimana presentase kandungan gas - gas lain diabaikan karena terlalu kecil, maka dapat diasumsikan udara hanya terdiri dari 79% Nitrogen (N<sub>2</sub>) dan 21% Oksigen (O<sub>2</sub>) saja.

Stoikiometri adalah suatu keadaan dimana campuran bahan bakar dan udara berada pada jumlah yang tepat untuk beraksi secara keseluruhan yang mana pada reaksi pembakaran hidrokarbon dapat dicapai apabila seluruh atom C dan H pada hidrokarbon berikatan seluruhnya dengan O<sub>2</sub> membentuk CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O.

#### 2.2.4 Air fuel Ratio (AFR)

*Air Fuel Ratio* (AFR) adalah rasio perbandingan antara massa atau mol udara dan bahan bakar yang terjadi dalam suatu reaksi. Pada reaksi pembakaran AFR memegang peranan penting dalam menentukan jalannya proses pembakaran tersebut. Persamaan AFR pada campuran stoikiometrik dituliskan dalam rumus sebagai berikut:

$$(AFR) = \left( \frac{M_{udara}}{M_{bahan\ bakar}} \right) \quad 2-1$$

(Wardana, 2008)

Keterangan :

- $(AFR)_{stoic}$  = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik
- $M_{udara}$  = Massa udara
- $M_{bahan\ bakar}$  = Massa bahan bakar

Dengan berdasarkan pada persamaan (2-1) tersebut maka dapat dihitung nilai AFR untuk bahan bakar heksana ( $C_6H_{14}$ ) pada kondisi stoikiometriknya, perhitungannya menjadi sebagai berikut:

Diketahui:



- Massa atom relatif (Ar)  
C = 12  
H = 1  
O = 16  
N = 14
- Rumus stoikiometri heksana ( $C_6H_{14}$ ) berdasarkan massa

$$AFR = \frac{9,5 \times ((2 \times 16) + (3,76 \times 14 \times 2))}{(12 \times 6) + (14 \times 1)} = \frac{1304,16}{86} = 15,1646 \frac{kg\ udara}{kg\ bahan\ bakar}$$

- Dari hasil perhitungan AFR diatas dapat dicari perbandingan antara heksana(*liquid*) dan udara

$$AFR = 15,1646 \frac{kg\ udara}{kg\ bahan\ bakar}$$

$$1\ kg\ (heksana) : 15,1646\ kg\ (udara)$$

$$\frac{1\ gr\ (heksana)}{\rho_{heksana(l)} = 0,659\ gr/ml} : \frac{15,1646\ gr\ (udara)}{\rho_{udara} = 0,001185\ gr/ml}$$

$$1,5174\ ml\ (heksana) : 12797,1308\ ml\ (udara)$$

(Perry, 1997)

- Nilai tersebut adalah perbandingan stoikiometri antara volume heksana dan volume udara untuk terjadinya reaksi pembakaran. Sehingga untuk perbandingan debitnya adalah sebagai berikut

$$\frac{1.51745 \text{ ml (heksana)} : 12797.1308 \text{ ml (udara)}}{1.51745 \text{ hr}}$$

$$1 \text{ ml/hr} : 8433.3129 \text{ ml/hr}$$

$$1 \text{ ml/hr} : 140.5552 \text{ ml/min}$$

### 2.2.5 Rasio Ekuivalen ( $\Phi$ )

Rasio ekuivalen rasio dari rasio aktual bahan bakar-udara terhadap rasio bahan bakar-udara untuk pembakaran dengan jumlah udara teoritis. Rumus rasio ekuivalen dituliskan sebagai berikut.

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

Keterangan :

- $\Phi$  = Rasio ekuivalen
- $AFR_s$  = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik
- $AFR_a$  = Rasio udara dan bahan bakar dalam kondisi aktual

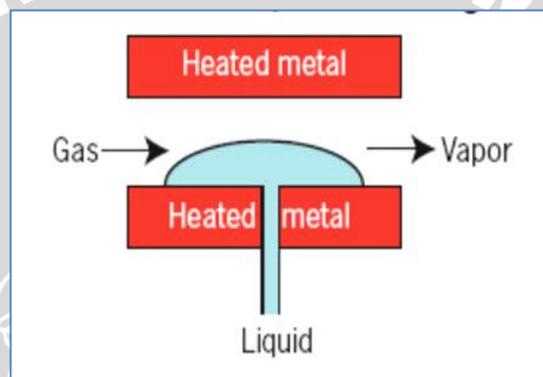
Menurut nilai rasio ekuivalen, jenis campuran udara dan bahan bakar diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu

- $\Phi > 1$  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)

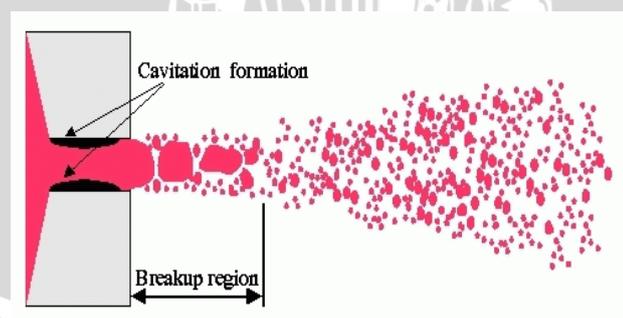
### 2.3 Pembakaran Bahan Bakar Cair

Pembakaran menggunakan bahan bakar cair terlebih dahulu harus diuapkan dengan maksud mengubah fase bahan bakar dari cair menjadi gas. Pembakaran bahan bakar cair dapat dilakukan dengan dua buah cara, yaitu dengan memperluas bidang

kontak fluida dengan sumber panas (*liquid film*) dengan maksud untuk membuat fluida pada kondisi selebar dan setipis mungkin sehingga bidang kontak fluida dengan sumber panas semakin lebar dan transfer panas dapat terjadi dengan baik dan penguapan lebih cepat terjadi. Cara kedua dapat dilakukan melalui cara atomisasi dengan tujuan yang sama yaitu memperluas bidang kontak permukaan fluida. Namun metode yang digunakan adalah dengan membuat fluida pada kondisi terpisah-pisah hingga ukuran mikro (*droplet*) sehingga luas bidang kontak antara fluida dan lingkungan sebagai sumber panas akan semakin besar dan waktu yang dibutuhkan untuk menguapkan bahan bakar akan semakin cepat karena kalor langsung tersebar keseluruh permukaan *droplet* tanpa perlu meresap kedalamnya.



Gambar 2.8 Pembakaran bahan bakar cair dengan metode *liquid film*  
Sumber : Browne (2011)



Gambar 2.9 Pembakaran bahan bakar cair dengan metode atomisasi  
Sumber : Tanner (2009)

### 2.3.1 Heksana ( $C_6H_{14}$ )

Heksana adalah sebuah senyawa hidrokarbon alkana dengan rumus kimia  $C_6H_{14}$ . Awalan heks- merujuk pada enam atom karbon yang terdapat pada heksana dan akhiran

-ana berasal dari alkana, yang merujuk pada ikatan tunggal yang menghubungkan atom-atom karbon tersebut. Berikut adalah karakteristik dari n-heksana:

- Fase cair pada suhu 15 °C dan tekanan 1 atm
- Temperatur didih 68.7 °C pada tekanan 1 atm
- Titik beku – 13.6 °C pada tekanan 1 atm
- Titik nyala 225 °C pada tekanan 1 atm
- Specific Gravity 0.659 pada suhu 20 °C

#### 2.4 Metode Percampuran Bahan Bakar Menggunakan *Tangential Inlet*

Penelitian menggunakan saluran tangensial (*swirl burner*) tanpa adanya pencampuran awal (*non-premixed*). Pusaran diberikan melalui lubang masuk aksial dan tangensial, kekuatan pusaran diatur/dikontrol oleh variasi perbandingan jumlah aliran udara aksial dan tangensial. Bahan bakar diinjeksikan melalui sebuah lubang *nozle* (*single hole-nozzle*) dan menghasilkan nyala api pada daerah percampuran primer yaitu sebelah dalam di dekat *quartz ring* tampak lebih biru dengan inti bercahaya merata. (Cozzi. 2011)

Aliran *swirl* banyak diaplikasikan pada *burner* turbin gas, *swirl atomizer*, dan mesin *spray* pertanian. Pada sistem pembakaran, pengaruh penting penggunaan *swirl* terdapat pada penginjeksian udara dan bahan bakar, metode ini digunakan sebagai bantuan untuk mencapai stabilitas pembakaran. *Swirl burner* pada turbin gas dan tungku pembakaran industri memanfaatkan pusaran kuat untuk meningkatkan momentum antara aliran aksial dengan tangensial sehingga mempercepat waktu percampuran bahan bakar dan udara, selain itu dapat juga meningkatkan waktu tinggal bahan bakar. (Surjosatyo. 2011)

#### 2.5 Batas Stabilitas Nyala Api (*Flammability Limits*)

Dalam kenyataannya terjadinya nyala api dapat tercapai jika terjadi campuran antara oksidator dan bahan bakar yang mendukung. Ada kisaran campuran bahan bakar dan udara yang dapat menyebabkan nyala api. Kisaran itu yaitu kisaran batas bawah stabilitas nyala dan batas atas stabilitas nyala atau yang lebih dikenal sebagai *lower and upper flammability limits*. *Lower flammability limits* adalah konsentrasi uap *fuel* dimana tidak dapat terjadi pembakaran karena konsentrasi *fuel* masih terlalu sedikit dibandingkan dengan kandungan oksidator. *Upper flammability limits* adalah

konsentrasi uap *fuel* dimana tidak dapat terjadi pembakaran karena konsentrasi *fuel* masih terlalu banyak dibandingkan dengan kandungan oksidator.

## 2.6 *Micro/Meso-Scale Combustor*

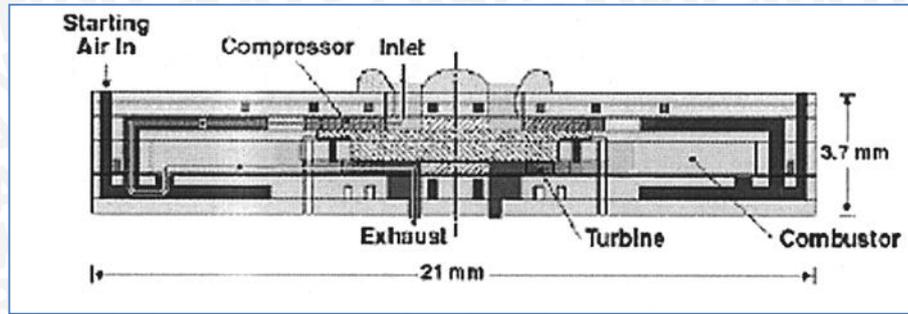
Secara garis besar *microcombustor* diklasifikasikan menjadi dua golongan yaitu *micro-scale combustor* dan *meso-scale combustor*. Pengklasifikasian berdasarkan besarnya celah pada ruang bakar. Untuk *micro-scale combustor* celah ruang bakar memiliki ukuran kurang dari 1 mm. Sedangkan untuk *meso-scale combustor* memiliki ukuran lebih dari 1 mm, namun karakteristik pembakaran masih menyerupai *microcombustion*. (Maruta, 2011).

Pada penelitian ini menggunakan *meso-scale combustor* yang memiliki ciri sulitnya untuk mencapai kestabilan api karena perbandingan luas permukaan dan volume sangatlah besar (*surface to volume ratio*,  $S/V$ ), sehingga *heat-loss* yang terjadi juga semakin tinggi. Hal ini dapat menyebabkan api padam karena panas yang terjadi dari pembakaran sebelumnya tidak cukup untuk menjadi energi aktivasi bagi pembakaran selanjutnya.

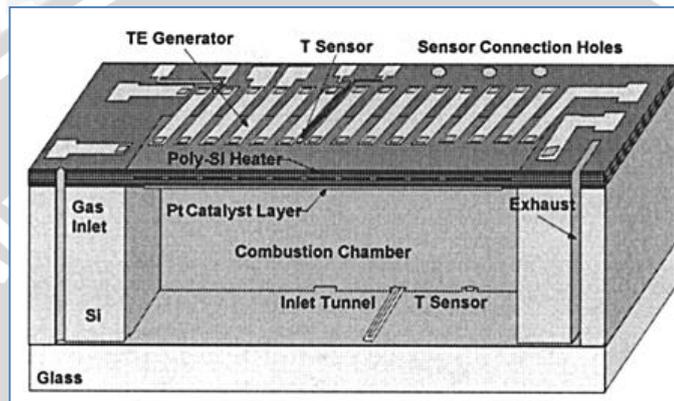
Penggunaan bahan bakar gas pada *meso-scale combustor* sejauh ini sudah banyak diteliti karena mudah dalam pengaturan debit bahan bakar dan tercampur dengan udara. Namun karena adanya kesulitan dalam penyimpanan bahan bakar gas dimana harus menggunakan tabung bertekanan tinggi maka dalam penelitian ini dicoba diterapkan pembakaran menggunakan bahan bakar cair untuk mengatasi masalah tersebut.

## 2.7 *Micropower Generator*

*Micropower generator* adalah sumber pembangkit energi berskala mikro (*microcombustion*) yang memanfaatkan prinsip pembakaran dan dapat dibedakan menjadi dua, yaitu menggunakan siklus daya konvensional dan menggunakan modul pengkonversi energi termal menjadi energi listrik (*thermophotovoltaic* atau *thermo electric*), *microcombustion* merupakan proses pembakaran pada suatu *combustor* yang memiliki karakteristik dimensi relatif mendekati *quenching distance* atau lebar minimal suatu ruang bakar agar dapat terjadi pembakaran didalamnya.



Gambar 2.10 *Micropower generator* dengan siklus daya konvensional  
 Sumber : Fernandez-Pello, *et al* (2002)



Gambar 2.11 *Micropower generator* dengan prinsip *thermoelectric*  
 Sumber : Fernandez-Pello, *et al* (2002)

## 2.8 Hipotesis

Pada pembakaran *meso-scale combustor* menggunakan bahan bakar cair dapat terjadi dengan *preheated multiple tangential fuel inlet*. Bahan bakar cair heksana dapat menguap lebih merata karena adanya saluran *annular* bahan bakar yang terletak di sekeliling dinding *combustor*, uap bahan bakar yang masuk ke bagian dalam *combustor* diharapkan dapat bereaksi dengan udara dan terjadi proses pembakaran. Dengan diaplikasikannya *tangential inlet* dapat meratakan distribusi uap dan juga pemasangan 2 buah *mesh* dapat berfungsi untuk lebih meratakan distribusi uap bahan bakar dan udara serta dapat berfungsi sebagai *flame holder*, sehingga pembakaran dapat terjadi lebih homogen dan merata di dalam *combustor*.