

Pengaruh Penambahan Konsentrasi Oksigen dalam Laminar Premixed Flame dengan Bahan Bakar Metana

Aris Purwanto

Program Studi S-1 Teknik Mesin, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 Juni 2025

Revised: 22 Juli 2025

Accepted: 26 Juli 2025

Keywords:

Premixed flame

Oksigen

Adiabatic flame temperature

Entropy generation

Laminar flame speed

Published by

Impression: Jurnal Teknologi dan Informasi

Copyright © 2025 by the Author(s) | This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ABSTRACT

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan persentase jumlah oksigen pada *laminar premixed flames* dengan bahan bakar metana, dengan menggunakan salah satu perangkat lunak 1D yaitu CHEMKIN Pro kami melakukan analisis terhadap *laminar flame speed*, *adiabatic flame temperature* dan *entropy generation rate*. Pada penelitian ini mekanisme GRI 3.0 dipilih karena mekanisme ini sering digunakan untuk memodelkan pembakaran dengan bahan bakar hidrokarbon. Berdasarkan hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak CHEMKIN Pro, peningkatan konsentrasi oksigen meningkatkan *Adiabatic flame temperature*, *laminar flame speed*, dan *entropy generation*. Berdasarkan hasil simulasi, konsentrasi oksigen sebesar 33% menghasilkan nilai tertinggi untuk suhu nyala adiabatik, *laminar flame speed*, dan *entropy generation*. Meskipun demikian, Secara aplikatif, konsentrasi oksigen pada kisaran 26% dapat dianggap sebagai titik kompromi yang relatif aman dan efisien, karena menghasilkan peningkatan kinerja termal tanpa lonjakan *entropy generation* yang terlalu tinggi. Konsentrasi ini cocok diterapkan pada sistem burner gas.

This study aims to determine the effect of increasing the percentage of oxygen on laminar premixed flames with methane fuel, using one of the 1D lunar devices, namely CHEMKIN Pro, we analyzed the laminar flame speed, adiabatic flame temperature, and entropy generation rate. In this study, the GRI 3.0 mechanism was chosen because this mechanism is often used to model combustion with hydrocarbon fuels. Based on the simulation results using CHEMKIN Pro software, increasing oxygen concentration increases Adiabatic flame temperature, laminar flame speed, and entropy generation. Based on the simulation results, an oxygen concentration of 33% produces the highest values for adiabatic flame temperature, laminar flame speed, and entropy generation. However, in practice, an oxygen concentration in the range of 26% can be considered a relatively safe and efficient compromise point, because it results in increased thermal performance without too high a surge in entropy generation. This concentration is suitable for application in gas burner systems.

Corresponding Author:

Aris Purwanto

Department of Mechanical Engineering, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

Gedung A6 Kampus UNESA Ketintang Surabaya 60231

Email: arispurwanto@unesa.ac.id

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dalam bidang transportasi dan industri pembangkit listrik memungkinkan peneliti melakukan pengembangan mengenai pengembangan teknologi pembakaran yang bersih dan efisien (Li et al., 2023), beberapa peneliti melakukan pengembangan dengan cara mencari bahan bakar alternatif yang dapat mengurangi emisi karbon monoksida seperti penggunaan bahan bakar berbasis ammonia (Ge et al., 2024; Lu et al., 2024; Nawaz et al., 2024), serta bahan bakar rendah karbon

lainnya seperti bahan bakar berbasis metal partikel (Bergthorson et al., 2015; Chen et al., 2025; Li et al., 2021; Li et al., 2022; Prasadha et al., 2024). Upaya ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi termal pada serta mendapatkan energi yang lebih bersih. Dalam hal ini pembangkit listrik tenaga uap yang masih menggunakan bahan bakar hidrokarbon seperti metana juga perlu mendapatkan perhatian yang lebih, dikarenakan penggunaan ammonia dan bahan bakar berbasis metal tidak cocok untuk bahan bakar turbin gas, maka perlu dilakukan peningkatan efisiensi termal pada pembakaran dengan basis bahan bakar metana (Shakeel et al., 2018).

Di samping pendekatan melalui bahan bakar alternatif, upaya lain untuk menciptakan pembakaran yang lebih bersih dan efisien dilakukan dengan meningkatkan konsentrasi oksigen dalam proses pembakaran atau menggunakan jenis oksidizer yang memiliki kandungan oksigen yang lebih tinggi seperti nitrous oxide (N_2O) sebagai alternatif oksidizer untuk menciptakan pembakaran yang lebih bersih dan mengurangi emisi karbon (Chen & Li, 2021; Razus et al., 2018). Oksigen memiliki peran yang krusial didalam proses pembakaran dimana oksigen bersama dengan bahan bakar dan sumber api membentuk sebuah segitiga pembakaran. Dalam api *premixed* oksigen dan bahan bakar dicampur secara homogen sebelum dilakukan proses pembakaran (Turns, 1996).

Didalam sebuah sistem pembakaran *premixed* persentase oksigen memiliki pengaruh terhadap efisiensi dan karakteristik pembakaran. Jika jumlah persentase oksigen didalam sistem semakin banyak maka reaksi yang dihasilkan akan menjadi semakin sempurna (Glassman et al., 2014). Selain itu persentase oksigen juga dapat meningkatkan efisiensi termal serta dapat meningkatkan laju pembakaran (*flame speed*) (Zhang et al., 2016). Persentase oksigen didalam sistem juga dapat meningkatkan suhu pembakaran yang dihasilkan. Akan tetapi semakin tinggi konsentrasi oksigen didalam sistem juga memiliki dampak negatif. Beberapa penelitian sudah melakukan pengkajian mengenai dampak penambahan konsentrasi oksigen dalam proses pembakaran seperti yang dilakukan oleh (Habib et al., 2015; Zhang et al., 2016), akan tetapi penelitian terkait sudah menetapkan konsentrasi oksigen didalam sistem, sedangkan untuk penelitian simulasi yang mengkaji pengaruh penambahan oksigen hingga titik tertentu belum banyak dilakukan. Beberapa penelitian terkait pembakaran premix dengan bahan bakar metana hanya membahas mengenai laminar flame speed atau adiabatic flame saja, sedangkan literature yang membahas mengenai laminar flame speed, adiabatic flame temperature, dan entropy generation secara bersama sama masih jarang dikaji oleh para peneliti, secara umum ketiga aspek ini merupakan aspek penting dalam proses pembakaran. Dimana adiabatic flame temperature adalah suhu maksimum yang dapat dicapai oleh suatu sistem pembakaran ideal, yaitu saat semua bahan bakar dan oksidan terbakar sempurna. Sedangkan untuk laminar flame speed adalah kecepatan perambatan nyala api dalam campuran bahan bakar dan oksidator dalam kondisi laminar. Sedangkan, Entropy Generation dalam konteks pembakaran menunjukkan jumlah energi yang hilang karena ketidakteraturan sistem. Ketiga parameter ini merupakan parameter penting dalam pembakaran premix.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan persentase jumlah oksigen pada *laminar premixed flames* dengan bahan bakar metana, dengan menggunakan salah satu perangkat lunak 1D yaitu CHEMKIN Pro kami melakukan analisis termodinamika yang komprehensif terhadap *laminar flame speed*, *adiabatic flame temperature* dan *entropy generation* didalam peningkatan konsentrasi oksigen didalam sebuah api premix dengan bahan bakar metana. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan mengenai dampak penambahan oksigen didalam api premix dengan bahan bakar metana sehingga penelitian lebih lanjut mengenai dampak ini dapat dilakukan secara eksperimen ataupun secara simulasi 2D maupun 3D. Secara praktis, hasil simulasi ini dapat dimanfaatkan untuk merancang sistem pembakaran yang efisien, aman, dan rendah emisi, khususnya pada gas turbine untuk keperluan industri maupun burner gas untuk skala rumah tangga.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan salah satu perangkat lunak simulasi yaitu CHEMKIN Pro, dimana perangkat ini digunakan untuk pengembangan reaksi kimi termal khususnya pada pembakaran dan reaktor kimia (DESIGNS, 2011; Kee et al., 1989). CHEMKIN Pro memiliki kemampuan untuk memodelkan pembakaran dengan presisi yang tinggi dengan menggunakan mekanisme pembakaran

yang kompleks. Pada penelitian ini mekanisme GRI 3.0 dipilih karena mekanisme ini sering digunakan untuk memodelkan pembakaran dengan bahan bakar hidrokarbon (Smith et al., 2000). Mekanisme ini terdiri atas 325 reaksi dan 53 spesies kimia. Selain pada pembakaran premixed, CHEMKIN juga biasa digunakan untuk memodelkan *counter flow flame*, *plug flow reactor* (PFR), *perfectly stirred reactor* (PSR), dan batch reactor sehingga perangkat lunak ini dapat memberikan pendekatan yang akurat terhadap berbagai jenis pembakaran. Penggunaan perangkat lunak CHEMKIN Pro memberikan kelebihan dalam hal efisiensi waktu, kemampuan untuk mengontrol parameter reaksi secara presisi, dan kemudahan mengevaluasi berbagai kondisi operasi tanpa risiko keselamatan.

Pada penelitian ini tiga buah jenis kode digunakan yaitu EQUIL untuk menganalisis *Adiabatic flame temperature*, dan PREMIX untuk menganalisis *Laminar flame speed* dan *Entropy generation rate*. Masing masing kode tersebut digunakan untuk mendapatkan hasil yang akurat dan diharapkan mendapatkan hasil yang lebih terperinci dan dapat dijadikan sebagai dasar untuk simulasi CFD lanjutan atau sebagai dasar untuk dilakukan eksperimen untuk mendapatkan pembakaran yang efisien dan mengurangi emisi karbon. Tabel 1 menunjukkan hasil masukkan fraksi mol bahan bakar, oksigen, dan nitrogen ke dalam CHEMKIN Pro.

Pemilihan tiga level konsentrasi oksigen utama, yaitu 21%, 26%, dan 33%, didasarkan pada pertimbangan ilmiah terkait batas kandungan oksigen dalam campuran premix yang masih aman secara termodinamika. Konsentrasi 21% mewakili kandungan oksigen udara atmosferik, sementara 26% dipilih sebagai titik tengah untuk melihat tren peningkatan. Konsentrasi 33% dipilih sebagai batas atas karena pada penelitian (Chen & Li, 2021) mereka menggunakan N₂O sebagai oksidator, dimana N₂O memiliki konsentrasi 33% Oksigen, pada penelitian tersebut terjadi peningkatan drastis pada temperatur nyala.

Tabel 1. *Mole Fraction*

Persentase Oksigen	Fraksi Mol Metana	Fraksi Mol Nitrogen	Fraksi Mol Oksigen
21%	0,0950	0,7148	0,1902
26%	0,1150	0,6549	0,2301
31%	0,1342	0,5975	0,2683
33%	0,1416	0,5751	0,2833

Untuk masing masing simulasi, pada kecepatan masuk di tetapkan pada kecepatan 0,8 m/s dengan suhu campuran adalah 300 K dengan panjang combustor diasumsikan 150 mm dengan diameter luar combustro adalah 11,5 mm, pemilihan jenis combustor ini disesuaikan pada penelitian terdahulu mengenai api premix dengan bahan bakar metana (Li et al., 2021). Untuk mendapatkan hasil yang konvergen dilakukan dengan cara mengubah *adaptive mesh*, *adaptive grid curvature* (GRAD) = 0,1 sedangkan untuk *adaptive grid control* (CURV) = 0,1, selain itu *number of adaptive grid point* = 20. Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat dilakukan *grid indepenence test* yaitu dengan memvarisasikan jumlah *maximum number of grid point*, yaitu dengan 1000 dan 10.000, dimana pada kedua hasil menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan dimana didapatkan error kurang dari 2%, maka 1000 dipilih sebagai jumlah *maximum number of grid point*. Pada simulasi ini mempertimbangkan difusi termal dan *multicomponent transport*.

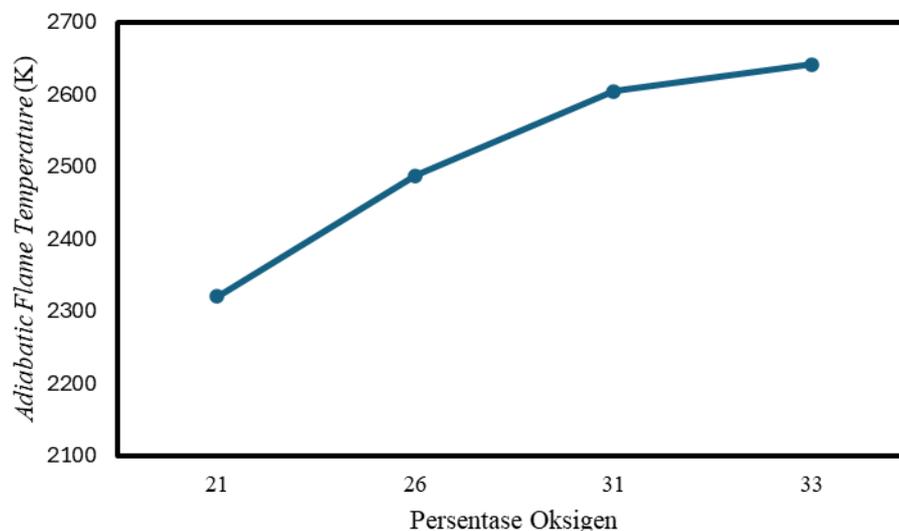
HASIL PENELITIAN

Berdasarkan hasil simulasi didapatkan tiga parameter utama pengaruh penambahan konsentrasi oksigen dalam api premix dengan bahan bakar metana yaitu *Adiabatic flame temperature*, *Laminar flame speed*, dan *Entropy generation*. Ketiga parameter ini merupakan parameter penting dalam pembakaran premix. Semakin meningkatnya konsentrasi oksigen dalam sebuah sistem pembakaran maka akan menghasilkan suhu yang lebih besar, selain itu laju pembakaran juga akan semakin cepat. Sedangkan pada *Entropy generation*, semakin meningkat, karena semakin besar pembangkitan entropi, maka semakin besar pula energi yang tidak dapat digunakan kembali untuk melakukan kerja, karena hilang sebagai panas tersebar atau bentuk energi yang tidak teratur.

Hasil simulasi *Adiabatic flame temperature* ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan hasil simulasi suhu pembakaran yang ideal (adiabatic) pada konsentrasi oksigen 33% memiliki nilai yang paling tinggi

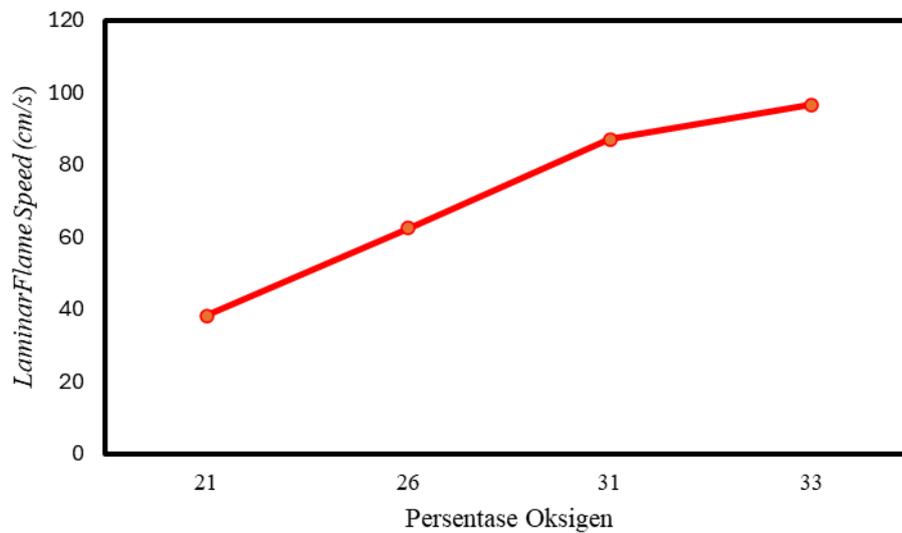
yaitu sebesar 2641 K, dimana angka ini memiliki perbedaan 321 K pada kondisi udara yang memiliki 21% oksigen. Peningkatan suhu ini diakibatkan adanya perubahan laju reaksi pembakaran, hal ini dikarenakan seiring dengan penambahan konsentrasi oksigen maka konsentrasi nitrogen dalam sistem akan menurun, mengakibatkan reaksi antara metana dengan oksigen akan lebih cepat. Selain itu secara termodinamika, meningkatnya konsentrasi oksigen memperbanyak jumlah oksidator yang tersedia, sehingga memperkaya reaksi eksotermis antara metana dan oksigen, hal ini dapat meningkatkan entalpi (ΔH) sehingga meningkatkan *adiabatic flame temperature*.

Selain itu meningkatkan konsentrasi oksigen juga dapat meningkatkan kinetika pembakaran, dimana konsentrasi oksigen yang tinggi akan mempercepat laju reaksi karena memperbanyak tumbukan efektif antara molekul reaktan. Akan tetapi konsentrasi oksigen yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan ketidak stabilan termal pada reaksi karena pada konsentrasi 33% hanya berbeda 37 K saja, hal ini mengindikasikan sebagai batas maksimal konsentrasi oksigen dalam pembakaran api premix dengan bahan bakar metana.

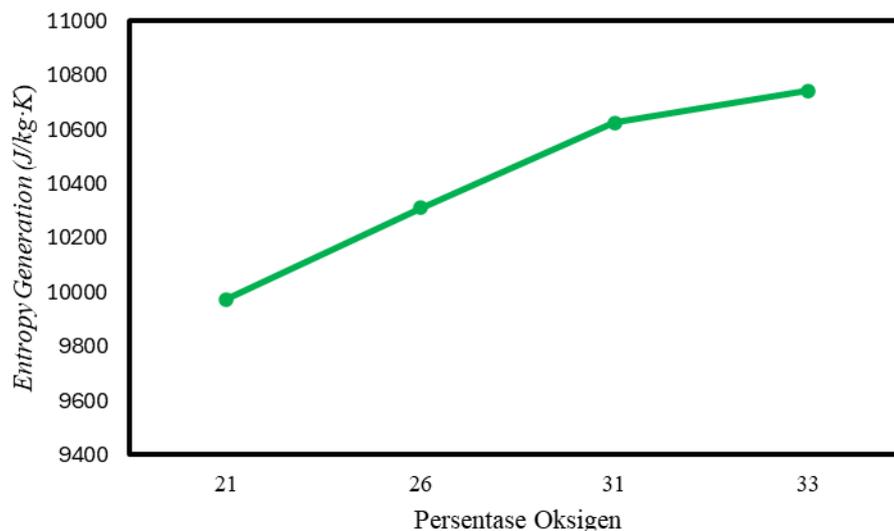


Gambar 1 Hasil Simulasi *Adiabatic flame temperature*

Gambar 2 menunjukkan hasil *Laminar flame speed*, dimana seiring dengan peningkatan konsentrasi oksigen, *Laminar flame speed* juga akan bertambah, pada konsentrasi 33% memiliki *Laminar flame speed* yang relatif tinggi yaitu 96,75 cm/s. *Laminar flame speed* adalah parameter yang menunjukkan dimana proses terjadinya reaksi pembakaran, semakin tinggi angka yang dihasilkan akan memiliki laju pembakaran yang lebih cepat. Pada konsentrasi oksigen 31% dan 33% dapat memungkinkan terjadinya nyala balik (*flashback*), nyala balik terjadi jika laju pembakaran / *Laminar flame speed* memiliki angka yang lebih besar dibandingkan dengan laju aliran bahan bakar dan oksigen, sehingga memungkinkan apa dapat merambat menuju kedalam tabung bahan bakar atau tabung oksigen yang dapat berisiko menimbulkan ledakan. Pada sebuah pembakaran ada dua hal yang dihindari yaitu *flame blow off* dan *flame flashback*, dimana *flame blowoff* adalah kecepatan api yang terlalu rendah, sedangkan *flame flashback* adalah kecepatan rambat api yang terlalu tinggi. Studi dari Siagian (Siagian et al., 2018) menambahkan uap air kedalam pembakaran premix metana dan udara, mereka menyimpulkan bahwa penambahan konsentrasi uap air akan membuat api menjadi tidak stabil, ketidak stabilan ini mengakibatkan *flame* menjadi *blowoff*, selain itu studi dari Dhi'fanyah (Dhi'fanyah & Wahyudiyono, 2017) mengemukakan bahwa pada industri Oxy-cutting Salah satu bahaya paling signifikan adalah potensi terjadinya *flashback*, yaitu aliran balik api ke dalam selang atau tabung gas akibat ketidakseimbangan tekanan.

Gambar 2 Hasil Simulasi *Laminar flame speed*

Berdasarkan hasil simulasi *Entropy generation* yang ditunjukkan pada Gambar 3, *Entropy generation* meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi oksigen. Pada konsentrasi oksigen 33% memiliki *Entropy generation* yang paling tinggi yaitu sebesar 10743,09 J/kg·K. Dimana *Entropy generation* adalah sebuah ukuran ketidakbalikan (*irreversible*) dalam sebuah sistem termodinamika. Dalam pembakaran premix *Entropy generation* adalah energi yang hilang atau energi yang tidak dapat digunakan Kembali karena proses reaksi kimia yang terlalu cepat. Secara teoritis kondisi udara memiliki *Entropy generation* yang lebih rendah, artinya kondisi tersebut secara teoritis memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi oksigen 33%. Hal ini juga divalidasi oleh studi dari Yan (Yan et al., 2022) Dimana melalui simulasi nyala difusi laminar berbasis oxy-fuel, ditemukan bahwa peningkatan konsentrasi oksigen dalam oksidator menyebabkan kenaikan bertahap pada entropi akibat konveksi-konduksi, difusi massa, dan reaksi kimia.

Gambar 3 Hasil Simulasi *Entropy generation*

PENUTUP

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak CHEMKIN Pro, diketahui bahwa peningkatan konsentrasi oksigen dalam campuran pembakaran secara signifikan mempengaruhi karakteristik termal sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi oksigen, maka nilai *adiabatic flame temperature*, *laminar flame speed*, dan *entropy generation* juga mengalami peningkatan. Pada konsentrasi oksigen sebesar 33%, tercatat nilai suhu nyala adiabatik tertinggi yaitu sebesar 2641 K, dengan kecepatan rambat api laminar mencapai 96,75 cm/s, serta nilai *entropy generation* sebesar 10743,09 J/kg·K. Meskipun konsentrasi oksigen yang tinggi meningkatkan performa termal, namun juga diikuti oleh peningkatan *entropy generation* yang dapat berdampak pada efisiensi energi dan kestabilan sistem.

Dalam hal aplikasi praktis, konsentrasi oksigen sekitar 26% dinilai sebagai titik kompromi yang ideal. Pada kisaran ini, sistem mampu menghasilkan kinerja termal yang cukup tinggi tanpa mengalami peningkatan *entropy generation* yang terlalu ekstrem. Kondisi ini sangat relevan untuk diterapkan pada sistem *burner* berbasis gas baik di skala industri maupun rumah tangga, di mana efisiensi energi menjadi prioritas namun tetap mengedepankan aspek keselamatan operasional.

Namun, penting untuk dicatat bahwa simulasi ini dilakukan dengan pendekatan satu dimensi (1D) menggunakan asumsi kondisi ideal. Model yang digunakan belum mempertimbangkan efek turbulensi, radiasi non-linier, serta pengaruh geometri dan dinamika aliran nyata yang umum terjadi dalam sistem pembakaran aktual. Oleh karena itu, untuk memperkuat validitas hasil yang diperoleh, penelitian lanjutan akan diarahkan pada pemodelan multidimensi (2D atau 3D) yang dapat merepresentasikan kondisi riil secara lebih akurat. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terkait fenomena pembakaran dan meningkatkan akurasi prediksi performa sistem secara keseluruhan.

REFERENSI

- Bergthorson, J. M., Goroshin, S., Soo, M. J., Julien, P., Palecka, J., Frost, D. L., & Jarvis, D. J. (2015). Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power. *Applied Energy*, 160, 368-382. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.037>
- Chen, C.-H., & Li, Y.-H. (2021). Role of N₂O and equivalence ratio on NO_x formation of methane/nitrous oxide premixed flames. *Combustion and Flame*, 223, 42-54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.002>
- Chen, R., Thijs, L. C., Hansen, B. B., Lin, W., Wu, H., Glarborg, P., . . . Mi, X. (2025). Combustion of micron-sized iron particles in a drop tube reactor. *Fuel*, 383, 133814. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133814>
- DESIGNS, M. E. (2011). Chemkin-pro. *Ansys*.
- Dhi'fansyah, R. F., & Wahyudiyono, D. A. (2017). Identifikasi Bahaya pada Pekerjaan Oxy-Cutting di PT. Aziz Jaya Abadi Tuban. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*, 6(1), 27.
- Ge, Y., Ma, H.-H., & Wang, L.-Q. (2024). Experimental and numerical investigation of combustion characteristics of carbon-free NH₃/H₂ blends in N₂O. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 510-520. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.187>
- Glassman, I., Yetter, R. A., & Glumac, N. G. (2014). *Combustion*. Academic press.
- Habib, M. A., Nemitallah, M. A., Ahmed, P., Sharqawy, M. H., Badr, H. M., Muhammad, I., & Yaqub, M. (2015). Experimental analysis of oxygen-methane combustion inside a gas turbine reactor under various operating conditions. *Energy*, 86, 105-114.
- Kee, R. J., Rupley, F. M., & Miller, J. A. (1989). *Chemkin-II: A Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics*.
- Li, G., Zhu, Z., Zheng, Y., Guo, W., Tang, Y., & Ye, C. (2023). Experiments on a powerful, ultra-clean, and low-noise-level swirl-combustion-powered micro thermoelectric generator. *Energy*, 263, 125825. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125825>

- Li, Y.-H., Pangestu, S., Purwanto, A., & Chen, C.-T. (2021). Synergetic combustion behavior of aluminum and coal addition in hybrid iron-methane-air premixed flames. *Combustion and Flame*, 228, 364-374. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.02.013>
- Li, Y.-H., Purwanto, A., & Chuang, B.-C. (2022). Micro-Explosion mechanism of iron hybrid Methane-Air premixed flames. *Fuel*, 325, 124841. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124841>
- Lu, M., Long, W., Wei, F., Dong, D., Cong, L., Dong, P., . . . Wang, P. (2024). Assessment of carbon-free fuel ammonia combustion with low methanol blends in reducing GHG emissions including N₂O. *Journal of Cleaner Production*, 463, 142755. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142755>
- Nawaz, B., Nasim, M. N., Das, S. K., Landis, J., SubLaban, A., Trelles, J. P., . . . Mack, J. H. (2024). Combustion characteristics and emissions of nitrogen oxides (NO, NO₂, N₂O) from spherically expanding laminar flames of ammonia-hydrogen blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 65, 164-176.
- Prasidha, W., Baigmohammadi, M., Shoshin, Y., & de Goey, P. (2024). Towards an efficient metal energy carrier for zero-emission heating and power: Iron powder combustion. *Combustion and Flame*, 268, 113655.
- Razus, D., Mitu, M., Giurcan, V., Movileanu, C., & Oancea, D. (2018). Methane-unconventional oxidant flames. Laminar burning velocities of nitrogen-diluted methane-N₂O mixtures. *Process Safety and Environmental Protection*, 114, 240-250. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.026>
- Shakeel, M. R., Sanusi, Y. S., & Mokheimer, E. M. (2018). Numerical modeling of oxy-methane combustion in a model gas turbine combustor. *Applied Energy*, 228, 68-81.
- Siagian, D. P., Widodo, A. S., & UD, F. G. (2018). Pengaruh Kadar uap Air Terhadap Kecepatan Api Laminar Dengan bahan Bakar Metana. *Universitas Brawijaya*.
- Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M., Moriarty, N. W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., . . . Gardiner Jr, W. C. (2000). GRI_{mech} 3.0 reaction mechanism. *Sandia National Laboratory*, 20(0), 0.
- Turns, S. R. (1996). *Introduction to combustion* (Vol. 287). McGraw-Hill Companies New York, NY, USA.
- Yan, H., Tang, G., Wang, C., Li, L., Zhou, Y., Zhang, Z., & Lou, C. (2022). Thermodynamics irreversibilities analysis of oxy-fuel diffusion flames: The effect of oxygen concentration. *Entropy*, 24(2), 205.
- Zhang, K., Hu, G., Liao, S., Zuo, Z., Li, H., Cheng, Q., & Xiang, C. (2016). Numerical study on the effects of oxygen enrichment on methane/air flames. *Fuel*, 176, 93-101.