

Pengaruh persentase CO₂ terhadap temperatur dan kecepatan api *premixed* laminar pada *oxy-butane combustion*

Lilis Yuliati, Francisca Gayuh Utami Dewi, Ichtiaraka Amarullah

Jurusan Teknik Mesin, Universitas Brawijaya
Jl. Mayjend Haryono No. 167, Malang, 65145
Email korespondensi: lilis_y@ub.ac.id

Abstrak

Oxy-combustion merupakan salah satu teknologi yang dikembangkan untuk mengurangi jumlah CO₂ yang dilepas ke atmosfer dalam rangka mengurangi efek rumah kaca dan pemanasan global. Resirkulasi gas hasil pembakaran pada *oxy-combustion* mengakibatkan adanya CO₂ dalam proses pembakaran. Kajian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh persentase CO₂ terhadap kecepatan api *premixed* laminar pada proses pembakaran *oxy-butane*. Pengujian dilakukan pada rasio ekuivalen sebesar 0,6, 0,8, 1, 1,2 dan 1,4. Kadar CO₂ divariasikan sebesar 50%, 55%, 60%, 65% dan 70%, dihitung berdasarkan jumlah oksigen dalam proses pembakaran. Pengukuran kecepatan api *premixed* laminar dilakukan pada *cylindrical tube burner*. Hasil kajian menunjukkan bahwa suhu nyala api dan kecepatan api *premixed* laminar berkurang dengan bertambahnya persentase CO₂ dalam oksidator. Adanya CO₂ mengakibatkan kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran sebagian diserap untuk meningkatkan suhu CO₂, sehingga suhu nyala api berkurang. Adanya CO₂ dalam reaktan menghalangi bertemu dan bereaksinya butana dan oksigen, sehingga kecepatan pembakaran menjadi lebih lambat. Penurunan suhu pembakaran juga merupakan salah satu penyebab penting terjadinya penurunan kecepatan pembakaran pada campuran dengan kandungan CO₂. Selain itu, diketahui bahwa untuk setiap persentase CO₂ dalam oksidator, nyala api memiliki suhu dan kecepatan pembakaran maksimum pada rasio ekuivalen sama dengan satu.

Kata kunci: *oxy-combustion*, persentase CO₂, temperatur api, kecepatan api *premixed* laminar.

Abstract

Oxy-combustion is one of the technologies developed to reduce the amount of CO₂ released into the atmosphere in order to reduce the greenhouse effect and global warming. Gas recirculation in *oxy-combustion* results in the presence of CO₂ in the oxidizer. This study was conducted to determine the effect of the percentage of CO₂ on the laminar *premixed* flame speed in the *oxy-butane* combustion process. Experiment was conducted on equivalent ratios of 0.6, 0.8, 1, 1.2 and 1.4. CO₂ content were varied by 50%, 55%, 60%, 65% and 70%, calculated based on the amount of oxygen in the combustion process. The measurement of laminar *premixed* flame speed was carried out on a *cylindrical tube burner*. The results showed that the flame temperature and the laminar *premixed* flame speed decreased with the increasing of CO₂ percentage in the oxidizer. The presence of CO₂ causes the heat generated from the combustion process absorbed by CO₂, so that the flame temperature is reduced. The decreasing in the flame temperature is an important factor which caused the decreasing in laminar *premixed* flame speed in a mixture with CO₂ content. Furthermore, the presence of CO₂ in the reactants prevents the butane and oxygen from mixing and reacting, hence the flame speed becomes lower. In addition, it is known that for every percentage of CO₂ in the oxidizer, the flame has a maximum flame temperature and speed at an equivalent ratio of unity.

Keywords: *oxy-combustion*, CO₂ percentage, flame temperature, laminar *premixed* flame speed.

1. Pendahuluan

Kekhawatiran mengenai terjadinya pemanasan global dan regulasi emisi yang kian diperketat, mendorong berkembangnya teknologi untuk mengurangi pelepasan gas rumah kaca (salah satunya karbon dioksida) ke atmosfer. Salah satu metode untuk menjaga kadar karbon dioksida (CO₂) di atmosfer tetap rendah adalah dengan penerapan metode *oxy-combustion* dan *carbon captured and storage* (CCS). Dalam metode *oxy-combustion*, O₂ murni digunakan sebagai oksidator dan pada pembakaran bahan bakar hidro karbon, gas hasil

pembakarannya adalah CO₂ dan H₂O. Selanjutnya H₂O dipisahkan dari CO₂ dengan metode kondensasi, dan CO₂ yang tersisa dapat disimpan dengan metode tertentu, sehingga tidak dilepaskan ke atmosfer dan menimbulkan efek rumah kaca.

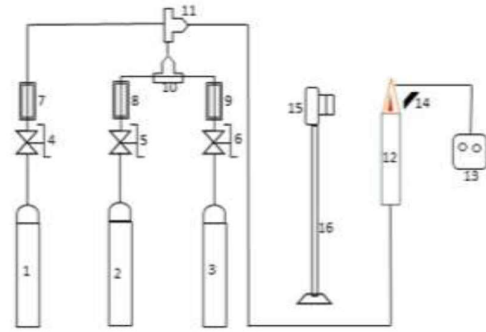
Tingginya suhu gas buang mendorong dilakukannya resirkulasi gas hasil pembakaran ke ruang bakar. Hal ini dilakukan untuk mengurangi *heat loss* yang terjadi dalam proses pembakaran dengan memanfaatkan kembali kalor yang terdapat di dalam proses pembakaran. Resirkulasi gas buang mengakibatkan suhu reaktan masuk ke daerah reaksi

lebih tinggi, yang menghasilkan peningkatan kecepatan pembakaran. Tetapi resirkulasi gas hasil pembakaran ini juga mengakibatkan penambahan konsentrasi CO₂ dan H₂O pada reaktan dalam proses *oxy-combustion*, yang mengakibatkan penurunan kecepatan pembakaran. Adanya CO₂ dan H₂O dalam reaktan menghalangi terjadinya reaksi antara bahan bakar dengan oksigen. Kandungan CO₂ yang tinggi mengakibatkan karakteristik nyala bahan bakar *oxy-combustion* berbeda dengan pembakaran yang menggunakan oksidator udara [1]. Sifat-sifat CO₂ berbeda dari N₂ di udara, yang mengubah kecepatan nyala laminar, suhu nyala api dan karakteristik nyala api lainnya dari pembakaran butana. Kecepatan nyala laminar adalah salah satu karakteristik nyala yang paling penting dan kecepatan nyala laminar dari bahan bakar *oxy-combustion* mengalami perubahan dengan persentase CO₂ yang tinggi.

Kecepatan nyala laminar adalah properti intrinsik yang penting dari campuran yang mudah terbakar. Parameter ini didefinisikan sebagai kecepatan di mana nyala adiabatik, merambat relatif terhadap campuran yang terbakar [2]. Kecepatan nyala laminar mengandung informasi fisikokimia tentang difusivitas, reaktivitas, dan eksotermisitas. Variabel-variabel tersebut mempengaruhi atau bahkan menentukan tingkat pembakaran campuran bahan bakar/udara pada suatu sistem pembakaran [3]. Selain itu, banyak fenomena api *premixed*, seperti api padam, *flash back*, dan *lift off* dapat dikarakterisasi dengan kecepatan api *premixed* laminar sebagai parameter referensi [4]. Salah satu metode untuk menentukan besarnya kecepatan api *premixed* laminar adalah dengan menggunakan *Bunsen burner* [5]. Metode ini sangat umum digunakan karena kesederhanaan instalasi dan struktur api yang jelas [6]. Dalam kajian ini akan diamati kecepatan api *premixed* laminar yang menggunakan butana sebagai bahan bakar. Butana adalah sebuah senyawa hidrokarbon alkana dengan rumus kimia C₄H₁₀. Butana merupakan komponen terbesar yang terkandung dalam LPG. Gas butana merupakan salah satu gas yang berasal dari gas alam mentah. Gas butana merupakan gas yang mudah terbakar, tidak mempunyai warna dan mudah dicairkan, sehingga mudah dalam penyimpanan dan transportasinya. Sifat-sifat tersebut mengakibatkan butana banyak digunakan, baik dalam bentuk murni ataupun dalam bentuk campuran dengan bahan bakar gas yang lain.

2. Metode

Pengamatan dilakukan pada pembakaran *premixed* butana-oksigen dengan tambahan karbon dioksida pada *Bunsen burner*. Gambar 1 menunjukkan skema instalasi kajian yang digunakan. *Bunsen burner* berupa silinder yang terbuat dari *stainless steel* dengan diameter dalam 5 mm dan panjang 150 mm.



Gambar 1. Skema instalasi.

Keterangan Gambar 1: 1) Tabung butana, 2) Tabung oksigen, 3) Tabung karbon dioksida, 4,5,6) Regulator, 7,8,9) Flow meter, 10) Mixing chamber untuk oksidator 11) Mixing chamber butana-oksigen, 12) Bunsen burner, 13) Data logger-termokopel, 14) Ignitor, 15) Kamera, 16) Tripod.

Bahan bakar butana dialirkan dari tabung 1, sedangkan oksidatornya adalah campuran oksigen dan karbon dioksida dialirkan dari tabung 2 dan 3 dengan persentase tertentu. Debit dari butana, oksigen dan karbon dioksida masing-masing diatur dan diukur dengan *flow meter* 7, 8, dan 9. Regulator 4, 5, dan 6 digunakan untuk mengatur agar tekanan butana, oksigen dan karbon dioksida tetap sebesar 0,1 MPa saat mengalir menuju *flow meter*. Oksigen dan karbon dioksida dicampur terlebih dahulu pada *mixing chamber* 10, kemudian oksidator ini dicampur dengan butana pada *mixing chamber* 11 membentuk campuran/*premixed* sebelum memasuki *bunsen burner* 12. Campuran bahan bakar udara dinyalakan dengan *ignitor* 14 pada ujung *burner*. Kamera 15 diletakkan 20 cm dari *burner*, berfungsi untuk mengambil gambar nyala api untuk setiap variasi, dilanjutkan pengolahan gambar menggunakan AutoCAD untuk mengukur tinggi api dan sudut nyala api. Rangkaian termokopel dan *data logger* 13 digunakan untuk mengukur suhu nyala api. Dalam kajian ini digunakan termokopel tipe R dengan diameter 0,2 mm [7,8].

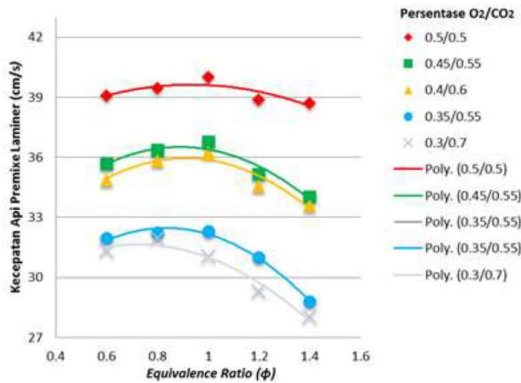
Dalam kajian ini nilai *equivalence ratio* divariasikan sebesar 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, dan 1,4, sedangkan kandungan CO₂ pada oksidator untuk setiap nilai rasio ekuivalen bervariasi dari 50%, 55%, 60%, 65%, dan 70%. Dalam kajian ini diamati beberapa parameter dari nyala api *premixed* laminar yang terdiri dari dimensi api, suhu nyala api, dan kecepatan api *premixed* laminar pembakaran gas butana (C₄H₁₀) dengan oksidator berupa O₂/CO₂. Debit aliran oksigen yang masuk ke dalam *burner* dijaga konstan yaitu sebesar 1 L/min.

3. Hasil dan Pembahasan

Kecepatan nyala api *premixed* laminar dan suhu nyala api diamati sebagai fungsi dari nilai rasio ekuivalen dan persentase oksigen didalam oksidator, di mana persentase oksigen = 100% - persentase

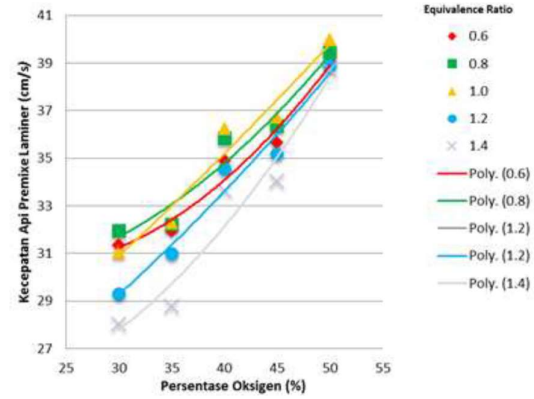
CO₂. Dalam kajian ini, persentase oksigen bervariasi dari 30%, 35%, 40%, 45% hingga 50%. Gambar 2 dan 3 berturut-turut menunjukkan besarnya kecepatan api *premixed* laminar sebagai fungsi dari rasio ekuivalen dan persentase oksigen.

Gambar 2 di bawah ini menunjukkan pengaruh rasio ekuivalen terhadap kecepatan api *premixed* laminar. Gambar 2 menunjukkan bahwa kecepatan api *premixed* laminar berubah seiring terjadinya perubahan rasio ekuivalen. Kecepatan api *premixed* laminar mencapai nilai maksimum pada rasio ekuivalen = 1. Kondisi tersebut terjadi pada semua persentase karbon dioksida dalam oksidator. Seiring dengan penambahan bahan bakar mulai dari rasio ekuivalen 0,6–1,0, kecepatan api *premixed* laminar terus mengalami peningkatan. Hal ini disebabkan oleh sifat dari bahan bakar yang sekaligus menjadi pendingin dalam pembakaran itu sendiri. Bahan bakar yang tidak terbakar menyebabkan terjadinya api difusi, sehingga terjadi ujung api terbuka (*open tip*). Ketika terdapat bahan bakar berlebih justru akan menyerap energi yang dihasilkan dari pembakaran untuk menyalakan campuran. Akibatnya, kecepatan api *premixed* laminar justru akan mengalami penurunan dan menyebabkan api *bunsen* sekunder berupa api difusi.



Gambar 2. Pengaruh rasio ekuivalen terhadap kecepatan api *premixed* laminar.

Gambar 2 di atas menunjukkan bahwa kecepatan api *premixed* laminar tertinggi didapatkan ketika persentase oksigen terbesar. Hal ini disebabkan karena oksigen merupakan oksidator dalam pembakaran *oxy-combustion*. Sedangkan pada persentase oksigen yang rendah, grafik kecepatan api *premixed* laminar cenderung mengalami penurunan yang signifikan ketika *equivalence ratio* berada pada campuran kaya bahan bakar. Hal ini disebabkan CO₂ yang menghambat reaksi campuran dan bahan bakar berlebih yang justru menyerap lebih banyak energi yang dihasilkan oleh pembakaran yang secara signifikan akan menurunkan kecepatan api *premixed* laminar.

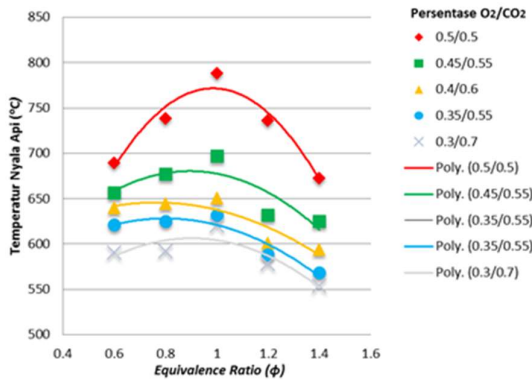


Gambar 3. Pengaruh persentase oksigen/karbon dioksida terhadap kecepatan api *premixed* laminar.

Gambar 3 di bawah ini menunjukkan pengaruh kadar oksigen (atau karbon dioksida) dalam oksidator terhadap kecepatan api *premixed* laminar. Peningkatan kadar oksigen (penurunan kandungan karbon dioksida) dalam oksidator mengakibatkan meningkatnya kecepatan api *premixed* laminar. Kecenderungan di atas terlihat sama untuk setiap nilai rasio ekuivalen yang digunakan. Gambar 3 juga menunjukkan bahwa campuran kaya bahan bakar memiliki kecepatan api *premixed* laminar yang lebih rendah, perbedaan semakin besar pada kadar karbon dioksida yang lebih besar.

Kandungan karbon dioksida dalam oksidator menyebabkan penurunan kecepatan api *premixed* laminar. Hal ini disebabkan oleh sifat CO₂ yang bersifat sebagai inhibitor penghambat tumbukan reaksi antara oksigen sebagai oksidator dengan bahan bakar. CO₂ tidak bereaksi dengan bahan bakar dan adanya CO₂ menjadi penghalang terjadinya pencampuran dan reaksi antara butana dan oksigen, hal ini menyebabkan penurunan kecepatan api *premixed* laminar.

Grafik peningkatan kecepatan api *premixed* laminar pada campuran kaya lebih besar daripada campuran miskin, hal ini disebabkan karena penurunan kandungan karbon dioksida lebih signifikan dalam mempengaruhi kecepatan api *premixed* laminar pada campuran kaya, di mana banyak bahan bakar yang belum terbakar akan bereaksi membentuk api *bunsen* sekunder. Dalam campuran miskin, tidak terjadi api *bunsen* sekunder, sehingga pengaruh penurunan karbon dioksida tidak sebesar seperti pada campuran kaya bahan bakar. Bagian berikut mengamati perubahan suhu nyala api sebagai fungsi dari perubahan rasio ekuivalen dan kadar karbon dioksida dalam oksidator. Gambar 4 dan 5 menunjukkan suhu nyala api pada berbagai variasi rasio ekuivalen dan kadar karbon dioksida.



Gambar 4. Pengaruh rasio ekuivalen terhadap suhu nyala api.

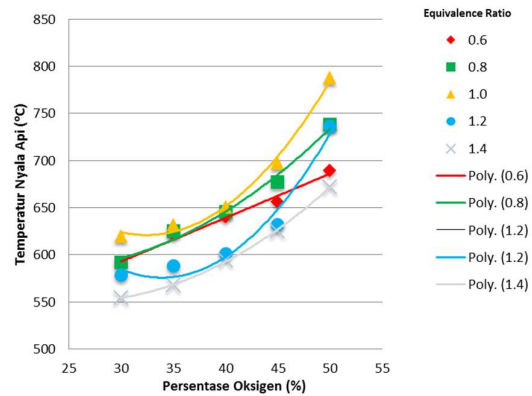
Gambar 4 di atas menunjukkan bahwa suhu api mencapai nilai maksimum pada rasio ekuivalen = 1. Suhu nyala api berkurang ketika nilai ekuivalen rasio menjadi lebih kecil ataupun lebih besar dari 1. Kecenderungan di atas sama untuk setiap kadar karbon dioksida/oksigen yang diamati, tetapi perubahan suhu nyala api yang paling besar terjadi pada kandungan karbon dioksida sebesar 50%, di mana campuran ini memiliki kadar oksigen terbesar bila dibandingkan dengan variasi kadar karbon dioksida yang lainnya.

Suhu nyala api semakin tinggi ketika *equivalence ratio* mendekati nilai 1. Hal ini dikarenakan ketika campuran mendekati stoikiometri, jumlah bahan bakar dan oksidator yang bereaksi akan mendekati sempurna, sehingga reaksi terjadi secara lebih cepat. Reaksi yang cepat terjadi karena tidak ada bahan bakar sisa ataupun *excess air* berlebih yang tidak terbakar yang justru menjadi penghambat reaksi dan reaksi yang lebih cepat akan menyebabkan suhu yang lebih tinggi pula.

Perubahan suhu terbesar terjadi ketika karbon dioksida paling rendah, di mana terjadi kenaikan suhu yang signifikan ketika campuran berada pada area stoikiometrinya. Hal ini disebabkan oleh rendahnya kandungan karbon dioksida itu sendiri, di mana peran karbon dioksida sebagai *inhibitor* tidak terlalu signifikan, sehingga kenaikan dan penurunan suhu hanya disebabkan oleh *equivalence ratio* dari campuran. Sedangkan kecenderungan penurunan suhu yang lebih besar ketika campuran kaya bahan bakar pada karbon dioksida yang tinggi disebabkan oleh energi yang dihasilkan oleh pembakaran, banyak diserap oleh bahan bakar yang belum terbakar untuk membentuk api sekunder dan juga terhambat oleh karbon dioksida berlebih yang menghambat reaksi pembakaran.

Gambar 5 menunjukkan bahwa suhu nyala api meningkat dengan bertambahnya kadar oksigen (penurunan kadar karbon dioksida) dalam oksidator. Secara umum terlihat bahwa campuran kaya bahan bakar memiliki suhu nyala api yang lebih rendah dari

pada campuran stoikiometri dan campuran miskin bahan bakar.



Gambar 5. Pengaruh persentase oksigen/karbon dioksida terhadap temperatur nyala api.

Kenaikan suhu nyala api disebabkan oleh penurunan persentase CO₂ pada udara pembakaran. CO₂ bersifat sebagai *inhibitor* yang mencegah reaksi tumbukan antara oksigen dengan bahan bakar butana, ketika besaran CO₂ dikurangi, maka suhu nyala api akan semakin mengalami peningkatan. Disinilah diketahui fungsi CO₂ itu sendiri sebagai *inhibitor* yang menurunkan kecepatan dan juga suhu pembakaran.

Peningkatan suhu nyala api yang lebih tinggi terjadi ketika campuran miskin bahan bakar daripada campuran kaya bahan bakar, hal ini disebabkan pada campuran miskin bahan bakar, penurunan karbon dioksida akan lebih mempercepat reaksi pembakaran, sehingga suhu akan naik lebih signifikan daripada pada campuran kaya, di mana masih banyak energi yang terserap untuk pembentukan api sekunder dari bahan bakar berlebih.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian, analisis dan pembahasan pada pengujian dengan variasi *equivalence ratio* dan persentase O₂/CO₂ dapat disimpulkan bahwa kecepatan nyala api *premixed* laminar mencapai nilai maksimum pada rasio ekuivalen = 1, pada saat kadar CO₂ dalam oksidator paling sedikit, dalam kajian ini sebesar 50%. Suhu nyala api maksimum terjadi pada kondisi yang sama, hal tersebut menunjukkan bahwa kecepatan nyala api *premixed* laminar dan suhu pembakaran mempunyai hubungan yang sangat erat, suhu pembakaran yang tinggi menyebabkan kecepatan nyala api yang lebih besar, sebaliknya kecepatan nyala api yang besar menghasilkan suhu nyala api yang tinggi sehubungan dengan tingginya *heat release* yang dihasilkan pada proses pembakaran.

Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada BPPM Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya yang telah menyediakan dana untuk kajian ini.

Daftar Pustaka

- [1] N.S. Yuzbasi, N. Selcuk. 2012, "Air and Oxy-fuel Combustion Behaviour of Petrole/lignite Blends", *Fuel*, Vol. 92, issue 1, 137-144.
- [2] J. Buffam, K. Cox, H. Schiess. 2008, "Measurement of Laminar Burning Velocity of Methane-Air Mixtures Using a Slot and Bunsen Burner", Worcester Polytechnic Institute.
- [3] K.F. Mustafa, S. Abdullah, M. Z. Abdullah, K. Sopian. 2015, "Combustion Characteristics of Butane Porous Burner for Thermoelectric Power Generation", *Journal of Combustion*, Vol. 2015, Article ID 121487, 1-13.
- [4] I M. K. Dhiputra, H.A. Hartono, C.P. Mahandari. 2008, Flame Height of Propane and the Propane Flame lift-up. Proc 1st International Meeting on Advanced in Thermo-Fluid, UTM Johor, Malaysia, 26 August.
- [5] C.P. Mahandari, I M. K. Dhiputra. 2007, Flame Lift-up on a Bunsen Burner; A Preliminary Study. Proc 10th International Conference on Quality 15 in Research (QIR) Engineering Center University of Indonesia, EPE-13.
- [6] H.A. Becker, D. Liang. 1978, "Visible height of vertical free turbulent diffusion flames", *Combustion and Flame*, Vol. 32, 115-137.
- [7] X. Hu, Q. Yu. 2018, "Effect of the Elevated Initial Temperature on the Laminar Flame Speeds of Oxy-methane Mixture", *Energy*, Vol. 147, 876-883.
- [8] A. Nair, R.K. Velamati, S. Kumar. 2016, "Effect of CO₂/N₂ Dillution On Laminar Burning Velocity of Liquid Petroleum Gas-Air Mixtures at Elevated Temperatures", *Energy*, Vol. 100, 145-153.