

## SIMULASI NUMERIS KARAKTERISTIK PEMBAKARAN $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ /Udara Dan $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{O}_2$ PADA COUNTERFLOW PREMIXED BURNER

Hangga Wicaksono, Mega Nur Sasongko, Denny Widhiyanuriyawan  
Teknik Mesin Universitas Brawijaya Jl. Mayjend Haryono 167, Malang 65145, Indonesia  
E-mail: wicaksonohangga@gmail.com

### Abstract

*The high amount of  $\text{CO}_2$  produced in a conventional biogas reactor needs to be considered. A further analysis is needed in order to investigate the effect of  $\text{CO}_2$  addition especially in thermal and chemical kinetics aspect. This numerical study has been held to analyze the effect of  $\text{CO}_2$  in  $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{O}_2$  and  $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{Air}$  premixed combustion. In this study one dimensional analysis in a counterflow burner has been performed. The volume fraction of  $\text{CO}_2$  used in this study was 0%-40% from  $\text{CH}_4$ 's volume fraction, according to the amount of  $\text{CO}_2$  in general phenomenon. Based on the flammability limits data, the volume fraction of  $\text{CH}_4$  used was 5-61% in  $\text{O}_2$  environment and 5-15% in air environment. The results showed a decreasing temperature along with the increasing percentage of  $\text{CO}_2$  in each mixtures, but the effect was quite smaller especially in stoichiometric and lean mixture.  $\text{CO}_2$  could affect thermally (by absorbing heat due to its high  $C_p$ ) and also made the production of unburnt fuel species such as CO relatively higher.*

**Keywords:** *Biogas, counterflow, analisis 1D, pembakaran, premiks*

### PENDAHULUAN

Pembakaran merupakan salah satu teknologi konversi energi yang paling banyak dipakai saat ini. Hal ini dikarenakan besarnya energi yang dapat dibangkitkan dalam waktu yang relatif cepat pada suatu proses pembakaran. Biogas merupakan energi alternatif dihasilkan dari proses pencernaan *anaerob* yang dilakukan oleh bakteri methanogen pada limbah organik untuk menghasilkan metana ( $\text{CH}_4$ ). Limbah organik ini dapat berasal dari kotoran hewan, kotoran manusia, dan hasil proses lain yang sumber energi utamanya berasal dari fotosintesis tumbuh-tumbuhan. Pada reaktor penghasil biogas konvensional, proses pencernaan *anaerob* yang dilakukan oleh bakteri methanogen tidak menghasilkan  $\text{CH}_4$  murni. Komposisi dari biogas yang dihasilkan pada reaktor konvensional meliputi  $\text{CH}_4$  (50%-70%),  $\text{CO}_2$  (30%-40%),  $\text{H}_2\text{O}$  (0%-10%),  $\text{H}_2\text{S}$  (0,3%),  $\text{N}_2$  (<2%),  $\text{H}_2$  (<1%) dan gas-gas lainnya [1].

*Oxy-fuel combustion* merupakan metode yang cukup menjanjikan untuk mendapatkan nilai efisiensi pembakaran yang tinggi. Metode ini menggunakan oksidator oksigen murni

sebagai pengganti udara. Tidak adanya keberadaan  $\text{N}_2$  yang merupakan gas inert dan tidak ikut bereaksi dalam proses pembakaran disinyalir membuat pembakaran dari *oxy-fuel combustion* lebih maksimal.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mencari pengaruh adanya  $\text{CO}_2$  dalam pembakaran. Penggunaan  $\text{CO}_2$  sebagai diluent menyebabkan kecepatan rambat api maksimal yang terjadi bergeser pada nilai *equivalence ratio* yang lebih tinggi yakni pada kondisi yang lebih miskin bahan bakar [2]. Jika diamati pada *bunsen* burner, dengan semakin meningkatnya kadar  $\text{CO}_2$  dapat menurunkan kecepatan rambat api. Resiko terjadinya pemadaman api akibat blow off yang terjadi ketika kecepatan aliran reaktan lebih tinggi daripada kecepatan rambat api, akan memiliki kemungkinan semakin besar. Hal ini juga berdampak kepada konsumsi bahan bakar rata-rata yang semakin sedikit jika dibandingkan dengan tidak adanya  $\text{CO}_2$  pada pembakaran  $\text{CH}_4$  [3]. Dengan menurunnya kecepatan rambat api, maka resiko terjadinya ledakan pada tabung *reservoir* dapat terminimalisir [4]. Semakin rendahnya temperatur yang dihasilkan pada proses

pembakaran berpotensi meminimalisir produksi  $\text{NO}_x$  yang merupakan gas beracun. Meskipun begitu, dengan adanya  $\text{CO}_2$  pada reaktan dapat meningkatkan resiko terjadinya pembentukan gas karbon monoksida ( $\text{CO}$ ) yang juga berbahaya bagi kesehatan. Kadar emisi  $\text{CO}$  yang tinggi pada dasarnya merupakan penurunan efisiensi karena untuk menghasilkan daya yang sama membutuhkan lebih banyak bahan bakar [5]. Penelitian mengenai pengaruh adanya  $\text{CO}_2$  pada pembakaran biogas *counterflow burner* secara difusi terhadap karakteristik pembakaran yang terjadi dengan konsentrasi  $\text{CO}_2$  yang digunakan divariasikan dari 0%-50% dengan laju aliran massa 4-14 L/min. Hasilnya mengindikasikan bahwa dengan adanya  $\text{CO}_2$  pada bahan bakar biogas mempengaruhi karakteristik nyala api difusi, terutama pada luasan area warna nyala api kuning. Namun stabilitas nyala api lebih dipengaruhi oleh laju difusi antara bahan bakar dan oksigen [6].

Sebuah investigasi dilakukan untuk mengetahui efek termal kuantitatif dari  $\text{CO}_2$  sebagai pengganti  $\text{N}_2$  pada oksidator terhadap pembentukan  $\text{NO}_x$  dengan menggunakan pembakaran difusi konfigurasi *counterflow*. Fraksi molar  $\text{O}_2$  dijaga konstan pada nilai 21%. Perhitungan dilakukan pada variasi *stretch rate* dan persentase  $\text{CO}_2$  yang berbeda pada sisi oksidator. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan CHEMKIN dan kode perhitungan radiasi yang dikembangkan oleh ICPET. Dikarenakan oleh nilai kalor spesifik yang lebih tinggi, penggantian  $\text{N}_2$  menggunakan  $\text{CO}_2$  dapat menurunkan temperatur dari api secara signifikan, dan mengakibatkan turunnya konsentrasi  $\text{NO}$  yang terbentuk [7].

Dari paparan latar belakang di atas diperlukan analisis lebih lanjut terutama untuk mengatasi pengaruh negatif dari  $\text{CO}_2$  pada pembakaran premiks biogas. Fokus dari kebanyakan penelitian sebelumnya adalah mengganti spesies  $\text{N}_2$  dengan  $\text{CO}_2$  sebagai campuran oksidator. Pada penelitian ini spesies  $\text{N}_2$  tetap digunakan sebagai campuran udara, sedangkan spesies  $\text{CO}_2$  ditambahkan secara bertahap berdasarkan persentase dari biogas.

Sehingga secara umum penambahan  $\text{CO}_2$  lebih kecil jika dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya. Dengan menggunakan pendekatan numeris 1 dimensi pada konfigurasi *counterflow burner* pembakaran premiks diharapkan akan didapati perkiraan proporsi antara biogas dan oksidator yang paling efektif. Beberapa aspek yang diamati adalah temperatur adiabatik, distribusi temperatur dan komposisi gas buang yang dihasilkan oleh pembakaran.

## METODOLOGI PENELITIAN

### Variabel Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan dengan metode pendekatan numeris analisis pengaruh fraksi volume  $\text{CO}_2$  dan oksidator pada pembakaran  $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{udara}$  dan  $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{O}_2$ . Analisis numeris didasarkan pada perhitungan matematis pembakaran 1 dimensi. Jenis *burner* ditetapkan menggunakan konfigurasi *counterflow premixed burner*. Variasi dilakukan pada kisaran mampu nyala  $\text{CH}_4$  yakni 5%-15% volume campuran bahan bakar dengan oksidator udara ( $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{udara}$ ), dan 5%-61% volume campuran bahan bakar dengan oksidator  $\text{O}_2$  murni ( $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{O}_2$ ). Konsentrasi  $\text{CO}_2$  pada campuran bahan bakar mulai 0%, 10%, 20%, 30% dan 40% dari 100% volume bahan bakar ( $\text{CH}_4+\text{CO}_2$ ). Variabel terikat dalam penelitian ini adalah perilaku nyala api yang meliputi temperatur api adiabatik, distribusi temperatur dan formasi gas buang pada setiap variasi yang ditentukan.

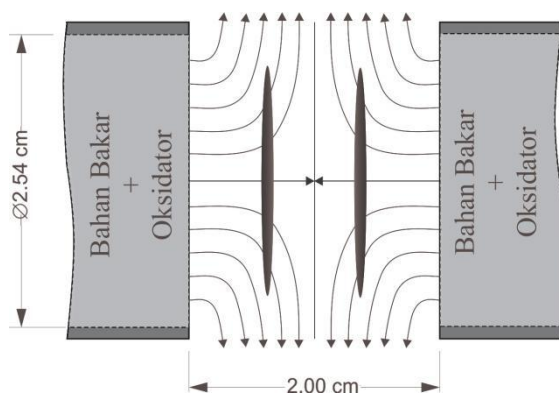
Parameter yang dijaga tetap selama pengujian adalah pipa *Counterflow flame burner* yaitu diameter pipa bagian dalam 2.45 cm. Tekanan gas yang dimasukkan ke ruang bakar *Counterflow flame burner* sebesar 1 atm. Temperatur masuk reaktan adalah 300K;. Laju aliran reaktan awal  $\pm 6$  L/min tanpa tambahan  $\text{CO}_2$ . Jarak antar pipa *Counterflow flame burner* adalah 20 mm sehingga titik stagnasi yang didapatkan terletak pada 10mm koordinat z.

Piranti lunak utama yang digunakan untuk perhitungan 1 dimensi adalah Cantera 2.2.1 dengan basis data mekanisme reaksi kimia GRI-Mech 3.0. Dikarenakan Cantera hanya merupakan kompilasi program berbasis objek,

maka diperlukan sebuah piranti lunak pemrograman sebagai lingkungan kerja. Pada penelitian ini dipilih piranti lunak pemrograman Python dengan beberapa konfigurasi tambahan. Perhitungan kinetika kimiawi didasarkan pada penggunaan database mekanisme kimia GRI-Mech 3.0. Di mana mekanisme ini menyajikan data pembakaran metana pada kondisi atmosfer secara eksplisit. Terdapat total 325 reaksi kimia dengan 53 spesies hasil pembakaran meliputi data laju reaksi dan data termodinamikanya. Data termodinamika berbasis dari data Technion NASA. GRI-Mech 3.0 dioptimasi untuk pembakaran metana sebagai bahan bakar utama. Meskipun begitu tersedia juga data untuk reaksi kimia C2 dan propana [8], [9].

**Instalasi Penelitian**

Sesuai dengan skema pada Gambar 1, campuran dari bahan bakar dan oksidator dialirkan dari kedua ujung mulut pipa berlawanan arah dengan komposisi yang identik. Diameter dalam pipa yang digunakan adalah sebesar 2.45 cm. sedangkan jarak antara kedua mulut pipa yang berlawanan adalah 2 cm. Nilai diameter dalam pipa yang digunakan mempengaruhi besar fluks massa aliran masuk reaktan. Garis berwarna kuning menunjukkan titik stagnasi di mana kedua aliran identik berlawanan tersebut bertemu. Dikarenakan adanya kesamaan pada kedua aliran tersebut dan juga profil api tipis yang berbentuk lingkaran, maka analisa 1D dapat dilakukan.

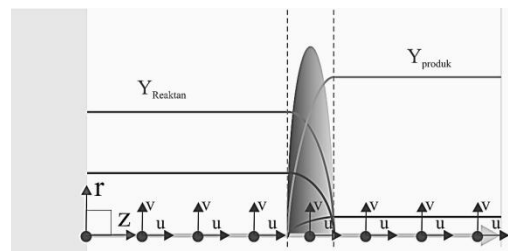


**Gambar 1.** Skema instalasi penelitian

Pada penelitian ini digunakan kelas *CounterflowPremixedFlame* di mana kelas ini berbasis dari kelas *OneDim* yang merupakan dasar untuk simulasi dengan domain 1 dimensi. Kelas *CounterflowPremixedFlame* adalah sebuah domain yang telah ditulis berdasarkan kaidah persamaan aliran stagnasi aksisimetrik [10].

Untuk kondisi batas ditentukan bahwa kecepatan aksial ( $u$ ), kecepatan radial ( $v$ ), temperatur ( $T$ ), lambda  $(1/r)(\partial p/\partial r)$  ( $\Lambda$ ) dan fraksi massa spesies ( $Y_k$ ) tidak dipengaruhi oleh koordinat radius. Perhitungan dilakukan pada bilangan Mach yang kecil di mana  $dP/dz = 0$ , dan nilai lambda ( $\Lambda$ ) adalah konstan  $(1/r)(\partial p/\partial r) = konstan$ . Gas dianggap sebagai gas ideal sehingga berlaku persamaan gas ideal.

Dari beberapa persamaan tersebut, Cantera menggunakan metode Newton untuk menyelesaikannya. Penyelesaian dilakukan dengan dua tahap. Tahap pertama adalah memecahkan solusi dengan menggunakan ekuilibrium pada setiap titik koordinat  $z$  yang telah ditentukan. Banyak titik awal pengira-ngiraan ditentukan sejak awal program. Tahap kedua adalah proses perhitungan kembali pada setiap titik untuk kemudian dibagi-bagi lagi agar mendapatkan hasil perhitungan yang lebih halus.



**Gambar 2.** Daerah analisis 1D premiks counterflow

Analisis lebih lanjut dilakukan untuk dapat mendeskripsikan efek dari rasio ekuivalen dan penambahan CO<sub>2</sub> terhadap besar temperatur adiabatik yang dapat dihasilkan. Salah satu sifat fisik yang berpengaruh pada temperatur pembakaran adalah kalor spesifik ( $C_p$ ). Pada perhitungan temperatur adiabatik keseluruhan

kalor yang dihasilkan oleh pembakaran digunakan untuk memanaskan produk hasil pembakaran. Oleh karena itu nilai dari temperatur pada produk akan bergantung pada jumlah energi yang dibutuhkan oleh suatu spesies untuk dapat menaikkan 1 derajat temperatur. Nilai dari Cp pada masing-masing spesies berbeda satu sama lain dan merupakan fungsi dari temperatur. Temperatur dari masing-masing spesies produk sama dengan temperatur total produk. Sehingga nilai Cp dari masing-masing spesies dapat dicari sesuai dengan data GRI-Mech 3.0 dan persamaan polinomial orde 4 NASA. Untuk dapat membandingkan pengaruh Cp dari setiap spesies, maka dibuat sebuah parameter fraksi Cp dengan rumusan

$$Cp_{total}[T] = \sum_{i=1}^{53} x_i * Cp_i[T]$$

$$fCp_i[T] = \frac{x_i * Cp_i[T]}{\sum_{i=1}^{53} x_i * Cp_i[T]} \quad (2)$$

Dimana:

$Cp_{total}[T]$  = kalor spesifik total produk pada temperatur T (J/kmol K)

$fCp_i[T]$  = fraksi Cp spesies-i pada temperatur T (%)

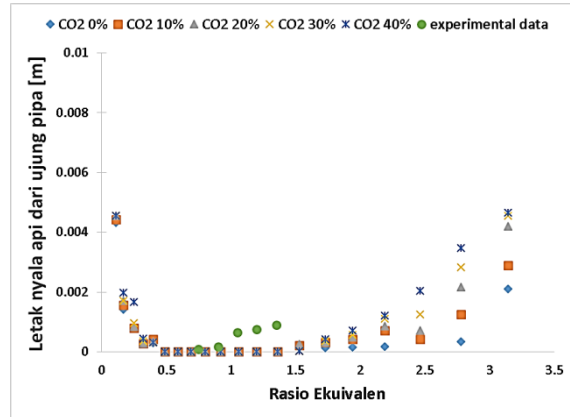
$x_i$  = fraksi mol spesies-i (%)

$Cp_i[T]$  = kalor spesifik berbasis molar spesies-i pada T (J/kmol K)

Jumlah spesies pada database GRI-Mech 3.0 adalah 53, sehingga nilai dari total Cp produk pada temperatur T adalah jumlah keseluruhan dari fraksi molar spesies ke-i dikalikan dengan Cp spesies ke-i pada temperatur T. Perhitungan dilakukan pada keseluruhan 200 variasi reaktan untuk didapatkan nilai fraksi Cp setiap spesies produk hasil pembakaran. Nilai fraksi Cp dapat memberikan informasi mengenai persentase jumlah kalor yang diserap oleh masing-masing spesies produk. Dalam penelitian ini hanya diamati 7 spesies dengan besar fraksi Cp tertinggi, mengingat bahwa tidak semua ke-53 spesies yang tersedia masih tersisa di tahap akhir pembakaran (contoh spesies CH<sub>4</sub> yang merupakan bahan bakar dan banyak spesies radikal lainnya). Ke-7 spesies yang diamati antara lain H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, OH, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub>.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Validasi Data Hasil Simulasi



**Gambar 3.** Posisi letak nyala api dari ujung pipa pada hasil simulasi dan eksperimen

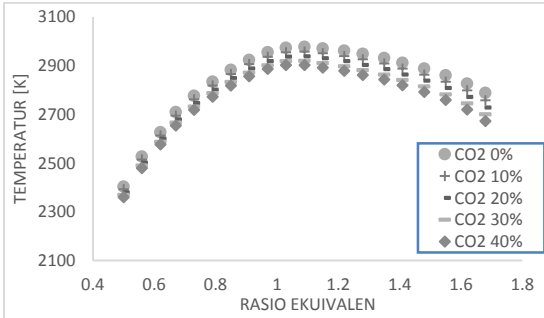
Posisi terjadinya nyala api pada simulasi 1D pada Gambar 3 dapat menunjukkan perbedaan kecepatan rambat api pada setiap variasi reaktan. Hal tersebut dikarenakan pada penelitian ini menggunakan laju aliran reaktan yang sama. Letak nyala api yang semakin dekat dengan ujung pipa menunjukkan adanya peningkatan kecepatan rambat api dan sebaliknya. Berdasarkan teori pembakaran, nyala api terbentuk pada saat reaktan dari bahan bakar dan oksidator berada pada temperatur penyalaan ( $T_{ig}$ ) bahan bakar. Untuk bahan bakar CH<sub>4</sub> nilai dari temperatur penyalaannya pada kondisi 1 atm adalah 537°C atau 810 K. Sehingga untuk mendapatkan data letak nyala api pada simulasi 1D dilakukan iterasi pada data distribusi temperatur untuk mendapatkan posisi reaktan dengan temperatur di atas 810 K.

Data eksperimental posisi nyala api secara premiks parsial *counterflow* melibatkan pada reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> dengan laju aliran reaktan yang sama yakni 6 L/min. Di mana pada eksperimen ini terdapat fenomena *flashback* yang terjadi bersamaan dengan adanya nyala api *twin flame*.

### Data Temperatur Adiabatis Pada Reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara

Perhitungan data temperatur adiabatik dilakukan pada semua variasi reaktan.

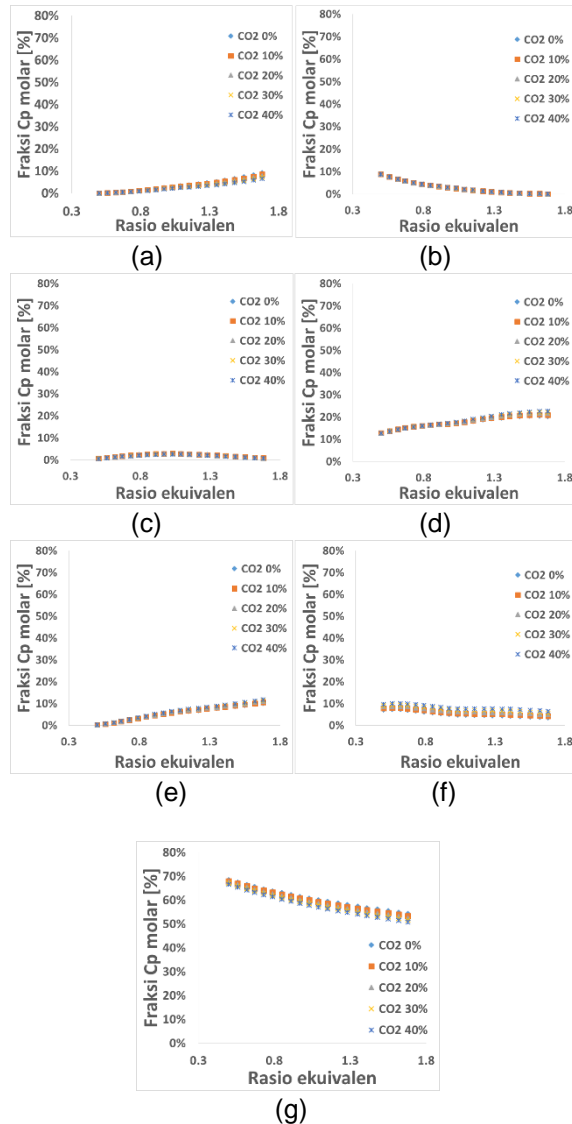
Perhitungan ini tidak melibatkan persamaan-persamaan perpindahan yang terdapat pada analisis 1D *counterflow*, melainkan hanya mempertimbangkan aspek keseimbangan kimia saja.



**Gambar 4.** Data temperatur adiabatik  $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{udara}$  di setiap jangkauan rasio ekuivalen dengan penambahan  $\text{CO}_2$

Sehingga hasil dari perhitungan temperatur adiabatik murni merupakan derajat temperatur maksimal yang dapat dihasilkan oleh proses disosiasi molekul bahan bakar tanpa adanya gangguan ataupun kehilangan energi akibat terkonversi dalam bentuk energi lain.

Dari data temperatur adiabatik dengan reaktan  $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{udara}$  Gambar 4, diperoleh temperatur maksimum yang dapat dicapai bernilai 2977.4 K yakni pada variasi rasio ekuivalen 1.09 dan persentase  $\text{CO}_2$  pada bahan bakar sebesar 0%. Temperatur terendah bernilai 2360.44 K pada variasi rasio ekuivalen 0.5 dan persentase  $\text{CO}_2$  pada bahan bakar tertinggi yakni 40%. Terlihat bahwa penurunan temperatur yang diakibatkan penambahan  $\text{CO}_2$  bernilai semakin besar pada rasio ekuivalen > 1. Hal ini dapat diartikan bahwa efek dari  $\text{CO}_2$  lebih signifikan pada pembakaran dengan kondisi campuran kaya bahan bakar. Selisih temperatur terkecil bernilai 10.698 K didapatkan pada rasio ekuivalen 0.5 sedangkan selisih terbesar bernilai 28.64 K didapatkan pada rasio ekuivalen 1.68.



**Gambar 5.** Fraksi Cp spesies produk (a).  $\text{H}_2$ , (b).  $\text{O}_2$ , (c).  $\text{OH}$ , (d).  $\text{H}_2\text{O}$ , (e).  $\text{CO}$ , (f).  $\text{CO}_2$ , dan (g).  $\text{N}_2$  dari hasil analisis temperatur adiabatik reaktan  $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{udara}$  pada setiap rasio ekuivalen dengan penambahan  $\text{CO}_2$

Gambar 5 menunjukkan pengaruh dari semakin bertambahnya rasio ekuivalen dan  $\text{CO}_2$  memiliki dampak yang berbeda pada setiap spesies produk hasil pembakaran adiabatik. Spesies yang memiliki fraksi Cp terbesar adalah  $\text{N}_2$  Gambar 4(g), disusul oleh  $\text{H}_2\text{O}$  Gambar 4(d). Tingginya nilai fraksi Cp  $\text{N}_2$  dikarenakan oleh jumlah mol  $\text{N}_2$  ( $x\text{N}_2$ ) pada

masing-masing reaktan di awal pembakaran merupakan nilai yang terbesar sesuai dengan kandungan N<sub>2</sub> di udara. Pada pembakaran miskin bahan bakar nilai fraksi Cp dari CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> memiliki efek yang lebih dominan daripada OH dan H<sub>2</sub>. Namun pada campuran yang lebih kaya bahan bakar, spesies H<sub>2</sub> dan OH mulai banyak terbentuk. Hal ini disebabkan pada pembakaran kaya bahan bakar terdapat sisa dari pecahan atom H bahan bakar yang tidak dapat berpasangan dengan O dikarenakan oleh semakin berkurangnya asupan O<sub>2</sub> dalam reaktan. Berdasarkan analisis ini pengaruh dari berubahnya rasio ekuivalen membuat fraksi Cp spesies produk hasil pembakaran menjadi bervariasi. Pada pembakaran miskin bahan bakar spesies pembentuk udara yakni N<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> yang tidak ikut terbakar memiliki peran paling signifikan dalam menyerap sebagian kalor yang dihasilkan oleh pembakaran. Sedangkan pada pembakaran kaya bahan bakar, fraksi Cp spesies yang mengandung atom H seperti OH, H<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O cenderung meningkat.

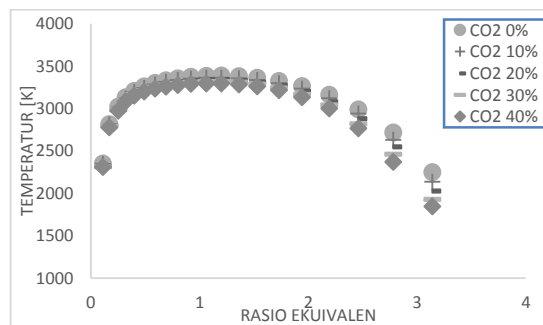
Dari keseluruhan data yang teramati, efek penambahan CO<sub>2</sub> memiliki rata-rata pengaruh perubahan terbesar pada fraksi Cp spesies N<sub>2</sub>. Sedangkan rata-rata perubahan fraksi Cp spesies terkecil pada spesies O<sub>2</sub>. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun spesies N<sub>2</sub> memiliki penyerapan kalor tertinggi di antara spesies lain, dengan adanya penambahan CO<sub>2</sub> berpengaruh pada penurunan efek penyerapan kalor N<sub>2</sub>. Sehingga penambahan CO<sub>2</sub> yang mempengaruhi nilai Cp dari masing-masing spesies hasil pembakaran (selain spesies CO<sub>2</sub> sendiri) secara tidak langsung memiliki peran pada penurunan temperatur adiabatik yang dihasilkan.

**Data Temperatur Adiabatik Pada Reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>**

Seiring dengan bertambahnya rasio ekuivalen nilai temperatur adiabatik naik semakin tinggi hingga berada pada rasio ekuivalen mendekati 1 kemudian menurun setelah melewatinya. Nilai temperatur tertinggi yakni 3386.5 K berada pada rasio ekuivalen 1.06, dan penambahan CO<sub>2</sub> 0% sedangkan

temperatur terendah yakni 1845.8 K berada pada rasio ekuivalen 3.14 dan penambahan CO<sub>2</sub> 40%. Selisih antara temperatur maksimal yang dapat dicapai oleh *oxy-fuel* dengan reaktan yang menggunakan oksidator udara terpaut hingga mencapai 409.04 K. Adanya spesies N<sub>2</sub> pada reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara menjadi faktor yang paling signifikan.

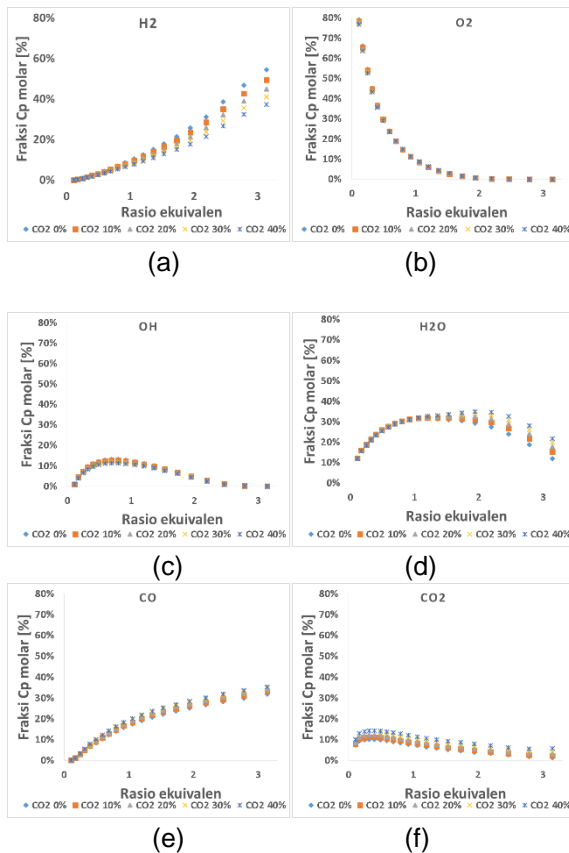
Gambar 6 menunjukkan nilai temperatur adiabatik yang cenderung lebih rendah pada sisi campuran kaya bahan bakar.



**Gambar 6.** Data temperatur adiabatik CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> di setiap jangkauan rasio ekuivalen dengan penambahan CO<sub>2</sub>

Hal ini berbeda dengan kecenderungan yang terjadi pada reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara yang memiliki temperatur lebih rendah pada campuran miskin bahan bakar. Pada reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> hal ini dikarenakan faktor gas hasil pembakaran yang cenderung memiliki penyerapan panas yang lebih tinggi daripada penyerapan panas sisa spesies O<sub>2</sub> yang tidak terbakar pada campuran miskin bahan bakar. Sedangkan pada reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara adanya kelimpahan spesies N<sub>2</sub> pada campuran miskin bahan bakar memiliki penyerapan panas yang sangat tinggi.



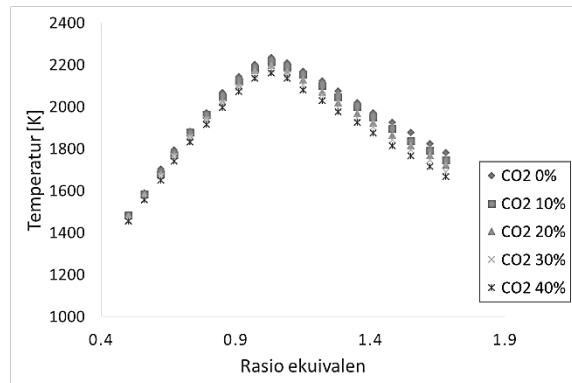


**Gambar 7.** Fraksi Cp spesies produk produk (a). H<sub>2</sub>, (b). O<sub>2</sub>, (c). OH, (d). H<sub>2</sub>O, (e). CO, dan (f). CO<sub>2</sub> dari hasil analisis temperatur adiabatik reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> pada setiap rasio ekuivalen dengan penambahan CO<sub>2</sub>

**Data Pembakaran Premiks 1D Counterflow Reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara**

Secara keseluruhan data temperatur maksimum (peak temperature) menunjukkan kecenderungan yang mirip dengan temperatur adiabatik. Yakni temperatur tertinggi berada pada rasio ekuivalen mendekati 1 dan temperatur pada pembakaran campuran kaya bahan bakar lebih tinggi daripada campuran miskin. Temperatur maksimum tertinggi bernilai 2234.1 K yakni pada rasio ekuivalen 1.03 dengan penambahan CO<sub>2</sub> 0%. Sedangkan temperatur maksimum terendah bernilai 1455.9 K didapatkan pada rasio ekuivalen 0.5 dengan penambahan CO<sub>2</sub> 40%. Meskipun begitu secara keseluruhan rata-rata temperatur antara temperatur maksimum dari analisis 1D dengan temperatur adiabatik terpaut 881.98 K.

Penurunan ini diakibatkan efek dari adanya perhitungan aliran yang turut memperhitungkan koefisien difusivitas termal pada setiap spesies. Sehingga terdapatnya perambatan panas pada sepanjang koordinat z, mempengaruhi besarnya nilai kalor yang dapat diserap oleh spesies untuk menaikkan temperturnya. Selain itu adanya perpindahan massa aliran stagnasi pada analisis 1D, menyebabkan terdapatnya efek perbedaan kecepatan alir pada setiap titik koordinat z (*strain rate*) yang juga berpengaruh pada temperatur yang dihasilkan oleh pembakaran [11].



**Gambar 8.** Data temperatur maksimum pada pembakaran premiks 1D counterflow reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara

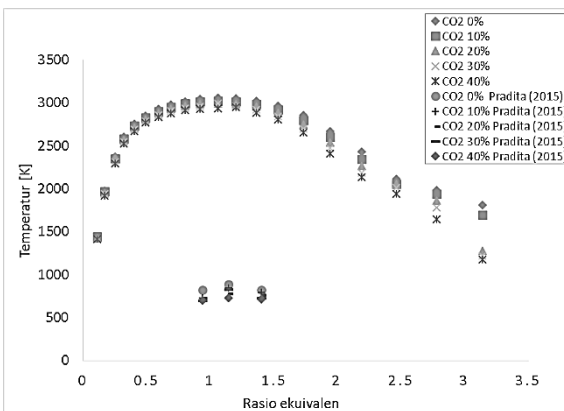
**Data Pembakaran Premiks 1D Counterflow Reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>**

Terlihat pada Gambar 9 bahwa nilai temperatur maksimum tertinggi berada pada variasi rasio ekuivalen 1.06 dengan penambahan CO<sub>2</sub> 0%. Sedangkan nilai temperatur maksimum terendah berada pada variasi rasio ekuivalen 3.14 dengan penambahan CO<sub>2</sub> 40%.

Nilai temperatur maksimum semakin naik pada saat rasio ekuivalen mendekati 1 dan kemudian turun pada rasio ekuivalen setelah melewati 1. Data nilai temperatur maksimum yang dapat dicapai reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> pembakaran 1D *counterflow* memiliki kecenderungan yang hampir sama dengan data temperatur adiabatik. Meskipun demikian rata-rata selisih dari temperatur maksimum

dengan temperatur adiabatik pada setiap variasi terpaut 545.86 K.

Data eksperimental menunjukkan kecenderungan yang sama dengan data yang didapat dari hasil perhitungan numerik. Yakni temperatur tertinggi yang didapatkan tidak berada pada rasio ekuivalen tepat sama dengan 1. Melainkan bergeser pada campuran sedikit lebih kaya. Dari Gambar 9 terlihat bahwa selisih penurunan temperatur pada penambahan CO<sub>2</sub> dari data eksperimental memiliki rentang nilai yang tidak terlalu berbeda dengan hasil simulasi. Akan tetapi terdapat perbedaan data temperatur yang didapatkan di mana pada penelitian yang dilakukan secara eksperimental bernilai lebih kecil daripada hasil simulasi. Hal ini dikarenakan adanya kehilangan panas pada penelitian eksperimental dari nyala api ke lingkungan. Selain itu instalasi yang berupa premiks parsial di mana aliran reaktan pada sisi yang berbeda dialiri dengan gas N<sub>2</sub> juga menimbulkan penurunan temperatur data eksperimental.



**Gambar 9.** Data temperatur maksimum pada pembakaran premiks 1D counterflow reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> dan data eksperimental (Pradita S et al, 2015)

Nilai temperatur maksimum pada campuran kaya lebih rendah daripada campuran miskin bahan bakar. Pada rasio ekuivalen 0.11 kisaran temperatur maksimum berkisar 1444.5 – 1413.8 K. Sedangkan pada rasio ekuivalen 3.14 bernilai 1811 K dan 1693 K pada penambahan CO<sub>2</sub> 0% dan 10%, kemudian menurun drastis dengan nilai 1279 K,

1220.3 K dan 1177.6 K pada penambahan CO<sub>2</sub> 30%, 40% dan 50%. Fenomena tersebut dikarenakan oleh kadar O<sub>2</sub> yang semakin sedikit hingga mendekati kondisi padam. Secara molekuler CO<sub>2</sub> memiliki diameter tumbukan Lennard-Jones yang cukup besar yakni 3.760 Angstrom apabila dibandingkan dengan spesies O<sub>2</sub> yang hanya memiliki diameter 3.460 Angstrom. Hal ini membuat kemungkinan CH<sub>4</sub> untuk dapat bertumbukan dengan O<sub>2</sub> semakin kecil. Sehingga penambahan CO<sub>2</sub> berdampak pada penurunan temperatur di setiap rasio ekuivalen yang sama.

**KESIMPULAN**

Dari analisis dan pembahasan hasil penelitian, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut ini

1. Pada perhitungan temperatur adiabatik, penurunan temperatur akibat penambahan CO<sub>2</sub> lebih signifikan pada campuran kaya bahan bakar. Selain berefek menyerap sebagian temperatur secara fisik, dari analisa Cp menunjukkan bahwa CO<sub>2</sub> juga memiliki potensi berpengaruh secara kimiawi dengan mempengaruhi nilai fraksi Cp spesies hasil pembakaran lainnya.
2. Turut diperhitungkannya persamaan aliran 1D *counterflow* aliran kedua reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara mempengaruhi signifikansi dari efek penambahan CO<sub>2</sub>. Hal ini juga menyebabkan hasil temperatur maksimum lebih kecil daripada temperatur adiabatik meskipun memiliki kecenderungan yang sama. Pada reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara kondisi campuran kaya bahan bakar cenderung memiliki temperatur lebih tinggi dibandingkan miskin bahan bakar. Hal sebaliknya terjadi pada reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>. Tingginya kadar N<sub>2</sub> pada sisi campuran miskin bahan bakar reaktan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara disinyalir memiliki penyerapan panas hasil pembakaran yang sangat tinggi.

**DAFTAR PUSTAKA**

[1] Teodorita, A.S. 2008. [1]. *Biogas Handbook*. Esbjerg: University of Southern Denmark



- [2] Lapalme, D., Seers, Patrick. [2]. 2014. *Influence of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and initial temperature on H<sub>2</sub>/CO laminar flame speed*. International Journal of Hydrogen Energy. 3477-3486
- [3] Cohe, Cecile., Chauveau, Christan., Gokalp, Iskender., Kurtulus, D.F. [3] 2009. CO<sub>2</sub> addition and pressure effects on laminar and turbulent lean premixed CH<sub>4</sub> air flames. *Proceedings of Combustion Institute* 32. 1803-1810
- [4] Janes, A. 2014. Experimental Study of CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Mixtures Flammability. Makalah dalam *AIChE Spring Meeting 2011*. Chicago, 2011.
- [5] Amato, A., Hudak, B., D'Souza, P., D'Carlo, P., Noble, D., Scarborough, D., Seitzman, J., Lieuwen, T. 2011. Measurements and Analysis of CO and O<sub>2</sub> Emissions in CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Flames. *Proceeding of the Combustion Institute*. 3399-3405
- [6] Sasongko, Mega, N. 2014. Pengaruh Prosentase CO<sub>2</sub> Terhadap Karakteristik Pembakaran Difusi Biogas. *Mekanika Volume 12 Nomor 2*
- [7] Gascoin, Nicolas., Yang, Qingchun., Chetehouna, Khaled. 2016. Thermal effects of CO<sub>2</sub> on the NO<sub>x</sub> formation behavior in the CH<sub>4</sub> diffusion combustion system. *Applied Thermal Engineering* 110. 144-149
- [8] Developer, Cantera. 2012. *Phyton Module Documentation*. <http://cantera.org/docs/sphynx/html/index.html> (diakses Agustus 2016)
- [9] Smith, G.P., Golden, D.M., Frenklach, M., Moriarty, N.W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C.T., Hanson, R.K., Song, S., Gardiner Jr., W.C., 1999. *GRI 3.0 Mechanism*. Gas Research Institute. <http://www.me.berkeley.edu/gri-mech/> (diakses Agustus 2016)
- [10] Kee, Robert, J., Coltrin, Michael, E., Glarborg, Peter. 2003. *Chemically Reacting Flow*. New Jersey: Wiley
- [11] Guo, H., Ju, Y., Maruta, K. 1998. Numerical investigation of CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/air and CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> counterflow premixed flames with radiation reabsorption. *Combustion Science and Technology*. 135, pp. 49-64