TUGAS AKHIR - TF 181801

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN HIDROGEN PADA BAHAN BAKAR TERHADAP EMISI GAS BUANG PADA *AIR STAGED COMBUSTION FURNACE* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

NESA SYOFAR ZAHAV MAINGAK
NRP. 02311640000077

Dosen Pembimbing:
Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

TUGAS AKHIR - TF 181801

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN HIDROGEN PADA BAHAN BAKAR TERHADAP EMISI GAS BUANG PADA *AIR-STAGED COMBUSTION FURNACE* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

NESA SYOFAR ZAHAV MAINGAK
NRP. 02311640000077

Dosen Pembimbing:
Gunawan Nugroho S.T, M.T, Ph.D.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

FINAL PROJECT - TF 181801

EFFECT ANALYSIS OF HYDROGEN ADDITION INTO FUEL TO EXHAUST GAS EMISSION ON AIR-STAGED COMBUSTION FURNACE USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS METHOD

NESA SYOFAR ZAHAV MAINGAK
NRP. 02311640000077

Supervisors:
Gunawan Nugroho S.T, M.T, Ph.D.

Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

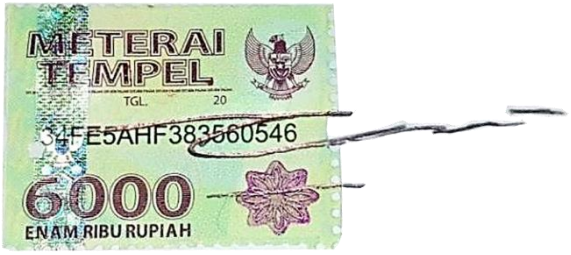
Nama	: Nesa Syofar Zahav Maingak
NRP	: 02311640000077
Departemen / Prodi	: Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN HIDROGEN PADA BAHAN BAKAR TERHADAP EMISI GAS BUANG PADA *AIR-STAGED COMBUSTION FURNACE* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 15 Juni 2020

Yang membuat pernyataan,



Nesa Syofar Zahav Maingak

NRP. 02311640000077

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

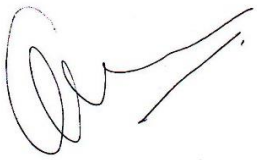
ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN HIDROGEN PADA BAHAN BAKAR TERHADAP EMISI GAS BUANG PADA *AIR-STAGED COMBUSTION FURNACE* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Oleh:

Nesa Syofar Zahav Maingak
NRP. 02311640000077

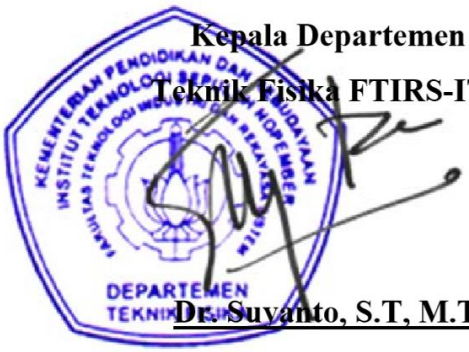
Surabaya, 15 Juni 2020

Menyetujui,
Pembimbing



Gunawan Nugroho S.T, M.T, Ph.D.
NIP. 19771127 200212 1 002

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTIRS-ITS



Dr. Suyanto, S.T, M.T.
NIP. 19711113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN HIDROGEN PADA BAHAN BAKAR TERHADAP EMISI GAS BUANG PADA *AIR-STAGED COMBUSTION FURNACE* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Nesa Syofar Zahav Maingak

NRP. 02311640000077

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Gunawan Nugroho S.T, M.T, Ph. D. (Pembimbing)
2. Ir. Roekmono, M. T. (Penguji I)
3. Erna Septyaningrum, S.T, M. T. (Penguji II)
4. Detak Yan Pratama S.T, M.Sc. (Penguji III)

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN HIDROGEN PADA BAHAN BAKAR TERHADAP EMISI GAS BUANG PADA *AIR-STAGED COMBUSTION FURNACE* MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Nama	**:**	**Nesa Sofar Zahav Maingak**
NRP	**:**	**02311640000077**
Departemen	**:**	**Teknik Fisika FT-IRS ITS**
Dosen Pembimbing	**:**	**Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph. D.**

ABSTRAK

Pengembangan *furnace* industri dengan emsisi gas buang yang rendah menjadi perhatian untuk menurunkan tingkat pencemaran udara secara global. Salah satu metode untuk menurunkan emisi gas buang hasil pembakaran adalah *air staged combustion*. Selain itu penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar dapat menjadi alternatif untuk menghasilkan pembakaran rendah emisi.Pada penelitian ini dilakukan variasi penambahan hidrogen pada bahan bakar natural gas dan penggunaan metode *air staged combustion* untuk menghasilkan pembakaran dengan emisi gas buang yang rendah. Variasi penambahan hidrogen yang dilakukan yakni 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Sedangkan untuk penambahan *secondary air* pada *air staged combustion* dilakukan sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% terhadap volume *furnace*. Berdasarkan simulasi metode numerik CFD (Computational Fluid Dynamic), diperoleh hasil penurunan emisi gas buang terbaik pada tiga kondisi, yakni dengan penambahan hidrogen sebesar 20%, penambahan *secondary air* sebesar 20%, dan kombinasi penambahan hidrogen 15% dan *secondary air* 20%. Ketiga kondisi variasi tersebut dapat menurunkan karbon dioksida, NOx, dan meningkatkan *total energy* pembakaran, akan tetapi terjadi kenaikan karbon monoksida dengan kadar maksimum 43.4 ppm.

Kata Kunci: ***furnace, air-staged combustion, hidrogen, secondary air***

Halaman ini sengaja dikosongkan

EFFECT ANALYSIS OF HYDROGEN ADDITION INTO FUEL TO EXHAUST GAS EMISSION ON AIR-STAGED COMBUSTION FURNACE USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS METHOD

Name	**:**	**Nesa Syofar Zahav Maingak**
NRP	**:**	**02311640000077**
Department	**:**	**Engineering Physics FT-IRS ITS**
Supervisors	**:**	**Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D.**

ABSTRACT

The development of low emissions industrial furnaces is a big concern to reduce the level of global air pollution. Air staged combustion is one of the best methods to reduce emission. In addition, the use of hydrogen as a fuel can be an alternative to produce low-emissions combustion.Hydrogen addition to natural gas fuels and the use of air staged combustion method are the main variations in this research to produce combustion with low emissions. Hydrogen addition variations are 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%. Whereas the addition of secondary air of air staged combustion variations are 0%, 10%, 20%, 30%, and 40% of the furnace volume.Based on the simulation of Computational Fluid Dynamic method, the best emission reduction results are obtained in three conditions, namely by adding 20% hydrogen, adding 20% secondary air, and a combination of adding 15% hydrogen and 20% secondary air. These three conditions can reduce carbon dioxide, NOx, and increase total combustion energy, but there is an increment of carbon monoxide with a maximum level of 43.4 ppm.

Keywords: furnace, air-staged combustion, hidrogen, secondary air

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa penulis panjatkan atas segala yang telah diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **"Analisis Pengaruh Penambahan Hidrogen Pada Bahan Bakar Terhadap Emisi Gas Buang Pada *Air-Staged Combustion Furnace* Menggunakan Metode *Computational Fluid Dynamics*"** dengan lancer.

Dalam proses penyelesaian Tugas Akhir tersebut, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga penulis yang selalu memberikan dukungan dan doa kepada penulis dalam proses penempuh pendidikan.
2. Bapak Gunawan Nugroho S.T, M.T, Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan pengarahan dan ilmu yang sangat bermanfaat selama penyusunan Tugas Akhir.
3. Seluruh dosen penguji Tugas Akhir yang telah memberikan masukan dalam penyusunan Tugas Akhir ini untuk menjadi lebih baik.
4. Maria Novita, Indjra DJ, Bangkit, Edward, Abyan, Novendra, Shafly, Putri, Kartini, Erdi, Ivan, Rodzan, Aryeshah, Mbak Klora, dan selruh rekan KSE serta Thalassinus Fortis 2016 atas dukungannya selama penulis menempuh pendidikan di ITS.
5. Semua pihak yang membantu dan menemani penulis selama menempuh pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan. Penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini, sehingga penulis mengharapakan kritik dan salan dari pembaca untuk

Surabaya, 15 Juli 2020

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL……i
COVER PAGE..... iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI v
LEMBAR PENGESAHAN vii
LEMBAR PENGESAHAN ix
ABSTRAK xi
ABSTRACT..... xiii
KATA PENGANTAR xv
DAFTAR ISI..... xvii
DAFTAR GAMBAR xix
DAFTAR TABEL..... xxi
BAB I PENDAHULUAN..... 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan.....2
1.4 Batasan Masalah.....3
1.5 Sistematika Laporan 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI..... 5
2.1 *Furnace* (Tungku Pembakaran).....5
2.2 Reaksi Pembakaran 6
2.3 Gas Hidrogen.....9
2.4 *Air-Staged Combustion* 10
2.5 *Computational Fluid Dynamics* 11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... 13

3.1 Diagram Alir Penelitian 13
3.2 Desain *Furnace* 15
3.3 Simulasi Pembakaran dengan Metode *Computational Fluid Dynamics* 17
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 21
4.1 Validasi Hasil Simulasi 21
4.2 Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen 22
4.3 Hasil Simulasi Penambahan *Secondary Air* 24
4.4 Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen dan *Secondary Air* 25
4.5 Pembahasan 32
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 39
5.1 Kesimpulan 39
5.2 Saran 39
DAFTAR PUSTAKA 41
LAMPIRAN 43
BIODATA PENULIS 49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 *Furnace* 5
Gambar 2.2 *Air-Staged Combustion* 10
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian 13
Gambar 3.2 Geometri *Furnace* 16
Gambar 3.3 Geometri *Furnace* 18
Gambar 3.4 Parameter Kualitas *Meshing* 18
Gambar 3.5 Hasil *Meshing* Geometri *Furnace* 19
Gambar 4.1 Grafik Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen 23
Gambar 4.2 Grafik Hasil Simulasi Penambahan *Secondary Air* 24
Gambar 4.3 Grafik CO_2 Tiap Variasi 26
Gambar 4.4 Grafik CO Tiap Variasi 27
Gambar 4.5 Grafik NO_x Tiap Variasi 28
Gambar 4.6 Grafik Temperatur *Furnace* Tiap Variasi 29
Gambar 4.7 Grafik Temperatur *Flue Furnace* Tiap Variasi 29
Gambar 4.8 Grafik Perubahan *Total Energy* Tiap Variasi 30
Gambar 4.9 Profil Temperatur Variasi Terbaik 31
Gambar 4.10 Grafik Kadar Air Akibat penambahan Hidrogen 33
Gambar 4.11 Grafik Kadar Air Terhadap CO 34
Gambar 4.12 Grafik Kadar CO terhadap Temperatur 35
Gambar 4.13 Grafik Temperatur terhadap Enthalpy 37

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Temperatur Penyalaan Beberapa Bahan Bakar 6
Tabel 2.2 Karakteristik Hidrogen 9
Tabel 3.1 Variasi Penelitian Tugas Akhir. 14
Tabel 3.2 Dimensi Geometri *Furnace* 15
Tabel 3.3 Komposisi Bahan Bakar *Furnace* 16
Tabel 3.4 Komposisi Oxidizer 16
Tabel 3.5 Komposisi Penambahan Hidrogen 17
Tabel 3.6 Kualitas Hasil *Meshing* Geometri *Furnace* 19
Tabel 3.7 Kondisi Batas 20
Tabel 4.1 Validasi *Grid Indpendence* 22
Tabel 4.2 Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen 22
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen 24
Tabel 4.4 Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen dan *Secondary Air* 25
Tabel 4.5 Hasil Terbaik Variasi 36

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu kegiatan konversi energi yang tidak dapat dilepaskan dalam kegiatan manusia adalah pembakaran. Aplikasi paling sederhana yang dapat ditemukan dalam dunia industri adalah pembakaran menggunakan *furnace*. Aktivitas pembakaran tersebut merupakan langkah paling sederhana untuk melakukan konversi energi, akan tetapi kegiatan tersebut juga dapat memengaruhi lingkungan akibat emisi gas hasil pembakaran yang dapat membahayakan kesehatan manusia serta merusak keaadaan alam. Terdapat berbagai jenis emisi gas buang, diantaranya adalah karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), nitrogen oxida (NO_X), dan hidrokarbon (HC). Sebagai contoh, gas nitrogen oxida menjadi salah satu penyebab umum terjadinya hujan asam dan penipisan lapisan ozon. Menurut data *World Bank* pada tahun 2012 produksi NO_X sebesar tiga juta metrik ton yang setara dengan tiga milyar metrik ton CO_2.

Berbagai macam solusi dikembangkan untuk mengurangi emisi gas buang pembakaran, diantaranya melakukan pembakaran dengan metode *Moderate and Intense Low-Oxygen Dilution* (MILD) yang mempunyai emisi 3% lebih rendah daripada pembakaran secara konvensional (G. Wang, 2019). Selain metode MILD *combustion,* injeksi bahan bakar *premixed* dan *non-premixed* juga memengaruhi hasil produksi emisi, kedua metode tersebut mempunyai perbedaan pada *mass flow rate* dan persebaran temperature hasil pembakaran (Xiao Yang, 2019). Injeksi bahan bakar *premixed* merupakan kondisi dimana bahan bakar dicampur dengan oxidator sebelum terjadinya pembakaran, sedangkan injeksi *non-premixed* mempertemukan bahan bakar dan oksidator dari sumber yang berbeda. Selain itu berdasarkan penelitian yang dilakukan Hao Zhou, penambahan separasi pada *swirl burner furnace* juga dapat mengurangi produksi NO_X (Hao Zhou, 2019). Metode lain yang dapat digunakan dikemukakan oleh Jixau Shen dengan membuat *air-staged combustion* dimana hasil penelitian terbaik dapat menurunkan hingga 48.7% emisi NO_X (Jiaxu Shen, 2018). Metode *air-staged combustion* dilakukan dengan

menginjeksi udara pada bagian tengah ruang bakar dengan jumlah tertentu sehingga pembakaran terjadi dalam kondisi yang kaya akan udara (oksidator).

Selain metode yang telah disebutkan, menurut Can Yilmaz, dengan melakukan penambahan hidrogen untuk menggantikan CO sebagai *reductant* dapat menurunkan emisi NO_X pada reaksi pembakaran (Can Yilmaz, 2017). Penambahan hidrogen dapat menurunkan emisi karena oksigen yang bertemu dengan H_2 akan teroksidasi menjadi air, hal ini membuat konsentrasi NO yang dihasilkan oleh oksidasi N_2 akan menjadi lebih rendah apabila dibandingkan dengan tidak adanya penambahan hidrogen pada pembakaran (Li Jingding, 1998). Selain penurunan produksi NO_X, menurut percobaan yang dilakukan oleh Shivaprasad pada *Spark Ignition* (SI) *gasoline engine*, penambahan hidrogen pada proses pembakaran dapat meningkatkan efisiensi volumetrik (Shivaprasad K V, 2014). Adapun penelitian ini akan membahas lebih lanjut bagaimana efek yang ditimbulkan oleh penambahan hidrogen pada proses pembakaran yang terjadi pada *furnace* dengan menggunakan metode *air-staged combustion*, untuk mengurangi emisi gas buang. Penelitian akan dilakukan dengan melihat karakteristik masing-masing penambahan hidrogen dan *air-staged combustion* serta kombinasi antara keduanya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah yang diangkat dalam tugas akhir ini, yaitu:

a) Bagaimana pengaruh penambahan hidrogen pada bahan bakar *furnace* terhadap emisi gas buang yang dihasilkan?
b) Bagaimana pengaruh *air-staged combustion* pada *furnace* terhadap emisi gas buang yang dihasilkan?
c) Bagaimana pengaruh penambahan hidrogen pada bahan bakar *air-staged combustion furnace* terhadap emisi gas buang yang dihasilkan?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan penulisan tugas akhir ini, yaitu:

a) Menganalisis pengaruh penambahan hidrogen pada bahan bakar *furnace* terhadap emisi gas buang yang dihasilkan

b) Menganalisis pengaruh *air-staged combustion* pada *furnace* terhadap emisi gas buang yang dihasilkan.
c) Menganalisis pengaruh penambahan hidrogen pada bahan bakar *air-staged combustion furnace* terhadap emisi gas buang yang dihasilkan.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini antara lain:

a) Jenis pembakaran yang digunakan adalah *non-premixed combustion.*
b) Ruang bakar yang digunakan bertipe *air-staged furnace* dengan variasi *secondary air* 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40%.
c) Variasi penambahan hidrogen yang digunakan adalah 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%.
d) Bentuk geometri *furnace chamber* berdasarkan pada model yang dilakukan penelitian sebelumnya (Jiaxu Shen, 2018).
e) Bahan bakar yang digunakan adalah natural gas berdasarkan penelitian sebelumnya berupa CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, C_5H_{12}, dan C_6H_{14} (KM Dabrowski, 2019).
f) Simulasi untuk mengetahui profil aliran menggunakan metode *Computational Fluid Dynamc* dengan persaman model turbulensi k-epsilon.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini tersusun atas lima bagian. Pertama, pendahuluan yang menjelaskan latar belakang permasalahan, rumusan masalah, tujuan, serta batasan masalah dalam tugas akhir ini. Kedua, tinjauan pustaka yang merupakan serangkaian teori pendukung yang digunakan dalam penyelesaian tugas akhir ini. Ketiga metodologi penelitian yang merupakan langkah yang dilakukan dalam proses penelitian. Keempat, hasil dan pembahasan yang memuat data hasil penelitian yang telah dilakukan. Kelima, kesimpulan dan saran dari penelitan yang telah dilakukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 *Furnace* (Tungku Pembakaran)

Furnace atau biasa disebut dengan tungku pembakaran merupakan sebuah alat yang digunakan untuk pemanasan. *Furnace* sangat banyak digunakan dalam dunia industri seperti pembuatan keramik, ekstraksi logam dari bijih, hingga penggunaan pada kilang minyak dan berbagai pabrik. Adapun bahan bakar yang dgunakan pada *furnace* pada umumnya adalah gas alam termasuk *Liquefied Petroleum Gas* (LPG), bahan bakar minyak, atau batu bara. Efisiensi dari *furnace* yang umumnya digunakan mempunyai efisiensi yang sangat rendah yakni tujuh persen. Angka tersebut disebabkan oleh suhu operasi yang tinggi dalam *furnace*.

Gambar 2.1 *Furnace*

Dimensi *furnace* dan kemampuan dalam menghasilkan panas dapat ditentukan berdasarkan perhitungan sesuai fungsi dan kebutuhannya. Contohnya *furnace* untuk pembangkit listrik tentunya memerlukan dimensi yang besar, karena untuk menghasilkan uap pada boiler diperlukan energi panas yang juga cukup besar. Material yang digunakan pada *furnace* juga ditentukan sesuai dengan kebutuhan dan energi apa yang nantinya akan digunakan, dapat menggunakan isolasi keramik, maupun bata tahan api. Secara luas *furnace* dibagi menjadi dua jenis berdasarkan metode pembangkitan panasnya, yakni menggunakan bahan bakar dan menggunakan listrik.

2.2 Reaksi Pembakaran

Pembakaran merupakan sebuah reaksi kimia yang melibatkan material yang dapat terbakar dengan oksidator pada kondisi tertentu. Pembakaran dapat terjadi apabila terpenuhi tiga hal utama yaitu bahan bakar, oksigen, dan pemantik atau sumber panas. Akan tetapi pada saat kondisi tertentu suatu bahan bakar dapat terbakar tanpa adanya pemantik sehingga disebut sebagai pembakaran spontan. Pembakaran tipe ini dapat terjadi akibat adanya perubahan tekanan atau adanya reaksi kimia lainnya yang dapat menghasilkan panas. Secara umum, kecepatan dan efisiensi pembakaran bergantung pada *time*, *temperature*, dan turbulensi (Muliawati, 2008).

- *Time* (Waktu)

  Sebuah reaksi kimia memerlukan durasi waktu tertentu untuk terjadinya pembakaran, dimana bahan bakar yang akan terbakar harus berjumlah sesuai dengan waktu yang ditentukan dalam terjadinya pembakaran.

- *Temperature*

  Proses terjadinya pembakaran pada suatu bahan bakar memerlukan temperatur tertentu untuk mencapi kondisi terbakar. Nilai temperatur tiap komposisi kimia masing-masing zat disebut sebagai temperatur penyalaan. Adapun temperatur penyalaan untuk beberapa material bahan bakar dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2.1 Temperatur Penyalaan Beberapa Bahan Bakar

JENIS BAHAN /ZAT	SIMBOL KIMIAWI	TEMPERATUR PENYALAAN	
		C	F
Sulfur (belerang)	S	243	470
Bituminous Coal		408	766
Semi – Bituminous Coal		466	870
Anthractive		496	925
Acetylene	C_2H_2	482	900
Ethane	C_2H_4	538	1000
Hydrogen	H_2	610	1130
Methane	CH_4	650	1130
Carbon Monoxide	CO	654	1210

- Turbulensi

  Oksigen yang akan bertemu dengan bahan bakar harus diatur sedemikian rupa agar dapat bercampur dengan bahan bakar dengan sempurna. Terdapat kemungkinan oksigen di dalam udara yang dialirkan ke ruang bakar langsung mengalir menuju cerobong asap tanpa adanya interaksi dengan bahan bakar. Dengan adanya turbulensi udara terhadap bahan bakar maka potensi terjadinya pembakaran secara sempurna jauh lebih tinggi. Apabila temperatur ruang bakar lebih rendah dibandingkan dengan temperatur penyalaan maka campuran udara dan bahan bakar tidak akan terbakar dengan baik, begitu pula apabila hembusan udara terlalu tinggi dapat menyebabkan turbulensi yang juga tidak baiik untuk pembakaran. Proses tersebut dapat menyebabkan bahan bakar terbakar diluar zona pembakaran.

Dalam bahasa kimia, pembakaran juga dapat didefinisikan sebagai kondisi dimana terjadinya oksidasi oleh bahan bakar. Proses tersebut akan menghasilkan panas yang disebut dengan proses eksotermis. Apabila diasumsikan bahwa pembakaran memerlukan pembakaran dari udara, dimana udara terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen, maka reaksi stokiometri pembakaran dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$C_mH_n + (m + -) O_2 + 3,76(m + -)N_2 \quad mCO_2 + - H_2O + 3,76 (m + -)N_2 \qquad (2.1)$$

Persamaan diatas merupakan penyederhanaan dari proses pembakaran sempurna yang cukup kompleks (Barca, 2012). Apabila pembakaran yang terjadi tidak sempurna maka hasil persamaan berupa CO_2 dan air tidak akan terbentuk melainkan terbentuknya hasil oksidasi parsial yaitu CO, CO_2, dan H_2O

2.2.1 Campuran Udara-Bahan Bakar

Pada proses pembakaran salah satu faktor penting yang perlu diperhatikan yakni bahan bakar, oksigen, reaksi kimia, dan kalor. Selain faktor tersebut pencampuran antara bahan bakar dan udara yang akan digunakan dalam proses pembakaran harus diperhitungkan jumlah dan komposisi untuk masing-masing komponen untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna. Terdapat beberapa metode rasio pencampuran bahan bakar dan udara yang sering digunakan,

diantaranya adalah *Air-Fuel Ratio* (AFR), *Fuel-Air Ratio* (FAR), dan Rasio Ekivalen ( ).

- *Air-Fuel Ratio* (AFR)

  Sesuai dengan penamaannya, metode ini menunjukan perbandingan antara massa udara dengan bahan bakar yang digunakan dalam pembakaran. Metode ini paling sering digunakan dalam pembakaran untuk melambangkan rasio bahan bakar dan udara, adapun AFR dirumuskan sebagai berikut:

  $$AFR = \frac{\quad}{\quad} = \frac{\quad}{\quad} \tag{2.2}$$

  Apabila nilai AFR secara aktual lebih besar maka jumlah udara yang ada saat pembakaran lebih banyak dibandingakn dengan bahan bakar, sehingga pada kondisi tersebut disebut miskin bahan bakar, sedangkan apabila nilai aktual lebih kecil maka pada kondisi ini dikatakan kaya bahan bakar.

- *Fuel-Air Ratio* (FAR)

  FAR merupakan rasio yang berkebalikan dengan AFR, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

  $$FAR = \frac{\quad}{\quad} = \frac{\quad}{\quad} \tag{2.3}$$

- *Equivalent Ratio* ( )

  Rasio ekivalen dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio *air-fuel* kondisi stoikiometrik dengan rasio *air-fuel* pada kondisi aktual. Perbandingan ini juga berlaku pada rasio *fuel air*. Adapun rumus rasio ekivalen adalah sebagai berikut:

  $$= \frac{\quad}{\quad} = \frac{\quad}{\quad} \tag{2.4}$$

  Apabila > 1 maka terdapat kelebihan bahan bakar sehingga disebut sebagai kondisi kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*), kemudian saat < 1 maka kondisi ini disebut sebagai miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*). Sedangkan apabila = 1 maka terjadi pembakaran secara sempurna.

2.2.2 Udara Berlebih (*Excess Air-XSA*)

Dalam reaksi pembakaran, campuran antara bahan bakar dan udara dengan nilai yang pasti pada kondisi aktual sangat sulit untuk dipenuhi, sehingga pada umumnya pembakaran dilakukan dengan memberikan udara yang berlebih untuk memastikan terjadinya pembakaran secara sempurna. *Excess air* didefinisikan sebagai udara

yang diberikan melebihi jumlah udara teoritis pada proses pembakaran. Adapun perhitungan udara berlebih dapat dilihat pada rumus berikut:

$$\%XSA = \frac{\quad}{\quad} \tag{2.5}$$

Atau,

$$\%XSA = \frac{\quad}{\quad} \tag{2.6}$$

2.3 Gas Hidrogen

Hidrogen merupakan salah satu unsur yang mempunyai flammability yang cukup besar apabila dibandingkan dengan bahan bakar lainnya, sehingga hidrogen dapat digunakan pada *Internal Combustion Engine* (*ICE*) dengan rasio campuran bahan bakar dan udara yang cukup variatif (Shivaprasad K V, 2014). Hidrogen merupakan elemen paling ringan dimana delapan kali lebih ringan dibandingkan dengan metana, kemudian hidrogen juga membutuhkan pengapian yang lebih rendah dan mempunyai panas pembakaran yang sangat tinggi. Dalam susunan tabel periodik, hidrogen disimbolkan dengan huruf H dengan nomor atom 1. Pada kondisi standar hidrogen tidak mempunyai warna, bau, bersifat non logam, bervalensi tunggal dan merupakan gas yang bersifat mudah terbakar. Senyawa hidrogen biasanya sangat jarang dijumpai dalam bentuk yang alami, senyawa ini pun biasanya dihasilkan dari proses industri dengan berbagai senyawa hidrokarbon contohnya metana (Nasution, 2016). Saat dicampur dengan oksigen pada komposisi tertentu dengan temperatur 560 ^{o}C, hidrogen dapat meledak dengan sendirinya. Adapun karakteristik dari gas hidrogen dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.2 Karakteristik Hidrogen

Parameter	Keterangan
Titik lebur	-259,14^{0}C
Titik didih	-252,87 ^{0}C
Warna	tidak berwarna
Bau	tidak berbau
Densitas	0,08988 g/cm^{3} pada 293 K
Kapasitas panas	14,304 J/g^{0}K

(Sumber; http://id.wikipedia.org/wiki/Hidrogen,2013)

Dewasa kini, hidrogen menjadi salah satu senyawa yang digunakan sebagai bahan bakar karena sifatnya yang ramah lingkungan dengan kadar emisi yang

cukup rendah. Adapun reaksi kimia yang terbentuk dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$H_2 + O_2 \quad OH + O \tag{2.7}$$

$$O + H_2 \quad OH + H \tag{2.8}$$

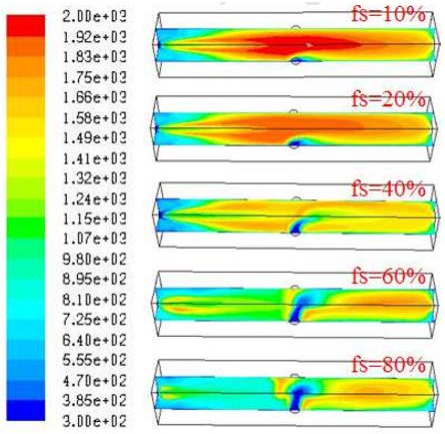
Akibat adanya reaksi hidrogen, maka CO akan beroksidasi dengan reaksi sebagai berikut:

$$CO + OH \quad CO_2 + H \tag{2.9}$$

$$H + O_2 \quad OH + O \tag{2.10}$$

Berdasarkan persamaan kimia diatas, dapat dilihat bahwa dengan adanya penambahan hidrogen, maka akan oksigen tidak sepenuhnya digunakan untuk mengoksidasi N_2 yang dapat menghasilkan NO, tidak hanya itu produksi OH dari hasil oksidasi hidrogen akan mencegah terbentuknya CO yang berbahaya bagi lingkungan, sehingga produksi gas emisi beracun akan menjadi lebih rendah (Li Jingding, 1998).

2.4 *Air-Staged Combustion*



Gambar 2.2 *Air-Staged Combustion*

Terdapat berbagai jenis pembakaran, salah satunya adalah *air-staged combustion* atau biasa disebut dengan pembakaran dengan udara bertingkat. Jenis pembakaran ini dikatakan bertingkat karena terdapat dua *inlet* udara masuk, yang pertama adalah *primary inlet* dan yang kedua adalah *secondary inlet*. Adanya penambahan udara pada *secondary inlet* akan menurunkan kadar NO_X dari pembakaran yang dilakukan (Jiaxu Shen, 2018).

2.5 *Computational Fluid Dynamics*

Computational Fluid Dynamics (*CFD*) merupakan sebuah sistem yang berbasis program komputer yang dapat digunakan untuk meyimulasikan aliran fluida, perpindahan panas, dan berbagai proses fisika lainnya dengan pendekatan numerik. Program ini bekerja dengan memecahkan persamaan Navier-Stokes yang merupakan persamaan umum untuk berbagai fenomena fluida. Terdapat tiga tahap yang perlu diketahui dalam melakukan simulasi CFD yakni:

a. *Pre-Processing*
   Tahap ini dikenal juga sebagai tahap inisialisasi awal, dimana geometri yang akan disimulasikan akan dimasukkan. Pada tahap ini pula terdapat *grid generation* yakni pembagian domain geometri menjadi ukuran yang lebih kecil atau biasa disebut dengan *mesih*. *Meshing* dilakukan untuk melakukan perhitungan tiap titik atau biasa disebut dengan *finite element method*. Dengan menggunakan metode ini, perhitungan dapat menjadi lebih akurat untuk menggambarkan kondisi aktual yang terjadi pada sistem. Pada tahap ini dilakukan penentuan *properties* setiap material yang terlibat dalam simulasi. Setiap *boundary* atau batasan dari simulasi harus ditentukan untuk selanjutnya diolah pada tahap *solver* dimana mesin akan menyelesaikan masalah dengan batasan yang telah ditetapkan.

b. *Solver*
   Pada tahap ini dilakukan perhitungan pada tiap titik, seperti yang telah dijelaskan pada proses sebelumnya yakni dengan *finite element method, finite difference,* dan *spectral method.* Pada tahap ini aproksimasi dari variabel aliran yang tidak diketahui, dihitung dengan menggunakan berbagai fungsi sederhana, selain itu diskritisasi dengan melakukan subtitusi juga digunakan dengan dilanjutkan oleh manipulasi matematis. Adapun solusi yang dhasilkan oleh persamaan aljabar diperoleh dengan metode iteratif atau perhitungan berulang.

c. *Post Processing*
   Tahap ini merupakan proses terakhir dari simulasi CFD, dimana program dapat menampilkan hasil simulasi dalam bentuk visual seperti animasi. Program juga dapat memberkan display *grid,* plot vektor, plot kontur pada permukaan 2D atau 3D, dan lainnya.

Adapun pada *software Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang digunakan terdapat beberapa persamaan atau biasa disebut *solver* untuk menyelesaikan reaksi pembakaran yang terjadi. Adapun persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

Continuity : — + = 0 (2.11)

Species Conservation : —— + ——— = -— ( ) + -1

Momentum : Komponen x

—— + = -— + —— + ——+ ——+ (2.12a)

Komponen y

—— + = -— + —— + ——+ ——+ (2.12b)

Komponen z

—— + = -— + —— + ——+ ——+ (2.12c)

Energy : — — — — —

— — — — ——— ——— ——— ———

——— ——— ——— ——— ——— ——— ———

——— (2.13)

Secara keseluruhan pada *software Computational Fluid Dynamics* (CFD) digunakan pemodelan k-epsilon yang digunakan untuk aliran turbulen, dengan persamaan umum sebagai berikut:

Turbulent Kinetic energy k:

—— + ——— = — — — + 2 (2.14)

Dissipation

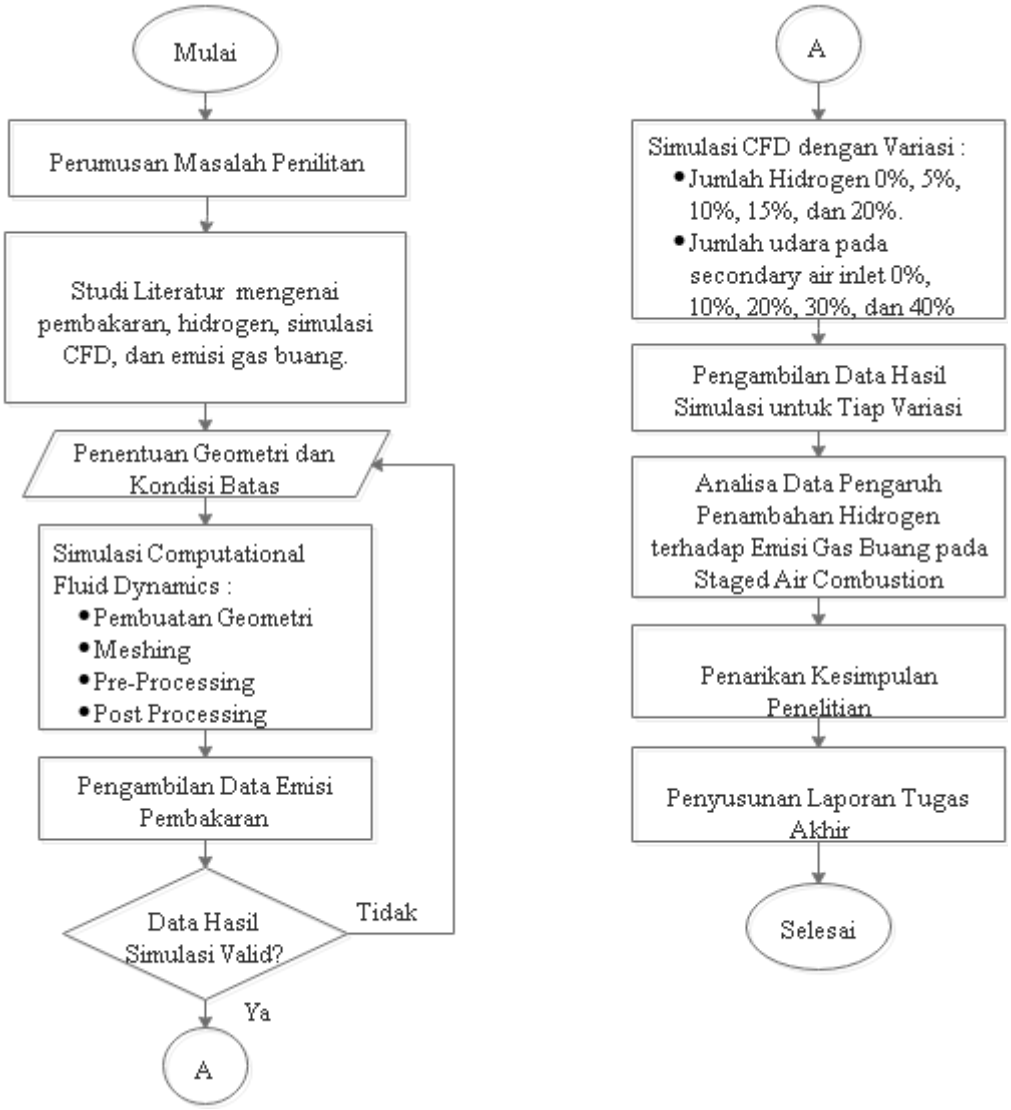
—— + ——— = — — — + – - 2 — (2.15)

Laju perubahan k atau + Transport dari k atau akibat konveksi = Transport dari k atau akibat difusi + laju produksi k atau - Laju destruksi dari k dan .

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Adapun langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir penelitian dibawah ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini diawali dengan perumusan masalah penilitan, yakni tingginya pencemaran udara yang salah satu penyebabnya adalah gas buang yang dihasilkan oleh pembakaran *furnace.* Berbagai rekayasa keteknikan kemudian dapat menjadi solusi untuk mengurangi emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembakaran pada

furnace melalui tahapan kedua yakni studi literatur. Studi literatur yang dilakukan mengenai pembakaran pada *furnace*, efek yang ditimbulkan oleh hidrogen saat pembakaran, kemudian *air-staged combustion*, hingga metode *computational fluid dynamics* (CFD) yang digunakan untuk memodelkan fenomena yang terjadi. Setelah dilakukan studi literatur tahapan berikutnya adalah menentukan geometri dan kondisi batas yang akan diterapkan pada simulasi dengan metode CFD. Geometri yang digunakan didasarkan pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Jiaxu Shen, dkk (2018).

Setelah melakukan penentuan batas dan geometri yang jelas, kemudian dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent 17.1. Adapun tahapan yang dilakukan pada simulasi tersebut adalah *meshing*, *set up* simulasi, kemudian *solution* atau biasa disebut dengan *processing* berdasarkan parameter yang telah ditetapkan sebelumnya, hingga *post-processing* yang digunakan untuk mengekstrak hasil simulasi. Hasil yang diperoleh dari simulasi tersebut selanjutnya divalidasi dengan metode *grid independence* dan perhitungan matematis stokiometri pembakaran. Apabila hasil simulasi yang digunakan sebagai kondisi awal mempunyai selisih kurang dari 10% terhadap langkah validasi yang telah ditetapkan maka simulasi dilanjutkan pada variasi simulasi. Variasi simulasi tersebut berupa kombinasi antara penambahan hidrogen sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dengan penambahan udara pada *secondary air inlet* (*air-staged combustion)* sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% terhadap volume total. Adapun tabel variasi penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variasi Penelitian Tugas Akhir.

Jumlah Kadar Hidrogen	Jumlah Udara *Secondary Inlet*	Variasi
0%	0%	1
	10%	2
	20%	3
	30%	4
	40%	5
5%	0%	6
	10%	7
	20%	8
	30%	9

	40%	10
10%	0%	11
	10%	12
	20%	13
	30%	14
	40%	15
15%	0%	16
	10%	17
	20%	18
	30%	19
	40%	20
20%	0%	21
	10%	22
	20%	23
	30%	24
	40%	25

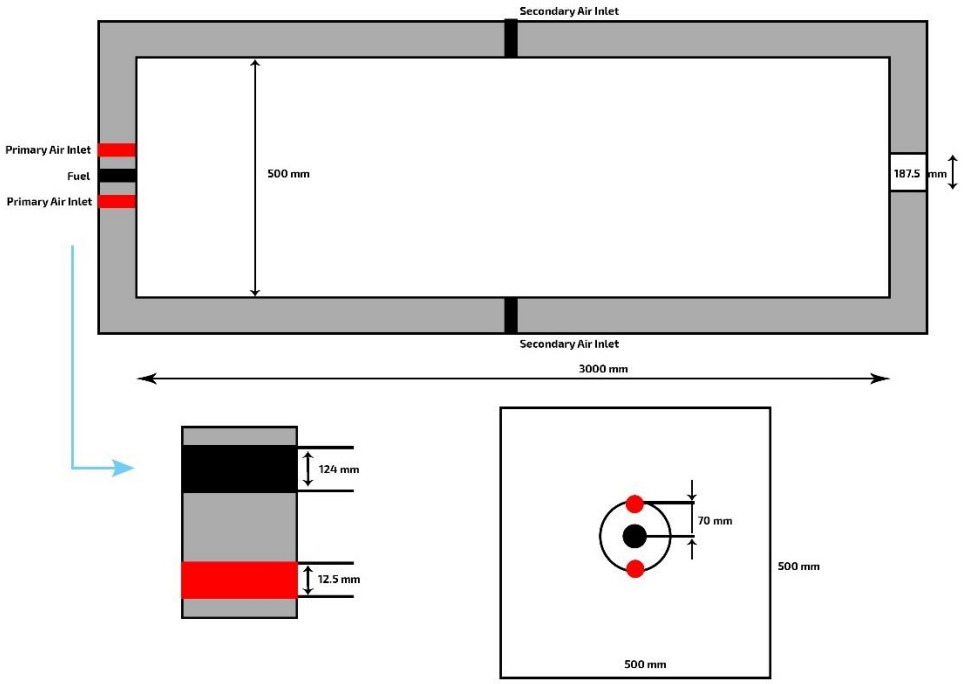
Berdasarkan kombinasi antara kedua parameter yang telah disebutkan, akan diperoleh 25 variasi simulasi yang nantinya akan digunakan sebagai dasar pengambilan kesimpulan hasil penelitian yang telah dilakukan. Setelah dilakukan analisa terhadap hasil simulasi, kemudian dilakukan penulisan laporan tugas akhir.

3.2 Desain *Furnace*

Adapun dimensi dari geometri yang digunakan dalam tugas akhir ini dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan divisulaisasikan oleh Gambar 3.2 Terdapat beberapa perubahan yang diterapkan pada geometri dasar yang telah dilakukan oleh Jiaxu Shen, dkk (2018) diantaranya penambahan inlet sekunder dan inlet udara (*secondary air inlet*) dengan ukuran yang telah disesuaikan.

Tabel 3.2 Dimensi Geometri *Furnace*

Keterangan	**Ukuran (mm)**
Panjang	3000
Lebar	500
Tinggi	500
Volume	0.75 m3
Diameter Inlet Primer	31
Diameter Inlet Sekunder	12.5
Diameter Inlet Udara	12.5
Jarak Inlet Primer dan Sekunder	70
Diameter Outlet	187.5



Gambar 3.2 Geometri *Furnace*

Bahan bakar yang digunakan pada *furnace* diatas adalah *natural gas* dengan komposisi yang didasarkan oleh penelitian KM Dabrowski, dkk (2019) yang dapat dilihat pada Tabel 3.3, sedangkan untuk *oxidizer* yang digunakan adalah udara dengan komposisi sesuai dengan Tabel 3.4.

Tabel 3.3 Komposisi Bahan Bakar *Furnace*

Senyawa	Fraksi Mol	Massa Molar (g/mol)	Massa (g)	Mol	%Massa
CH4	0.8868	16.04	1108.055	69.081	0.7859
C2H6	0.0700	30.07	163.9690	5.453	0.1163
C3H8	0.0207	44.1	71.112	1.613	0.0504
C4H10	0.0019	58.12	8.603	0.148	0.0061
C5H12	0.0008	72.15	4.496	0.062	0.0032
C6H14	0.0009	86.18	6.042	0.07	0.0043
N2	0.0137	28.0134	29.896	1.067	0.0212
CO2	0.0052	44.01	17.827	0.405	0.0126
Jumlah	1.0000	18.1	1410.000	77.899	1

Tabel 3.4 Komposisi Oxidizer

Senyawa	ppmv	in %	Density (kg/m3)
N2	780,760	78.08%	1.25
O2	209,460	20.95%	1.429
Ar	9,340	0.93%	1.661
CO2	439.75	0.04%	1.977
Jumlah	1,000,000	100.00%	1.292

Adapun persamaan reaksi pembakaran yang terjadi pada bahan bakar *natural gas* dapat dilihat pada persamaan berikut ini:

$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ (3.1)

$C_2H_6 + 7/2O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$ (3.2)

$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$ (3.3)

$C_4H_{10} + 6.5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$ (3.4)

$C_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O$ (3.5)

$C_6H_{14} + 9.5O_2 \rightarrow 6CO_2 + 7H_2O$ (3.6)

Berdasarkan tabel 3.1, dilakukan penambahan hidrogen pada bahan bakar *natural gas* dengan cara mengurangi fraksi mol CH_4 dan menambahkan fraksi mol H_2 pada bahan bakar. Adapun komposisi penambahan hidrogen untuk variasi 0% hingga 40% dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.5 Komposisi Penambahan Hidrogen

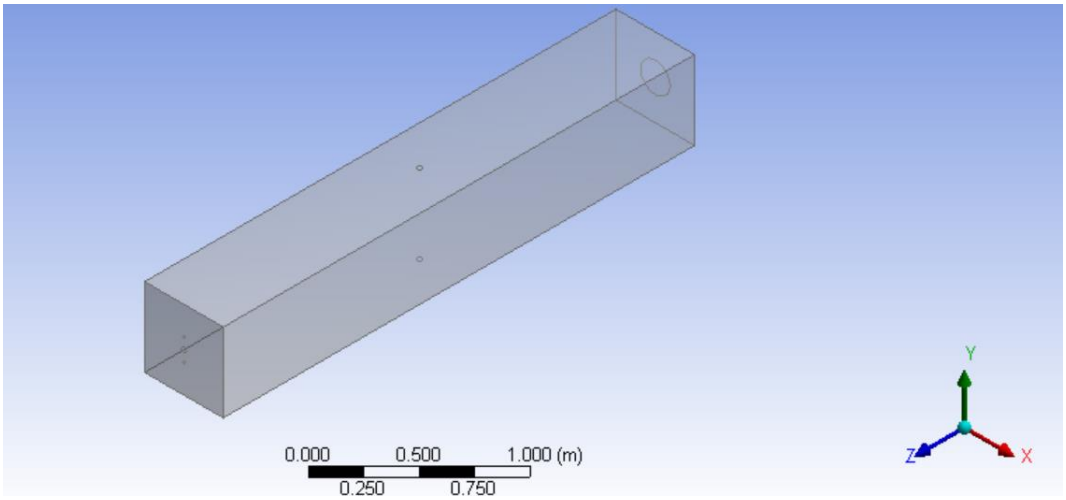
Penambahan Hidrogen	**Fraksi Mol CH_4**	**Fraksi Mol H_2**	**Mol CH_4**	**Mol H_2**
0%	0.8868	0	69.081	0
10%	0.8425	0.0443	65.63007	3.450934
20%	0.7981	0.0887	62.17134	6.909658
30%	0.7538	0.133	58.72041	10.36059
40%	0.7094	0.1774	55.26168	13.81932

3.3 Simulasi Pembakaran dengan Metode *Computational Fluid Dynamics*

Simulasi pembakaran yang dilakukan dengan metode CFD menggunakan ANSYS 17.1 mempunyai beberapa tahapan sebagai berikut:

3.3.1 Pembuatan Geometri

Geometri yang digunakan pada *software* CFD dibuat menggunakan perangkat lunak tambahan yakni *Autodesk Inventor Professional 2017* dengan format .stp kemudian dimasukkan ke *design modeler*. Pada bagian ini pula dilakukan pemberian nama pada setiap daerah yang akan dikenai kondisi batas. Kondisi batas diberikan dengan memilih setiap sisi dari *geometry* dengan pemberian nama kondisi batas yaitu *wall* yang terdiri atas 6 sisi *geometry*. Kemudian outlet yang terletak pada sisi bagian belakang *geometry*, selanjutnya inlet primer dan inlet sekunder yang terletak pada sisi bagian depan *geometry*. Sedangkan untuk *secondary air inlet* yang digunakan sebagai *inlet* udara tambahan berada pada kedua sisi samping *geometry* yang dengan susunan simetris.



Gambar 3.3 Geometri *Furnace*

3.3.2 *Meshing*

Meshing merupakan salah satu tahapan penting yang menentukan bagaimana proses perhitungan yang dilakukan oleh sistem, dimana pada proses ini dilakukan pembagian geometri menjadi bagian kecil sebagai kontrol volume. Pada masing-masing kontrol volume tersebut nantinya akan dilakukan perhitungan matematis pembakaran. Ukuran *meshing* dari suatu geometri juga sangat menentukan memori dan waktu yang diperlukan untuk melakukan perhitungan saat simulasi dijalankan.

Adapun parameter yang digunakan untuk menentukan kualitas *meshing* adalah *skewness* dan *orthogonal quality*. Nilai *skewness* mendekati 0 menunjukkan bahwa *mesh* yang dibuat dalam kondisi sangat baik, dan apabila nilai *skewness* mendekati atau bernilai 1, maka hasil *mesh* yang telah dibuat berada pada nilai yang sangat buruk. Sedangkan apabila nilai *orthogonal quality* mendekati 1 maka kualitas *mesh* sangat baik dan sebaliknya apabila nilai mendekati 0 maka kualitas *mesh* sangat buruk. Hasil *meshing* yang diperoleh pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Skewness mesh metrics spectrum:

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

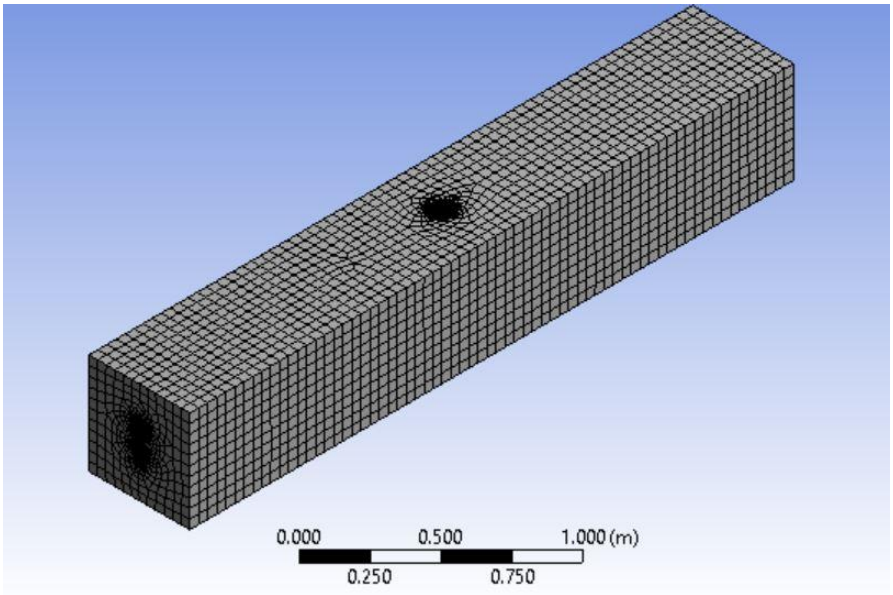
Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Gambar 3.4 Parameter Kualitas *Meshing*

Tabel 3.6 Kualitas Hasil *Meshing* Geometri *Furnace*

Parameter Nilai	*Skewness*	*Orthogonal Quality*
Minimum	9.56E-04	3.00E-02
Maximum	0.99983	1
Average	0.36488	0.77878
Standarad Deviation	0.29238	0.27212



Gambar 3.5 Hasil *Meshing* Geometri *Furnace*

3.3.3 Kondisi Batas Simulasi

Terdapat beberapa kondisi batas yang diterapkan sebagai *set up* simulasi sebelum dilakukan tahap perhitungan atau *processing*. Adapun jenis *viscous model* yang digunakan pada simulasi ini adalah *k-epsilon standard* dengan *standar wall function.* Kemudian diberikan pemodelan radiasi dan absorpsi yaitu P1 model, kondisi tersebut juga didukung dengan pemberian temperature 1500 K pada dinding *furnace* dengan *internal emissivity* sebesar 0.6. Simulasi ini menggunakan jenis pembakaran *non-premixed* combustion. Solution *Method* yang digunakan pada *solver Fluent* adalah SIMPLE dengan pengaturan *spatial discretization default.* Sedangkan nilai *under-relaxation factors* pada *solution controls* juga diatur pada kondisi *default.*

Tabel 3.7 Kondisi Batas

Zone	Parameter	Keterangan
Inlet_Primer	Turbulent Intensity %	5
	Hydraulic Diameter (mm)	31
	Type	*Mass Flow Inlet*
Inlet_Sekunder	Turbulent Intensity %	5
	Hydraulic Diameter (mm)	12.5
	Type	*Mass Flow Inlet*
Outlet	Gauge Pressure (Pascal)	0
	Turbulent Intensity %	5
	Hydraulic Diameter (mm)	187.5
	Type	*Pressure Outlet*
Wall	Temperature (K)	1500
	Internal Emissivity	0.6
NOx Model (All Domain)	Thermal NOx	*Activated*
	Prompt NOx	
	PDF Mode	*Temperature*

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Hasil Simulasi

Validasi hasil simulasi merupakan tahap membandingkan hasil simulasi yang diperoleh terhadap teori atau eksperimen maupun keduanya. Validasi hasil simulasi yang dapat ditoleransi apabila selisih antara kondisi aktual dan simulasi (deviasi) dibawah 10% (William, 2002). Adapun jenis validasi hasil simulasi yang dilakukan pada penelitian ini, yaitu validasi terhadap teori dan validasi menggunakan metode *grid independence.* Validasi hasil simulasi terhadap teori didasarkan pada perhitungan *enthalpy* pembakaran yang terbentuk saat terjadinya pembakaran, sehingga diperoleh nilai temperatur *furnace*. Sedangkan validasi menggunakan metode *grid independence* menunjukkan validitas dari *software Fluent* yang melakukan perhitungan dengan pendekatan *computational fluid dynamics*. Ketika terjadi perubahan jumlah *nodes* dan *elements* pada kualitas *mesh* suatu geometri, hasil simulasi dari setiap perubahan tersebut diharapkan tidak mengalami perubahan signifikan untuk setiap variasinya, sehingga data hasil simulasi menjadi lebih akurat dan berlaku untuk setiap jenis kualitas *mesh.*

Validasi hasil simulasi terhadap teori dilakukan pada sistem adiabatik dengan bahan bakar CH_4 murni sebesar 24.8 kilomol. Berdasarkan hasil perhitungan teoritis, temperatur *furnace* yang diperoleh adalah 1275 Kelvin, sedangkan temperatur *furnace* pada hasil simulasi adalah 1264.712 Kelvin. Sehingga *error* hasil simulasi terhadap teori adalah 0.806%. Nilai deviasi tersebut sangat baik karena berada dibawah 10%. Sedangkan validasi metode *grid independence* dilakukan dengan menggunakan tiga jenis variasi kualitas *mesh* geometri terhadap *mesh* acuan. Adapun parameter hasil yang digunakan sebagai acuan adalah nilai temperatur rata-rata pada *furnace*. Kondisi acuan kualitas *mesh* adalah simulasi dengan jumlah *nodes* 20061 dan jumlah *elements* sebanyak 21910. Kondisi acuan ini telah memenuhi standar kualitas *meshing* merujuk pada sub bab 3.3.2. Adapun perbandingan hasil simulasi untuk masing-masing kualitas *mesh* dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Validasi *Grid Indpendence*

Parameter	Variasi Acuan	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3
Jumlah *Nodes*	20061	12688	13207	4942
Jumlah *Element*	21910	12485	15982	5488
Temperatur (K)	1697.27	1701.87	1714.57	1733.06
Deviasi (%)	-	0.27085	1.01899	2.10862

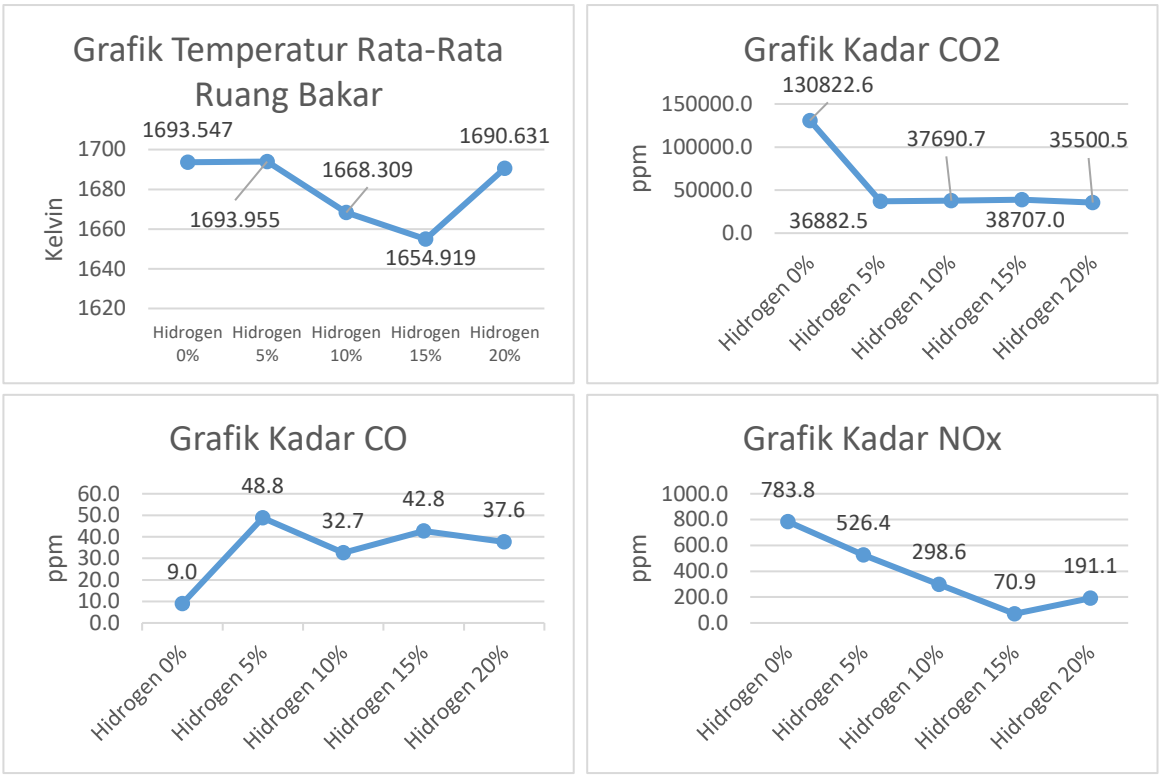
Berdasarkan hasil validasi yang ditunjukkan Tabel 4.1 dapat ditarik kesimpulan bahwa hasil simulasi yang dilakukan menggunakan *software Fluent* telah memenuhi standar. Nilai pada tabel tersebut menunjukkan bahwa apabila dilakukan simulasi dengan geometri yang sama pada kondisi kualitas *mesh* tertentu, maka hasil simulasi yang diperoleh mempunyai *error* yang kecil terhadap hasil simulasi dengan kualitas *mesh* lainnya.

4.2 Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen

Pengaruh penambahan hidrogen pada simulasi pembakaran *furnace* ini dapat dianalisa melalui berbagai faktor diantaranya jumlah polutan yang dihasilkan serta distribusi temperatur pada ruang bakar. Kedua faktor tersebut ditetapkan sebagai parameter karena pembakaran yang terjadi diharapkan mempunyai tingkat emisi yang rendah dengan mempertahankan temperatur *furnace*. Adapun data hasil simulasi penambahan hidrogen dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.1

Tabel 4.2 Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen

Keterangan	Hidrogen 0%	Hidrogen 5%	Hidrogen 10%	Hidrogen 15%	Hidrogen 20%
CO2 (ppm)	130822.6	36882.5	37690.7	38707.0	35500.5
CO (ppm)	9.0	48.8	32.7	42.8	37.6
Nox (ppm)	783.8	526.4	298.6	70.9	191.1
NOx Density (kg/m3)	0.00729654	0.0047248	0.00278163	0.000562257	0.001910626
T rata-rata (k)	1693.547	1693.955	1668.309	1654.919	1690.631
T Max (k)	2422.799	2411.391	2406.5	2034.024	2089.573
T Min (k)	358.5576	344	317	299	338.0172



Gambar 4.1 Grafik Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen

Berdasarkan data hasil simulasi penambahan hidrogen dapat ditarik kesimpulan bahwa seiring ditambahkannya hidrogen pada bahan bakar terjadi penurunan CO_2 dan NO_x disertai kenaikan CO. Berdasarkan gambar 4.1, temperatur rata-rata ruang bakar mengalami penurunan terhadap kondisi acuan (hidrogen 0%). Penurunan temperatur tertinggi terjadi pada penambahan kadar hidrogen 15%, dimana temperatur semula 1693.547 Kelvin menjadi 1654.919 Kelvin, artinya terjadi penururnan temperatur rata-rata *furnace* sebesar 2.27%. Apabila emisi gas buang hasil pembakaran dianalisa lebih lanjut, terdapat penurunan emisi gas buang yang signifikan pada kadar CO_2 dan NOx, dimana kadar CO_2 saat hidrogen 0% sebesar 130822.6 ppm menjadi 35500.5 ppm atau setara dengan penurunan 65% saat kadar hidrogen ditingkatkan menjadi 20%. Sedangkan kadar NO_x saat hidrogen 0% sebesar 783.8 ppm menjadi 70.9 ppm atau setara dengan penurunan 90.95% ketika kadar hidrogen ditingkatkan menjadi 15%. Berdasarkan gambar 4.1, kadar CO meningkat cukup signifikan untuk setiap penambahan kadar hidrogen, dengan kadar tertinggi sebesar 48.8 ppm

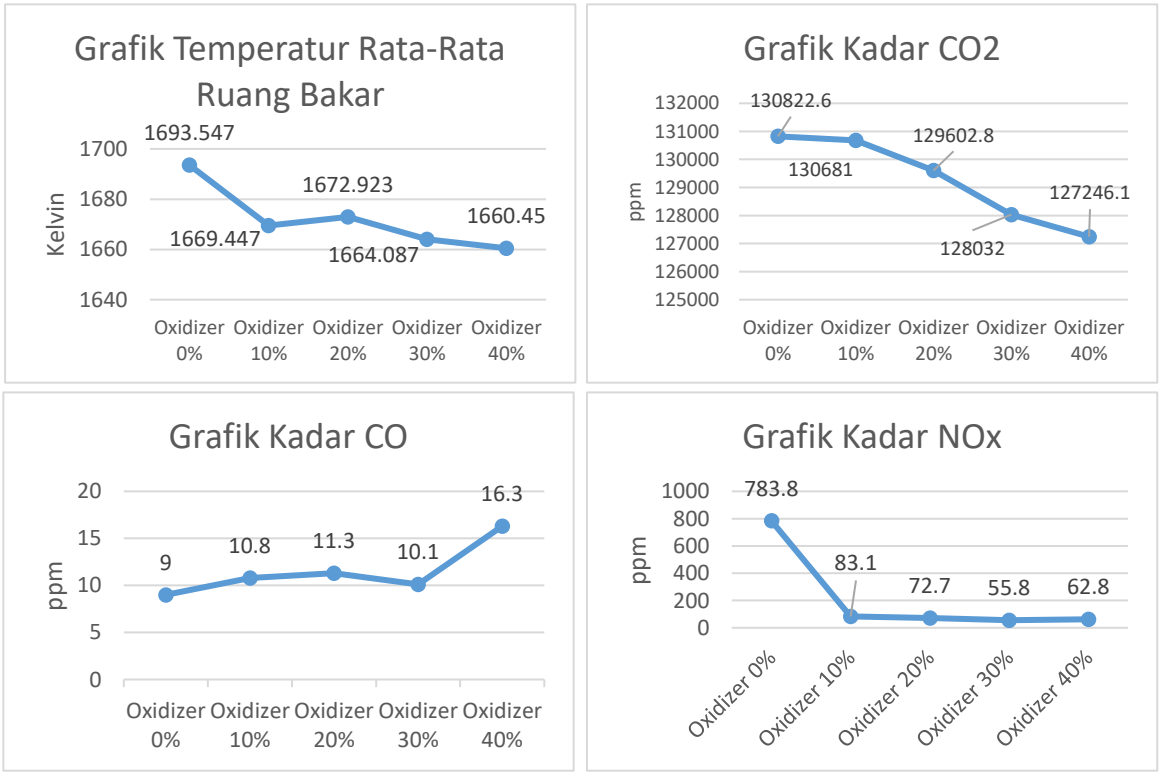
4.3 Hasil Simulasi Penambahan *Secondary Air*

Penambahan *secondary air* dilakukan pada bagian tengah *furnace* melalui dua lubang inlet. Adapun parameter yang digunakan pada hasil simulasi sama dengan parameter pada sub bab 4.2 yang membahas mengenai penambahan hidrogen pada bahan bakar. Adapun hasil simulasi penambahan *secondary air* dapat dilihat pada tabel 4.3 dan gambar 4.2.

Tabel 4.3 Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen

Keterangan	*Oxidizer* 0%	*Oxidizer* 10%	*Oxidizer* 20%	*Oxidizer* 30%	*Oxidizer* 40%
CO_2 (ppm)	130822.6	130681	129602.8	128032	127246.1
CO (ppm)	9	10.8	11.3	10.1	16.3
Nox (ppm)	783.8	83.1	72.7	55.8	62.8
NOx *Density* (kg/m3)	0.00729654	0.000836695	0.00067241	0.000530026	0.000540024
T rata-rata	1693.547	1669.447	1672.923	1664.087	1660.45
T Max	2422.799	2105.696	2080.304	1889.246	2064.963
T Min	358.5576	310.1587	318.7431	331.8992	340.1977

Gambar 4.2 Grafik Hasil Simulasi Penambahan *Secondary Air*



Berdasarkan hasil simulasi penambahan *secondary air* pada *furnace,* terjadi penurunan kadar emisi gas buang untuk CO_2 dan NO_x. Seiring dengan bertambahnya komposisi secondary air, terjadi penurunan temperatur rata-rata pada ruang bakar *furnace*. Penurunan temperatur ruang bakar tertinggi pada saat jumlah *secondary air* 40% terhadap volume *furnace*. Temperatur ruang bakar yang semula 1693.547 Kelvin mengalami penurunan menjadi 1660.45 Kelvin atau penurunan sebesar 1.95%. Sedangkan apabila emisi gas buang ditinjau, hasil simulasi menunjukkan bahwa kadar CO_2 dan NO_x menunjukkan angka yang cukup signifikan, berbeda halnya untuk kadar CO yang mengalami kenaikan signifikan pada kondisi *secondary air* 40% terhadap volume *furnace*. Kadar CO mengalami kenaikan dari 9 ppm menjadi 16.3 ppm, atau terjadi kenaikan sebesar 1.81 kali terhadap kondisi normal. Kadar NO_x mengalami penurunan sebesar 92.88% dari 783.8 ppm menjadi 55.8 ppm. Penurunan kadar NO_x pada saat dilakukan penambahan *secondary air* lebih besar apabila dibandingkan dengan penambahan hidrogen pada bahan bakar.

4.4 Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen dan *Secondary Air*

Simulasi penambahan hidrogen yang dikombinasikan dengan penambahan *secondary air* dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan penurunan kadar emisi gas buang dengan penurunan temperatur yang paling rendah. Data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 hanya memberikan informasi seberapa besar perubahan yang dihasilkan oleh setiap variasi terhadap kondisi acuan yakni saat kadar oksigan dan *secondary air* sebesar 0%.

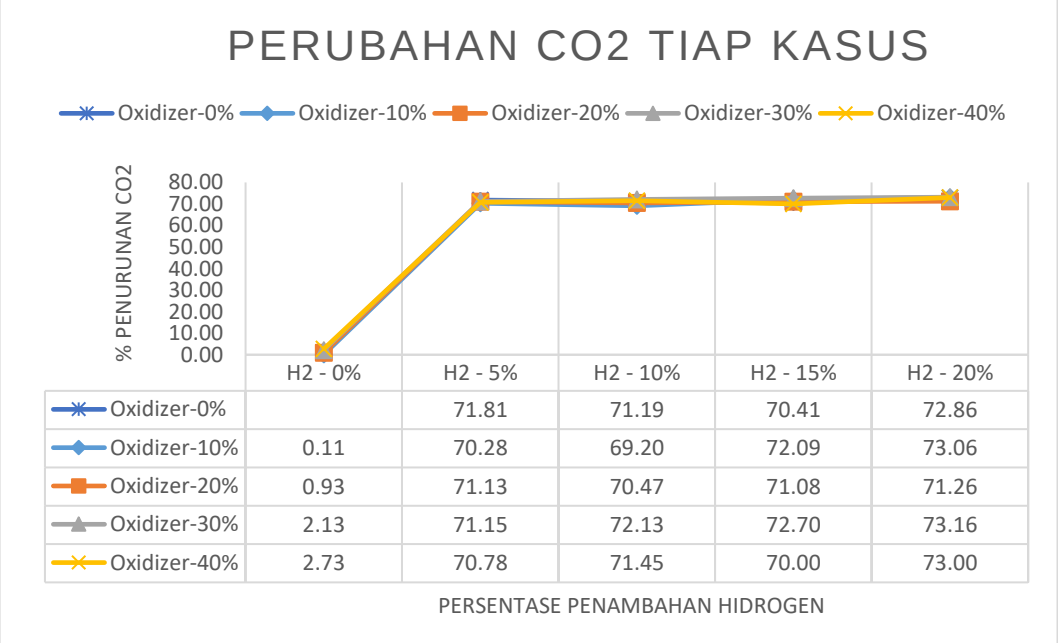
Tabel 4.4 Hasil Simulasi Penambahan Hidrogen dan *Secondary Air*

Jumlah Kadar Hidrogen	Jumlah Udara *Secondary Inlet*	Penurunan Kadar CO2 (%)	Kenaikan Kadar CO (kali lipat)	Penurunan Kadar NOx (%)	Penurunan Temperatur *Furnace*	Kenaikan Total *Energy* (%)	Perubahan Temperatur *Flue* (%)
0%	0%	Nilai Acuan					
	10%	0.11	1.2	89.4	1.42	5.08	1.46
	20%	0.93	1.26	90.72	1.22	5.06	2.02
	30%	2.13	1.12	92.88	1.74	3.11	1.62
	40%	2.73	1.81	91.99	1.95	5.74	3.9
5%	0%	71.81	5.42	32.84	1.42	1.37	4.87
	10%	70.28	3.69	66.6	0.18	-4.23	1.57

	20%	71.13	4.86	84.86	1.12	-6.04	3.92
	30%	71.15	3.01	92.23	2.3	1.94	-0.46
	40%	70.78	3	86.88	2.56	2.51	0.16
10%	0%	71.19	3.63	61.9	1.49	7.07	1.26
	10%	69.2	2.88	92.52	2.04	-1.06	-0.45
	20%	70.47	3.98	82.85	0.64	-0.11	2.06
	30%	72.13	4.43	91.27	1.13	4.8	1.88
	40%	71.45	3.74	86.09	1.16	1.85	1.4
15%	0%	70.41	4.76	90.95	2.28	8.12	4.26
	10%	72.09	4.82	84.79	0.03	1.85	3.08
	20%	71.08	4.1	90.69	0.98	4.75	2.03
	30%	72.7	5.98	93.7	2.02	-0.7	5.1
	40%	70	3.24	86.41	1.07	-2.6	0.95
20%	0%	72.86	4.18	75.62	0.17	4.19	2.36
	10%	73.06	5.72	67.2	0.24	-3.52	4.21
	20%	71.26	4.37	79.48	0.72	2.52	3.06
	30%	73.16	5.7	76.56	2.38	1.78	4.61
	40%	73	8.14	90.88	1.83	2.89	6.49

4.4.1 Perubahan Kadar CO_2 Tiap Variasi

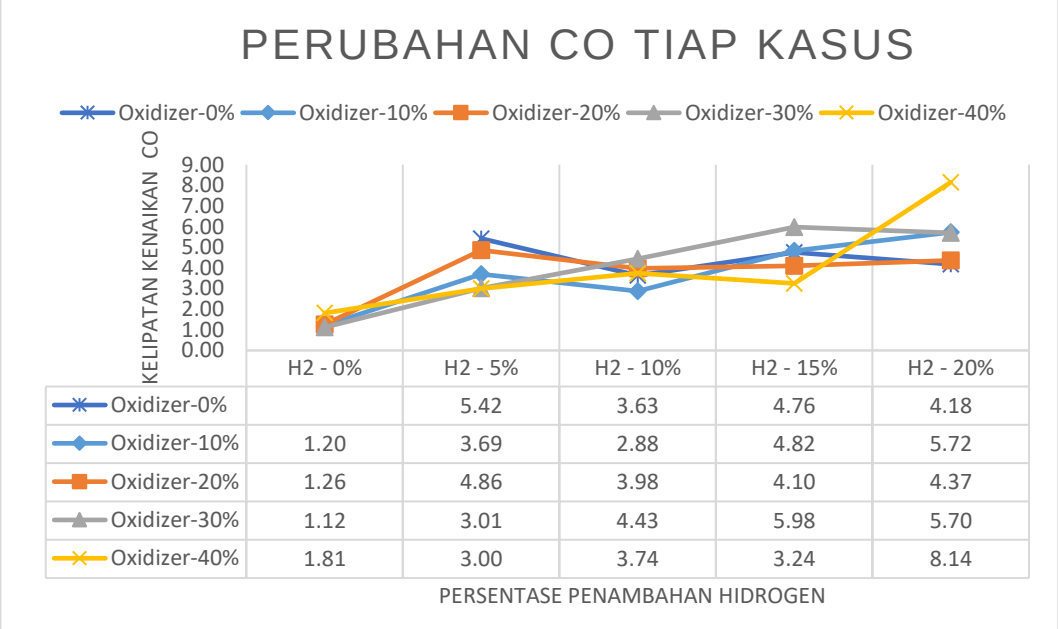
Adapun perubahan kadar CO_2 untuk setiap variasi dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.3 Grafik CO_2 Tiap Variasi

Berdasarkan data yang ditampilkan pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan kadar CO_2 untuk setiap variasi yang diberikan. Rata-rata penurunan kadar CO_2 yang terjadi adalah 59,79%. Selain itu grafik yang ditunjukkan oleh penambahan hidrogen sebesar 20% mempunyai tren penurunan CO_2 yang cukup baik untuk tiap kondisi penambahan *secondary air*. Rata-rata penurunan CO_2 sebesar 71% ketika variasi *secondary air* diberikan penambahan hidrogen. Adapun penurunan kadar CO_2 terbesar terjadi pada variasi penambahan hidrogen sebesar 20% dengan kadar *secondary air* sebesar 30% yakni 73.16%. Kemudian untuk penurunan terkecil terjadi pada kondisi tidak ada penambahan kadar hidrogen pada *furnace*, yakni hanya terjadi penurunan sebesar 1.48% terhadap kondisi acuan dengan nilai terendah pada kondisi *secondary air* sebesar 10%.

4.4.2 Perubahan Kadar CO Tiap Variasi



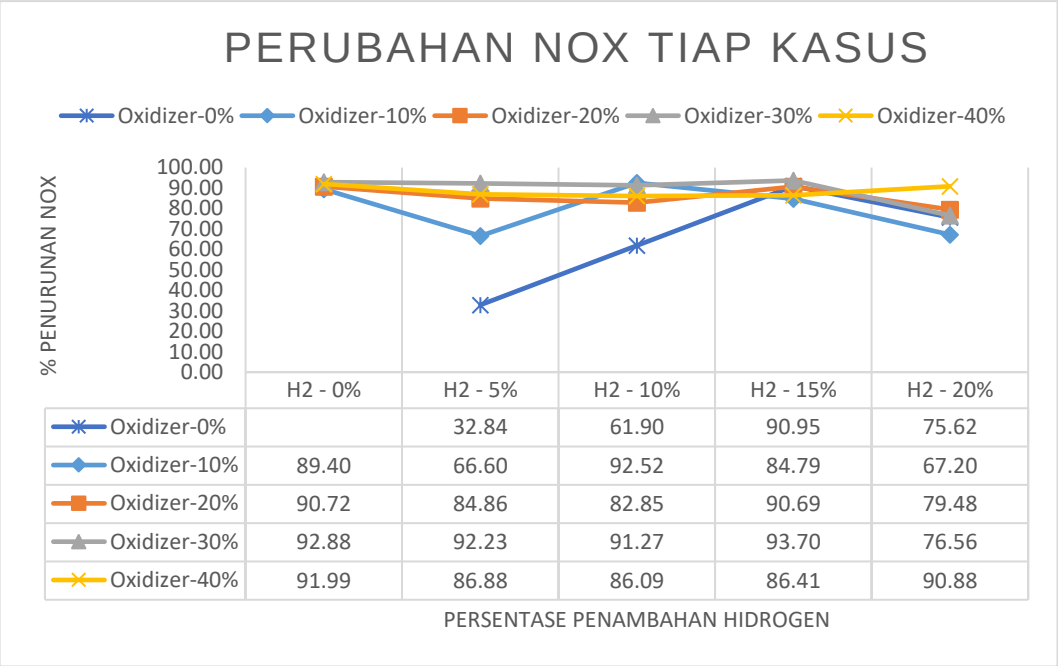
	H2 - 0%	H2 - 5%	H2 - 10%	H2 - 15%	H2 - 20%
Oxidizer-0%		5.42	3.63	4.76	4.18
Oxidizer-10%	1.20	3.69	2.88	4.82	5.72
Oxidizer-20%	1.26	4.86	3.98	4.10	4.37
Oxidizer-30%	1.12	3.01	4.43	5.98	5.70
Oxidizer-40%	1.81	3.00	3.74	3.24	8.14

Gambar 4.4 Grafik CO Tiap Variasi

Secara keseluruhan kenaikan kadar CO tertinggi terjadi pada kondisi *secondary air* sebesar 40% dengan penambahan hidrogen 20%, dengan tingkat kenaikan sebesar 8.14 kali lebih besar terhadap kondisi acuan atau terjadi kenaikan dari 9 ppm menjadi 73.3 ppm. Sedangkan rata-rata kenaikan kadar CO terendah terjadi pada kondisi tanpa penambahan *secondary air* dan hidrogen dengan rata-rata kenaikan sebesar 1.34 kali lebih besar terhadap kondisi acuan. Rata-rata

kenaikan kadar CO yang ditimbulkan akibat adanya penambahan kedua parameter tersebut adalah 4.48 kali lebih besar terhadap kondisi acuan. Nilai kenaikan kadar CO cukup bervariasi, apabila data penambahan *secondary air* 40% diperhatikan, pada rentang penambahan hidrogen sebesar 0% hingga 15% terjadi kenaikan yang cukup stabil, lonjakan terjadi pada penambahan hidrogen sebesar 20%. Secara keseluruhan adanya penambahan hidrogen dan *secondary air* menyebabkan terjadinya peningkatan kadar CO pada *furnace*

4.4.3 Perubahan Kadar NO_x Tiap Variasi



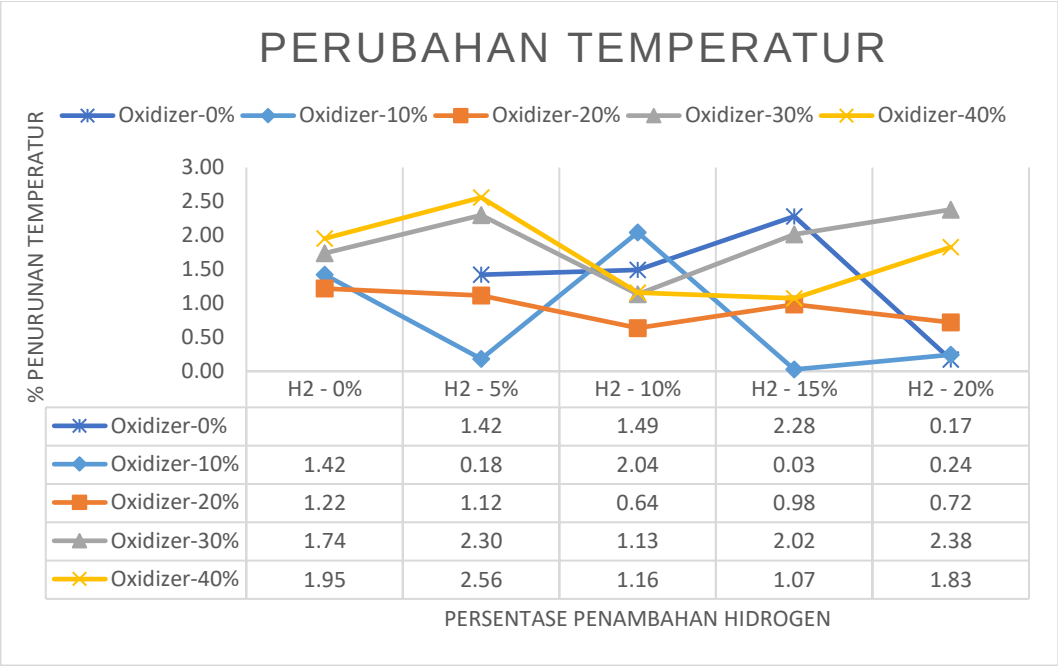
	H2 - 0%	H2 - 5%	H2 - 10%	H2 - 15%	H2 - 20%
Oxidizer-0%		32.84	61.90	90.95	75.62
Oxidizer-10%	89.40	66.60	92.52	84.79	67.20
Oxidizer-20%	90.72	84.86	82.85	90.69	79.48
Oxidizer-30%	92.88	92.23	91.27	93.70	76.56
Oxidizer-40%	91.99	86.88	86.09	86.41	90.88

Gambar 4.5 Grafik NO_x Tiap Variasi

Penurunan kadar NO_x tertinggi untuk setiap variasi hidrogen ditunjukkan oleh keadaan tanpa penambahan kadar hidrogen. Rata-rata penurunan untuk seluruh variasi adalah 82.47%. Penurunan rata-rata terbesar terjadi pada saat tidak ada penambahan *secondary air*. Sedangkan untuk penurunan rata-rata NO_x terkecil berada pada kondisi dengan penambahan hidrogen sebesar 5% dengan rata-rata penurunan sebesar 72.68%. Penurunan terbesar terjadi pada variasi penambahan hidrogen sebesar 15% dengan *secondary air* sebesar 30%, yakni 93.7% terhadap kondisi acuan atau terjadi penurunan dari 783.8 ppm menjadi 49.4 ppm. Sedangkan variasi dengan penurunan kadar NO_x terendah terjadi pada variasi penambahan hidrogen sebesar 5% tanpa adanya penambahan *secondary air*, dengan penurunan

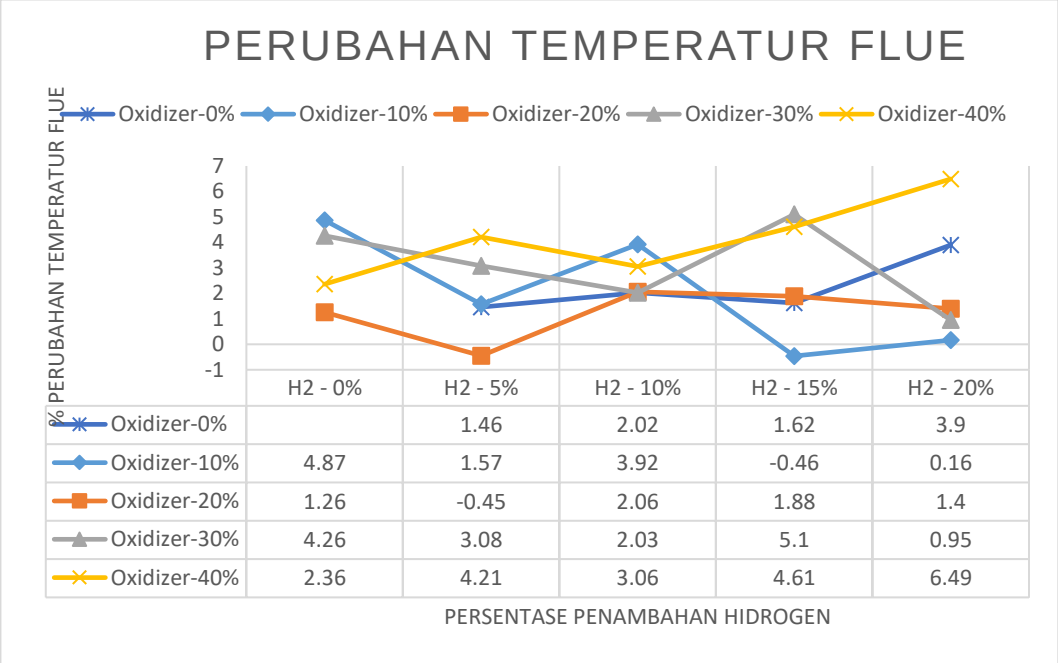
sebesar 32.84%. Secara keseluruhan adanya variasi penambahan *secondary air* dan hidrogen menyebabkan terjadinya penurunan emisi gas buang CO_2 pada *furnace*.

4.4.4 Perubahan Temperatur Tiap Variasi



	H2 - 0%	H2 - 5%	H2 - 10%	H2 - 15%	H2 - 20%
Oxidizer-0%		1.42	1.49	2.28	0.17
Oxidizer-10%	1.42	0.18	2.04	0.03	0.24
Oxidizer-20%	1.22	1.12	0.64	0.98	0.72
Oxidizer-30%	1.74	2.30	1.13	2.02	2.38
Oxidizer-40%	1.95	2.56	1.16	1.07	1.83

Gambar 4.6 Grafik Temperatur *Furnace* Tiap Variasi

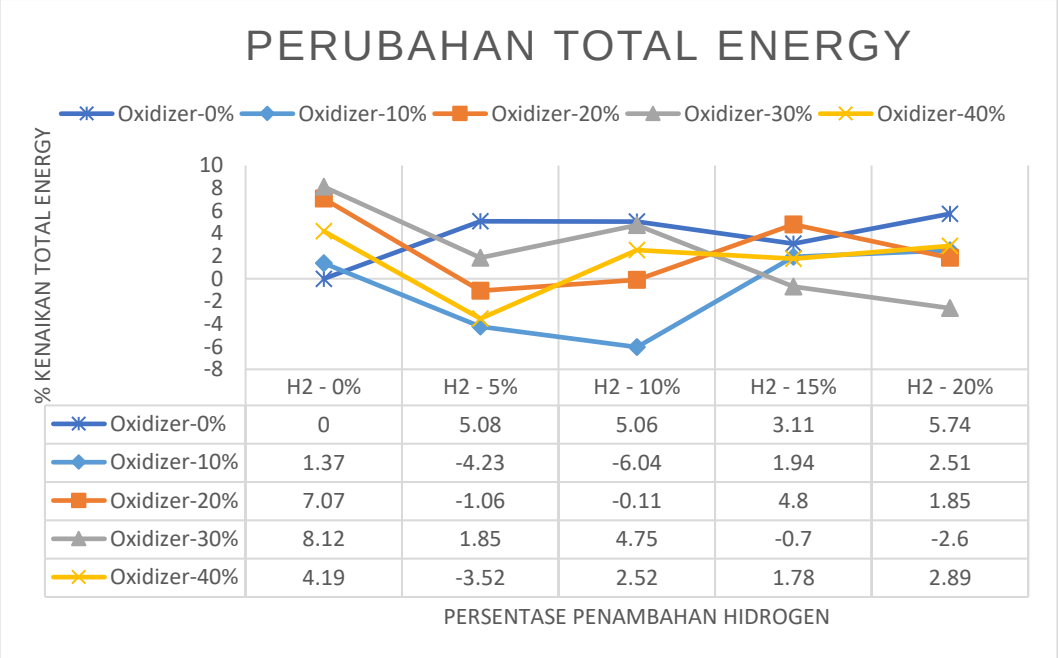


	H2 - 0%	H2 - 5%	H2 - 10%	H2 - 15%	H2 - 20%
Oxidizer-0%		1.46	2.02	1.62	3.9
Oxidizer-10%	4.87	1.57	3.92	-0.46	0.16
Oxidizer-20%	1.26	-0.45	2.06	1.88	1.4
Oxidizer-30%	4.26	3.08	2.03	5.1	0.95
Oxidizer-40%	2.36	4.21	3.06	4.61	6.49

Gambar 4.7 Grafik Temperatur *Flue Furnace* Tiap Variasi

Berbeda dengan emisi gas buang, temperatur rata-rata harus mempunyai nilai penurunan sekecil mungkin. Berdasarkan gambar 4.6, dapat dilihat bahwa data yang diperoleh untuk perubahan temperatur cukup fluktuatif disetiap variasi. Temperatur rata-rata *furnace* mengalami penurunan untuk setiap variasi. Penurunan temperatur paling besar terjadi pada kondisi penambahan hidrogen sebesar 5% dengan *secondary air* sebesar 40%. Apabila kondisi acuan mempunyai temperatur rata-rata *furnace* sebesar 1693.547 Kelvin, maka penurunan temperatur yang terjadi, tidak kurang dari 1650.215 Kelvin. Penurunan temperatur rata-rata yang paling rendah untuk setiap variasi penambahan hidrogen banyak terjadi pada kondisi *secondary air* sebesar 10%. Sedangkan untuk temperatur *flue* dari *furnace* terjadi kenaikan temperatur terhadap nilai acuan saat dilakukan variasi *secondary air* (Hidrogen 10%). Nilai kenaikan tertinggi terjadi saat variasi 20% hidrogen dan *secondary air* sebesar 40%. Sedangkan nilai penurunan temperature *flue furnace* terbesar terjadi pada variasi penambahan hidrogen 15% dan *secondary air* sebesar 10%. Nilai minus (-) pada gambar 4.7 menunjukkan terjadinya kenaikan temperatur terhadap kondisi acuan.

4.4.5 Perubahan Total *Energy*

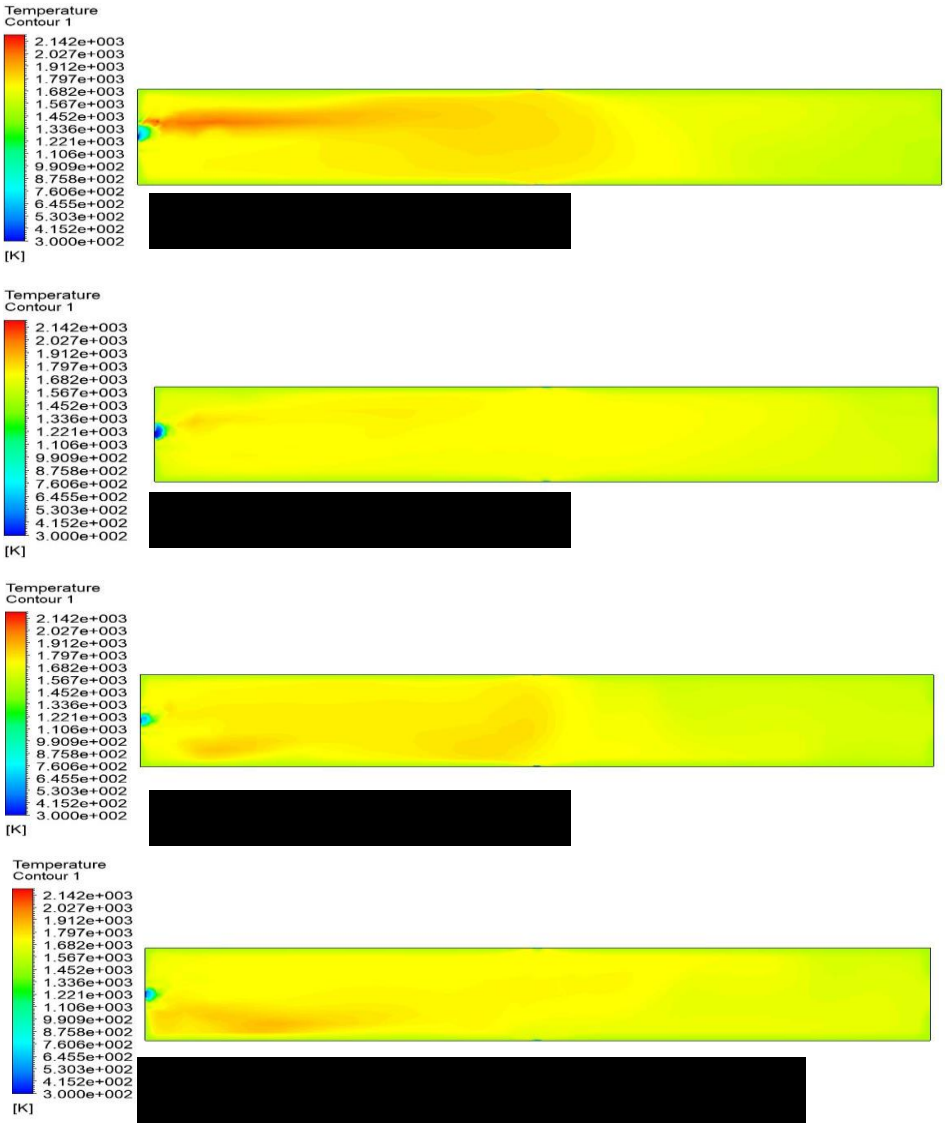


	H2 - 0%	H2 - 5%	H2 - 10%	H2 - 15%	H2 - 20%
Oxidizer-0%	0	5.08	5.06	3.11	5.74
Oxidizer-10%	1.37	-4.23	-6.04	1.94	2.51
Oxidizer-20%	7.07	-1.06	-0.11	4.8	1.85
Oxidizer-30%	8.12	1.85	4.75	-0.7	-2.6
Oxidizer-40%	4.19	-3.52	2.52	1.78	2.89

Gambar 4.8 Grafik Perubahan *Total Energy* Tiap Variasi

Berdasarkan gambar 4.8, terjadi kenaikan *total energy furnace* untuk setiap variasi hidrogen, dan setiap variasi *secondary air*. Akan tetapi untuk variasi kombinasi antara hidrogen dan *secondary air* diperoleh hasil yang fluktuatif. Adapun kenaikan tertinggi terjadi pada variasi penambahan hidrogen 0% dan *secondary air* sebesar 30%. Sedangkan untuk penurunan terbesar terjadi pada variasi penambahan hidrogen 15% dan *secondary air* sebesar 30%.

4.4.6 Profil Temperatur *Furnace*



Gambar 4.9 Profil Temperatur Variasi Terbaik

Gambar diatas merupakan profil temperatur dari variasi terbaik keseluruhan simulasi. Adapun persebaran temperatur pada *secondary air 20%* dan kombinasi hidrogen 15% serta *secondary air 10%*, cukup merata, akan tetapi pada saat

mendekati *flue furnace* (2.5meter dari *inlet* primer) terjadi penurunan temperatur. Temperatur rata-rata *furnace* pada kedua variasi tersebut berturut-turut adalah 1660.45 dan 1693.098 kelvin. Persebaran temperatur yang dihasilkan oleh kedua variasi tersebut jauh lebih baik apabila dibandingkan dengan kondisi acuan yang mengalami penurunan temperatur pada jarak lebih dari 1.5meter terhadap *inlet* primer. Untuk variasi *secondary air 20%* mempunyai kontur yang mirip dengan kondisi acuan, dimana terjadi penurunan temperatur pada jarak 1.5meter terhadap inlet primer, sehingga persebaran temperatur tidak lebih baik dibandingkan dengan kedua variasi lainnya. Adapun persebaran temperatur terbaik adalah dengan variasi kombinasi hidrogen 15% serta *secondary air 10%* yang mempunyai selisih sebesar 0.449 kelvin terhadap kondisi acuan, dengan persebaran panas yang lebih baik.

4.5 Pembahasan

Hidrogen merupakan salah satu alternatif bahan bakar yang dipasarkan di seluruh dunia. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, hidrogen memberikan dampak yang signifikan pada penurunan emisi gas buang pembakaran, akan tetapi terjadi penurunan temperatur yang dapat memengaruhi performa *furnace*. Penurunan temperatur yang disebabkan oleh hidrogen tidak dapat dilepaskan dari *enthalpy* pembakaran *furnace*. *Enthalpy* merupakan *internal energy* ditambahkan produk dari tekanan dan volume yang dimiliki oleh sistem (J.M Smith, 2018).

$$\text{Spesific enthalpy} = \frac{}{} = h \quad e + RT = (c_V + R)\,T = c_p T \tag{4.1}$$

$$h_2 - h_1 \quad c_p\,(T_2 - T_1) \tag{4.2}$$

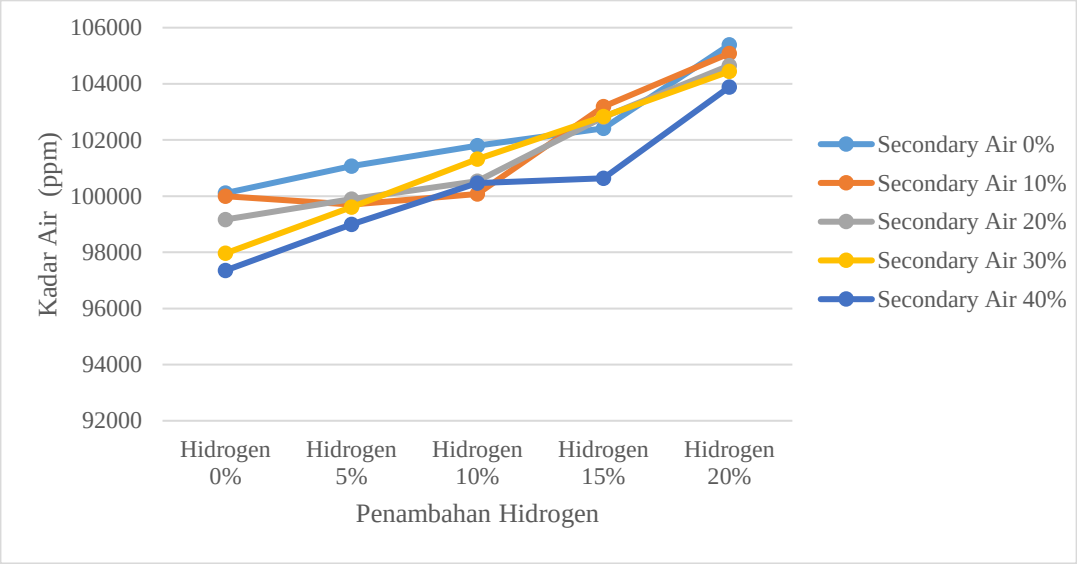
$$CH_4 + 2O_2 \quad CO_2 + 2H_2O \qquad H = -802{,}3\ kJ/mol \tag{4.3}$$

$$H_2 + 2O_2 \quad H_2O \qquad H = -286\ kJ/mol \tag{4.4}$$

Besarnya nilai *enthalpy* pada proses pembakaran dipengaruhi oleh jenis bahan bakar yang digunakan. Pada penelitian ini kondisi acuan pembakaran menggunakan *natural gas* sebagai bahan bakar dengan penambahan hidrogen untuk variasi penelitian. Kedua jenis bahan bakar tersebut mempunyai *specific enthalpy* pembakaran yang berbeda, dimana nilai *enthalpy* pembakaran yang dihasilkan oleh hidrogen lebih rendah apabila dibandingkan dengan *natural gas*. Ketika hidrogen

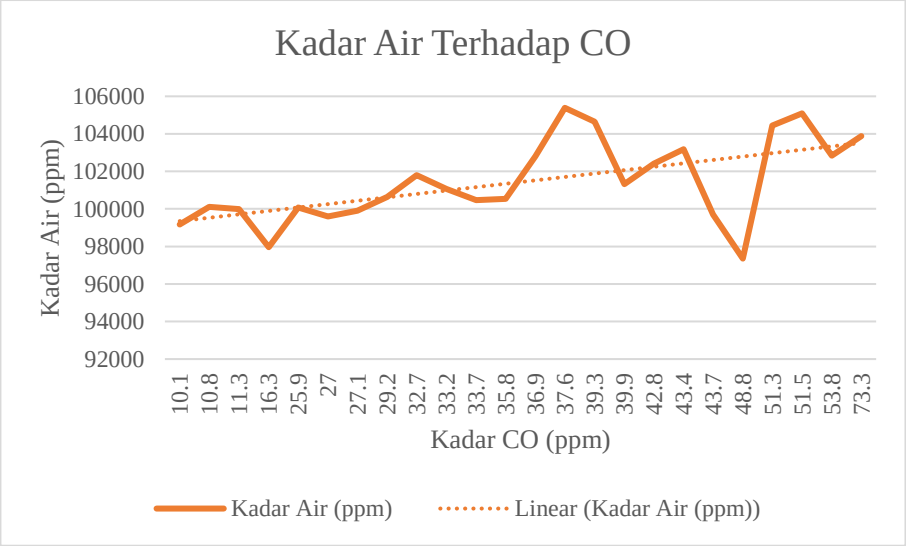
ditambahkan pada *natural gas*, maka terjadi pengurangan komposisi *natural gas (methane)* sesuai dengan jumlah hidrogen yang ditambahkan. Perubahan komposisi tersebut menyebabkan terjadinya penurunan jumlah *enthalpy* pembakaran secara keseluruhan. Nilai *enthalpy* yang lebih kecil akan menyebabkan penurunan pada temperatur *furnace* seperti yang ditunjukkan pada persamaan (4.2).

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, penambahan hidrogen dapat menurunkan kadar CO_2 dan NO_x, akan tetapi dapat meningkatkan kadar CO. Adanya kenaikan kadar CO dapat terjadi akibat pembakaran yang tidak sempurna pada *furnace*. Pembakaran yang tidak sempurna juga menyebabkan CO_2 yeng merupakan salah satu parameter pembakaran sempurna menurun. Salah satu penyebab naiknya kadar CO pada emisi gas buang adalah kadar air (*water vapor*) yang tinggi akibat pembakaran hidrogen.



Gambar 4.10 Grafik Kadar Air Akibat penambahan Hidrogen

Adanya kadar air dapat memengaruhi bahan bakar sehingga menghasilkan kadar CO yang lebih tinggi (Soliman, 2018), hal ini dapat dilihat pada persamaan 4.5. Hal ini juga dapat dilihat pada gambar 4.10 yang menunjukkan *uptrend* kadar CO, pada setiap peningkatan kadar air.



Gambar 4.11 Grafik Kadar Air Terhadap CO

Tidak hanya itu kenaikan konsentrasi hidrogen juga dapat menyebabkan kesetimbangan bergeser kearah reaktan sehingga menyebabkan tingginya kadar CO pada *furnace*, hal ini dapat dilihat pada persamaan 4.6

$$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2 \qquad H = +206\ kJ/mol \qquad (4.5)$$

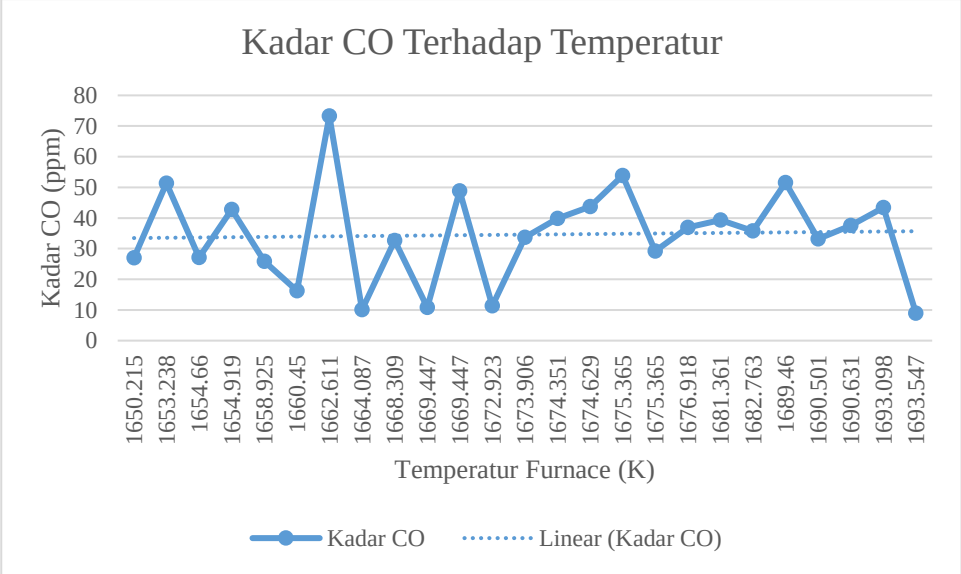
$$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2 \qquad H = -206\ kJ/mol \qquad (4.6)$$

Adanya reaksi pembakaran yang terjadi pada *furnace* menyebabkan penurunan jumlah O_2 yang dapat mengoksidasi N_2 untuk menghasilkan NO, sehingga kadar NO_x sistem akan mengalami penurunan dibandingkan dengan kondisi acuan tanpa penambahan hidrogen.

Penambahan *secondary air* pada *furnace* membuat sistem disebut sebagai *air-staged combustion.* Berdasarkan hasil simulasi¸ *secondary air* memberikan dampak yang cukup signifikan dalam penurunan emisi gas buang. Penurunan tersebut terjadi akibat adanya oksigen dari injeksi *secondary air* pada *furnace* yang membuat senyawa karbon bereaksi dengan NO menjadi N_2 sehingga mencegah pembentukan NO_2 (Takeshi Suzuki, 1994). Akibatnya kadar NO_x dari sistem akan turun, namun menurut penelitian yang dilakukan oleh Takeshi Suzuki, dkk, penurunan kadar NO yang merupakan cikal bakal NO_2 akan menyebabkan terbentuknya gas CO. Akan tetapi penelitian lebih lanjut mengenai reaksi kimia yang terjadi pada proses pembakaran kombinasi penambahan hidrogen dan

secondary air harus dilakukan untuk mendapatkan jawaban yang lebih pasti. Adanya injeksi *secondary air* tersebut juga dapat menurunkan temperatur ruang bakar. Akibatnya peluang pembentukan NO_x yang terjadi saat temperatur *furnace* diatas 1800 K (Batrakov, 2016) menjadi lebih kecil.

Berdasarkan hasil simulasi, adanya penambahan hidrogen, *secondary air*, maupun kombinasi keduanya dapat meningkatkan kadar CO dari emisi gas buang hasil pembakaran. Terdapat beberapa penelitian yang menunjukan penyebab terjadinya peningkatan kadar CO dalam sebuah pembakaran. Salah satu penyebab utama terjadinya peningkatan kadar CO adalah akibat temperatur pembakaran yang rendah (Daniel T. Gottuk, 1995). Apabila kita melihat gambar 4.10, tidak terdapat korelasi yang signifikan bahwa seiring terjadinya penurunan temperatur, kadar CO dari sistem akan menurun. Sehingga premis yang telah dikemukakan sebelumnya, yakni adanya kadar air dan efek penambahan *secondary air* menjadi jawaban kuat terjadinya peningkatan kadar CO terhadap kondisi acuan.



Gambar 4.12 Grafik Kadar CO terhadap Temperatur

Adanya kadar CO yang tinggi, menuntut pemilihan kondisi terbaik variasi harus memenuhi standar keselamatan kerja. Menurut *The Occupational Safety and Health Association* (OSHA), *personal exposure limit* (PEL) karbon monoksida pada udara yang boleh dihirup oleh pekerja adalah tidak lebih dari 50 ppm dalam periode waktu 8 jam. Apabila seseorang terpapar CO diatas 50 ppm dalam kurun waktu 8 jam dapat menyebabkan gangguan kesehatan bahkan kematian, sehingga

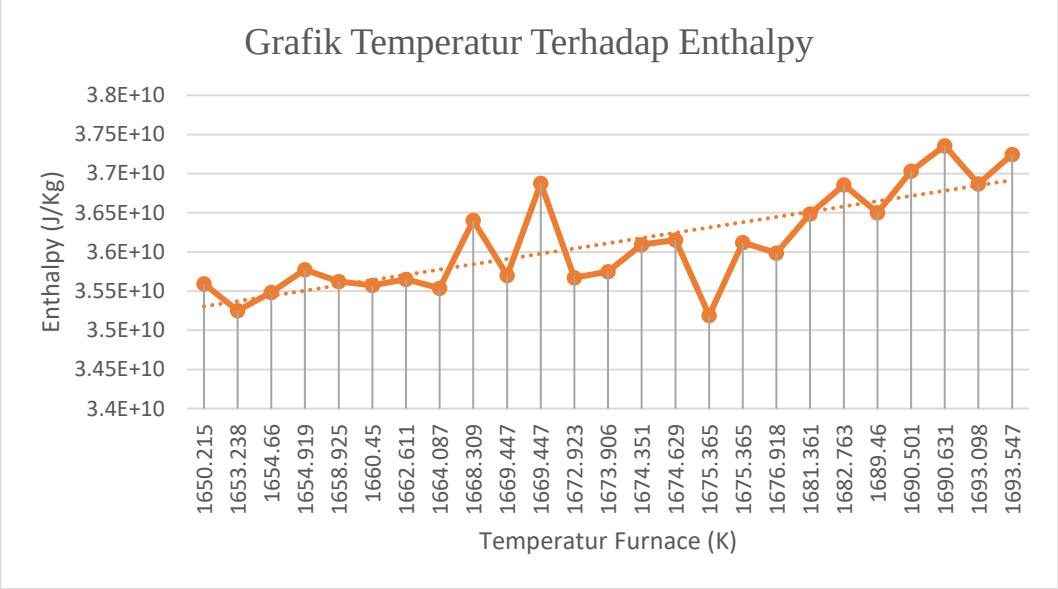
variasi simulasi yang baik pada penelitian ini harus berada pada kadar standar yang telah ditetapkan tersebut. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengurangi kadar CO yaitu dengan menambahkan katalis $MnCo_2O_{4.5}$ yang dapat mempercepat oksidasi karbon monoksida menjadi CO_2 (Subhashish Dey, 2019), akan tetapi solusi ini tidak akan dibahas lebih lanjut.

Tabel 4.5 Hasil Terbaik Variasi

Keterangan	**Existing**	**Hidrogen 20%**	***Secondary Air* 20%**	**Hidrogen 15% dan *Secondary Air* 10%**
CO (ppm)	9	37.6	11.3	43.4
CO2 (ppm)	130822.6	35500.5	129602.8	36518.3
NOx (ppm)	783.8	191.1	72.7	119.2
Temperature *Furnace* (K)	1693.547	1690.631	1660.45	1693.098
Temperature *Flue* (K)	1570.314	1607.317	1602.062	1618.612
Total Energy (J/kg)	2.43E+10	2.53E+10	2.55E+10	2.57E+10

Kondisi acuan pada penelitian ini menghasilkan kadar CO_2, CO, dan NO_x berturut-turut sebesar 130822.6 ppm, 9 ppm, dan 783.8 ppm. Sedangkan temperatur rata-rata ruang bakar yang tercatat adalah 1693.547 Kelvin. Berdasarkan simulasi, hasil variasi penambahan hidrogen terbaik yaitu saat ditambahkan 20% hidrogen. Variasi tersebut dapat memberikan penurunan kadar NO_x hingga 79.48% (191.1 ppm) dan penurunan kadar CO_2 sebesar 71.26% (35500.5 ppm). Sedangkan peningkatan kadar CO terjadi hingga 37.6 ppm atau 4.37 kali lebih besar dibandingkan acuan. Pada variasi ini terjadi penurunan temperatur ruang bakar sebesar 0.72% atau 2.916 Kelvin. Kemudian hasil variasi penambahan *secondary air* terbaik yaitu saat ditambahkan 20% *secondary air*. Variasi tersebut dapat menghasilkan penurunan kadar NO_x hingga 90.72% (72.7 ppm) dan penurunan kadar CO_2 sebesar 0.93% (129602.8 ppm). Sedangkan peningkatan kadar CO terjadi hingga 11.3 ppm atau 1.26 kali lebih besar terhadap kondisi normal. Pada variasi ini terjadi penurunan temperatur ruang bakar yaitu 1.22% atau 20.624 Kelvin. Sedangkan untuk variasi kombinasi antara hidrogen dan *secondary air* terbaik yaitu pada kondisi penambahan hidrogen sebesar 15% dan *secondary air* sebesar 10%. Variasi kombinasi tersebut dapat menghasilkan penurunan kadar NO_x hingga 84.79% (119.2 ppm) dan penurunan kadar CO_2 sebesar 72.09% (36518.3 ppm). Sedangkan

peningkatan kadar CO terjadi hingga 43.4 ppm atau 4.82 kali lebih besar terhadap kondisi normal. Pada variasi ini terjadi penurunan temperatur ruang bakar yang sangat kecil yaitu 0.03% atau 0.449 Kelvin. Adapun total *energy* yang dimiliki oleh variasi mengalami kenaikan terhadap nilai acuan. Fakta menarik muncul bahwa pada variasi penambahan *secondary air 20%*, nilai temperatur rata-rata *furnace* lebih rendah daripada nilai acuan, akan tetapi mempunyai *total energy* yang lebih besar apabila dibandingkan dengan nilai kondisi acuan. Perlu diketahui bahwa *total energy* adalah penjumlahan antara energi kinetik dan potensial dari sistem. Besar kecilnya temperatur dipengaruhi oleh energi kinetik sistem seperti yang ditunjukkan pada persamaan 4.2. Adanya kenaikan nilai *enthalpy* sistem membuat temperatur dari *furnace* juga akan meningkat, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.13.



Gambar 4.13 Grafik Temperatur terhadap Enthalpy

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat ditarik berdasarkan penelitian ini adalah sebagai berikut:

a) Jumlah penambahan hidrogen terbaik untuk menurunkan emisi gas buang *furnace* adalah 20%. Dengan kondisi tersebut, terjadi penurunan NOx sebesar 79.48%, penurunan CO2 sebesar 71.26%, dan kenaikan CO sebesar 4.37 kali terhadap kondisi acuan. Terdapat kenaikan temperatur sebesar 37 kelvin dan kenaikan *total energy* sebesar 4 % terhadap kondisi normal.
b) Jumlah penambahan *secondary air* pada *air-staged combustion* terbaik untuk menurunkan emisi gas buang *furnace* adalah 20%. Dengan kondisi tersebut, terjadi penurunan NOx sebesar 90.72%, penurunan CO2 sebesar 0.93%, dan kenaikan CO sebesar 1.26 kali terhadap kondisi acuan. Terdapat kenaikan temperatur sebesar 31.75 kelvin dan kenaikan *total energy* sebesar 4.94 % terhadap kondisi normal.
c) Kombinasi penambahan hidrogen dan *secondary air* pada *air-staged combustion* terbaik untuk menurunkan emisi gas buang *furnace* berturut-turut adalah 15% dan 10%. Dengan kondisi tersebut, terjadi penurunan NOx sebesar 84.79%%, penurunan CO2 sebesar 72.09%, dan kenaikan CO sebesar 4.82 kali terhadap kondisi acuan. Terdapat kenaikan temperatur sebesar 48.3 kelvin dan kenaikan *total energy* sebesar 5.76 % terhadap kondisi normal.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan berdasarkan penelitian ini adalah dilakukan penelitian lanjut dengan metode eksperimen pada rentang pengambilan data yang lebih detail untuk mendapatkan hasil yang lebih valid.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

Barca, A. (2012). Injeksi Gas Hidrogen Pada Sistem Pembakaran Di Sepeda Motor Dengan Konfigurasi Pitot Tube. *91*(Universitas Indonesia), 11.

Batrakov. (2016). The Nitrogen Oxide Formation Studying at Natural Gas Combustion in Non-Circular Profile Furnaces of Fire-Tube Boilers. *International Conference on Oil and Gas Engineering*, 148.

Can Yilmaz, J. W. (2017). Modeling and Simulation of Hydrogen Injection Into a Blast Furnace to Reduce Carbon Dioxide Emission. *Thermal Engineering, 45*(Journal Of Cleaner Predicition), 3.

Daniel T. Gottuk, R. J. (1995). The Role of Temperature on Carbon Monoxide Production in Compartment Fires. *Fire Safety Journal* , 322.

G. Wang, J. M. (2019). MILD Combustion Versus Conventional Bluff-Body Flame of A Premixed CH4/Air Jet in Hot Coflow. *Energy, 16*(Elsevier), 1.

Hao Zhou, S. M. (2019). Numerical Prediction of Swirl Burner Geometry Effects on Nox Emission and Combustion Instability in Heavy Oil-Fired Boiler. *Applied Thermal Engineering, 10*(Elsevier), 1.

J.M Smith, H. V. (2018). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics.* New York: McGraw-Hill Education.

Jiaxu Shen, F. L. (2018). Numerical Investigation of Air Staged Combustion to Reduce Nox Emission from Biodiesel Combustion in Industrial Furnaces. *Energy, 15*(Journal Of The Energy Institute), 2.

KM Dabrowski, S. K. (2019). Downhole Measurements and Determination of Natural Gas Composition using Raman Spectroscopy. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 30.

Li Jingding, G. L. (1998). Formation and Restraint of Toxic Emissions in Hydrogen-Gasoline Mixture Fueled Engines. *5*(International Association for Hydrogen Energy), 5.

Muliawati, N. (2008). *Hidrogen Sebagai Bahan Bakar : Sumber Energi Masa Depan.*

Nasution, F. P. (2016). Produksi Gas Hidrogen Menggunakan Teknologi Membran. *7*(Institut Teknologi Bandung), 3.

Shivaprasad K V, R. S. (2014). Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen Addition on Combustion Performance and Emissions Characteristics of A Spark Ignition High Speed Gasoline Engine. *8*(Elsevier), 2.

Soliman, N. K. (2018). Factor affecting CO Oxidation Reactio Over Nanosized Materials : A review. *Journal of Materials Research and Technology* , 2403.

Subhashish Dey, G. C. (2019). Catalytic Conversion of Carbon Monoxide Into Carbon Dioxide Over Catalysts. *Material Science for Energy Technologies*, 582.

Takeshi Suzuki, T. K. (1994). Study on the Carbon-Nitric Oxide Reaction in the Presence o Oxygen. *American Chemical Society*, 2844.

Xiao Yang, L. Z. (2019). Comparative Study of Combustion and Thermal Performance in a Swirling Micro Combustor under Premixed and Non-Premixed Modes. *Applied Thermal Engineering, 12*(Elsevier), 1.

LAMPIRAN

A. Perhitungan Stoikiometri

Bahan bakar yang digunakan 1.41kg/s

Tabel A.1 Komposisi *Natural Gas*

Senyawa	Fraksi Mol	Massa Molar (g/mol)	Massa (g)	Mol	%Massa
CH4	0.8868	16.04	1108.055	69.081	0.7859
C2H6	0.0700	30.07	163.9690	5.453	0.1163
C3H8	0.0207	44.1	71.112	1.613	0.0504
C4H10	0.0019	58.12	8.603	0.148	0.0061
C5H12	0.0008	72.15	4.496	0.062	0.0032
C6H14	0.0009	86.18	6.042	0.07	0.0043
N2	0.0137	28.0134	29.896	1.067	0.0212
CO2	0.0052	44.01	17.827	0.405	0.0126
Jumlah	1.0000	18.1	1410.000	77.899	1

Reaksi Bahan Bakar

CH_4	+	$2O_2$	CO_2	+	$2H_2O$
69.081 mol		138.162 mol	69.081 mol		138.162 mol
C_2H_6	+	$7/2O_2$	$2CO_2$	+	$3H_2O$
5.453 mol		19.0855 mol	10.906 mol		16.359 mol
C_3H_8	+	$5O_2$	$3CO_2$	+	$4H_2O$
1.613 mol		8.065 mol	4.839 mol		6.452 mol
C_4H_{10}	+	$6.5O_2$	$4CO_2$	+	$5H_2O$
0.148 mol		0.962 mol	0.592 mol		0.74 mol
C_5H_{12}	+	$8O_2$	$5CO_2$	+	$6H_2O$
0.062 mol		0.496 mol	0.31 mol		0.372 mol
C_6H_{14}	+	$9.5O_2$	$6CO_2$	+	$7H_2O$
0.07 mol		0.665 mol	0.42 mol		0.49 mol

Total bahan bakar tanpa N_2 dan CO_2 = 76.427 mol (1362.277 gram)
Total Kebutuhan O_2 = 167.436 mol

Oxidizer

N_2	78.08%	= 624.027 mol
O_2	20.95%	= 167.436 mol

Ar 0.93% = 7.433 mol
CO_2 0.04% = 0.320 mol

Total Oxidizer = 799.215 mol, sehingga untuk perhitungan AFR adalah sebagai berikut :

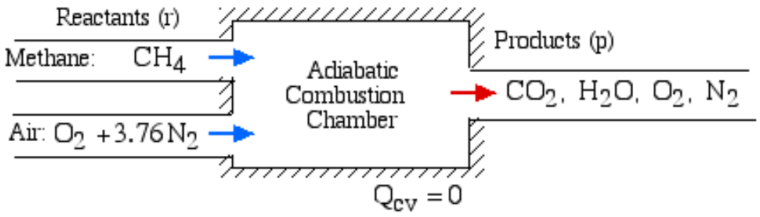
AFR = ——— = ——————————— = 16.43775

0.83 = ——————— – = 19.80452

1.41 kg/s for Fuel
27.9244kg/s for Oxidizer

B. Validasi Simulasi

Pendekatan Perhitungan



Gambar B.1 Skema Pembakaran

$CH_4 + (2.5)\ 2(O_2 + 3.76\ N_2)$ $CO_2 + \mathbf{2}H_2O + \mathbf{3}O_2 + (5)\ \mathbf{3.76}\ N_2$

$Q_{CV} = 0 =$ $N_p\,[hf^o + h(T)]_p -$ $N_r[hf^o + h(T)]_r$

Dimana, h(T) adalah enthalpy sensible sebagai fungsi temperatur T, dengan asumsi temperatur reaktan adalah 25°C, maka :

1[-393,52 + h(T)] + **2**[-393,52 + h(T)] + **3**[h(T)] + **18.8**[h(T)] = 1(-74,85)

Menjadi : h + 2[ ] +3[ ] + 18.8[h] = 802,310 [kJ/kmol fuel]

Pendekatan temperatur flame pada kondisi adiabatik dapat dilakukan dengan mengasumsikan bahwa produk yang terbentuk seluruhnya adalah udara. Pendekatan ini diperkenalkan oleh Potter dan Somerton dalam *Thermodynamics for Engineers*, yang mengasumsikan bahwa seluruh produk adalah N_2. Kemudian pada persaman ini kita menggunakan *Spesific Heat Capacity of Air* : $C_{p,1000K}$ = 1.142 kJ/kg.K

Berdasarkan penjumlahan seluruh produk diperoleh :

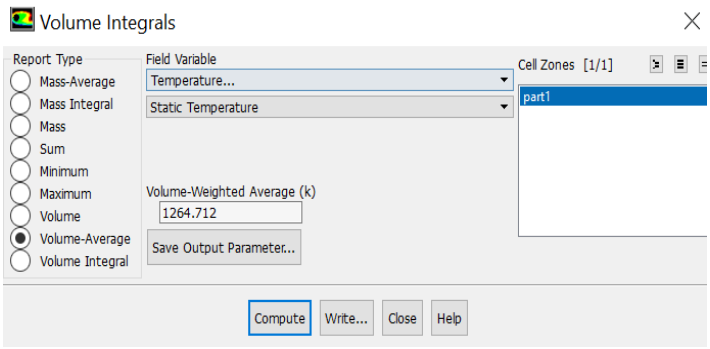
N total = 1 + 2 + 3 + 18.8 = 24.8 kmols produk

$24.8[h(T)-h^{o}]_{air} = 24.8\ (M_{air})(C_{p,1000k})(T_{adiabatik}-298K) = 802{,}310[kJ/kmol\ fuel]$

Dimana : M_{air} = 29 kg/kmol, merupakan massa molekul dari udara

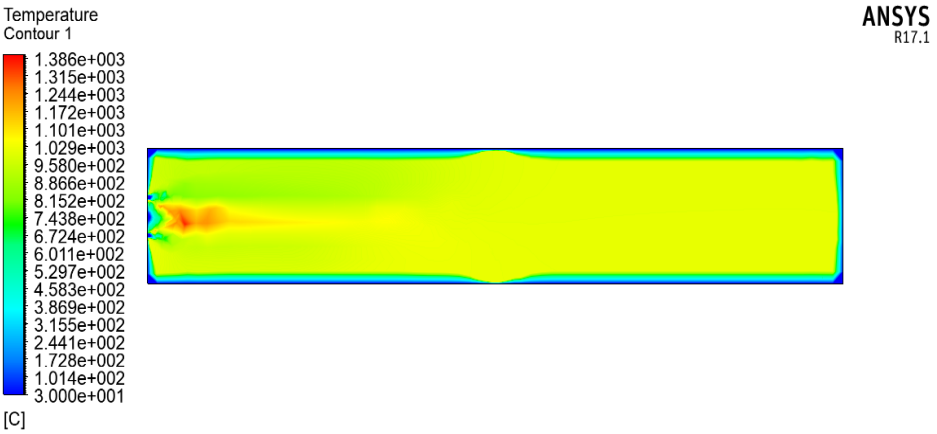
$C_{p,1000k}$ = 1.142 kJ/kg.K, merupakan *specific heat capacity* dari udara

Sehingga diperoleh $T_{adiabatik}$ = **1275K.**



Gambar B.2 Hasil Simulasi Validasi

Berdasarkan perhitungan diatas, dilakukan simulasi menggunakan *software Computational Fluid Dynamic* dan diperoleh temperatur sebesar **1264.712K.** Sehingga error antara hasil perhitungan dan simulasi adalah **0.806%**



Gambar B.3 Kontur *Temperature Furnace*

Metode Grid Indepence

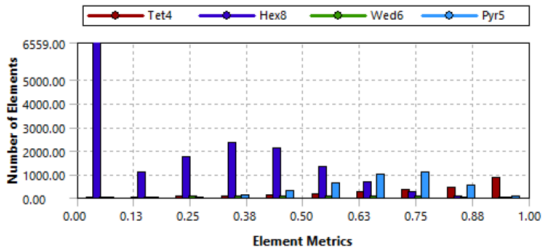
Salah satu tahapan *pre-processing* pada *software* CFD adalah *meshing*, dimana dilakukan pengaturan volume atur untuk dilakukan perhitungan. Adapun kualitas *meshing* dari geometri yang telah dilakukan dapat ditentukan berdasarkan skala dibawah ini.

Gambar B.4 Skala *Mesh Quality*

Berdasarkan statistik *meshing* yang dilakukan diperoleh data sebagai berikut

Tabel B.1 *Mesh Quality Geometry*

Nodes	20061
Elements	21910
Mesh Metric	Skewness
Minimum	9.5556e-004
Maximum	0.99983
Average	0.36488
Standard Deviation	0.29238



Gambar B.4 *Element Metrics*

Berdasarkan data diatas, kualitas *meshing* rata-rata yang telah dilakukan yakni 0.36488, dapat dikategorikan sangat baik (*very good*). Sedangkan untuk *grid independence test* dapat dilihat pada tabel dibawah, dimana dilakukan empat simulasi dengan jumlah *nodes* dan *elements* yang berbeda-beda, dan diperoleh *error* dibawah 10% dan masih dapat diterima sebagai sebuah simulasi yang valid.

Tabel B.2 *Grid Independence Method*

	Simulasi 1	Simulasi 2	Simulasi 3	Simulasi 4
Jumlah Nodes	20061	12688	13207	4942
Jumlah Element	21910	12485	15982	5488
Temperatur (K)	1697.27	1701.87	1714.57	1733.06
Error (%)	-	0.27085	1.01899	2.10862

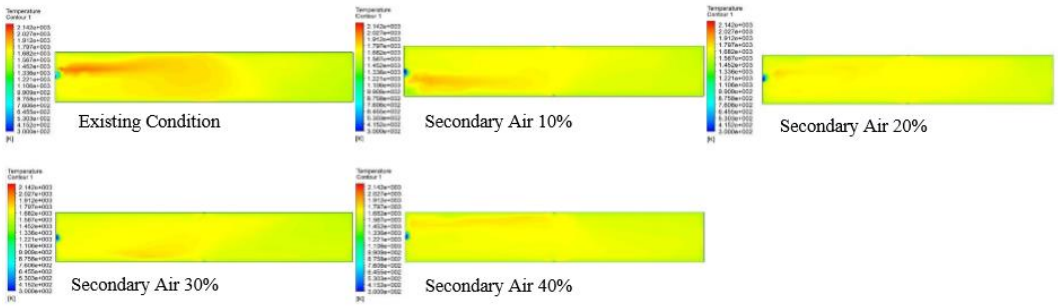
C. Hasil Simulasi

Tabel C.1 Hasil Simulasi Variasi

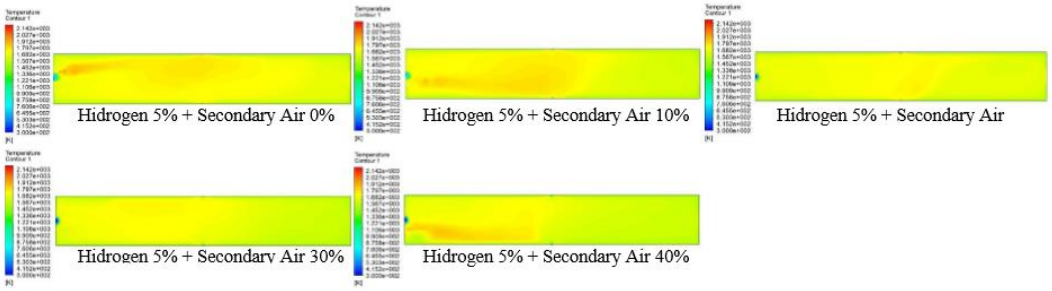
Jumlah Kadar Hidrogen	Jumlah Udara *Secondary Inlet*	Kadar CO2 (ppm)	Kadar CO (ppm)	Kadar Nox (ppm)	Temperatur *Furnace* (K)	Total *Energy* (J/kg)	Temperatur Outlet *Furnace* (K)
0%	0%	130822.6	9	783.8	1693.547	2.43E+10	1570.314
	10%	130681	10.8	83.1	1669.447	2.55E+10	1593.318
	20%	129602.8	11.3	72.7	1672.923	2.55E+10	1602.062
	30%	128032	10.1	55.8	1664.087	2.50E+10	1595.779
	40%	127246.1	16.3	62.8	1660.45	2.57E+10	1631.584
5%	0%	36882.5	48.8	526.4	1669.447	2.46E+10	1646.796
	10%	38885.4	33.2	261.8	1690.501	2.33E+10	1594.928
	20%	37764.6	43.7	118.7	1674.629	2.28E+10	1631.922
	30%	37746.6	27.1	60.9	1654.66	2.48E+10	1563.085
	40%	38232.3	27	102.8	1650.215	2.49E+10	1572.822
10%	0%	37690.7	32.7	298.6	1668.309	2.60E+10	1590.095
	10%	40287	25.9	58.6	1658.925	2.40E+10	1563.228
	20%	38633.2	35.8	134.4	1682.763	2.43E+10	1602.73
	30%	36464.9	39.9	68.4	1674.351	2.54E+10	1599.862
	40%	37344.7	33.7	109	1673.906	2.47E+10	1592.295
15%	0%	38707	42.8	70.9	1654.919	2.63E+10	1637.245
	10%	36518.3	43.4	119.2	1693.098	2.57E+10	1618.612
	20%	37833.9	36.9	73	1676.918	2.54E+10	1602.19
	30%	35718.8	53.8	49.4	1675.365	2.41E+10	1650.356
	40%	39249.8	29.2	106.5	1675.365	2.36E+10	1585.218
20%	0%	35500.5	37.6	191.1	1690.631	2.53E+10	1607.317
	10%	35243.7	51.5	257.1	1689.46	2.34E+10	1636.38
	20%	37597.4	39.3	160.8	1681.361	2.49E+10	1618.363
	30%	35109.6	51.3	183.7	1653.238	2.47E+10	1642.779
	40%	35321.6	73.3	71.5	1662.611	2.50E+10	1672.16

D. Profil Temperatur Setiap Variasi

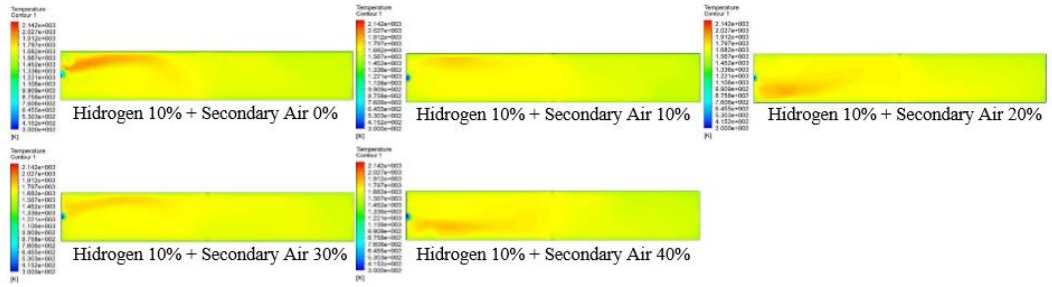
Penambahan Hidrogen 0%



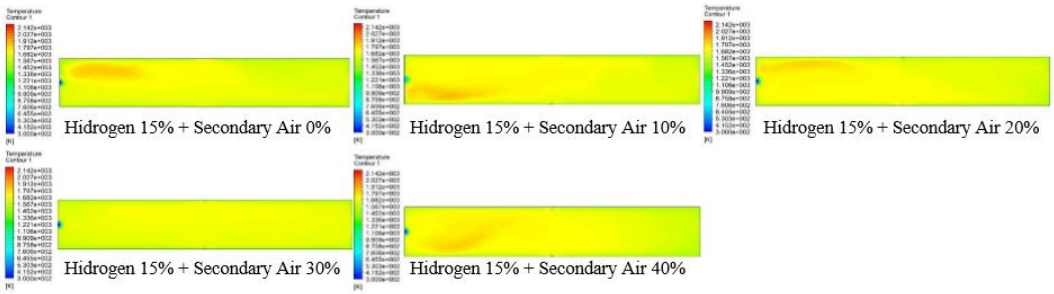
Penambahan Hidrogen 5%



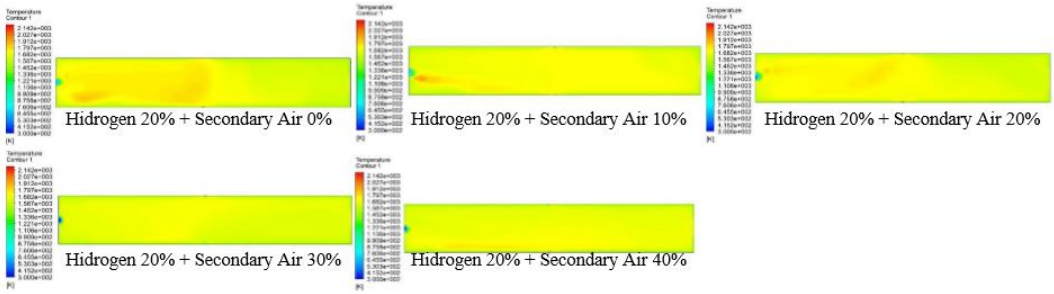
Penambahan Hidrogen 10%



Penambahan Hidrogen 15%



Penambahan Hidrogen 20%



BIODATA PENULIS

Penulis lahir di Ujung Pandang, 2 April 1999 dan berdomisili di Makassar, Sulawesi Selatan. Penulis menempuh pendidikan di SDK Santo Yakobus Makassar (2005-2011), SMPN 1 Sungguminasa (2011-2013), SMA Kolese de Britto Yogyakarta (2013-2016), dan S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama masa perkuliahaan, penulis aktif sebagai asisten di Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan dari tahun 2018-2020. Selain itu penulis juga sempat aktif dalam berbagai kepanitiaan di lingkungan Keluarga Mahasiswa ITS dan sempat diamanahi sebagai Ketua *Engineering Physics Week 2018* serta staff hubungan luar Harmonisasi Berkarya BEM FTI ITS (2017-2018). Penulis pernah menerima dua beasiswa yakni, Bakti BCA (2019) dan Generasi Baru Indonesia (GenBI)-Bank Indonesia (2020). Penulis juga pernah melaksanakan kegiatan kerja praktik di PT. TRIPATRA *Engineers and Constructos*, dengan fokusan *sizing control valve* pada LNG Tangguh *Expansion Project.* Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail:* nesasyofar@gmail.com.