



SKRIPSI - TK141581

**SIMULASI KARAKTERISTIK HIDRODINAMIKA PADA
PULSE COMBUSTOR BERBASIS CFD**

ESFANING SALIHAT
NRP 2311 100 001

RACHMA TIKASARI
NRP 2311 100 003

Dosen Pembimbing

Dr. Widiyastuti, S.T., M.T.

NIP. 197503062002122002

Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M. Eng.

NIP. 195209161980031002

JURUSAN TEKNIK KIMIA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh
Nopember Surabaya
2015



FINAL PROJECT - TK141581

**SIMULATION OF HYDRODYNAMIC
CHARACTERISTICS ON PULSE COMBUSTOR
BASED ON CFD**

**ESFANING SALIHAT
NRP 2311 100 001**

**RACHMA TIKASARI
NRP 2311 100 003**

Supervisor

Dr. Widiyastuti, S.T., M.T.

NIP. 197503062002122002

Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M. Eng.

NIP. 195209161980031002

**CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2015**

LEMBAR PENGESAHAN

SIMULASI KARAKTERISTIK HIDRODINAMIKA PADA PULSE COMBUSTOR BERBASIS CFD

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Teknik Program Studi S-1
Jurusan Teknik Kimia
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

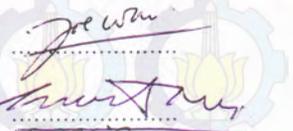
ESFANING SALIHAT
RACHMA TIKASARI

2311100001
2311100003

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Widiyastuti, S.T., M.T.
(Pembimbing I)
2. Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng.
(Pembimbing II)
3. Dr. Juwari, S.T., M.Eng.
(Penguji I)
4. Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.Eng.
(Penguji II)
5. Dr. Siti Machmudah, S.T., M.Eng.
(Penguji III)


.....


.....


.....

SURABAYA
JULI 2015

SIMULASI KARAKTERISTIK HIDRODINAMIKA PADA PULSE COMBUSTOR BERBASIS CFD

Nama : Esfaning Salihat (2311100001)
Rachma Tikasari (2311100003)
Jurusan : Teknik Kimia FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Widiyastuti, S.T., M.T.
Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M. Eng.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *inlet pulse* dan *inlet* konstan terhadap karakteristik pembakaran, serta pengaruh *excess air* dan geometri *pulse combustor* terhadap karakteristik dan performa pembakaran yang terjadi pada *pulse combustor* berbasis CFD (*Computational Fluid Dynamics*) menggunakan FLUENT melalui analisa temperatur, tekanan, dan kecepatan aliran.

Metode simulasi berbasis CFD digunakan karena sulitnya mengamati mekanisme *pulse combustion* yang sangat kompleks. Geometri *pulse combustor* yang digunakan berbentuk silinder dengan panjang 136 dan 250 mm, *inlet* dengan diameter 4 mm, dan *outlet* dengan diameter 20 dan 10 mm. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah udara dan propana pada temperatur 27°C dan tekanan 1 atm. Variabel yang digunakan untuk analisa karakteristik pembakaran adalah *inlet pulse* dan *inlet* konstan, sedangkan untuk analisa karakteristik pembakaran *pulse* adalah *excess air* dan geometri *pulse combustor*. Metodologi yang dilakukan meliputi beberapa tahapan diantaranya: membuat model geometri dan *grid*-nya, menentukan model, kondisi operasi, kondisi batas, parameter, dan penyelesaian hasil yang diamati dalam proses pembakaran pada *pulse combustor*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembakaran dengan *inlet pulse* memberikan hasil yang efektif dan efisien dibandingkan dengan *inlet* konstan. Semakin tinggi *excess air*

akan menurunkan suhu hasil pembakaran dan meningkatkan amplitudo tekanan. Geometri *pulse combustor* dengan luas penampang area perpindahan panas yang besar memberikan hasil pembakaran yang semakin efektif.

Kata kunci : CFD; pulse combustion; geometri pulse combustor; karakteristik hidrodinamika

SIMULATION OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS ON PULSE COMBUSTOR BASED ON CFD

Name : Esfaning Salihat (2311100001)
Rachma Tikasari (2311100003)
Department : Chemical Engineering FTI-ITS
Advisor : Dr. Widiyastuti, S.T., M.T.
Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M. Eng.

ABSTRACT

The purpose of this research is to study the affect of pulse and constant inlet for combustion characteristics, and also the affect of excess air and pulse combustor geometry for combustion characteristics and performances on pulse combustor based on CFD (Computational Fluid Dynamics) using FLUENT through temperature, pressure, and fluid velocity analysis.

Simulation method based on CFD (Computational Fluid Dynamics) is used because it is difficult to observe the complex mechanism of pulse combustion. Pulse combustors geometry that used in this research is cylinder which has length 136 and 250 mm, inlet with diameter 4 mm, and outlet with diameter 20 and 10 mm. The material used in this research is air and propane at temperature 27°C and pressure 1 atm. Variables which applied to analyze combustion characteristics are pulse and constant inlet, and to analyze pulse combustion characteristics are excess air and pulse combustor geometry. The methodology that will be conducted includes some stages: designing of geometry model and its grid, determining of model used, operating condition, boundary condition, parameter, and solving the simulation of pulse combustor.

The result show that combustion with pulse inlet give more effective and efficient combustion performances than constant inlet. The outlet temperature of combustion was

decreased and the pressure amplitude was increased with the increase of the excess air. Pulse combustor geometry with large heat transfer area give more effective combustion performances.

Keywords : CFD; pulse combustion; pulse combustor geometry; hydrodynamic characteristics

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT, atas segala petunjuk, karunia, dan kemudahan-Nya yang diberikan kepada kami sehingga kami dapat menyelesaikan Laporan Skripsi kami yang berjudul

“Simulasi Karakteristik Hidrodinamika pada *Pulse Combustor* Berbasis CFD”

Laporan Skripsi ini merupakan salah satu persyaratan kelulusan yang harus dilaksanakan oleh seluruh mahasiswa untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Dalam penyelesaian Laporan Skripsi ini, penyusun mendapatkan berbagai macam bantuan serta bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, kami ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Orang tua dan seluruh keluarga kami yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doanya.
2. Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M. Eng, selaku dosen pembimbing dan Kepala Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
3. Dr. Widiyastuti, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing kami atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
4. Dr. Tantular Nurtono, S.T., M. Eng, Kusdianto S.T., M.Sc.Eng., Dr. Siti Machmudah, S.T., M. Eng, selaku dosen Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran atas nasihat-nasihat yang telah diberikan.
5. Setiyo Gunawan, S.T., Ph.D., selaku koordinator Skripsi dan Tugas Akhir.
6. Dosen wali kami, Prof. Dr. Ir. M. Rachimoallah, Dipl. Est.

7. Mbak Fyka dan Mbak Eka yang telah memberikan ilmunya mengenai CFD dan *pulse combustion* kepada kami.
8. Yusi, Rosi, Juwita, Icha, Drajat, Gede, Stephen, Azis, Hermawan, Laila, Ni'am, Dini, Dimas, Ardianto, Gin Gin, Della, Wulan, Rina, Diana, Lia, Upik, Sarah, Edwin, Audit, Ridho, Raga, Mas Qifni, Mas Dwitama, Mas Iman, Mbak Restu, Mbak Arsus, dan Mas Agung sebagai teman-teman di Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran atas bantuan dan kebersamaannya saat susah maupun senang selama pengerjaan skripsi ini.
9. Bang Farid selaku laboran Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran atas semangat yang telah diberikan selama pengerjaan skripsi ini.
10. Teman-teman angkatan K-51 Teknik Kimia FTI-ITS atas dukungan dan *sharing* pengalamannya selama ini.
11. Seluruh dosen, staff, dan karyawan Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS serta semua pihak yang telah membantu penyelesaian penelitian ini, yang tidak dapat kami sebutkan satu-persatu.

Tak ada gading yang tak retak, begitu pula dengan Laporan Skripsi ini yang masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kami mengharapkan segala saran dan masukan yang membangun.

Semoga Laporan Skripsi ini dapat memberikan sumbangan ilmu pengetahuan dan manfaat bagi kita semua, khususnya di bidang Teknik Kimia.

Surabaya, Juli 2015

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Pulse Combustion</i>	5
2.2.1 Prinsip Kerja <i>Pulse Combustor</i>	7
2.2.1 Tipe dan Aplikasi <i>Pulse Combustion</i>	8
2.2 <i>Premixed dan Non-Premixed Combustion</i>	9
2.3 CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>).....	9
2.4 Permodelan Aliran Fluida.....	11
2.4.1 Persamaan Kontinuitas (Hukum Kekekalan Massa).....	11
2.4.2 Persamaan Momentum.....	11
2.4.3 Persamaan Kekekalan Energi.....	12
2.5 Permodelan Turbulensi.....	12
2.6 Permodelan Reaksi.....	13
2.7 Propana.....	14
2.8 Penelitian Terdahulu.....	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Sistem yang Dipelajari.....	19
3.2 Prosedur Simulasi.....	22
3.3 Variabel Penelitian.....	23

3.4	Kondisi Batas	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Perbandingan Performa Pembakaran <i>Inlet</i> Konstan dan <i>Inlet Pulse</i>	28
4.2	Identifikasi Pengaruh <i>Excess air</i> Terhadap Performa <i>Pulse Combustor</i>	38
4.3	Pengaruh Geometri terhadap Hasil Pembakaran pada <i>Pulse Combustor</i>	43
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	47
5.2	Saran	48
DAFTAR NOTASI		
DAFTAR PUSTAKA		
APPENDIKS		

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan antara <i>Steady State Combustion</i> dan <i>Pulse Combustion</i>6
Tabel 3.1	Kondisi Batas untuk Simulasi Perbandingan Pembakaran Konstan dan <i>Pulse</i>24
Tabel 3.2	Kondisi Batas untuk Simulasi <i>Pulse Combustion</i> Variasi <i>Excess air</i>25
Tabel 3.3	Kondisi Batas untuk Simulasi <i>Pulse Combustion</i> Variasi Geometri <i>Pulse combustor</i>25
Tabel 4.1	Perbandingan Performa Pembakaran <i>Inlet</i> Konstan dan <i>Inlet Pulse</i>37
Tabel 4.2	Perbandingan Produk Pembakaran Tiap Satu <i>Cycle</i> pada Variasi <i>Excess air</i>42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Pulse Combustor</i>	5
Gambar 3.1	Dimensi <i>Pulse combustor</i> (a) Geometri 1(b) Geometri 2	20
Gambar 2.2	<i>Grid Pulse combustor</i> (a) Geometri 1(b) Geometri 2	21
Gambar 4.1	<i>Inlet Velocity</i> (a) <i>Inlet Pulse</i> (b) <i>Inlet Konstan</i> ...	28
Gambar 4.2	Perbandingan Tekanan untuk <i>Inlet Konstan</i> dan <i>Inlet Pulse</i>	29
Gambar 4.3	Kontur Tekanan (Pascal) pada <i>Inlet Pulse</i> dalam 1 <i>Cycle</i>	31
Gambar 4.4	Kontur pada <i>Inlet Konstan</i> (a) Tekanan (Pascal)(b) Temperatur (K) (c) Kecepatan (m/s)	32
Gambar 4.5	Vektor Kecepatan (m/s) pada <i>Inlet Pulse</i> dalam 1 <i>Cycle</i>	33
Gambar 4.6	Kecepatan (m/s) pada Jarak 24 mm dari <i>Outlet</i>	33
Gambar 4.7	Arah Vektor Kecepatan pada 4/7 <i>Cycle</i> untuk <i>Inlet Pulse</i>	34
Gambar 4.8	<i>Kontur Temperatur</i> (m/s) pada <i>Inlet Pulse</i> dalam 1 <i>Cycle</i>	35
Gambar 4.9	Osilasi Tekanan, Temperatur, dan Kecepatan pada Pembakaran <i>Pulse</i>	36
Gambar 4.10	Perbandingan Temperatur <i>Outlet</i> Pembakaran pada Variasi <i>Excess air</i>	39
Gambar 4.11	Pengaruh <i>Excess air</i> Terhadap Temperatur <i>Outlet</i> Maksimum dan Minimum.....	40
Gambar 4.12	Perbandingan Amplitudo Tekanan pada Variasi <i>Excess air</i>	41
Gambar 4.13	Pengaruh <i>Excess air</i> terhadap Amplitudo Tekanan pada <i>Pulse Combustor</i>	42
Gambar 4.14	Perbandingan Geometri <i>Pulse Combustor</i> terhadap Total Energi.....	44

Gambar 4.15	Perbandingan Geometri <i>Pulse Combustor</i> terhadap <i>Heat of Reaction</i> Rata-Rata.....	45
Gambar 4.16	Perbandingan Geometri <i>Pulse Combustor</i> terhadap Temperatur <i>Outlet Tailpipe</i>	46

DAFTAR NOTASI

NOTASI	KETERANGAN	SATUAN
A	Luas penampang	m^2
C	Konsentrasi	$kgmol/m^3$
C_p	<i>Specific heat</i>	$J/kg.K$
$C_{1\varepsilon}, C_{3\varepsilon},$ C_1, C_2	Konstanta model turbulen	[...]
D_i	Diameter	m
E_A	Energi aktivasi	$J/kgmol$
F	<i>Net force</i>	N
G_k	Produksi energi kinetik turbulensi	[...]
G_b	Produksi energi kinetik turbulensi akibat gaya apung	[...]
h	Koefisien <i>heat transfer</i>	$W/m^2.K$
k	Energi kinetik turbulensi	m^2/s^2
m	Massa	kg
M	Berat molekul	$kg/kgmol$
P	Tekanan fluida	N/m^2
r	Koordinat radial	[...]
R	Konstanta gas	$J/mol.K$
R_i	Perubahan spesies akibat reaksi pembakaran	$kg/m^3.s$
S_h	Panas yang dilepaskan dari pembakaran bahan bakar	$W/m^2.K$
S_k	<i>User defined source term</i>	[...]
S_ε	<i>User defined source term</i>	[...]
T	Temperatur	K
u	Kecepatan <i>flapper</i>	m/s
v	Kecepatan fluida	m/s
X	Koordinat axial	[...]

Y_i	Fraksi massa spesies i	%
ε	<i>Dissipation rate</i>	m^2/s^3
η	Viskositas fluida	Pa.s
ρ	Massa jenis fluida	kg/m^3
σ	Konstanta Stefan-Boltzmann	$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$

Subscript :

ε = *dissipation rate*

i = nomor

k = energi kinetik turbulen

r = koordinat radial

t = turbulen

x = koordinat axial

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembakaran adalah reaksi kimia eksotermis yang mengkonversi bahan bakar menjadi produk pembakaran dan energi. Salah satu tipe pembakaran yang bukan merupakan teknologi baru adalah *pulse combustion*. Hingga saat ini, penelitian tentang *pulse combustion* terus dilakukan dan dikembangkan. *Pulse combustion* adalah bentuk spesifikasi dari pembakaran yang berbasis osilasi. Osilasi pada *pulse combustion* dapat menghasilkan manfaat dalam peningkatan kecepatan transfer panas dan massa antara produk pembakaran dan bahan bakar. Osilasi pencampuran dan transfer panas yang tinggi melalui dinding ruang bakar menghasilkan kondisi aliran osilasi di dalam zona pembakaran, yang meminimalkan produksi NO_x dan waktu tinggal reagen dibandingkan dengan sistem pembakaran klasik. Hal ini menyebabkan proses *pulse combustion* sangat efisien (Mujumdar, 2006).

Penggunaan *pulse combustion* sebenarnya bukan merupakan teknologi baru. *Pulse combustion* mempunyai potensi besar untuk diaplikasikan terutama dalam proses pengeringan (*drying*), ruang pemanas (*space heating*), *furnaces*, *boilers*, dan lain-lain (Zhonghua, 2007). Pada proses pengeringan, *dryer* dengan sistem *pulse combustion* memiliki kapasitas pengeringan yang lebih besar dengan konsumsi energi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan berbagai pengering konvensional (Zbicinski, 2002).

Beberapa hal yang mempengaruhi osilasi pada *pulse combustor* adalah tipe *valve* yang digunakan, variasi dari bentuk *combustion chamber* dan *tailpipe*, serta *rate* aliran yang menuju *combustion chamber* (Putnam et al., 1986). Studi mengenai *pulse combustion* telah dilakukan secara eksperimen mengenai pengaruh frekuensi, amplitudo, dan *Flow rate* rata-rata terhadap perpindahan panas pada *pulse combustor tailpipe* (Dec et al.,

1989) dan yang menjelaskan bahwa pembakaran pada *pulse combustor* menunjukkan hasil pembakaran yang optimum pada kondisi stokiometri, yang juga hampir mendekati *rich limit condition* (Tang et al., 1990). Selain itu secara simulasi juga telah dilakukan mengenai pengaruh *excess air* terhadap pembakaran pada *pulse combustor* yang menunjukkan bahwa peningkatan *excess air* yang digunakan menurunkan suhu pembakaran yang dihasilkan (Xu et al., 2012), dan yang menunjukkan bahwa peningkatan luas permukaan perpindahan panas dapat memberikan proses perpindahan panas yang lebih baik dan pembakaran yang lebih efektif (Zhonghua et al., 2008).

Kondisi optimal untuk peningkatan performa dari *pulse combustion* sulit untuk diamati karena menghasilkan fenomena osilasi yang sangat kompleks dan menghabiskan biaya yang tinggi. Oleh karena itu simulasi *pulse combustion* menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan dalam penelitian ini dengan menganalisa pengaruh *inlet pulse* dan *inlet* konstan terhadap karakteristik pembakaran yang dihasilkan, serta pengaruh *excess air* dan geometri dari *pulse combustor* yang digunakan terhadap performa pembakaran *pulse* yang dihasilkan. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan *software* yang mendukung untuk mengamati pola alir yang kompleks dalam bentuk visual pada proses *pulse combustion*, memprediksi kemungkinan aliran yang tidak stabil, memprediksi perpindahan panas dalam kondisi aliran yang berosilasi, distribusi suhu hasil pembakaran, dan lain-lain.

1.2 Rumusan Masalah

Pulse combustion memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan *constant combustion*. Pada *pulse combustion* terjadi fenomena yang sulit diamati melalui eksperimen. Hasil pembakaran yang terjadi pada *pulse combustor* dipengaruhi oleh *excess air* dan geometri dari *pulse combustor* yang digunakan. Sehingga dibutuhkan analisa *modelling* menggunakan CFD untuk mengetahui karakteristik pembakaran

yang dihasilkan dari *inlet pulse* dan *inlet* konstan, serta mengetahui karakteristik dan performa pembakaran yang terjadi pada *pulse combustor* melalui pengaruh *excess air* dan geometri dari *pulse combustor* yang digunakan.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah geometri *pulse combustor* yang digunakan, yaitu menggunakan geometri pada penelitian Widiyastuti et al., 2007. Jenis bahan bakar yang digunakan adalah propana dengan *Flow rate* 0,67 L/min. Temperatur *inlet* bahan bakar dan udara yang diumpankan ke *pulse combustor* adalah 300 K. Frekuensi operasi pada *pulse combustor* sebesar 700 Hz.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *inlet pulse* dan *inlet* konstan terhadap karakteristik pembakaran, serta pengaruh *excess air* dan geometri *pulse combustor* terhadap karakteristik dan performa pembakaran yang terjadi pada *pulse combustor* berbasis CFD (*Computational Fluid Dynamics*) menggunakan FLUENT melalui analisa temperatur, tekanan, dan kecepatan aliran.

1.5 Manfaat Penelitian

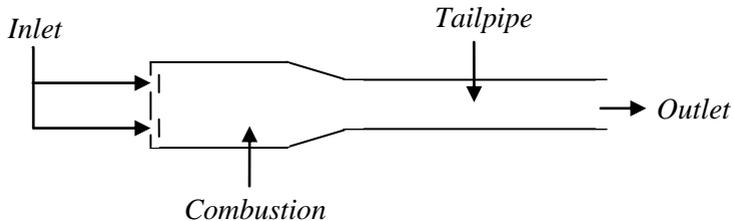
Manfaat penelitian ini adalah mengetahui karakteristik pembakaran yang dihasilkan dari *inlet pulse* dan *inlet* konstan, performa *pulse combustor* dengan variasi *excess air* yang diumpankan dan pengaruh geometri *pulse combustor* yang digunakan, serta memprediksi kondisi optimum terjadinya *pulse combustion*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Pulse Combustion*

Penggunaan *pulse combustion* bukanlah sebuah teknologi baru. Selama proses *pulse combustion*, terjadi pencampuran yang intensif dan meningkatkan transfer massa antara *combustion product* dengan bahan bakar. Pencampuran dan transfer inilah yang membuat efisiensi dari *pulse combustor* semakin meningkat. Pada *pulse combustion* terjadi proses pencampuran dan panas yang melalui dinding *combustor* yang dapat menyebabkan pengurangan waktu tinggal jika dibandingkan dengan sistem *combustion* konvensional (Zinn, 1992).

Pulse combustor pada umumnya terdiri dari sebuah *inlet valve* untuk udara dan *fuel*, *combustion chamber*, *resonance tube (tailpipe)* sesuai gambar 2.1. *Pulse combustor* dapat digunakan untuk bahan bakar dalam bentuk gas, liquid, maupun solid.



Gambar 2.1 *Pulse Combustor*

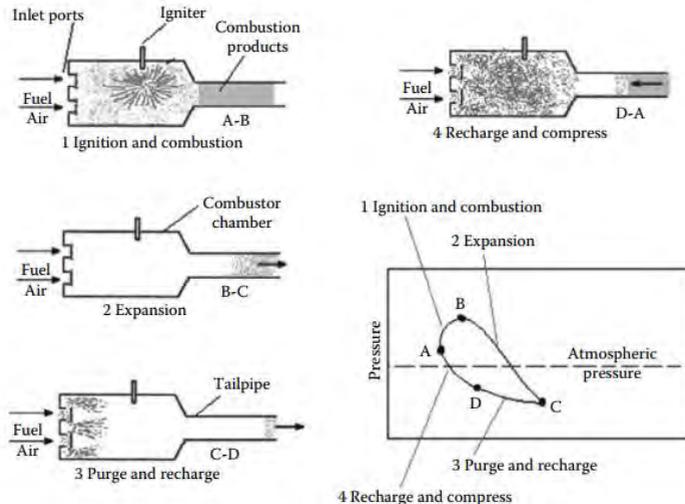
Selama *pulse combustion*, pencampuran intensif dan peningkatan perpindahan massa dan panas berlangsung antara produk pembakaran dan *fuel*, dan antara gas buang dan dinding *chamber*. Peningkatan pencampuran dan proses *transport* menyebabkan efisiensi yang tinggi dan proses pembakaran yang baik. Osilasi pencampuran dan transfer panas yang tinggi melalui dinding ruang bakar menghasilkan kondisi aliran osilasi di dalam zona pembakaran, yang meminimalkan produksi NO_x dan waktu tinggal reagen dibandingkan dengan sistem pembakaran klasik

(Mujumdar, 2006). Tabel 2.1 menunjukkan jika dibandingkan dengan sistem *continuous combustion*, *pulse combustion* dapat memberikan berbagai kelebihan seperti efisiensi pembakaran yang lebih tinggi, koefisien perpindahan massa yang lebih tinggi, dan emisi polutan yang lebih rendah (Zbicinski, 2002).

Tabel 2.1 Perbandingan antara *Steady State Combustion* dan *Pulse combustion*

Parameter Proses	<i>Steady state</i>	<i>Pulse</i>
Intensitas pembakaran (kW/m ³)	100-1000	10.000-50000
Efisiensi pembakaran	80-96	90-99
Kehilangan akibat pembakaran kimia (%)	0-3	0-1
Kehilangan akibat pembakaran mekanik (%)	0-15	0-5
Level temperatur (K)	2000-2500	1500-2000
Konsentrasi CO di aliran keluar (%)	0-2	0-1
Konsentrasi NO _x di aliran keluar (%)	100-7000	20-70
Tingkat kebisingan (dB)	85-100	110-130
Koefisien perpindahan massa konvektif (W/m ² K)	50-100	100-500
Waktu reaksi (s)	1-10	0,01-0,5
Koefisien udara <i>excess</i>	1,01-1,2	1,00-1,01

2.2.1 Prinsip Kerja *Pulse Combustor*



Gambar 2.2 Mekanisme Pembakaran pada *Pulse Combustor*

Prinsip kerja *pulse combustor* terdiri dari empat fase dalam satu *cycle* operasi seperti yang tampak pada Gambar 2.2.

Empat fase dalam satu kali *cycle* adalah :

1. *Ignition and Combustion*

Mula-mula *inlet valve* sehingga bahan bakar dan udara masuk dalam *combustion chamber*. Terjadi penyalaan campuran bahan bakar dan udara yang menyebabkan terjadinya ledakan. Hal ini menyebabkan tekanan dalam *combustion chamber* meningkat dari A-B.

2. *Expansion*

Pada fase ini, karena tekanan pada *combustion chamber* meningkat kemudian terjadi ekspansi yang menyebabkan hasil pembakaran bergerak menuju *tailpipe*. Lama-kelamaan tekanan dalam *combustion chamber* menurun hingga dibawah tekanan atmosfer. (Dari titik B-C).

3. *Purge and Recharge*

Tekanan yang rendah menyebabkan *inlet valve* terbuka sehingga udara dan bahan bakar mengisi kembali *combustion chamber*. Selain itu, hal ini menyebabkan aliran balik hasil pembakaran pada *tailpipe* kembali menuju *combustion chamber*.

4. *Recharge and Compress*

Udara dan bahan bakar yang baru masuk ke dalam *combustion chamber* kemudian bercampur dengan hasil pembakaran yang kembali menuju *combustion chamber*. Setelah itu terjadi pembakaran kembali dari campuran tersebut. Tahapan ini kemudian berlanjut secara terus-menerus (Zhonghua, 2007).

2.2.1 Tipe dan Aplikasi *Pulse Combustion*

Jenis *pulse combustion* berdasarkan jenis bahan bakar yang digunakan adalah :

- Schmidt *combustor* : bahan bakar cair
- Helmholtz resonator : bahan bakar gas
- Rijke tube : bahan bakar padat

dari ketiga tipe tersebut yang paling banyak digunakan pada industri adalah tipe Helmholtz. Hal ini dikarenakan desainnya yang relatif mudah dioperasikan dan mempunyai konstruksi yang simpel (Zhonghua, 2007).

Pulse combustor menjadi menarik karena kemampuannya yang dapat meningkatkan efisiensi pembakaran, penggunaan bahan bakar yang ekonomis, dan operasinya yang ramah lingkungan. Sampai sekarang, aplikasi dari *pulse combustor* meningkat secara signifikan. Aplikasi *pulse combustion* secara umum dibagi menjadi dua kelas, yaitu penggunaan *pulse combustor* sebagai pemanas dan pemanfaatan aliran *pulse* di dalam dan atau di luar *pulse combustor* untuk peningkatan proses pada *drying* atau *calcining* (Zinn, 1992).

2.2 Premixed dan Non-Premixed Combustion

Proses pembakaran turbulen secara umum dapat dibedakan menjadi dua yaitu *premixed combustion* dan *non-premixed combustion*. Untuk *premixed combustion* pada umumnya terjadi pada mesin motor yang menggunakan busi, dimana bahan bakar dan udara dicampurkan dan diumpankan ke dalam ruang pembakar secara bersamaan. Kemudian proses pembakaran terjadi percikan api yang dihasilkan dari busi membakar campuran bahan bakar dan udara yang telah terkompres oleh piston (Peters, 1997).

Sedangkan untuk *non-premixed combustion* terjadi pada mesin diesel. Proses pembakaran pada mesin diesel terjadi tanpa pencampuran udara dan bahan bakar saat diumpankan ke dalam ruang pembakaran. Udara mula-mula dihisap ke dalam ruang pembakaran dan dikompresi oleh gerakan piston. Kemudian bahan bakar diinjeksikan ke dalam udara yang telah terkompresi dan bersuhu tinggi. Akibatnya, bahan bakar akan terbakar dengan sendirinya pada ruang pembakaran (Peters, 1997).

2.3 CFD (Computational Fluid Dynamics)

CFD (*Computational Fluid Dynamics*) adalah teknik numerik untuk penyelesaian persamaan pengaturan aliran fluida didalam aliran fluida tertentu. Aliran fluida dapat digambarkan dengan menggunakan persamaan Navier's stoke. Persamaan ini diturunkan dengan mempertimbangkan kesetimbangan massa, momentum, dan energi di dalam elemen fluida, menghasilkan sejumlah penurunan persamaan parsial. Persamaan ini dilengkapi dengan menambahkan persamaan aljabar lain dari termodinamika seperti persamaan keadaan untuk massa jenis dan persamaan pokok untuk menjelaskan reologi.

Kode CFD tersusun atas algoritma-algoritma numerik yang dapat menyelesaikan permasalahan aliran fluida. Suatu kode CFD terdiri dari tiga elemen utama yaitu *pre-processor*, *solver*, dan *Post-processor* (Versteeg et al., 2007).

Pre-processing meliputi masukan dari permasalahan aliran ke suatu program CFD dan transformasi dari masukan tersebut ke bentuk yang cocok digunakan oleh *solver*. Langkah-langkah dalam tahap ini:

- Pendefinisian geometri yang dianalisa.
- *Grid* generation, yaitu pembagian daerah domain menjadi bagian-bagian lebih kecil yang tidak tumpang tindih.
- Seleksi fenomena fisik dan kimia yang perlu dimodelkan.
- Pendefinisian properti fluida.
- Pemilihan *boundary condition* (kondisi batas) pada kontrol volume atau sel yang berimpit dengan batas domain.
- Penyelesaian permasalahan aliran (kecepatan, tekanan, temperatur, dan sebagainya) yang didefinisikan pada titik nodal dalam tiap sel. Keakuratan penyelesaian CFD ditentukan oleh jumlah sel dalam *grid*.

Secara umum metode numerik *solver* tersebut terdiri dari langkah-langkah sebagai berikut :

- Prediksi variabel aliran yang tidak diketahui dengan menggunakan fungsi sederhana.
- Diskretisasi terhadap semua persamaan yang terlibat menjadi sistem persamaan aljabar.
- Penyelesaian persamaan aljabar dengan metode iterasi.

Post-processing merupakan tahap visualisasi dari hasil tahapan sebelumnya. *Post-processor* semakin berkembang dengan majunya *engineering workstation* yang mempunyai kemampuan grafik dan visualisasi cukup besar. Alat visualisasi tersebut antara lain :

- Domain geometri dan *display*.
- *Plot* vektor.
- *Plot* kontur.
- *Plot* 2D dan 3D *surface*.
- Manipulasi tampilan (translasi, rotasi, skala, dan sebagainya).
- Animasi *display* hasil dinamik.

2.4 Permodelan Aliran Fluida

2.4.1 Persamaan Kontinuitas (Hukum Kekekalan Massa)

Fenomena aliran dapat dimodelkan dengan persamaan matematis yaitu persamaan kontinuitas (hukum kekekalan massa) dan persamaan momentum (hukum kekekalan momentum). Persamaan kontinuitas untuk suatu fluida *compressible* pada aliran *unsteady* dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (2.1)$$

dimana x adalah koordinat aksial, r adalah koordinat radial, v_x adalah kecepatan aksial dan v_r adalah kecepatan radial. Dalam notasi vektor, persamaan 2.1 dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \quad (2.2)$$

Untuk aliran *incompressible*, nilai densitas (ρ) adalah konstan dan persamaan (2.2) menjadi :

$$\nabla(\rho v) = 0 \quad (2.3)$$

Atau persamaan (2.1) menjadi :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (2.4)$$

(Fluent, 2013)

2.4.2 Persamaan Momentum

Hukum kedua Newton menyatakan bahwa laju perubahan momentum pada partikel fluida sama dengan jumlah gaya-gaya yang bekerja pada partikel. Gaya-gaya tersebut dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *surface force* dan *body force* meliputi *gravity force*, *centrifugal force*, dan *electromagnetic force*. *Body force* biasanya dinyatakan sebagai *source term* dalam suatu persamaan momentum. Persamaan momentum dalam arah aksial dan radial untuk geometri aksial dua dimensi dapat ditulis dalam bentuk-bentuk persamaan Navier-Stokes sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \\ \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad (2.5)$$

dan,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \\ \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} \\ + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r \end{aligned} \quad (2.6)$$

dimana

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \quad (2.7)$$

v_z adalah *swirl velocity* (Fluent, 2013).

2.4.3 Persamaan Kekekalan Energi

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{r \partial x}(r \rho h v_x) + \frac{\partial}{r \partial r}(r \rho h v_r) = \frac{\partial}{r \partial x} \left(r k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{r \partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ + \frac{\partial}{r \partial x} \left(r \rho D_i \frac{\partial h_i Y_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{r \partial r} \left(r \rho D_i \frac{\partial h_i Y_i}{\partial r} \right) + S_h \end{aligned} \quad (2.8)$$

Dimana S_h menunjukkan panas yang dihasilkan dari spesies pembakaran gal *fuel*.

$$S_h = - \sum_i \left(\frac{h_i^0}{M_i} + \int_{T_{ref,i}}^T c_{p,i} dT \right) R_i \quad (2.9)$$

(Zhonghua, 2007)

2.5 Permodelan Turbulensi

Energi kinetik turbulen, k dan dissipation rate, ε untuk k - ε model turbulensi dimodelkan sebagai berikut.

Energi kinetik turbulen :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{r\partial_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{r\partial_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.10)$$

Dissipation rate dari energi kinetik turbulen menggunakan persamaan :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2.11)$$

dimana

$$C_{1\varepsilon} = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.12)$$

Eddy viscosity dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

$C_{1\varepsilon}$ dan C_2 adalah konstan, σ_k dan σ_ε adalah *turbulent prandtl number* untuk k dan ε (Fluent, 2013).

2.6 Permodelan Reaksi

Proses pembakaran propana yang terjadi pada *pulse combustor* diasumsikan merupakan proses pembakaran satu tahap dengan reaksi sebagai berikut :



Lima spesies, C_3H_8 , O_2 , N_2 , CO_2 , dan H_2O dimodelkan dengan persamaan yang sesuai dengan persamaan konservasi. Rate dari reaksi dihitung dengan mempertimbangkan hukum Arrhenius dan permodelan Magnussen-Hjertager serta memperhitungkan model kinetika dari reaksi. Persamaan Arrhenius yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$rate [kgmol / (m^3 \cdot s)] = k_0 \cdot \exp \left[-\frac{E_A}{RT} \right] [C_A]^a [C_B]^b \quad (2.14)$$

dimana konsentrasi dalam satuan $kgmol/m^3$. Persamaan untuk reaksi turbulen adalah :

$$R_i = A \rho m^* \frac{\varepsilon}{k} \quad (2.15)$$

menjadi

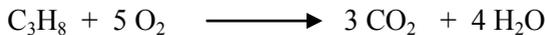
$$m^* = \min \left\{ \left(\frac{m_i}{v_i M_i} \right)_{reactants}, B \sum_{products} \left(\frac{m_k}{v_k M_k} \right) \right\} \quad (2.16)$$

dimana v_i dan M_i adalah koefisien stoikiometri dan berat molekul dari spesies i , k , ε adalah energi kinetik turbulen dan *dissipation rate*. Koefisien A adalah konstan 4,0 dan koefisien B adalah 0,5 (Zhonghua, 2007).

2.7 Propana

Propana (C_3H_8) merupakan senyawa alkana yang berwujud gas dalam keadaan normal, tetapi dapat dikompresi menjadi cairan yang mudah dipindahkan. Senyawa ini diturunkan dari produk petroleum lain pada pemrosesan minyak bumi atau gas alam. Propana umumnya digunakan sebagai bahan bakar yang dikenal juga sebagai LPG (*Liquefied Petroleum Gas*) yang secara kimia terdiri dari unsur karbon dan hidrogen yang merupakan senyawa hidrokarbon dengan komponen utama C_3 dan C_4 . Komposisi LPG tersebut terdiri dari senyawa propana C_3H_8 , *propylene* atau propena C_3H_6 , butana C_4H_{10} , *butylene* atau butena C_4H_8 , dan sejumlah kecil ethana C_2H_4 , ethylena C_2H_4 , dan penthana C_5H_{12} .

Propana mengalami reaksi pembakaran yang mirip dengan alkana lain. Pada keadaan oksigen berlebih, propana terbakar dan kemudian membentuk *air* dan karbondioksida dengan reaksi sebagai berikut :



Bila tak ada cukup oksigen untuk pembakaran sempurna, maka pembakaran tidak sempurna terjadi ketika propana terbakar dengan membentuk air, karbon monoksida, dan karbon dioksida sesuai dengan reaksi sebagai berikut :



Pembakaran propana jauh lebih bersih daripada pembakaran bensin meskipun tidak sebersih pembakaran gas alam. Adanya ikatan C-C dengan beberapa ikatan propilena dan butilena menghasilkan buangan organik selain karbondioksida dan uap *air* selama pembakaran. Ikatan ini juga menyebabkan terlihatnya api ketika propana terbakar.

Tidak seperti gas alam, propana lebih berat dari udara yaitu sekitar 1,5 kali lebih padat. Dalam keadaan mentah, propana akan berada di dasar. Propana *cair* akan menguap pada tekanan atmosfer dan tampak putih karena kondensasi uap *air* dari udara. Propana tidak beracun, namun jika terhirup akan menimbulkan asfiksi ringan karena kekurangan oksigen. Umumnya produk yang mengandung hidrokarbon propana disimpan di bawah tekanan pada suhu kamar, propana dan campurannya memuai ke seluruh ruangan dan mendingin ketika dilepas serta dapat menyebabkan radang dingin ringan.

2.8 Penelitian Terdahulu

2.8.1 Simulasi

- Zhonghua (2007) melakukan simulasi menggunakan CFD (*Computational Fluid Dynamics*) tentang mekanisme kerja *pulse combustion* dan aplikasinya terhadap inovasi mekanisme proses pengeringan. Tipe *pulse combustor* yang digunakan adalah Helmholtz dengan *mechanical valve* dan proses pembakaran *fuel/air premixed*. Menggunakan model geometri 2D dengan permodelan turbulensi standar k-ε permodelan reaksi *species transport*, permodelan *flapper valve* dan *dynamic mesh*, permodelan *boundary condition*, dan permodelan aliran fluida (neraca massa, momentum, dan energi). Pada simulasi ini menggunakan teknologi

dynamic mesh untuk menganalisa perpindahan *flapper valve* yang merupakan salah satu parameter terhadap mekanisme kerja *pulse combustion*. Dalam simulasi ini sistem yang dipelajari meliputi pengaruh dari variasi *inlet* tekanan dari campuran bahan bakar dan udara, *fuel/air equivalence ratio*, pergerakan *flapper valve*, *flapper inertia* dan *heat loss*. Hasil dari simulasi ini menunjukkan bahwa *heat transfer* pada *pulse combustion* meningkatkan laju pengeringan material.

- Zhonghua dan Mujumdar (2008) melakukan simulasi menggunakan CFD (*Computational Fluid Dynamics*) mengenai pengaruh variasi bahan bakar gas terhadap karakteristik *pulse combustion*. Tipe *pulse combustor* yang digunakan adalah Helmholtz dengan *mechanical valve* dan proses pembakaran *fuel/air premixed*. Menggunakan model geometri 2D-*axisymmetric* dengan permodelan turbulensi standar k- ϵ permodelan reaksi *species transport*, dan permodelan aliran fluida (neraca massa, momentum, dan energi). Bahan bakar yang memiliki berat molekul hidrokarbon yang rendah dan tinggi, *biofuels*, dan *mixed fuels* digunakan dalam simulasi ini. Hasil dari penelitian ini menyebutkan bahwa *combustor* dapat menghasilkan rentang parameter pembakaran tertentu untuk bahan bakar yang berbeda.
- Xu, Chen, dan Wang (2012) melakukan simulasi menggunakan CFD (*Computational Fluid Dynamics*) tentang karakteristik dasar dari pembakaran *pulse* dan pengaruh pengoperasian parameter pembakaran *pulse*. Tipe *pulse combustor* yang digunakan adalah Helmholtz, *valveless*, dan proses pembakaran *fuel/air premixed*. Menggunakan model geometri 2D- dengan permodelan turbulensi standar k- ϵ permodelan reaksi *species transport*, dan permodelan aliran fluida (neraca massa, momentum, dan energi). Hasil dari simulasi ini mengatakan bahwa tekanan, temperatur, dan fraksi massa bahan bakar yang

digunakan pada *combustion chamber* berpengaruh terhadap proses pembakaran *pulse*. Amplitudo tekanan pada *combustion chamber* meningkat dengan peningkatan *excess air ratio* dan *inlet mass flow rate*.

2.8.2 Eksperimen

Dec dan Keller (1989) melakukan penelitian secara eksperimen mengenai pengaruh frekuensi, amplitudo, dan *Flow rate* rata-rata pada perpindahan panas dalam *pulse combustor tail pipe*. Tipe *pulse combustor* yang digunakan adalah Helmholtz dengan external flapper valve dan *premixed combustion*. Dalam penelitian ini dilakukan variasi *mass flow rate*, frekuensi, dan panjang *tailpipe* yang digunakan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan bilangan Nusselt menurun dengan peningkatan *mass flow rate*, amplitudo osilasi pembakaran, dan frekuensi.

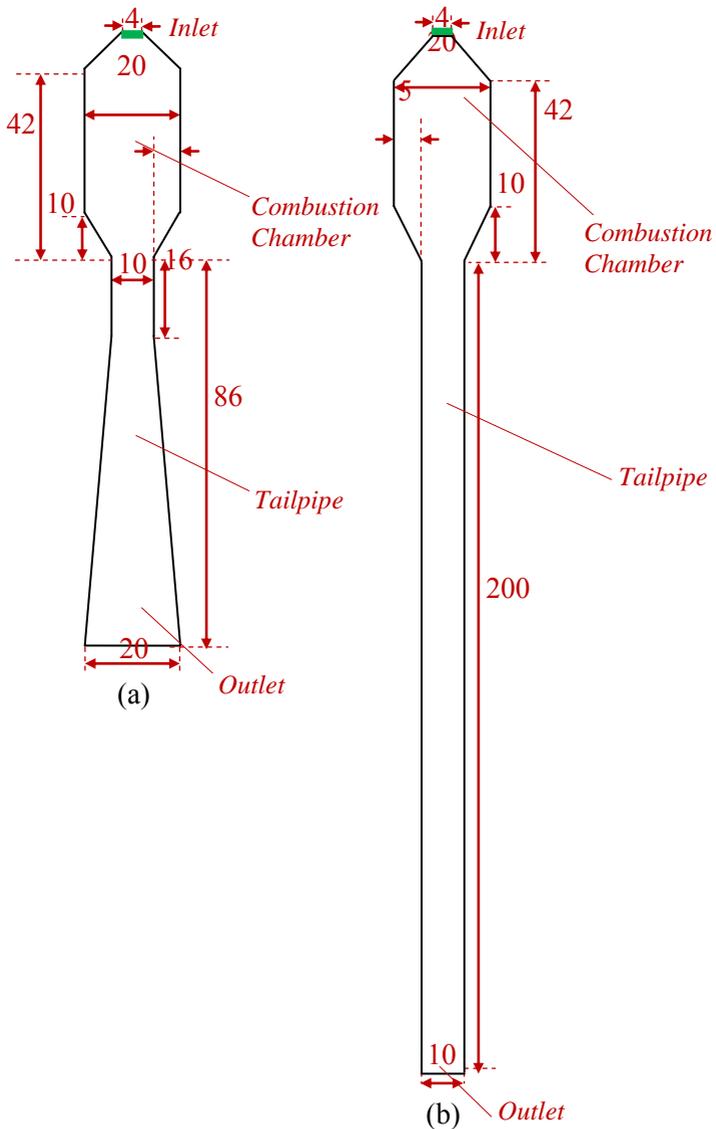
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada sistem pembakaran pulse combustor ini menggunakan metode simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Metode CFD dapat memberikan kemampuan untuk menganalisa karakteristik hidrodinamika pada aliran fluida. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS® 15.0 *Academic Package* dengan lisensi *software* milik Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS. Untuk prmodelan geometri digunakan *Design Modeler*® dengan penentuan jumlah *grid* dan *node* menggunakan *Meshing*®. Perhitungan iterasi simulasi CFD menggunakan FLUENT®.

3.1 Sistem yang Dipelajari

Sistem yang digunakan dalam penelitian ini adalah *pulse combustor* dengan tipe Helmholtz yang terdiri dari *inlet*, *combustion chamber*, dan *tailpipe*. *Pulse combustor* yang digunakan terdiri dari satu *inlet*, yaitu *inlet* campuran bahan bakar dan udara. Gambar 3.1 menunjukkan gambar dimensi *pulse combustor*, dan dimensi yang digunakan semuanya dalam satuan milimeter. Sedangkan *grid* untuk bidang pengamatan *pulse combustor* pada simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 3.2. *Grid* ini menunjukkan elemen yang akan didefinisikan oleh persamaan yang digunakan untuk permodelan di dalam FLUENT. *Grid* untuk geometri 1 menghasilkan *nodes* 10483, *elements* 10055 dan dengan *skewness* 0,06. Sedangkan untuk *grid* geometri 2 menghasilkan *nodes* 7072, *elements* 6732, dan dengan *skewness* 0,02. Pada simulasi *pulse combustor* ini, material yang digunakan adalah udara dan propana. Properti material yang digunakan untuk massa jenis berdasarkan *incompressible ideal gas*, *specific heat* berdasarkan *mixing law*, konduktivitas termal dan viskositas berdasarkan *ideal gas mixing law*, dan koefisien difusi termal berdasarkan teori kinetika.



Gambar 3.1 Dimensi *Pulse combustor* (a) Geometri 1
(b) Geometri 2



(a)



(b)

Gambar 2.2 *Grid Pulse combustor* (a) Geometri 1 (b) Geometri 2

3.2 Prosedur Simulasi

Simulasi yang dilakukan melalui tiga tahapan proses yaitu *Pre-Processing*, *Solving*, dan *Post-Processing*.

a. Tahapan *Pre-Processing*

Geometri dan meshing menggunakan *software Design Modeler*®.

1. Membuat model geometri 2D
2. Membuat *grid* menggunakan *meshing*® dan mendefinisikan *boundary condition*.

b. Tahapan *Solving*

Sistem *steady* dan *unsteady state (transient)* menggunakan *software FLUENT*®.

1. Membaca *mesh* yang digunakan
2. Memilih jenis *solver* yang digunakan, pada simulasi ini digunakan jenis *solver* tekanan-*based*
3. Memasukkan persamaan yang akan digunakan dengan model *transient*
4. Mengaktifkan permodelan *energy equation* untuk memodelkan aliran fluida sesuai dengan persamaan pada Bab II.4.
5. Memilih permodelan *k-ε realizable* untuk memodelkan turbulensi sesuai dengan persamaan pada Bab II.5.
6. Memilih permodelan *species transport* untuk memodelkan mekanisme reaksi yang terjadi sesuai dengan persamaan pada Bab II.6.
7. Mengatur *properties* material yang digunakan
8. Menentukan *boundary condition*
 - *Inlet* didefinisikan sebagai *velocity inlet*
 - *Outlet* pada ujung *tailpipe* didefinisikan sebagai tekanan *outlet*
9. Mengatur penyelesaian parameter-parameter yang mengontrol yaitu menggunakan metode penyelesaian tekanan-*velocity coupling* dengan metode "*SIMPLE*" dan metode inialisasi yang digunakan adalah "*standart*"

10. Menghitung penyelesaian yang dijalankan secara *steady state* hingga perhitungan mencapai konvergen
11. Setelah didapatkan penyelesaian dari hasil *steady state*, kemudian melakukan penyelesaian yang dijalankan secara *transient* dengan *time step size* 0,0001 s
12. Membuat titik pengamatan *surface monitor* untuk pengambilan data tekanan, temperatur, kecepatan, dan fraksi massa spesies tiap *time step*
13. Mengatur *solution animation* untuk pengambilan data kontur pada tekanan, temperatur, dan kecepatan tiap *time step*
14. Mengatur penyelesaian parameter-parameter yang mengontrol yaitu menggunakan metode penyelesaian tekanan-*velocity coupling* dengan metode "*SIMPLE*" dan metode inisialisasi yang digunakan adalah "*standart*"
15. Menghitung penyelesaian yang dijalankan secara *transient* hingga mencapai waktu 0,025 detik

c. Tahapan *Post-Processing*

1. Memperoleh hasil simulasi berupa *sequence* dan data *surface monitor*
2. Membuat grafik temperatur, tekanan, dan kecepatan dari data *surface monitor* yang diperoleh
3. Membuat kontur temperatur, tekanan, dan kecepatan dari data *sequence* yang diperoleh
4. Menganalisa gambar *sequence* dan grafik yang diperoleh dari hasil simulasi

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam sistem yang dipelajari adalah :

1. **Variabel untuk analisa karakteristik dan performa pembakaran menggunakan *excess air* 23% :**
 - *Inlet Pulse*
 - *Inlet* Konstan

2. Variabel untuk analisa karakteristik dan performa pembakaran *pulse* :

a. Variabel *excess air* menggunakan geometri dengan panjang *tailpipe* 68 mm dan diameter *outlet* 20 mm :

- 0%
- 23%
- 200%
- 500%

b. Variabel geometri *pulse combustor* menggunakan *excess air* 23% :

- Panjang *tailpipe* 68 mm dan diameter *outlet* 20 mm
- Panjang *tailpipe* 200 mm dan diameter *outlet* 10 mm

3.4 Kondisi Batas

Pada proses simulasi *pulse combustor* ini menggunakan *air/propane mixture*. Kondisi batas yang digunakan untuk sistem yang dipelajari dibedakan berdasarkan variabel yang digunakan pada sub bab III.3. Data kondisi batas yang digunakan untuk variabel analisa karakteristik dan performa pembakaran dengan perbandingan *inlet pulse* dan konstan tertulis dalam Tabel 3.1. Kondisi batas untuk variabel analisa karakteristik dan performa pembakaran *pulse* dengan variasi *excess air* disajikan dalam Tabel 3.2, sedangkan untuk variasi geometri yang digunakan disajikan dalam Tabel 3.3

Tabel 3.1 Kondisi Batas untuk Simulasi Perbandingan Pembakaran Konstan dan *Pulse*

Kondisi Batas	<i>Inlet Konstan</i>	<i>Inlet Pulse</i>
Suhu Aliran Masuk (K)	300	300
<i>Inlet Velocity</i> (m/s)	86,6526	86,6526
Fraksi Massa C ₃ H ₈	0,0495	0,0495
Fraksi Massa O ₂	0,2213	0,2213
Geometri	1	1

Tabel 3.2 Kondisi Batas untuk Simulasi *Pulse Combustion* Variasi *Excess air*

Kondisi Batas	<i>Excess</i> 0%	<i>Excess</i> 23%	<i>Excess</i> 200%	<i>Excess</i> 500%
Suhu Aliran Masuk (K)	300	300	300	300
<i>Inlet Velocity</i> (m/s)	68,930	86,6526	206,054	400,077
Fraksi Massa C ₃ H ₈	0,0602	0,0495	0,0209	0,0105
Fraksi Massa O ₂	0,2190	0,2213	0,2281	0,2305
Geometri	1	1	1	1

Tabel 3.3 Kondisi Batas untuk Simulasi *Pulse Combustion* Variasi Geometri *Pulse combustor*

Kondisi Batas	Geometri 1	Geometri 2
Suhu Aliran Masuk (K)	300	300
<i>Inlet Velocity</i> (m/s)	86,6526	86,2396
Fraksi Massa C ₃ H ₈	0,0495	0,0495
Fraksi Massa O ₂	0,2213	0,2213
Geometri	1	2

Untuk simulasi dengan menggunakan *inlet pulse*, *velocity inlet* dimodelkan dengan menggunakan *user defined function* (UDF) seperti yang terlampir pada Appendix.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *inlet pulse* dan *inlet* konstan terhadap karakteristik pembakaran, serta pengaruh *excess air* dan geometri *pulse combustor* terhadap karakteristik dan performa pembakaran yang terjadi pada *pulse combustor* berbasis CFD (*Computational Fluid Dynamics*) menggunakan FLUENT melalui analisa temperatur, tekanan, dan kecepatan aliran.

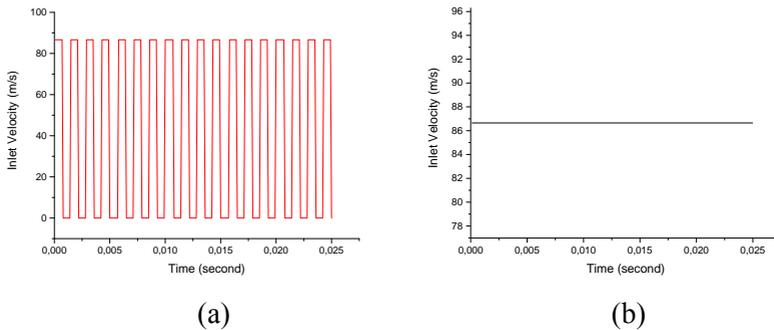
Dalam penelitian ini *pulse combustor* yang digunakan adalah tipe Helmholtz, *valveless* yang terdiri dari satu *inlet* dan satu *outlet* dengan sistem *inlet* yang diumpankan adalah propana/*air premixed*. Penelitian ini menggunakan geometri *pulse combustor* 2D. Laju alir propana yang diumpankan ke dalam *pulse combustor* adalah tetap sebesar 0,67 L/min, sedangkan laju alir udara yang digunakan dengan *excess air* sebesar 0%, 23%, 200%, dan 500%. Temperatur aliran masuk ke dalam *pulse combustor* ditetapkan sebesar 300 K.

Data yang didapatkan dari penelitian ini diperoleh melalui metode simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD dengan menggunakan *software ANSYS® 15.0 Academic Package*. Permodelan yang digunakan dalam simulasi ini adalah permodelan aliran fluida, permodelan turbulensi *k-ε realizable*, dan permodelan reaksi menggunakan *species transport*. Simulasi dilakukan dengan metode *steady state* kemudian dilanjutkan dengan metode *unsteady state* pada frekuensi 700 Hz dengan *time step size* 0,0001 dan data *number of time step* 250.

Untuk mengetahui karakteristik dan performa pembakaran pada *pulse combustor*, akan dilakukan analisa hasil dan pembahasan pada simulasi ini yang meliputi perbandingan performa pembakaran untuk *inlet* konstan dan *inlet pulse*, pengaruh dimensi dari *pulse combustor* terhadap performa hasil pembakaran, serta pengaruh dari *excess air* yang digunakan.

4.1 Perbandingan Performa Pembakaran *Inlet* Konstan dan *Inlet Pulse*

Pada analisa performa pembakaran untuk *inlet* konstan dan *inlet pulse* ini, variabel yang dibuat berbeda adalah kondisi batas pada *inlet*. Laju alir bahan bakar dan udara yang digunakan adalah 0,67 L/min dan 20 L/min. Untuk *inlet* konstan, kecepatan aliran masuk secara terus menerus dialirkan sebesar 86,6526 m/s. Sedangkan untuk *inlet pulse* kecepatan aliran masuk diatur dengan frekuensi 700 Hz. Dimana pada saat *valve* terbuka maka aliran masuk dengan kecepatan 86,6526 m/s dan pada saat *valve* tertutup maka aliran masuk dengan kecepatan 0 m/s. Perbedaan kecepatan aliran masuk pada *inlet* konstan dan *inlet pulse* ditunjukkan pada Gambar 4.1.

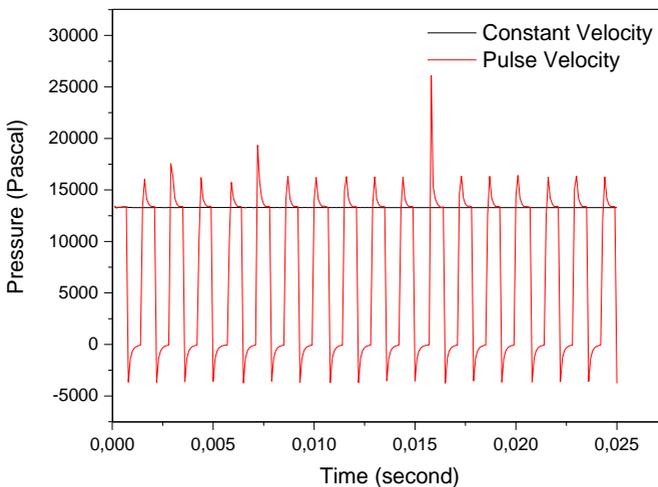


Gambar 4.1 *Inlet Velocity* (a) *Inlet Pulse* (b) *Inlet Konstan*

Tekanan pada *combustion chamber* berubah secara berkala untuk kondisi *inlet pulse*. Ketika *valve* terbuka, bahan bakar dan udara masuk ke dalam *pulse combustor* kemudian terjadi pembakaran di *combustion chamber* menyebabkan tekanan pada *combustion chamber* akan meningkat. Pada keadaan tersebut, seketika *valve* akan tertutup akibat tingginya tekanan pada *combustion chamber* dibandingkan dengan tekanan lingkungan. Perbedaan tekanan pada *combustion chamber* dan *tailpipe* mengakibatkan fluida mengalir dari *combustion chamber* ke *tailpipe*. Keadaan ini berlangsung secara *continue* dan

menyebabkan tekanan pada *combustion chamber* turun di bawah tekanan atmosfer, sehingga menyebabkan kondisi vakum pada *combustion chamber*. Kondisi vakum pada *combustion chamber* tersebut akan membuat *valve* terbuka dan aliran bahan bakar dan udara masuk ke dalam *combustion chamber* serta aliran gas dari *tailpipe* secara perlahan akan kembali ke *combustion chamber*. Pada keadaan tersebut maka akan terjadi pembakaran kembali. Aliran gas dari *tailpipe* yang belum terbakar akan kembali ke *combustion chamber* dan terbakar bersama aliran bahan bakar dan udara yang baru masuk ke *combustion chamber*. Perputaran ini akan berlangsung secara terus menerus dengan sendirinya.

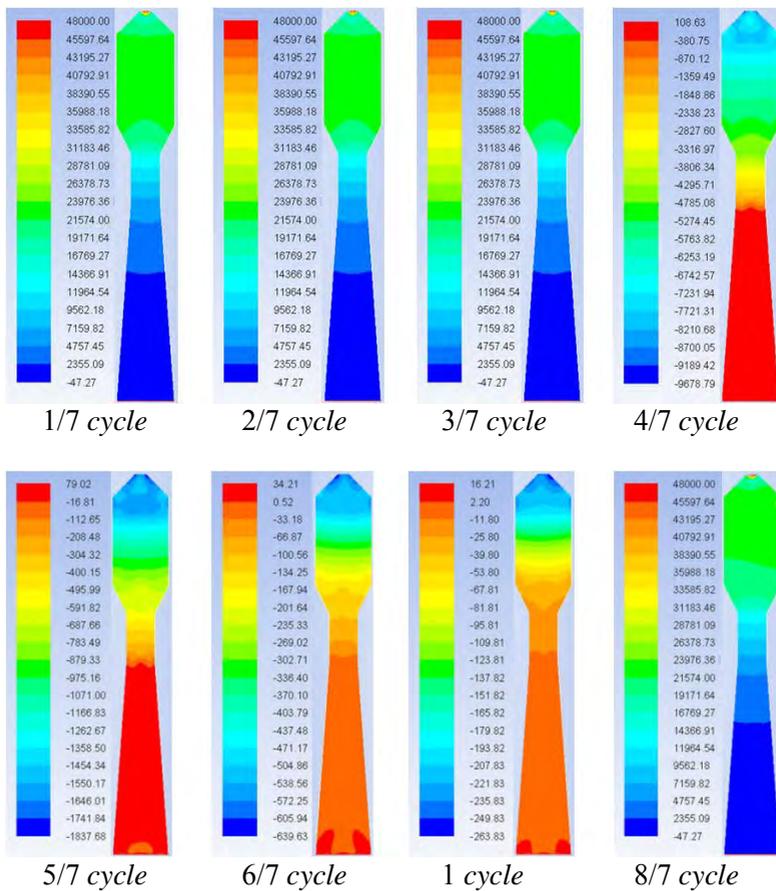
Perbandingan grafik tekanan untuk *inlet* konstan dan *inlet pulse* ditunjukkan pada Gambar 4.2. Grafik tersebut menunjukkan bahwa tekanan untuk *inlet* konstan stabil pada tekanan 13285 pascal. Sedangkan untuk *inlet pulse*, terjadi osilasi tekanan dengan *ranger* tertinggi mencapai 26100,33 pascal dan tekanan terendah mencapai -3778,014 pascal.



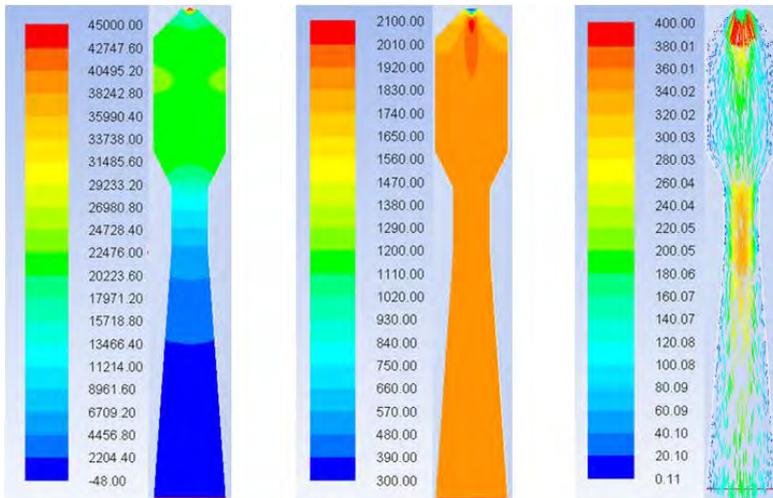
Gambar 4.2 Perbandingan Tekanan untuk *Inlet* Konstan dan *Inlet Pulse*

Satu *cycle* pembakaran pada *pulse combustor* dapat dilihat pada Gambar 4.3. Ketika awal terjadinya pembakaran yaitu dari $1/7$ sampai $3/7$ *cycle* tekanan pada *combustion chamber* berada pada kondisi tekanan yang tinggi. Pada kondisi tersebut aliran gas mengalir dari *combustion chamber* menuju ke *tailpipe*. Namun pada saat $4/7$ *cycle*, aliran gas bergerak kembali ke arah *combustion chamber*. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 4.3 untuk $4/7$ *cycle* bahwa tekanan pada *combustion chamber* lebih rendah atau berada pada kondisi vakum jika dibandingkan dengan tekanan pada *tailpipe*. Kemudian pada saat $8/7$ *cycle* kondisi kembali seperti awal, yaitu tekanan di *combustion chamber* berada pada keadaan yang tinggi. Sedangkan untuk kondisi *inlet* konstan, tekanan akan tetap konstan dari waktu ke waktu seperti kontur yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.

Pada sistem pembakaran *pulse*, pencampuran intensif dan peningkatan perpindahan massa dan panas berlangsung antara produk pembakaran dan *fuel*, dan antara gas buang dan dinding *chamber*. Peningkatan pencampuran dan proses *transport* menyebabkan efisiensi yang tinggi dan proses pembakaran yang baik. Osilasi pencampuran dan transfer panas yang tinggi melalui dinding ruang bakar menghasilkan kondisi aliran osilasi di dalam zona pembakaran, yang meminimalkan waktu tinggal reagen dibandingkan dengan sistem pembakaran klasik (Mujumdar, 2006).



Gambar 4.3 Kontur Tekanan (Pascal) pada *Inlet Pulse* dalam 1 Cycle

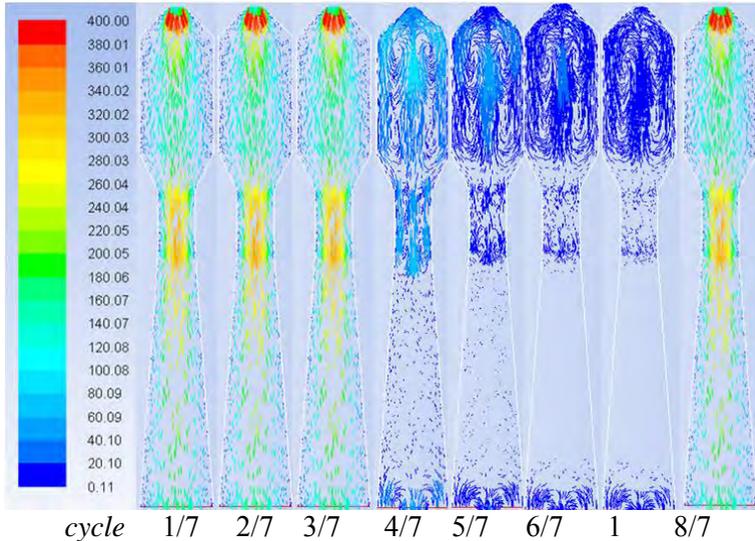


Gambar 4.4 Kontur pada *Inlet* Konstan (a) Tekanan (Pascal)
(b) Temperatur (K) (c) Kecepatan (m/s)

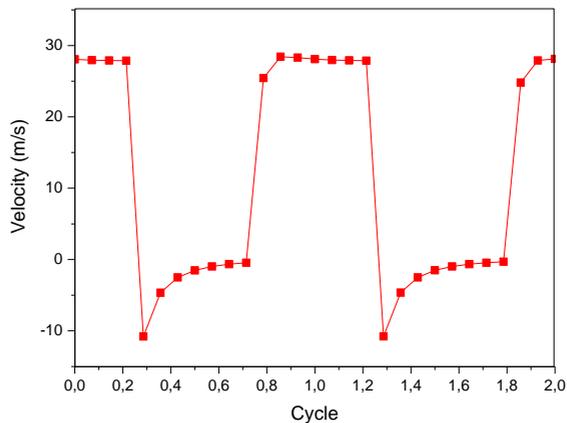
Arah aliran sistem pembakaran *pulse* ditunjukkan pada Gambar 4.5. Arah aliran tersebut ditunjukkan dalam kecepatan aliran dengan arah vektor. Pada saat $1/7$ sampai $3/7$ *cycle* terlihat arah aliran fluida dari *combustion chamber* menuju ke *tailpipe* dan pada saat $4/7$ sampai 1 *cycle*, terdapat aliran gas yang bergerak kembali ke arah *combustion chamber* yang ditunjukkan arah vektor kembali menuju *combustion chamber* sesuai dengan Gambar 4.7. Pada Gambar 4.6 ditunjukkan perubahan arah dan besarnya kecepatan yang terjadi pada jarak 24 mm dari *outlet tailpipe*. Nilai positif menunjukkan bahwa bahwa kecepatan mengalir ke arah *outlet*, sedangkan nilai negatif menunjukkan kecepatan mengalir kembali ke arah *chamber*.

Perubahan arah aliran gas yang terjadi sesuai dengan kontur tekanan yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Tekanan pada *chamber* yang lebih rendah pada kondisi vakum menyebabkan adanya aliran gas yang berbalik ke arah *chamber*. Sedangkan arah aliran untuk sistem pembakaran *inlet* konstan ditunjukkan pada

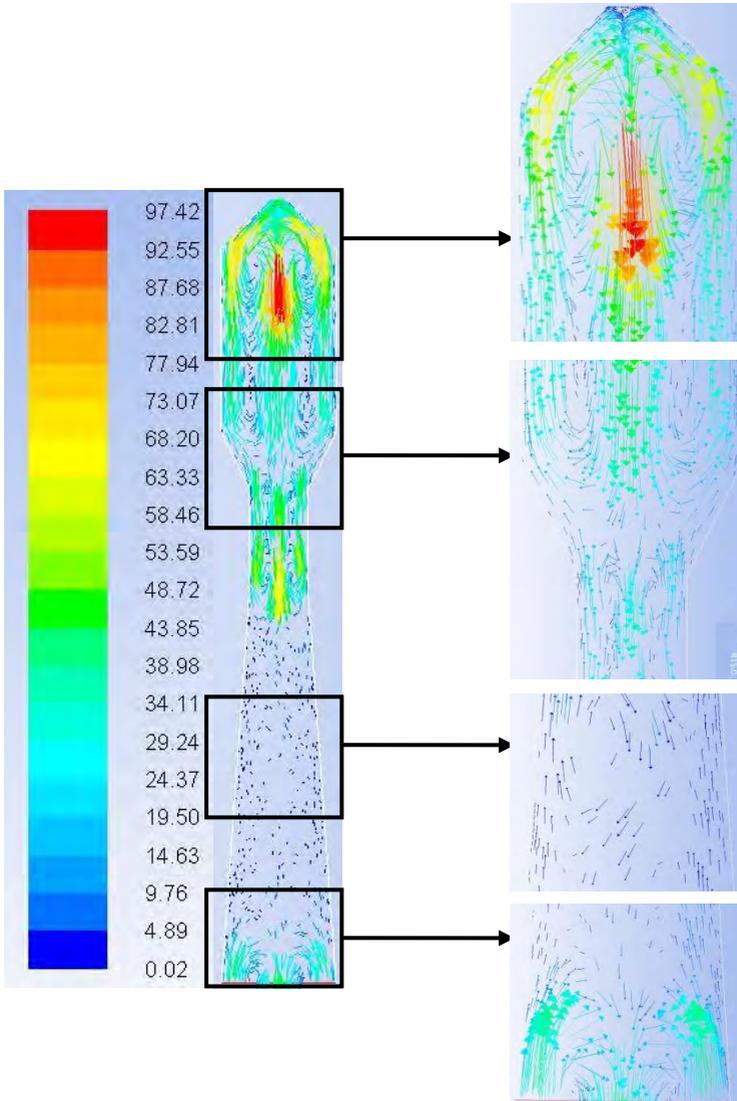
Gambar IV.4. Dimana arah aliran akan selalu konstan dari *combustion chamber* menuju ke *tailpipe*.



Gambar 4.5 Vektor Kecepatan (m/s) pada *Inlet Pulse* dalam 1 *Cycle*

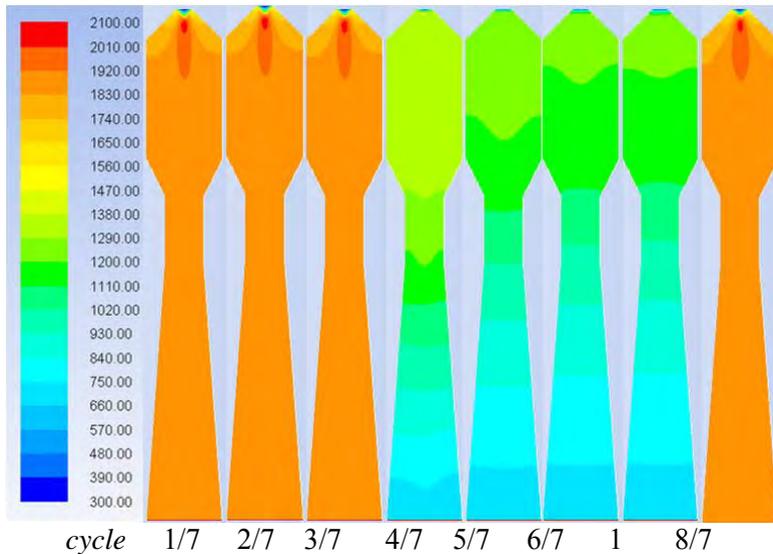


Gambar 4.6 Kecepatan (m/s) pada Jarak 24 mm dari *Outlet*

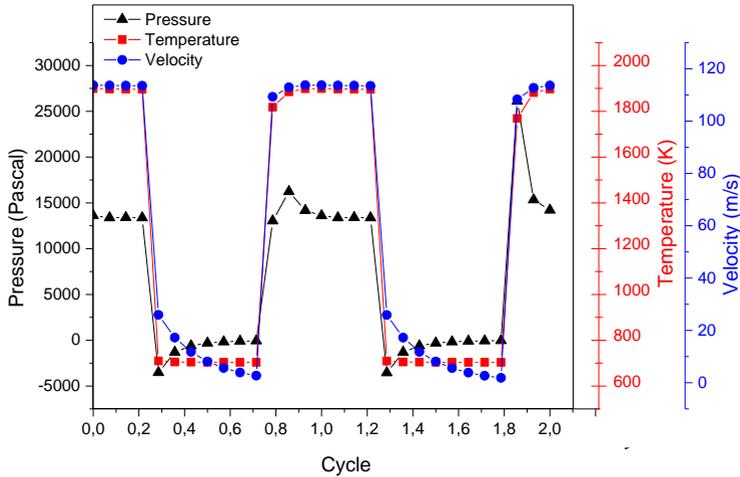


Gambar 4.7 Arah Vektor Kecepatan pada $4/7$ Cycle untuk *Inlet Pulse*

Kontur temperatur untuk sistem *inlet pulse* ditunjukkan dalam Gambar 4.8. Dalam gambar kontur tersebut terlihat bahwa terjadi persebaran temperatur yang tinggi pada *combustion chamber* dan *tailpipe* saat gambar 1/7 sampai 3/7 *cycle*, yaitu saat terjadinya pembakaran. Temperatur tertinggi berada pada *combustion chamber*, yaitu tempat dimana berlangsungnya pembakaran. Pada saat 4/7 sampai 1 *cycle* temperatur pada *combustion chamber* menunjukkan angka yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa ada aliran bahan bakar dan udara baru yang masuk ke *combustion chamber*. Osilasi tekanan, temperatur, dan kecepatan yang terjadi pada pembakaran *pulse* ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.8 Kontur Temperatur (m/s) pada *Inlet Pulse* dalam 1 *Cycle*



Gambar 4.9 Osilasi Tekanan, Temperatur, dan Kecepatan pada Pembakaran *Pulse*

Perbandingan performa pembakaran untuk *inlet* konstan dan *inlet pulse* disajikan pada Tabel 4.1. Dari parameter temperatur dan kecepatan keluaran *combustor* didapatkan nilai maksimal yang lebih besar untuk *inlet pulse* dibandingkan dengan *inlet* konstan. Dari total energi yang dihasilkan, *inlet pulse* juga menghasilkan nilai yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi pembakaran *pulse* akan lebih efisien digunakan dalam proses pembakaran. Dalam aplikasi *pulse combustion* pada proses pengeringan, *pulse combustion* merupakan salah satu teknologi pengeringan yang efisien dan ramah lingkungan untuk berbagai bahan. Teknik pengeringan *pulse combustion* menggunakan teknologi pembakaran osilasi dapat memproduksi temperatur dan kecepatan keluaran yang tinggi sehingga lebih efisien digunakan untuk proses pengeringan (Zbicinski, 2002).

Tabel 4.1 Perbandingan Performa Pembakaran *Inlet* Konstan dan *Inlet Pulse*

Parameter	<i>Inlet Konstan</i>	<i>Inlet Pulse</i>
Temperatur (K)	1893,509	703,573 - 1899,267
Kecepatan (m/s)	113.354	1.876 – 114
Fraaksi Massa C ₃ H ₈	1,69 x 10 ⁻²⁸	0 - 1,44 x 10 ⁻²⁸
Fraksi Massa O ₂	0,0509	0,041 - 0,051
Fraksi Massa CO ₂	0,1335	0,000512 - 0,1339
Fraksi Massa H ₂ O	0,0774	0,000325 - 0,07748
Fraksi Massa N ₂	0,738	0,7378 - 0,9572

Dilihat dari massa reaktan yang tersisa di *outlet*, untuk *inlet pulse* menghasilkan nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan *inlet* konstan. Hal ini membuktikan bahwa efisiensi pembakaran dengan *inlet pulse* lebih besar dibandingkan dengan *inlet* konstan. Sedangkan dari segi bahan bakar dan udara yang dibutuhkan untuk pembakaran tiap satu *cycle*, *inlet pulse* membutuhkan bahan bakar dan udara yang lebih sedikit yaitu sebesar 2,87931 x 10⁻⁷ kg dan kebutuhan untuk *inlet* konstan sebesar 5,75862 x 10⁻⁷ kg. Hal ini menunjukkan bahwa dengan kebutuhan bahan bakar dan udara yang lebih sedikit, *inlet pulse* menghasilkan parameter pembakaran yang tidak jauh berbeda dengan hasil pembakaran pada *inlet* konstan. Selain itu, ditinjau dari perbandingan total energi yang dihasilkan dengan kebutuhan bahan bakar dan udara yang diumpankan tiap satu *cycle* untuk *inlet pulse* menghasilkan nilai sebesar 3,499 x 10¹⁰ kJ/kg, sedangkan untuk *inlet* konstan sebesar 1,99 x 10¹⁰ kJ/kg.

Dari pemaparan parameter-parameter di atas, dapat dikatakan bahwa pembakaran untuk *inlet pulse* menghasilkan performa pembakaran yang lebih efisien dan efektif dibandingkan pembakaran dengan *inlet* konstan. Satu putaran pembakaran *pulse* pada simulasi ini membutuhkan waktu selama 0,0014 detik

dengan temperatur keluaran yang dihasilkan adalah 1899,267 K dan kecepatan aliran gas sebesar 114 m/s.

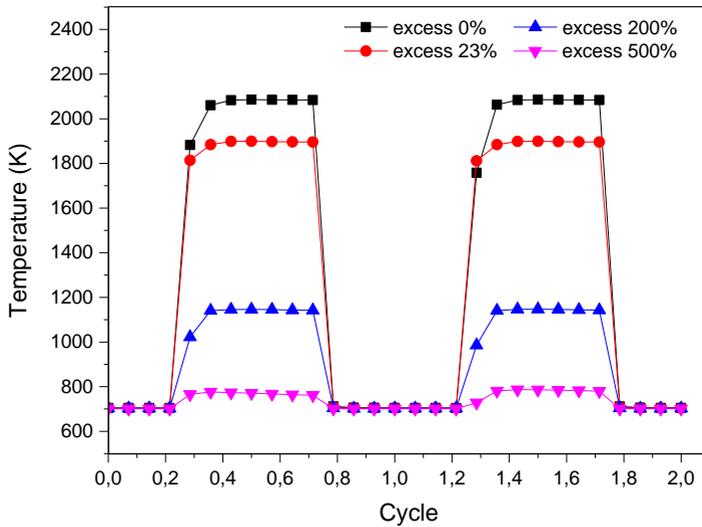
4.2 Identifikasi Pengaruh *Excess air* Terhadap Performa *Pulse Combustor*

Dalam suatu proses pembakaran terdapat beberapa hal penting yang perlu diperhatikan antara lain adalah bahan bakar, udara (oksigen), kalor, dan reaksi kimia. Perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran proses pembakaran.

Pada penelitian ini, simulasi dilakukan dengan mengamati performa dan karakteristik pembakaran pada *pulse combustor* terhadap *excess air* yang diumpangkan. Simulasi pengaruh *excess air* ini menggunakan geometri 1 *pulse combustor* yang ditunjukkan pada Gambar 3.1(a). *Flow rate* propana yang digunakan adalah tetap yaitu sebesar 0,67 L/min. Sedangkan untuk variasi *excess air* yang digunakan adalah sebesar 0%, 23%, 200%, dan 500%.

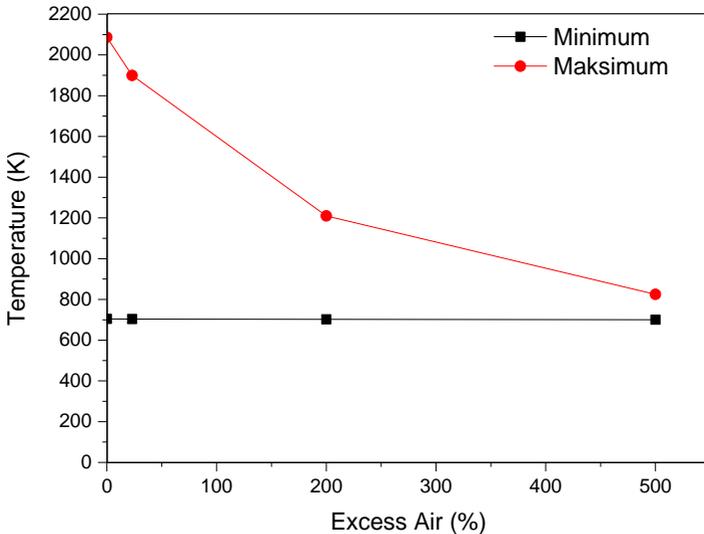
Pengaruh *excess air* terhadap pembakaran pada *pulse combustor* menunjukkan bahwa semakin meningkatnya *excess air* yang digunakan akan menurunkan temperatur pembakaran yang dihasilkan (Xu et al., 2012). Pembakaran pada *pulse combustor* menunjukkan hasil pembakaran yang optimum pada kondisi stokiometri, yang juga hampir mendekati *rich limit condition* (Tang et al., 1990).

Dari simulasi yang telah dilakukan terhadap variasi *excess air* pada *pulse combustor*, didapatkan hasil bahwa temperatur maksimal dicapai pada saat *excess air* yang digunakan sebesar 0% dengan temperatur 2086,105 K. Temperatur pembakaran semakin menurun diikuti dengan peningkatan *excess air* yang digunakan. Perbandingan temperatur pembakaran pada *outlet pulse combustor* selama dua *cycle* dapat dilihat pada Gambar 4.10 untuk berbagai variasi *excess air* yang digunakan.



Gambar 4.10 Perbandingan Temperatur *Outlet* Pembakaran pada Variasi *Excess air*

Penurunan temperatur pembakaran seiring dengan penambahan *excess air* yang digunakan disebabkan karena pengaruh dari udara dingin tersisa. Sedangkan temperatur maksimum pembakaran yang dicapai untuk setiap variasi *excess air* dapat dilihat pada Gambar 4.11.

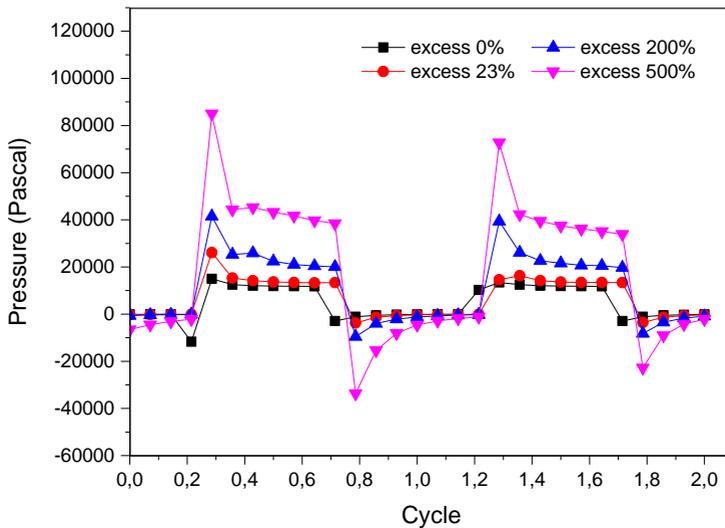


Gambar 4.11 Pengaruh *Excess air* Terhadap Temperatur *Outlet* Maksimum dan Minimum

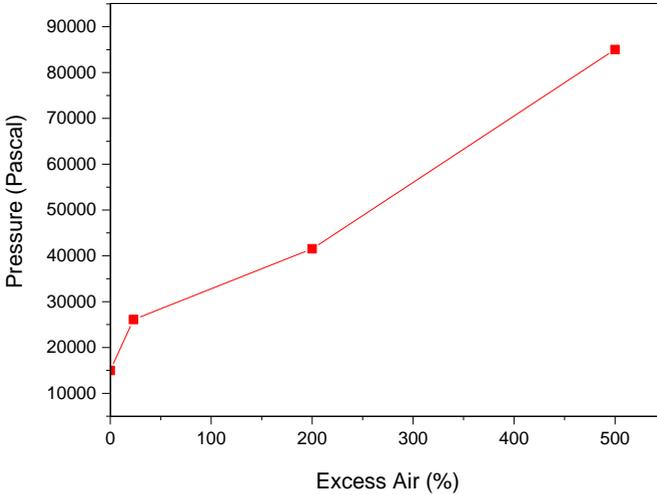
Pada umumnya, tujuan penggunaan *excess air* adalah untuk mengurangi adanya sisa bahan bakar yang tidak bereaksi pada proses pembakaran. Apabila tidak ada cukup udara untuk proses pembakaran sempurna maka dapat terjadi pembakaran yang tidak sempurna, yang menyebabkan menurunnya efisiensi pembakaran, dan terbentuknya emisi gas buang. Pembakaran tidak sempurna dapat menghasilkan gas carbon monoxide (CO) dan NO_x yang bersifat polutan.

Penggunaan *excess air* memberikan pengaruh terhadap amplitudo osilasi tekanan yang dihasilkan. Perbandingan amplitudo tekanan selama dua *cycle* dapat dilihat pada Gambar 4.12 untuk berbagai variasi *excess air* yang digunakan. Dari hasil simulasi yang dilakukan, amplitudo tekanan untuk masing-masing *excess air* 0%, 23%, 200%, dan 500% secara berurutan menunjukkan nilai sebesar, 14976,03 Pa; 26100,19 Pa; 41529,02 Pa; dan 85019,01 Pa. Pada Gambar 4.13 menunjukkan bahwa

semakin besar *excess air* yang digunakan, berbanding lurus dengan amplitudo osilasi tekanan yang dihasilkan. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Xu et al., 2012. Peningkatan *excess air* yang digunakan meningkatkan intensitas osilasi pembakaran. Sehingga menghasilkan amplitudo osilasi tekanan yang lebih tinggi pula. Dengan osilasi pembakaran yang lebih tinggi, maka intensitas pembakaran yang dihasilkan juga lebih tinggi.



Gambar 4.12 Perbandingan Amplitudo Tekanan pada Variasi *Excess air*



Gambar 4.13 Pengaruh *Excess air* terhadap Amplitudo Tekanan pada *Pulse Combustor*

Perbandingan komponen pembakaran yang dihasilkan untuk setiap variasi *excess air* yang digunakan disajikan pada Tabel 4.2. Untuk produk pembakaran yang dihasilkan, terjadi peningkatan seiring dengan peningkatan *excess air* yang digunakan. Hal ini sesuai dengan teori bahwa peningkatan reaktan akan menggeser kesetimbangan ke arah produk, sehingga produk yang dihasilkan dari reaksi semakin meningkat.

Tabel 4.2 Perbandingan Produk Pembakaran Tiap Satu *Cycle* pada Variasi *Excess air*

Massa (kg)	Excess 0%	Excess 23%	Excess 200%	Excess 500%
CO ₂	0,000359	0,000386	0,000417	0,000414
H ₂ O	0,000213	0,000224	0,000231	0,000226

4.3 Pengaruh Geometri terhadap Hasil Pembakaran pada *Pulse Combustor*

Meskipun bukan merupakan teknologi baru, penelitian tentang *pulse combustor* yang telah ada sangat terbatas. Salah satu yang mempengaruhi hasil pembakaran pada *pulse combustor* adalah desain bentuk dari geometrinya sendiri. Desain *pulse combustor* terus mengalami penelitian untuk menghasilkan desain *pulse combustor* yang tepat sesuai dengan kebutuhan. Hingga saat ini, desain *pulse combustor* yang ada masih menggunakan metode *try and error* (Zhonghua, 2008).

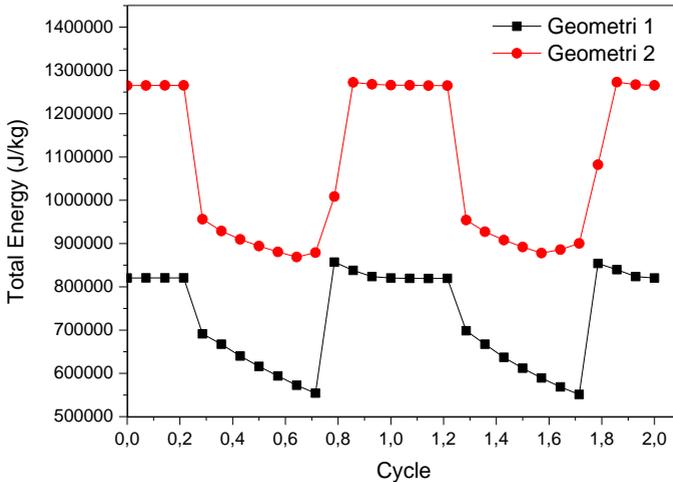
Pemahaman tentang perpindahan panas pada *tailpipe* sangat penting untuk proses desain *pulse combustor*. Fenomena perpindahan panas mempengaruhi mekanisme dasar osilasi pada *combustor* melalui perubahan temperatur. Selain itu akan mengoptimasi peningkatan perpindahan panas, sehingga akan menghasilkan pertukaran panas yang lebih efisien (Dec et al., 1989).

Pada penelitian ini, dilakukan identifikasi terhadap pengaruh geometri dari *pulse combustor* terutama pada bagian *tailpipe* terhadap performa dan hasil pembakaran yang dihasilkan. Modifikasi dilakukan pada bagian *tailpipe* dengan memperpanjang *tailpipe pulse combustor* menjadi 200 mm dengan dimensi diameter *outlet* sebesar 10 mm seperti ditunjukkan pada Geometri 2 Gambar 3.1(b). Kemudian hasil yang didapatkan, dilakukan perbandingan terhadap Geometri 1 *pulse combustor*.

Dari hasil simulasi, kemudian dilakukan identifikasi terhadap total energi yang dihasilkan pada *pulse combustor* dengan geometri yang berbeda. Pada Geometri 1 menunjukkan energi yang dihasilkan pada satu *cycle* pembakaran adalah sebesar 538639 - 958639 J/kg. Sedangkan untuk Geometri 2 menunjukkan energi yang dihasilkan sebesar 864502 - 1280814 J/kg.

Pada Gambar 4.14 terlihat bahwa total energi yang dihasilkan dengan *pulse combustor* menggunakan Geometri 2

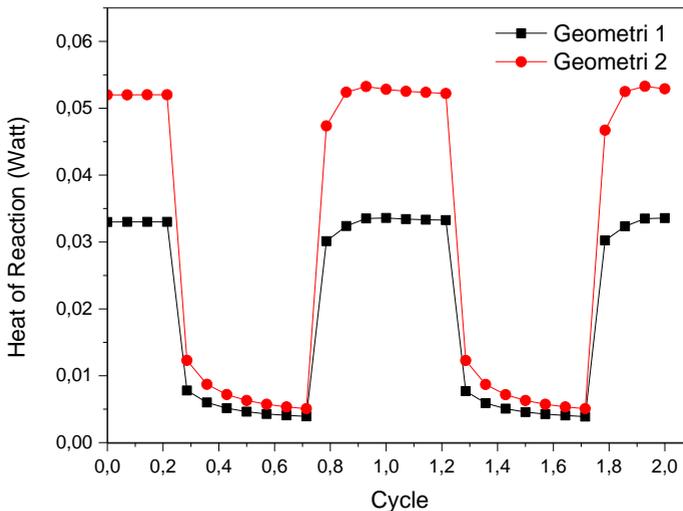
cenderung lebih besar dibandingkan dengan Geometri 1. Total energi yang dihasilkan lebih tinggi dengan desain geometri *pulse combustor* yang memiliki luas area perpindahan lebih besar, yaitu Geometri 2. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Zhonghua et al., 2008 menunjukkan bahwa peningkatan luas permukaan perpindahan panas dapat memberikan proses perpindahan panas yang lebih baik dan pembakaran yang lebih efektif.



Gambar 4.14 Perbandingan Geometri *Pulse Combustor* terhadap Total Energi

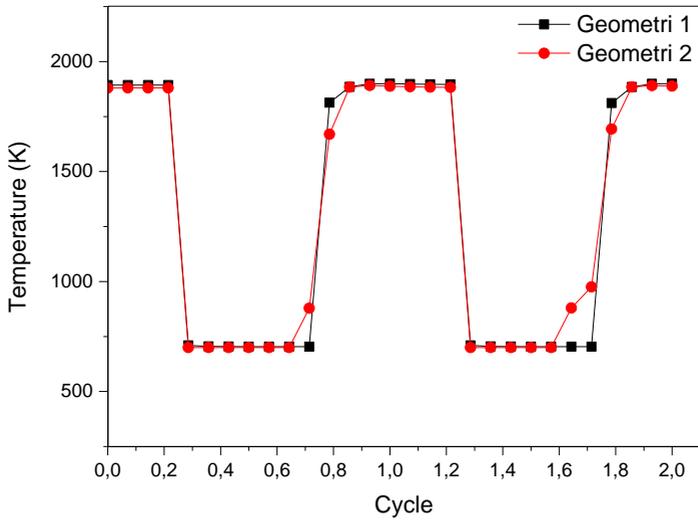
Selain energi yang dapat dihasilkan, pada penelitian ini juga dibandingkan nilai *heat of reaction* dari proses pembakaran menggunakan Geometri 1 maupun Geometri 2. Hasil simulasi menunjukkan nilai *heat of reaction* pada Geometri 1 untuk satu *cycle* pembakaran menunjukkan nilai 0,0037 – 0,0336 watt. Sedangkan untuk Geometri 2 menunjukkan nilai 0,0048 - 0,0533 watt.

Pada Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa perbandingan *heat of reaction* yang dihasilkan memiliki nilai yang cukup berbeda. *Heat of reaction* pada Geometri 2 cenderung memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan Geometri 1 terutama pada saat kondisi *valve* dari *pulse combustor* terbuka yang memungkinkan campuran bahan bakar/ udara baru masuk ke dalam *combustion chamber*.



Gambar 4.15 Perbandingan Geometri *Pulse Combustor* terhadap *Heat of Reaction* Rata-Rata

Pengaruh desain *pulse combustor* terhadap perpindahan panas yang terjadi juga tampak dari temperatur pembakaran yang dihasilkan. Pada Geometri 2 menunjukkan temperatur pembakaran yang dihasilkan pada bagian *outlet tailpipe* lebih tinggi dibandingkan Geometri 1 seperti yang disajikan pada Gambar 4.16. Temperatur pembakaran pada bagian *outlet tailpipe* untuk Geometri 1 dihasilkan *range* temperatur sebesar 703,573 - 1899,267 K. Sedangkan untuk Geometri 2 dihasilkan *ranger* temperatur sebesar 700 - 1891,87 K.



Gambar 4.16 Perbandingan Geometri *Pulse Combustor* terhadap Temperatur *Outlet*

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian dan analisa hasil yang diperoleh, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pembakaran dengan *inlet pulse* memberikan performa pembakaran yang lebih efisien dibandingkan dengan *inlet* konstan dilihat dari perbandingan total energi yang dihasilkan dengan kebutuhan bahan bakar dan udara yang diumpangkan tiap satu *cycle* untuk *inlet pulse* menghasilkan nilai sebesar $3,499 \times 10^{10}$ kJ/kg, sedangkan untuk *inlet* konstan sebesar $1,99 \times 10^{10}$ kJ/kg.
2. Penggunaan *excess air* pada *pulse combustion* memberikan pengaruh terhadap hasil pembakaran. Semakin tinggi *excess air* berpengaruh terhadap penurunan suhu hasil pembakaran dan peningkatan amplitudo tekanan yang terjadi. amplitudo tekanan untuk masing-masing *excess air* 0%, 23%, 200%, dan 500% secara berurutan menunjukkan nilai sebesar, 14976,03 Pa; 26100,19 Pa; 41529,02 Pa; dan 85019,01 Pa. Dengan peningkatan amplitudo tekanan maka osilasi pembakaran yang dihasilkan lebih tinggi, sehingga intensitas pembakaran yang dihasilkan juga lebih tinggi.
3. Desain *pulse combustor* berpengaruh terhadap performa pembakaran yang dihasilkan. Geometri *pulse combustor* dengan luas penampang area perpindahan panas yang semakin besar, memberikan performa pembakaran yang lebih efektif. Geometri 1 menunjukkan energi yang dihasilkan pada satu *cycle* pembakaran adalah sebesar 538639 - 958639 J/kg. Sedangkan untuk Geometri 2 menunjukkan energi yang dihasilkan sebesar 864502 - 1280814 J/kg.

5.2 Saran

Dari proses dan hasil penelitian yang telah dilakukan, saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan penelitian terhadap komposisi hasil pembakaran, terutama pengaruh penggunaan *pulse combustion* dalam pengurangan gas emisi (pembentukan gas CO dan NO_x).
2. Melakukan simulasi dengan model pembakaran *non-premixed*.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2013. *ANSYS Fluent Theory Guide*. ANSYS, Inc.
- Dec, J. E.; Jay, O. K. 1989. Pulse Combustor Tail Pipe Heat-Transfer Dependence on Frequency, Amplitude, and Mean Flow Rate. *Combustion and Flame*. 77, 359-374.
- Mujumdar, A. S. 2006. *Handbook of Industrial Drying*. National University of Singapore : CRC Press Online.
- Peters, N. 1997. *Four Lectures on Turbulent Combustion*. Presented at ERCOFTAC Summer School, Aachen, Germany on 15-19th September.
- Putnam, A. A.; Belles, F. E.; Kentfield, J. A. C. 1986. Pulse Combustion. *Prog. Energy Combust, Sci.* 12, 43-79.
- Tang, J. M.; Ku, S. H.; Daniel, B. R.; Jagoda, J. I.; Zinn, B. T. 1990. Controlling The Rich Limit of Operation of Pulse Combustors. *24th International Symposium on Combustion/ The Combustion Institute*. 1005-1010.
- Versteeg, H.K.; Malalasekera, W. 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics 2nd edition*. England : Prentice Hall.
- Widiyastuti, W.; Wang, W. N.; Purwanto, A.; Lenggoro, W.; Okuyama, K. 2007. A Pulse Combustion-Spray Pyrolysis Process for the Preparation of Nano- and Submicrometer-Sized Oxide Particles. *J. Am. Ceram. Soc.* 90, 3779-3785.
- Xu, Y.; Chen, J.; Wang, R. 2012. Combustion Simulation of a Helmholtz-type Valveless Self-excited Pulse Combustor. *IEEE*.
- Zbicinski, I. 2002. Equipment, Thecnology, Prospectives and Modelling of Pulse Combustion Drying. *Chemical Engineering Journal*. 86, 33-46.
- Zhonghua, W. 2007. Mathematical Modelling of Pulse Combustion and Its Applications to Innovative Thermal Drying Thecniques. Ph.D. Thesis, National University of Singapore, Singapore.

- Zhonghua, W.; Mujumdar, A. S. 2008. Pulse Combustion Characteristics of Various Gaseous Fuels. *Energy & Fuels*. 22, 915-924.
- Zinn, B.T. 1992. Pulse Combustion : Recent Applications and Research Issues. *24th International Symposium on Combustion/ The Combustion Institute*. 1297-1305.

APPENDIKS

Program *User Defined Function* yang digunakan dalam simulasi ini adalah :

```
#include "udf.h"
#include "unsteady.h"
DEFINE_PROFILE(inlet_velocity_magnitude,thread,nv)
{
    face_t f;          /* f is face thread index */
    real t=CURRENT_TIME;
    real v;
    real frek;
    real per;
    real n;
    int n2;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        frek=1400;
        per=1/frek;
        v=68.930916;
        n=t/per;
        n2=floor(n);
        if (n2 % 2 == 0)
            {
                F_PROFILE(f, thread, nv) = v;
            }
        else
            {
                F_PROFILE(f, thread, nv) = 0;
            }
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
```

Biodata Penulis



ESFANING SALIHAT

Anak pertama dari pasangan Bapak Agus Supaat dan Ibu Sri Enny Suswati ini lahir pada 31 Juli 1993 di Jember. Penulis memulai pendidikan formal di SD Al-Baitul Amien Jember pada tahun 1999-2005. Kemudian melanjutkan ke jenjang menengah pertama di SMPN 2 Jember pada tahun 2005-2008 dan ke jenjang menengah atas di SMAN 1 Jember pada tahun 2008- 2011. Setelah lulus dari jenjang SMA pada tahun 2011, penulis melanjutkan ke jenjang pendidikan S1 di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada akhir studinya, Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran menjadi laboratorium pilihan penulis untuk menyelesaikan tugas akhirnya. Bersama partnerinya, Rachma Tikasari dan dibawah bimbingan Dr. Widiyastuti, S.T., M. T. dan Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng., penulis berhasil menyelesaikan Pra Desain Pabrik Biodiesel dari *Crude Palm Oil* dan penulisan buku skripsi ini.

DATA PRIBADI PENULIS

Nama	: Esfaning Salihat
Tempat, Tanggal Lahir	: Jember, 31 Juli 1993
No. Hp	: 089681930194
Alamat	: Jalan Sentot Prawirodirjo I/18 Jember
Email	: esfanings@gmail.com

Biodata Penulis



RACHMA TIKASARI

Anak ketiga dari pasangan Bapak Asnan dan Ibu Muji Lestari ini lahir pada hari Rabu, 30 Juni 1993 di Malang. Penulis memulai pendidikan formal di SDN 1 Donomulyo pada tahun 1999-2005. Kemudian melanjutkan ke jenjang menengah pertama di SMPN 1 Donomulyo pada tahun 2005-2008 dan ke jenjang menengah atas di SMAN 1 Kepanjen pada tahun 2008- 2011. Setelah lulus dari jenjang SMA pada tahun 2011, penulis melanjutkan ke jenjang pendidikan S1 di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada akhir studinya, Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran menjadi laboratorium pilihan penulis untuk menyelesaikan tugas akhirnya. Bersama partnerinya, Esfaning Salihat dan dibawah bimbingan Dr. Widiyastuti, S.T., M. T. dan Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng., penulis berhasil menyelesaikan Pra Desain Pabrik Biodiesel dari *Crude Palm Oil* dan penulisan buku skripsi ini.

DATA PRIBADI PENULIS

Nama	: Rachma Tikasari
Tempat, Tanggal Lahir	: Malang, 30 Juni 1993
No. Hp	: 0856 4951 9718
Alamat	: Jalan Raya 99 Donomulyo RT.02/RW.01, Donomulyo, Malang
Email	: rachma.tikasari11@gmail.com