

SIMULASI NUMERIS KARAKTERISTIK PEMBAKARAN CH_4/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 CO_2 produced in a conventional biogas reactor needs to be considered. A further analysis is needed in order to investigate the effect of CO_2 addition especially in thermal and chemical kinetics aspect. This numerical study has been held to analyze the effect of CO_2 in $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{O}_2$ and CH_4/CO_2 /Air premixed combustion. In this study one dimensional analysis in a counterflow burner has been performed. The volume fraction of CO_2 used in this study was 0%-40% from CH_4 's volume fraction, according to the amount of CO_2 in general phenomenon. Based on the flammability limits data, the volume fraction of CH_4 used was 5-61% in O_2 environment and 5-15% in air environment. The results showed a decreasing temperature along with the increasing percentage of CO_2 in each mixtures, but the effect was quite smaller especially in stoichiometric and lean mixture. 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 (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 CH_4 murni. Komposisi dari biogas yang dihasilkan pada reaktor konvensional meliputi CH_4 (50%-70%), CO_2 (30%-40%), H_2O (0%-10%), H_2S (0,3%), N_2 (<2%), 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 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 CO_2 dalam pembakaran. Penggunaan 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 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 CO_2 pada pembakaran 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 NO_x yang merupakan gas beracun. Meskipun begitu, dengan adanya CO_2 pada reaktan dapat meningkatkan resiko terjadinya pembentukan gas karbon monoksida (CO) yang juga berbahaya bagi kesehatan. Kadar emisi CO yang tinggi pada dasarnya merupakan penurunan efisiensi karena untuk menghasilkan daya yang sama membutuhkan lebih banyak bahan bakar [5]. Penelitian mengenai pengaruh adanya CO_2 pada pembakaran biogas *counterflow burner* secara difusi terhadap karakteristik pembakaran yang terjadi dengan konsentrasi CO_2 yang digunakan divariasikan dari 0%-50% dengan laju aliran massa 4-14 L/min. Hasilnya mengindikasikan bahwa dengan adanya 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 CO_2 sebagai pengganti N_2 pada oksidator terhadap pembentukan NO_x dengan menggunakan pembakaran difusi konfigurasi *counterflow*. Fraksi molar O_2 dijaga konstan pada nilai 21%. Perhitungan dilakukan pada variasi *stretch rate* dan persentase 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 N_2 menggunakan CO_2 dapat menurunkan temperatur dari api secara signifikan, dan mengakibatkan turunnya konsentrasi NO yang terbentuk [7].

Dari paparan latar belakang di atas diperlukan analisis lebih lanjut terutama untuk mengatasi pengaruh negatif dari CO_2 pada pembakaran premiks biogas. Fokus dari kebanyakan penelitian sebelumnya adalah mengganti spesies N_2 dengan CO_2 sebagai campuran oksidator. Pada penelitian ini spesies N_2 tetap digunakan sebagai campuran udara, sedangkan spesies CO_2 ditambahkan secara bertahap berdasarkan persentase dari biogas.

Sehingga secara umum penambahan 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 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 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 O_2 murni ($\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{O}_2$). Konsentrasi CO_2 pada campuran bahan bakar mulai 0%, 10%, 20%, 30% dan 40% dari 100% volume bahan bakar (CH_4+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.

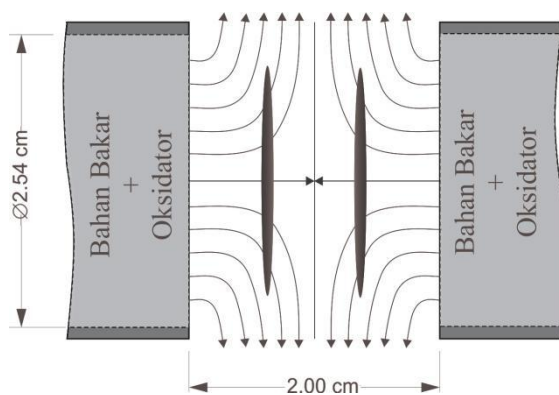
Parameter yang dijaga tetap selama pengujian adalah pipa *Counterflow flame burner* yaitu diameter pipa bagian dalam 2.45 cm. Tekanan gas yang dimasukkan ke ruang bakar *Counterflow flame burner* sebesar 1 atm. Temperatur masuk reaktan adalah 300K;. Laju aliran reaktan awal ± 6 L/min tanpa tambahan CO_2 . 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 teroptimasi 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.

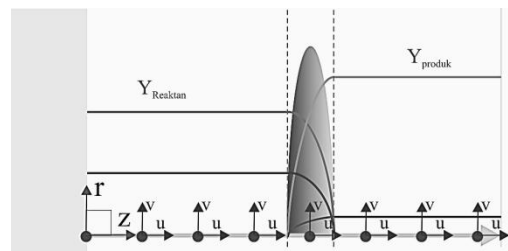


Gambar 1. Skema instalasi penelitian

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 $(1/r)(\partial p/\partial r)$ (Λ) 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 (Λ) 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 CO₂ 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 (%)

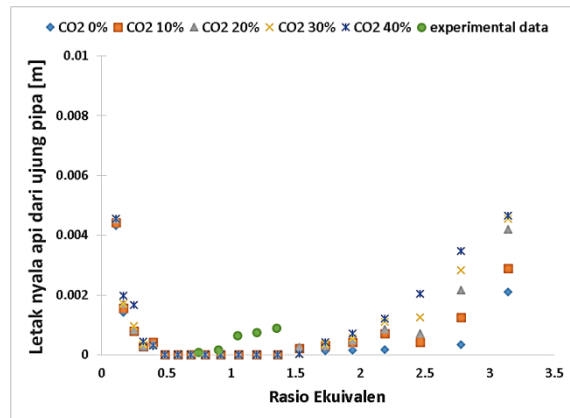
x_i = fraksi mol spesies-i (%)

$Cp_i[T]$ = 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 CH₄ yang merupakan bahan bakar dan banyak spesies radikal lainnya). Ke-7 spesies yang diamati antara lain H₂, O₂, OH, H₂O, CO, CO₂ dan N₂.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi Data Hasil Simulasi



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

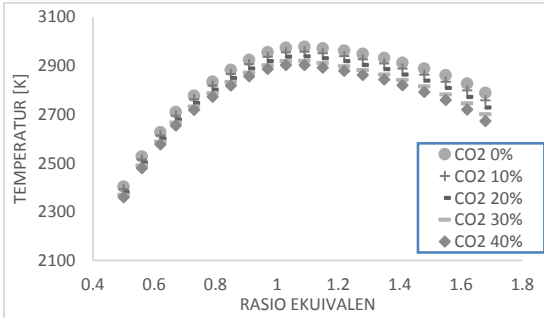
Posisi terjadinya nyala api pada simulasi 1D pada Gambar 3 dapat menunjukkan perbedaan kecepatan rambat api pada setiap variasi reaktan. Hal tersebut dikarenakan pada penelitian ini menggunakan laju aliran reaktan yang sama. Letak nyala api yang semakin dekat dengan ujung pipa menunjukkan adanya peningkatan 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 CH₄ 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 CH₄/CO₂/O₂ 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 CH₄/CO₂/udara

Perhitungan data temperatur adiabatis dilakukan pada semua variasi reaktan.

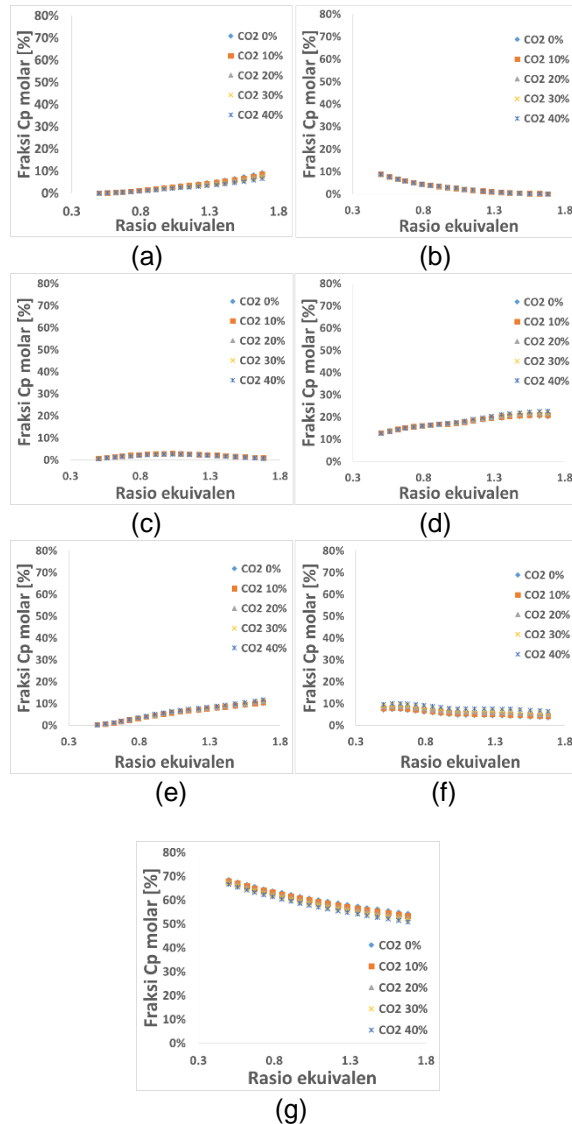
Perhitungan ini tidak melibatkan persamaan-persamaan perpindahan yang terdapat pada analisis 1D *counterflow*, melainkan hanya mempertimbangkan aspek keseimbangan kimia saja.



Gambar 4. Data temperatur adiabatik CH_4/CO_2 /udara di setiap jangkauan rasio ekuivalen dengan penambahan 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 CH_4/CO_2 /udara Gambar 4, diperoleh temperatur maksimum yang dapat dicapai bernilai 2977.4 K yakni pada variasi rasio ekuivalen 1.09 dan persentase CO_2 pada bahan bakar sebesar 0%. Temperatur terendah bernilai 2360.44 K pada variasi rasio ekuivalen 0.5 dan persentase CO_2 pada bahan bakar tertinggi yakni 40%. Terlihat bahwa penurunan temperatur yang diakibatkan penambahan CO_2 bernilai semakin besar pada rasio ekuivalen > 1. Hal ini dapat diartikan bahwa efek dari 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). H_2 , (b). O_2 , (c). OH , (d). H_2O , (e). CO , (f).

CO_2 , dan (g). N_2 dari hasil analisis temperatur adiabatik reaktan CH_4/CO_2 /udara pada setiap rasio ekuivalen dengan penambahan CO_2

Gambar 5 menunjukkan pengaruh dari semakin bertambahnya rasio ekuivalen dan CO_2 memiliki dampak yang berbeda pada setiap spesies produk hasil pembakaran adiabatik. Spesies yang memiliki fraksi Cp terbesar adalah N_2 Gambar 4(g), disusul oleh H_2O Gambar 4(d). Tingginya nilai fraksi Cp N_2 dikarenakan oleh jumlah mol N_2 (xN_2) pada

masing-masing reaktan di awal pembakaran merupakan nilai yang terbesar sesuai dengan kandungan N_2 di udara. Pada pembakaran miskin bahan bakar nilai fraksi Cp dari CO_2 dan O_2 memiliki efek yang lebih dominan daripada OH dan H_2 . Namun pada campuran yang lebih kaya bahan bakar, spesies H_2 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_2 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_2 dan O_2 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_2 dan H_2O cenderung meningkat.

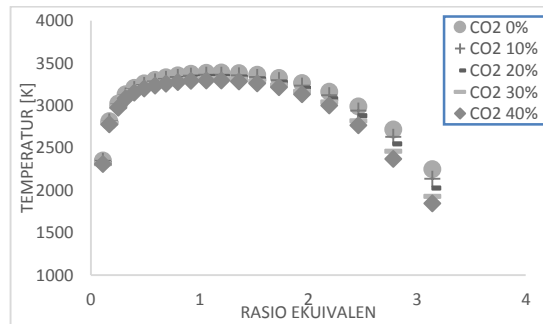
Dari keseluruhan data yang teramati, efek penambahan CO_2 memiliki rata-rata pengaruh perubahan terbesar pada fraksi Cp spesies N_2 . Sedangkan rata-rata perubahan fraksi Cp spesies terkecil pada spesies O_2 . Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun spesies N_2 memiliki penyerapan kalor tertinggi di antara spesies lain, dengan adanya penambahan CO_2 berpengaruh pada penurunan efek penyerapan kalor N_2 . Sehingga penambahan CO_2 yang mempengaruhi nilai Cp dari masing-masing spesies hasil pembakaran (selain spesies CO_2 sendiri) secara tidak langsung memiliki peran pada penurunan temperatur adiabatik yang dihasilkan.

Data Temperatur Adiabatik Pada Reaktan $CH_4/CO_2/O_2$

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_2 0% sedangkan

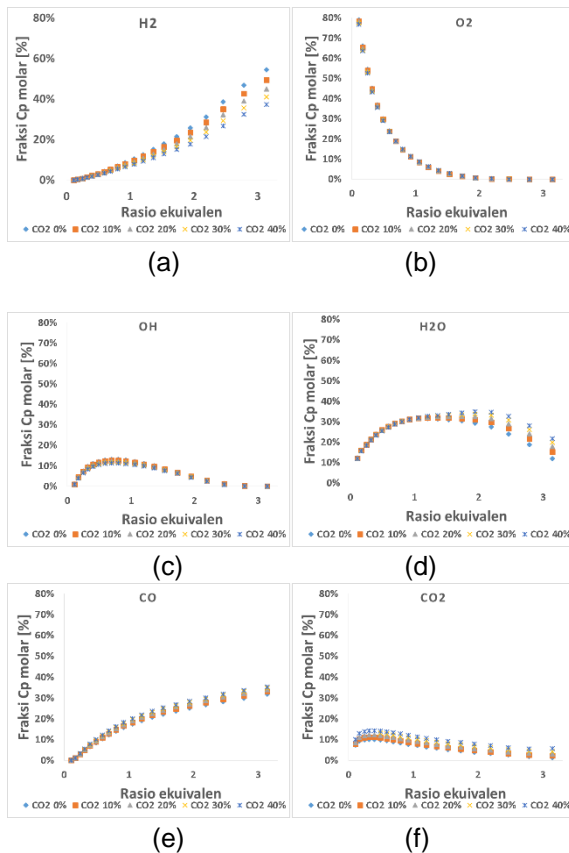
temperatur terendah yakni 1845.8 K berada pada rasio ekuivalen 3.14 dan penambahan CO_2 40%. Selisih antara temperatur maksimal yang dapat dicapai oleh *oxy-fuel* dengan reaktan yang menggunakan oksidator udara terpaut hingga mencapai 409.04 K. Adanya spesies N_2 pada reaktan $CH_4/CO_2/udara$ menjadi 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 $CH_4/CO_2/O_2$ di setiap jangkauan rasio ekuivalen dengan penambahan CO_2

Hal ini berbeda dengan kecenderungan yang terjadi pada reaktan $CH_4/CO_2/udara$ yang memiliki temperatur lebih rendah pada campuran miskin bahan bakar. Pada reaktan $CH_4/CO_2/O_2$ hal ini dikarenakan faktor gas hasil pembakaran yang cenderung memiliki penyerapan panas yang lebih tinggi daripada penyerapan panas sisa spesies O_2 yang tidak terbakar pada campuran miskin bahan bakar. Sedangkan pada reaktan $CH_4/CO_2/udara$ adanya kelimpahan spesies N_2 pada campuran miskin bahan bakar memiliki penyerapan panas yang sangat tinggi.

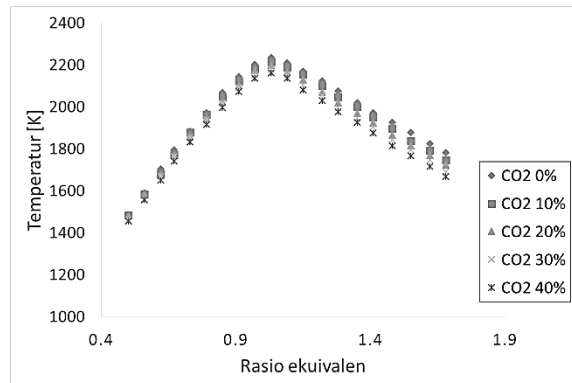


Gambar 7. Fraksi Cp spesies produk produk (a). H₂, (b). O₂, (c). OH, (d). H₂O, (e). CO, dan (f). CO₂ dari hasil analisis temperatur adiabatik reaktan CH₄/CO₂/O₂ pada setiap rasio ekuivalen dengan penambahan CO₂

Data Pembakaran Premiks 1D Counterflow Reaktan CH₄/CO₂/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 CO₂ 0%. Sedangkan temperatur maksimum terendah bernilai 1455.9 K didapatkan pada rasio ekuivalen 0.5 dengan penambahan CO₂ 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 CH₄/CO₂/udara

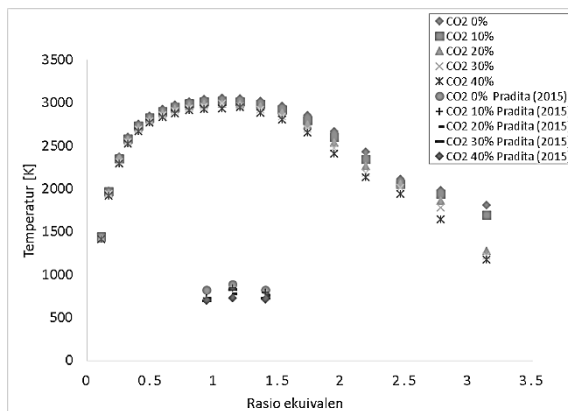
Data Pembakaran Premiks 1D Counterflow Reaktan CH₄/CO₂/O₂

Terlihat pada Gambar 9 bahwa nilai temperatur maksimum tertinggi berada pada variasi rasio ekuivalen 1.06 dengan penambahan CO₂ 0%. Sedangkan nilai temperatur maksimum terendah berada pada variasi rasio ekuivalen 3.14 dengan penambahan CO₂ 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 CH₄/CO₂/O₂ 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 CO₂ 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 N₂ juga menimbulkan penurunan temperatur data eksperimental.



Gambar 9. Data temperatur maksimum pada pembakaran premiks 1D counterflow reaktan CH₄/CO₂/O₂ 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 CO₂ 0% dan 10%, kemudian menurun drastis dengan nilai 1279 K,

1220.3 K dan 1177.6 K pada penambahan CO₂ 30%, 40% dan 50%. Fenomena tersebut dikarenakan oleh kadar O₂ yang semakin sedikit hingga mendekati kondisi padam. Secara molekuler CO₂ memiliki diameter tumbukan Lennard-Jones yang cukup besar yakni 3.760 Angstrom apabila dibandingkan dengan spesies O₂ yang hanya memiliki diameter 3.460 Angstrom. Hal ini membuat kemungkinan CH₄ untuk dapat bertumbukan dengan O₂ semakin kecil. Sehingga penambahan CO₂ 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 CO₂ lebih signifikan pada campuran kaya bahan bakar. Selain berefek menyerap sebagian temperatur secara fisik, dari analisa Cp menunjukkan bahwa CO₂ 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 CH₄/CO₂/O₂ dan CH₄/CO₂/udara mempengaruhi signifikansi dari efek penambahan CO₂. Hal ini juga menyebabkan hasil temperatur maksimum lebih kecil daripada temperatur adiabatik meskipun memiliki kecenderungan yang sama. Pada reaktan CH₄/CO₂/udara kondisi campuran kaya bahan bakar cenderung memiliki temperatur lebih tinggi dibandingkan miskin bahan bakar. Hal sebaliknya terjadi pada reaktan CH₄/CO₂/O₂. Tingginya kadar N₂ pada sisi campuran miskin bahan bakar reaktan CH₄/CO₂/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 CO₂, CH₄, and initial temperature on H₂/CO laminar flame speed*. International Journal of Hydrogen Energy. 3477-3486
- [3] Cohe, Cecile., Chauveau, Christan., Gokalp, Iskender., Kurtulus, D.F. [3] 2009. CO₂ addition and pressure effects on laminar and turbulent lean premixed CH₄ air flames. *Proceedings of Combustion Institute* 32. 1803-1810
- [4] Janes, A. 2014. Experimental Study of CH₄/O₂/CO₂ 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 O₂ Emissions in CH₄/CO₂/O₂ Flames. *Proceeding of the Combustion Institute*. 3399-3405
- [6] Sasongko, Mega, N. 2014. Pengaruh Prosentase CO₂ Terhadap Karakteristik Pembakaran Difusi Biogas. *Mekanika Volume 12 Nomor 2*
- [7] Gascoin, Nicolas., Yang, Qingchun., Chetehouna, Khaled. 2016. Thermal effects of CO₂ on the NO_x formation behavior in the CH₄ 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 CH₄/CO₂/air and CH₄/CO₂/O₂ counterflow premixed flames with radiation reabsorption. *Combustion Science and Technology*. 135, pp. 49-64