

Temperatur Nyala Adiabatik pada Pembakaran Premixed LPG/CO₂/udara dalam Hele Shaw Cell

Nasrul Ilminnafik⁽¹⁾

¹⁾Teknik Mesin Universitas Jember
Jl. Kalimantan 37 Jember 68121
Email: nasrul.ilminnafik@gmail.com

Abstrak

Pengetahuan sifat keamanan suatu bahan yang mudah terbakar adalah sangat penting untuk menjamin keamanan operasional pada suatu proses industri yang bisa berpotensi sebagai sumber kebakaran dan ledakan yang serius. Salah satu parameter dari pembakaran adalah temperatur nyala adiabatik. Perhitungan temperatur nyala adiabatik bisa digunakan untuk mengetahui temperatur maksimum yang akan dicapai oleh suatu bahan. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui temperatur adiabatis pada pembakaran premixed campuran LPG dan karbon dioksida dengan beberapa komposisi. Penelitian dilakukan dengan mengubah konsentrasi CO₂ pada ekuivalen rasio (Φ) yang tetap pada campuran LPG/udara. Penelitian dilakukan pada ruang bakar tipe Hele Shaw Cell (HSC) dengan dimensi panjang 500 mm, lebar 200 mm, dan celah 10 mm.

Dari hasil penelitian diperoleh bahwa CO₂ menyebabkan temperatur adiabatik menurun pada semua komposisi. Pada $\Phi=1,06$ tanpa CO₂, nilai entalpi produk yang diperoleh adalah -3,74 kJ/mol yang terletak pada temperatur sekitar 2330 K. Temperatur produk ini adalah temperatur adiabatik karena bahan bakar dan udara dibakar pada sistem adiabatik. Penambahan CO₂ menyebabkan temperatur adiabatik yang terjadi lebih rendah atau menurun. Pada campuran LPG/CO₂ dengan komposisi sama ($\Phi=1,06$), h_{produk} yang diperoleh adalah -44,3 kJ/mol dan temperatur adiabatik berada pada T sekitar 1592 K. Pada campuran kaya sekali ($\Phi=2,34$) tanpa CO₂, h_{produk} adalah -3,88 kJ/mol dan temperatur adiabatik yang dicapai sekitar 2393 K. Pada pembakaran kaya sekali, temperatur adiabatik sedikit lebih tinggi dibandingkan pada pembakaran stoikiometri.

Keywords: Pembakaran premixed, LPG/CO₂, temperatur adiabatik, hele shaw cell.

Pendahuluan

Pemahaman tentang sifat keamanan suatu bahan yang mudah terbakar adalah sangat penting untuk keamanan operasional suatu proses industri yang berpotensi sebagai sumber kebakaran dan ledakan yang serius (Chiang, et al. 2009). *Inhibitor* merupakan senyawa yang menghambat atau menurunkan laju reaksi kimia sehingga menaikkan energi aktivasi (Missen, et al., 1999). Menurut Chiang, et al., (2009), karbon dioksida merupakan bahan yang mampu menjadi *inhibitor* yang efektif dalam menurunkan laju reaksi pembakaran gas metana. Sifat *inhibitor* berlawanan dengan katalis, yang mempercepat laju reaksi. Untuk mengetahui pengaruh karbon dioksida sebagai *inhibitor* pada pembakaran hidrokarbon telah dilakukan penelitian rambat api pada pembakaran premixed hidrokarbon dan karbon dioksida (Ilminnafik, et al., 2011). Salah satu parameter dari pembakaran adalah temperatur nyala adiabatik. Temperatur adiabatik merupakan temperatur maksimum yang mungkin mampu dihasilkan oleh produk suatu reaksi pembakaran

apabila tidak terjadi kebocoran panas ke lingkungan (Patabang, 2009). Temperatur maksimum bisa dicapai pada kondisi campuran udara dan bahan bakar secara homogen dan stoikiometri sehingga reaksi berlangsung secara sempurna. Tetapi kondisi temperatur maksimum teoritis ini sulit dicapai karena beberapa penyebab, diantaranya pembakaran sulit dilakukan pada kondisi yang sempurna karena adanya udara berlebih, kehilangan panas akibat radiasi, konduksi dan konveksi serta disosiasi produk pembakaran, dan lain-lain (Wardana, 2008). Untuk menentukan batas-batas kemampuan material yang akan digunakan sebagai ruang bakar dan memberikan informasi berapa temperatur maksimum yang bisa dicapai oleh suatu bahan bisa dilakukan dengan menghitung temperatur adiabatik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui temperatur adiabatik pada pembakaran premixed campuran *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) dan karbon dioksida pada beberapa komposisi.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode perhitungan temperatur adiabatik pada pembakaran LPG dan pembakaran campuran LPG dan karbon dioksida (CO₂). Bahan yang digunakan adalah LPG digunakan sebagai fluida reaktan, udara sebagai oksidator, dan CO₂ sebagai *inhibitor*. LPG diperoleh dari market lokal produk PT Pertamina Indonesia dengan komposisi 50% propana dan 50% butana dengan fraksi massa. Penelitian dilakukan dengan mengubah konsentrasi CO₂ pada ekuivalen rasio (Φ) yang tetap pada campuran LPG/udara seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi yang digunakan

Campuran LPG + Udara	Φ	% CO ₂	% CO ₂
Stoikiometri	1	0%	-
Kaya 3	2,34	0%	9%
Kaya 2	1,69	0%	28%
Kaya 1	1,06	0%	16%
Miskin sekali	0,89	0%	6%

Penelitian dilakukan pada ruang bakar tipe *Hele Shaw Cell* (HSC) dengan dimensi panjang 500 mm, lebar 200 mm, dan celah 10 mm seperti terlihat pada Gambar 1. HSC terdiri dari 2 lembar acrylic dengan ukuran 600 x 260 x 10 (mm) yang diselipi satu lembar acrylic dengan dimensi yang sama dan dipotong bagian dalamnya 500 x 200 (mm). Kedua sisi acrylic terpotong dilapisi *silicone rubber seals* untuk mencegah kebocoran. CO₂, LPG, dan udara dimasukkan ke ruang *mixing*, kemudian dialirkan ke HSC. Pada kondisi ruang bakar seperti ini bisa dianggap pembakaran yang terjadi dalam HSC pada keadaan adiabatik (Ronney, 2001).

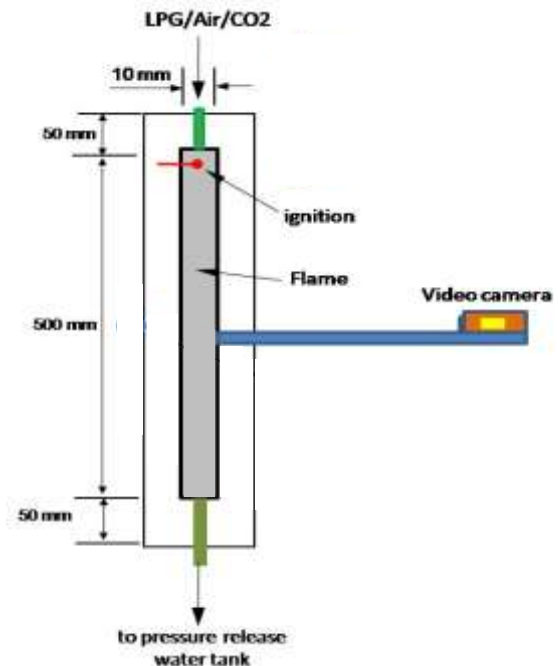


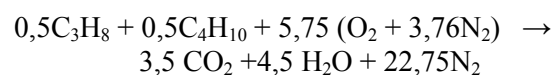
Fig. 1. Gambar detail *Hele Shaw Cell*

Prosedur penentuan temperatur adiabatik yang dilakukan adalah dengan merumuskan sesuatu kesetimbangan energi dan menyelesaikannya untuk memperoleh entalpi beberapa produk yang dinyatakan dalam entalpi berbagai reaktan. Setelah diperoleh harga nilai entalpi, komposisi, dan tekanan spesies produk maka temperatur adiabatik bisa diketahui. Idealisasi dari pembakaran yang diasumsikan merupakan temperatur nyala adiabatik adalah sebagai berikut :

- Produk hasil pembakaran hanya mengandung CO₂, H₂O, N₂, dan O₂ yang dipandang sebagai gas ideal
- Produk hasil pembakaran membentuk sebuah campuran berbagai macam gas ideal yang bebas satu dari yang lainnya
- Volumer atur adiabatik
- Masukan dan luaran volume atur dalam keadaan setimbang
- Aliran dalam keadaan stasioner
- Energi kinetik dan potensial dapat diabaikan

Hasil Penelitian

Untuk menentukan temperatur adiabatik LPG diperlukan terlebih dahulu persamaan reaksi kimia pembakaran yang terjadi antara LPG dan udara berikut,



Jumlah mol produk adalah:

$$N_{\text{produk}} = 3,5 + 4,5 + 22,5 = 30,5$$

Sehingga diperoleh fraksi mol tiap spesies reaktan adalah:

$$X_{C_3H_8} = \frac{N_{C_3H_8}}{N_{prod}} = \frac{0,5}{30,5} = 0.016$$

$$X_{C_4H_{10}} = \frac{N_{C_4H_{10}}}{N_{prod}} = \frac{1}{30,5} = 0.016$$

$$X_{O_2} = \frac{N_{O_2}}{N_{prod}} = \frac{5,75}{30,5} = 0.19$$

$$X_{N_2} = \frac{N_{N_2}}{N_{prod}} = \frac{21,62}{30,5} = 0.7$$

Dengan demikian kesetimbangan energi untuk LPG dapat ditulis sebagai berikut:

$$h_{prod} = 0,016h_{C_3H_8} + 0,016h_{C_4H_{10}} + 0,19h_{O_2} + 0,7h_{N_2}$$

Dari tabel entalpi pembentukan menurut Wardana (2008) diperoleh:

$$h_{prod} = 0,016(-103,85) + 0,016(-126,15) + 0,19(0) + 0,7(0) = -1,66 - 2,02 = -2,68 \text{ kJ/mol}$$

Penentuan temperatur adiabatik dilakukan dengan menghitung entalpi produk terkait dengan berbagai entalpi spesies individual melalui:

$$h_{prod} = X_{CO_2}h_{CO_2} + X_{H_2O}h_{H_2O} + X_{N_2}h_{N_2}$$

Perhitungan berbagai fraksi mol konstituen menghasilkan:

$$X_{CO_2} = \frac{3,5}{30,8} = 0,114 \quad X_{H_2O} = \frac{4,5}{30,8} = 0,146$$

$$X_{N_2} = \frac{22,76}{30,8} = 0,74$$

Maka $h_{prod}(T)$ yang terbentuk adalah sebagai berikut

$$h_{prod}(T) = 0,114h_{CO_2}(T) + 0,146h_{H_2O} + 0,74h_{N_2}(T)$$

nilai entalpi komponen diberikan oleh Strehlow (1985). Suatu pemecahan dengan metode *trial and error solution* dapat menghasilkan temperatur yang akan memberikan entalpi produk yang benar yaitu -3,74 kJ/mol. Cara menghitung entalpi masing-masing spesies kimia pada berbagai temperatur adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Entalpi beberapa spesies pada 2100K

Spesies	$H_{2100}^0 - H_{298}^0$ [kJ/mol]	$(H_f^0)_{298}$	H_{2100}^0 [kJ/mol]
---------	--------------------------------------	-----------------	--------------------------

	[kJ/mol]		
C ₃ H ₈	-104	-104	
C ₄ H ₁₀	-126	-126	
O ₂	62,96	0	62,96
N ₂	59,74	0	59,74
H ₂ O	77,83	-241,83	-164
CO ₂	97,5	-393,52	-296,02

Hasil dari Tabel 2 ditabulasikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan entalpi produk pada beberapa temperatur

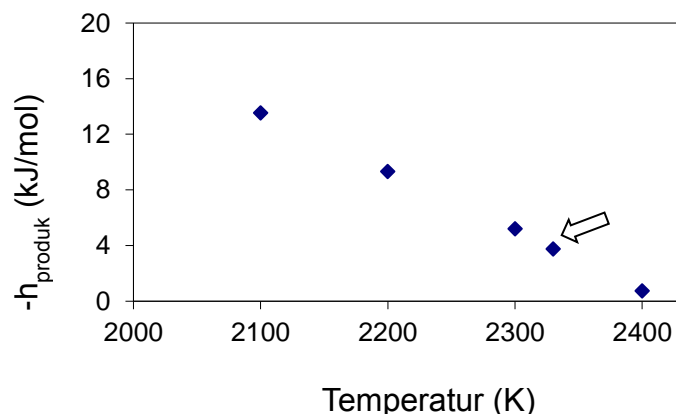
		CO ₂	H ₂ O	N ₂	Σ
	Xi	0,11	0,15	0,74	
2100	hi	-296	-164	59,7	
	Xihi	-34	-24	44	-14
2200	Hi	-290	-159	63	
	Xihi	-33	-23	47	-9
2300	hi	-284	-153	67	
	Xihi	-32,3	-22,4	49,6	-5,19
2400	hi	-278	-148	71	
	Xihi	-32	-22	53	-0,72

Pembahasan

Pembakaran LPG tanpa CO₂

Dari hasil perhitungan dalam Tabel 3 terlihat bahwa nilai h_{produk} lebih rendah atau menurun dengan peningkatan temperatur dan nilai h_{produk} yang terbentuk yaitu -3,74 kJ/mol terletak antara temperatur 2300 dan 2400. Apabila hasil perhitungan pada Tabel 3 di plot dalam grafik pada berbagai temperatur, maka hasilnya adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Untuk mendapatkan nilai pada temperatur berapa h_{produk} tersebut, maka nilai h_{produk} diplot dalam grafik pada Gambar 2. Dari Gambar 2 tersebut kemudian diperoleh bahwa pada nilai $h_{produk} = -3,74$ kJ/mol berada pada temperatur sekitar 2330 K. Temperatur produk ini adalah temperatur adiabatik karena bahan bakar dan udara dibakar pada sistem adiabatik.



Gambar 2. Entalpi produk pembakaran LPG tanpa CO₂ pada $\Phi=1,06$

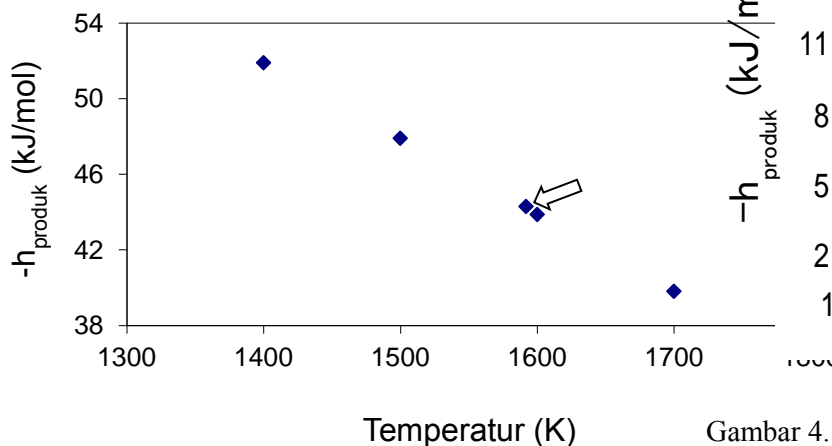
Dengan cara perhitungan yang sama, semua komposisi pada penelitian ini dihitung nilai h produknya sehingga diperoleh temperatur pada setiap komposisi. Hasil perhitungannya ditabulasikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan semua komposisi

	Φ	h_{prod} (kJ/mol)	$T_{\text{adiabatik}}$ (K)
Tanpa CO ₂	2,34	-3,88	2393
	1,69	-3,86	2394
	1,06	-3,74	2330
	0,89	-3,86	2394
Dengan CO ₂	2,34	-10,4	2347
	1,69	-78,2	1908
	1,06	-44,3	2005
	0,89	-10,5	2346

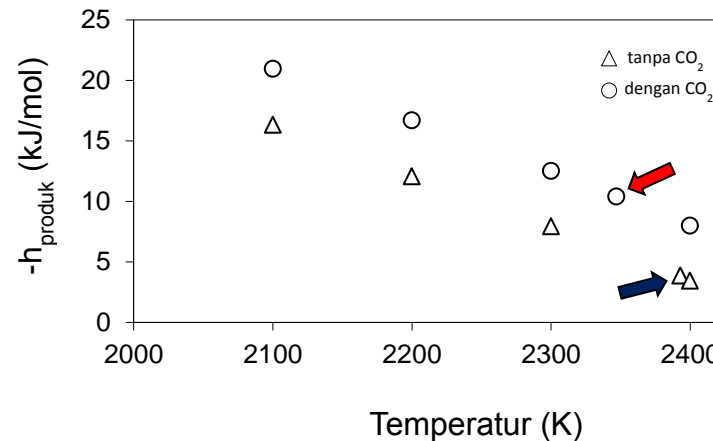
Pembakaran campuran LPG/CO₂

Penambahan CO₂ menyebabkan temperatur adiabatik yang terjadi menurun. Misalnya pada pembakaran campuran LPG/CO₂ dengan komposisi sama dengan perhitungan pada Tabel 3 ($\Phi=1,06$), h_{produk} yang diperoleh adalah sekitar -44,3 kJ/mol dan temperatur adiabatik berada pada nilai sekitar 1592 K seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Entalpi produk pembakaran LPG+CO₂, $\Phi=1,06$

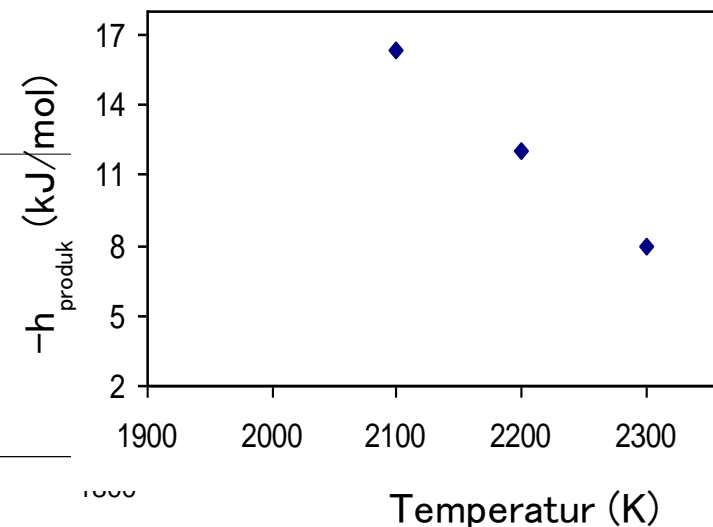
Pada Gambar 4 ditunjukkan plotting harga entalpi dan temperatur pada ekivalen rasio, $\Phi = 0,89$. Pada gambar tersebut terlihat temperatur adiabatik pada pembakaran tanpa CO₂ adalah sekitar 2394 K. Dan pada pembakaran LPG yang ditambahkan CO₂ terjadi penurunan temperatur adiabatik dimana nilai temperaturnya menjadi sekitar 2346 K.



Gambar 4. Entalpi produk pembakaran LPG+CO₂ pada $\Phi=0,89$

Pembakaran pada campuran kaya sekali

Pada pembakaran kaya sekali ($\Phi=2,34$) tanpa CO₂, h produk yang diperoleh adalah -3,88 kJ/mol. Hasil ini kemudian diplot pada grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 4 sehingga temperatur adiabatik yang diperoleh adalah sekitar 2393 K. Pada pembakaran kaya sekali, temperatur adiabatik sedikit lebih tinggi dibandingkan pada pembakaran stoikiometri.



Gambar 4. Entalpi produk pembakaran LPG tanpa CO₂ pada $\Phi=2,34$

Kesimpulan

Penambahan karbon dioksida pada pembakaran LPG menyebabkan temperatur adiabatik menurun pada semua komposisi. Pada pembakaran kaya sekali, temperatur adiabatik sedikit lebih tinggi dibandingkan pada pembakaran stoikiometri.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Pimpinan di Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah memberikan kesempatan untuk mempresentasikan paper ini pada SNTTM XII 2013.

Nomenklatur

h	entalpi
LPG	<i>Liquefied Petroleum Gas</i>
CO ₂	Karbon dioksida
HSC	Hele Shaw Cell
X	Fraksi mol

Greeks letters

Φ	Ekivalen rasio
--------	----------------

Referensi

Chiang, C., J. Lee, Y. Chang, C. Chuang, C. Shu. Inert Effect on the Flammability Characteristic of Methanol by Nitrogen of Carbon Dioxide, *Journal Thermal Analysis Calorimeter* Vol. 96, 759-763 (2009)

Ilminnafik, N., Nurkholis Hamidi, ING Wardana, Behavior of Flame Propagation in LPG Premixed Combustion with Carbon Dioxide Inhibitor, *International Journal of Academic Research*, Vol. 3 (2), 705-708 (March 2011).

Missen, R.W., A.A. Mims, B.A. Saville. *Introduction Chemical Reaction Engineering and Kinetics*. John Wiley & Sons. Inc. (1999).

Patabang, D., Analisa Suhu Nyala Adiabatik dari Berbagai Jenis Batu Bara, *Jurnal SMARTek*, Vol. 7, No. 2, 92 – 98 (2009).

Ronney, P.D. 2001. *Premixed-Gas Flames in: Microgravity Combustion: Fires in Free Fall* (H. Ross. Ed.). Academic Press. London.

Strehlow, R.A., *Combustion Fundamental*. McGraw-Hill Inc., New York (1985).

Wardana, ING. *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, PT Danar Wijaya, Brawijaya University Press, (2008).