



Tesis - TF142520

**STUDI INTEGRASI TORREFACTION SEBAGAI  
PRE-TREATMENT TANDAN KOSONG KELAPA  
SAWIT PADA CO-FIRING BIOMASSA DENGAN  
PENDEKATAN COMPUTATIONAL FLUID  
DYNAMICS**

ENDAH LAKSMI NUGRAHA  
NRP. 02311650020004

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Ridho Hantoro, ST., MT.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI TERBARUKAN  
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018



Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

**Endah Laksmi Nugraha**  
NRP. 02311650020004

Tanggal Ujian: 16 Juli 2018

Periode Wisuda: September 2018

Disetujui oleh:

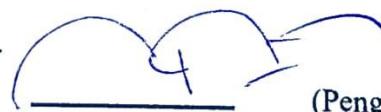
1. Dr. Ridho Hantoro, ST., MT.  
NIP. 19761223 200501 1 001

  
(Pembimbing I)

2. Dr.Ir. Totok Soehartanto DEA.  
NIP. 19650309 199002 1 001

  
(Penguji)

3. Agus Muhammad Hatta, ST, M. Si, PhD.  
NIP. 19780902 200312 1 002

  
(Penguji)





**STUDI INTEGRASI TORREFACTION SEBAGAI PRE-TREATMENT TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT PADA CO-FIRING BIOMASSA DENGAN PENDEKATAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

Nama Mahasiswa : Endah Laksmi Nugraha  
NRP : 02311650020004  
Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, ST., MT.

**ABSTRAK**

Pemanfaatan tandan kosong sebagai biomassa hingga saat ini hanya sebatas bahan bakar tambahan di pabrik kelapa sawit, dimana proses pembakaran secara langsung yang digunakan. Proses ini memiliki kekurangan karena karakteristik tandan kosong yang cenderung memiliki kandungan air yang tinggi. Hal ini menyebabkan untuk mencapai hasil pembakaran yang baik diperlukan *pre-treatment* terlebih dahulu. Dalam penelitian ini akan dilakukan studi eksperimental tandan kosong yang akan diproses dengan *torefaksi* untuk meningkatkan nilai kualitas energi. Sebelum proses *torefaksi* dilakukan pengeringan dari cacahan tandan kosong. Selanjutnya dilakukan *torefaksi* dalam beberapa variasi suhu dengan rentang antara 200-300 °C dan durasi 15, 20, 25, dan 30 menit. Investigasi dilakukan dengan menggunakan uji kandungan nilai bakar, uji proksimasi, dan ultimasi hasil proses *pre-treatment*. Hasil uji dari *pre-treatment* akan digunakan sebagai parametar dalam simulasi pembakaran *cofiring* TKKS dengan batubara. Simulasi dilakukan dengan menggunakan pendekatan *computational fluid dynamics*. Simulasi pembakaran serentak TKKS bersama batu bara dilakukan untuk melihat perilaku bakar dan emisi yang dihasilkan oleh TKKS yang telah diberi perlakuan. Perubahan fisik dan kimiawi terjadi pada TKKS yang dilakukan torefaksi. Diperoleh bahwa semakin tinggi semakin tinggi suhu dan waktu torefaksi akan merubah sifat fisik TKKS menjadi semakin rapuh dan gelap. Setiap kenaikan suhu torefaksi akan mengakibatkan nilai kalori dari TKKS meningkat. Kadar air akan menurun dalam peningkatan suhu maupun dalam peningkatan waktu torefaksi. Sebaliknya kadar abu akan meningkat seiring dengan peningkatan lama dan suhu torefaksi. Pada *cofiring* batu bara dengan TKKS yang dilakukan torefaksi, diperoleh bahwa TKKS yang mengalami torefaksi memiliki nilai kalor yang tinggi, nilai kalor ini disebabkan karena tingginya materi *volatile* akibat torefaksi. Dan emisi yang dihasilkan oleh *co firing* TKKS sangat bergantung dengan kandungan unsur kimiawi hasil uji ultimasi bahan.

Kata kunci: *torefaksi*, *pre-treatment*, *biomass*, *EFB*, *co-firing*, *emission*



***STUDY OF TOREFACTION AS EMPTY FRUIT BUNCH  
PRE-TREATMENT ON BIOMASS CO-FIRING BASED ON  
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

Student's Name : Endah Laksmi Nugraha  
Student's Number : 02311650020004  
Supervisor : Dr. Ridho Hantoro, ST., MT.

**ABSTRACT**

*Currently to increase the use of renewable energy and improve its utilization, especially biomass, pre-treatment technique is proposed. In this study, torefaction is proposed as pre-treatment on empty fruit bunch. Torefaction is done in various temperature with range between 150-300 °C and duration of 15, 20, 25, 30 minutes. Investigation of torefaction on empty fruit bunch is conducted using laboratorium test which measure calorific value, proximate analysis, and ultimate analysis. The result of pre-treatment is used as parameter in computational fluid dynamics simulation of cofiring between empty fruit bunch and coal. The cofiring behavior of coal and empty fruit bunch in a drop tube furnace (DTF) is investigated. The performance parameter of cofiring such as temperature distribution, and emission such as (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, and SO<sub>2</sub>) were evaluated under various EFB pre-treatment and mass fractions. The result indicate that torrefied EFB improve the quality of EFB as fuel. Torrefaction improve the calorific value of EFB. Moreover it is found that the higher temperature and the heating time will change the physical properties of EFB become more fragile and dark than raw EFB. This caused by oxidation process that occurred in torefaction. Increasing temperature of the torefaction will increase the calorific value of the EFB. Otherwise the moisture content decreased in higher temperature of torefaction as well as in the increasing of torefaction duration. Improvement of physical properties, calorific value, and EFB chemical substances enhance the temperature of combustion as well as its ignition. Emissions produced by co-firing EFB and coal are depending on chemicals substances of the torrefied EFB ultimate analysis.*

Kata kunci: torefaction, pre-treatment, biomass, EFB, co-firing, emission



## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas ridho dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Studi Integrasi *Torrefaction* Sebagai *Pre-Treatment* Tandan Kosong Kelapa Sawit Pada *Co-Firing* Biomassa dengan Pendekatan *Computational Fluid Dynamics*” yang dibuat untuk memenuhi salah satu syarat guna mencapai gelar magister teknik (S2). Terselesaikannya tulisan ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu baik dalam proses penelitian maupun selama penulisan. Ucapan terima kasih ini disampaikan kepada:

1. Bapak Dr. Ridho Hantoro, ST., MT., selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dan arahan selama penyusunan tesis ini serta atas ilmu yang diberikan selama masa studi
2. Bapak Dr.Ir. Totok Soehartanto DEA. Dan Bapak Agus Muhammad Hatta, ST, M. Si, PhD. selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan pada tesis ini.
3. Kedua orang tua (Ibu Sri Wahyu Widayati dan Bapak Heru Sasono.), Kakak (Diah Laksmi Nugraha), dan Adik (Azizah Laksmi Nugraha), atas kepercayaan, kesabaran, dukungan moril dan materi serta semangat yang tak pernah berhenti sehingga menjadi kekuatanku selama menyelesaikan tesis ini.
4. Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) ITS yang telah mendanai penelitian yang dilakukan penulis dan tim.
5. Bapak/Ibu dosen Program Studi Magister Teknik Fisika (PSMTF) yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas ilmu yang telah diberikan selama masa studi.
6. Teman-teman pascasarjana Teknik Fisika untuk keceriaan dan kenangan serta telah menjadi bagian dalam perjalanan studiku.

7. Staf akademik dan administrasi PSMTF, Ibu Martha Haardiyah, S.Pd., atas bantuannya dalam mengurus keperluan akademik dan administrasi selama penulis melaksanakan studi.

8. Teman-teman asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan Teknik Fisika.

9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Ibarat tiada gading yang tak retak, penulis menyadari bahwa dalam tesis ini masih terdapat banyak kekurangan. Untuk itu, masukan berupa kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata, penulis berharap semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan semua pihak.

Surabaya, 15 Juli 2018

Endah Laksmi Nugraha

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
ABSTRAK .....	v
<i>ABSTRACT</i> .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Rumusan Masalah .....	3
1.3    Tujuan Penelitian .....	3
1.4    Batasan Masalah.....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	5
2.1 Biomassa Tandan Kosong.....	5
2.2 Karateristik Biomassa .....	8
2.3 <i>Pre-treatment</i> Biomassa.....	11
2.4 Stokiometri Pembakaran.....	13
2.5 Pembakaran <i>Co-firing</i> .....	14
BAB 3 METODE PENELITIAN .....	17
3.1 Prosedur Penelitian .....	17
3.2 Prosedur Eksperimen .....	19
3.3 Pengujian Hasil Eksperimen .....	20
3.4 Simulasi Pembakaran <i>Co-firing</i> .....	21

3.4.1 Pembuatan Geometri .....	21
3.4.2 Meshing .....	22
3.4.3 Boundary Condition dan Processing .....	23
3.4.3 <i>Post Processing</i> .....	24
3.4.5 Validasi Hasil Simulasi .....	25
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>27</b>
4.1    Karateristik Biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	27
4.2 Kadar Kebasahan ( <i>Moisture</i> ) dan Kadar Abu ( <i>Ash Content</i> ).....	31
4.4 Analisis Ultimasi .....	34
4.5 Fenomena Pembakaran Batu Bara dengan TKKS.....	36
4.5.1 Hasil Pembakaran <i>Co-Firing</i> TKKS dan Batu bara .....	36
4.5.2 Distribusi Suhu .....	37
4.5.3 Distribusi Nyala Api Pembakaran .....	40
4.5.4 Distribusi Emisi CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , dan SO <sub>2</sub> .....	42
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>47</b>
5.1 Kesimpulan.....	47
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>xvii</b>
<b>LAMPIRAN</b>	
<b>BIODATA PENULIS</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1Neraca massa pengolahan kelapa sawit. (Hambali, Mujdalifah, Tambunan, & Pattiwiri, 2007) .....	5
Gambar 2.2 Biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit .....	6
Gambar 2.3 Diagram <i>Van Krevelen</i> .....	10
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	18
Gambar 3.2 Tandan kosong kering yang sudah dicacah.....	19
Gambar 3.3 Sampel Uji TKKS (a).Sampel TKKS yang terbungkus aluminium foil (b).Penempatan sampel sebelum masuk ke <i>Furnace</i> .....	20
Gambar 3.4 <i>Drop Tube Furnace</i> .....	21
Gambar 4.1 Perubahan warna Tandan Kosong setelah dilakukan torefaksi.....	28
Gambar 4.2 Nilai kalor Tandan kosong setelah dilakukan torefaksi pada rentang suhu 150-300 °C dengan waktu tetap (30 menit) .....	30
Gambar 4.3 Nilai kalori TKKS dengan variasi waktu pemanasan pada suhu tetap (300°C).....	30
Gambar 4.4 Kandungan <i>moisture ar basis (%)</i> pada variasi Torefaksi TKKS....	31
Gambar 4.5 Kandungan Abu ar basis (%) pada variasi Torefaksi TKKS .....	32
Gambar 4.6 Mass Yield TKKS hasil Torefaksi .....	33
Gambar 4.7 Distribusi Suhu pada <i>Drop Tube Furnace</i> dengan sampel torefaksi TKKS 300 °C.....	37
Gambar 4.8 Distribusi Suhu pada DTF dengan variasi suhu torefaksi TKKS.....	38
Gambar 4.9 Distribusi Temperatur pada DTF dengan variasi komposisi TKKS .	39
Gambar 4.10 Distribusi Suhu (nyala api) pada ruang bakar .....	40
Gambar 4.11 Emisi CO <sub>2</sub> <i>cofiring</i> TKKS tertreatment dan Batu bara.....	42
Gambar 4.12 Distribusi CO pada <i>cofiring</i> dengan <i>torrefied</i> TKKS .....	44
Gambar 4.13 Dampak Variasi Komposisi TKKS pada pollutant NOx.....	45
Gambar 4.14 Distribusi SO <sub>2</sub> pada DTF dengan variasi komposisi.....	46
Gambar 4.15 Emisi pada Outlet DTF variasi torefaksi TKKS .....	47



## **DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 Komposisi Tandan Kosong Kelapa Sawit Dari Literatur (Farkhan,2016)..	7
Tabel 2.2 Karakteristik bahan bakar biomassa padat dan dampaknya (Sjaak van Loo and Jaap Koppejan,2008., M. Sander and O. A. N, 1997) .....	8
Tabel 3.1 Nilai Kualitas hasil <i>Meshing</i> .....	22
Tabel 3.2 Model Simulasi yang digunakan.....	23
Tabel 3.3 Kondisi Batas Simulasi .....	24
Tabel 3.4 Metode Solusi pada Simulasi Pembakaran .....	24
Tabel 4.1 Nilai kalor TKKS dengan variasi suhu torefaksi .....	29
Tabel 4.2 Analisa Ultimasi Sampel TKKS dan Batu bara <i>lignite</i> .....	35



## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Biomassa adalah salah satu sumber energi terbarukan yang berasal dari bahan organik. Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi terbarukan dapat dilakukan dengan pembakaran, gasifikasi, dan pirolisa, namun pembakaran adalah salah satu teknologi yang paling menjanjikan untuk diterapkan[1]. Hal ini dikarenakan hasil dari pembakaran memiliki efisiensi yang tinggi dibanding gasifikasi maupun pirolisa. Serta dapat dilakukan dalam skala besar. Pembakaran biomassa melewati beberapa tahap yakni *drying*, *devolatilization*, gasifikasi, pembakaran karbon, dan oksidasi gas [1]. Pada tahapan-tahapan tersebut parameter pembakaran sangat berpengaruh dalam menentukan kualitas pembakaran.

Namun pembakaran biomassa memiliki hal yang perlu diperhatikan, yakni emisi yang dihasilkan akibat pembakaran sehingga untuk mencapai efisiensi maksimal dan emisi yang rendah perlu dilakukan pengaturan tertentu. Salah satu cara untuk mengurangi emisi hasil pembakaran adalah menggunakan sistem *co-firing*, yakni pembakaran secara langsung dua bahan bakar atau lebih. Dengan menggunakan bahan bakar yang biomassa yang memiliki kadar karbon lebih rendah maka akan mengurangi hasil emisi pembakaran[2].

Indonesia kaya akan sumber daya biomassa termasuk limbah pertanian dan industri. Di antara semua sumber daya biomassa, limbah industri memiliki banyak tantangan untuk digunakan sebagai biomassa. Pabrik kelapa sawit berkontribusi besar sebagai sumber biomassa di Indonesia. Pada tahun 2017, Indonesia merupakan negara penghasil minyak sawit terbesar di dunia[3]. Indonesia memproduksi minyak sawit mencapai 38,5 juta metrik ton minyak, atau 55,2% dari total pasokan minyak kelapa mentah. Total 608 unit milles minyak kelapa sawit beroperasi di Indonesia [4].

Kelapa sawit pabrik memiliki dua jenis limbah, padat dan cair. Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) adalah limbah biomasa padat dari pabrik kelapa sawit. Limbah ini mempunyai tantangan yang tinggi dalam pemanfaatannya namun didukung dengan ketersediaannya yang besar. Tantangan dalam memanfaatkan TKKS ini adalah mencakup masalah lingkungan dan penggunaannya belum efektif.

Pabrik kelapa sawit biasanya menyediakan tempat untuk mengakomodasi pengumpulan TKKS, namun akumulasi TKKS dapat menyebabkan fermentasi TKKS yang melepaskan metana sehingga menyebabkan masalah lingkungan. Selain bentuk fisik TKKS tidak teratur dan keras menyulitkan memrosesan TKKS sebagai biomassa karena bentuk, kepadatan, dan kekerasan dari tiap bagian TKKS berbeda.

TKKS belum digunakan secara optimal karena tingkat kelembabannya yang tinggi, TKKS mengandung air hingga 70%, dan kehadiran mineral lainnya[5]. TKKS juga merupakan biomassa berserat (lignoselulosa). Bentuk fisik TKKS yang berserat membuat TKKS mempunyai sifat *hidrophylic*, yakni sifat yang cenderung menyimpan air. Sifat inilah yang membuat TKKS memiliki tingkat kadar air yang tinggi. Wujud TKKS yang besar memberi tantangan lain menggunakan TKKS sebagai biomassa. Wujud yang besar membuat luas permukaan TKKS ketika dibakar cenderung kecil dan menyebabkan tidak terbakar sempurna dan meninggalkan residu, yakni arang. Jika sifat *hydrophylic* dan wujud besar dari TKKS tidak di *treatment* maka pemanfaatn TKKS sebagai bahan bakar tidak maksimal karena akan menyebabkan api saat pembakaran meredup dan tidak dapat terjadi pembakaran yang kontinyu.

Pemanfaatan tandan kosong sebagai biomassa masih sebatas pembakaran biasa tanpa melihat karakterisasi pembakaran tandan. Menurut penelitian yang telah dilakukan sebelumnya tandan kosong memiliki nilai kalor yang tinggi, sekitar 17.93 MJ/kg [6]. Pemanfaatan tandan kosong sebagai biomass akan memerlukan perlakuan khusus untuk membuang kandungan getah dan *moisture*

serta pengkondisian bentuk biomass sebelum dibakar. Kandungan serat (selulosa, dan lignin) tandan kosong yang tinggi serta kandungan air menyebabkan nilai bakar yang rendah dibandingkan biomassa lain ditambah dengan kandungan abu yang tinggi menyebabkan hasil pembakaran tandan kosong menyebabkan *slagging* pada ruang bakar, sehingga akan mengurangi efisiensi pembakaran. *Torefaksi* (pemanasan) adalah metode konversi biomassa secara termal dengan suhu 200-300 °C[7]. Dimana proses ini mampu meningkatkan kualitas sifat biomassa.

Selain itu dengan melakukan penyeragaman luas permukaan dari bahan bakar umpan, tandan kosong, akan memperbaiki campuran pembakaran sehingga menghasilkan pembakaran yang lebih baik. Meningkatkan nilai karbon yang terkandung pada tandan kosong akan memperbaiki kualitas karbon dalam tandan kosong, sehingga pembakaran akan lebih sempurna. Sehingga penelitian ini dirancang untuk meningkatkan kualitas tandan kosong kelapa sawit melalui proses *pre-treatment* tertentu. Penelitian ini diharapkan mampu mengetahui proses *pre-treatment* yang baik untuk biomassa tandan kosong dalam pembakaran *co-firing* dengan batu bara.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. bagaimana pengaruh *torefaksi* sebagai *pretreatment* biomassa tandan kosong?
- b. bagaimana pengaruh *torefaksi* biomassa tandan kosong pada *co-firing* tandan kosong dengan batu bara?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. mengetahui pengaruh *torefaksi* sebagai *pretreatment* biomas tandan kosong,
- b. mengetahui pengaruh *torefaksi* biomassa tandan kosong pada *co-firing* tandan kosong dengan batu bara.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Unit pembakaran yang digunakan adalah *drop tube furnace* skala laboratorium dengan panjang 15 meter dan diameter 70 cm.
- b. Batu bara yang digunakan dalam studi adalah jenis lignite A dengan nilai kalori 17.64MJ/kg

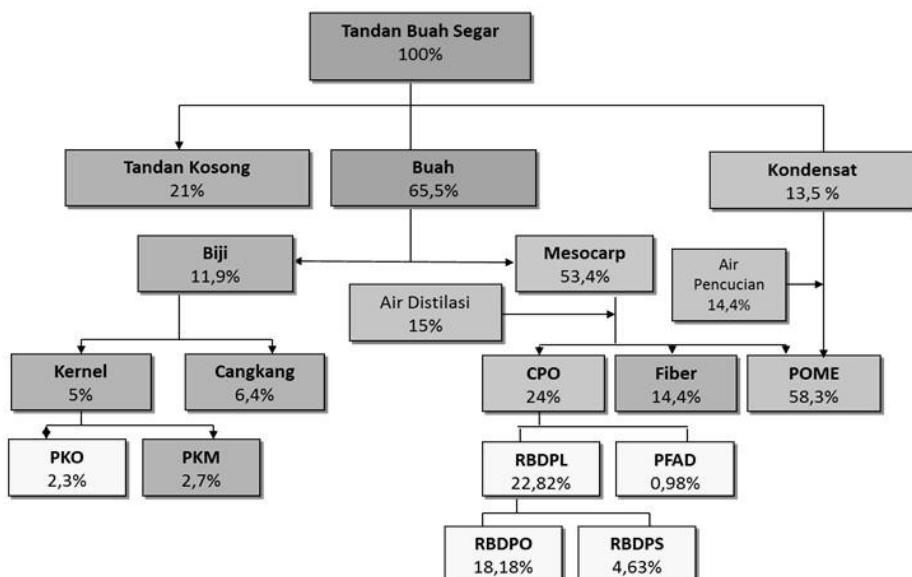
## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Biomassa Tandan Kosong

Sumber biomassa terbesar di antaranya disumbangkan oleh perkebunan kelapa sawit. Potensi kelapa sawit di Indonesia sangat besar yang tersebar di seluruh wilayah, terutama Sumatera dan Kalimantan. Produksi minyak sawit Indonesia tumbuh dari 21.390.326 ton tahun 2009 menjadi 22.899.109 ton tahun 2011[4]. Produksi minyak sawit yang besar juga memberikan gambaran betapa besar limbah biomassa yang dihasilkan. Limbah biomassa kelapa sawit dapat dilihat di dua tahapan, di kebun kelapa sawit (*on farm*) dan di pabrik kelapa sawit (*off farm*).

Pabrik kelapa sawit menghasilkan limbah biomassa baik berbentuk padat maupun cair. Biomassa pengolahan pabrik kelapa sawit terdiri dari *Mesocarp Fibre*, *Palm Kernel Shell*, Tandan Kosong Kelapa Sawit (Empty Fruit Bunch/ TKKS), dan *Palm Oil Mills Effluent* (POME). Neraca massa pengolahan kelapa sawit ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Neraca massa pengolahan kelapa sawit. (Hambali, Mujdalifah, Tambunan, & Pattiwiri, 2007)

Berdasarkan neraca massa, gambar 2.1, setiap pengolahan 1 ton Tandan Buah Segar (TBS) akan menghasilkan TKKS sebesar 23% atau 230 kilogram TKKS. Jika sebuah lahan kelapa sawit memiliki kapasitas produksi minyak sawit sebesar 4.137 ton/ha, maka dalam satu hektar kebun akan menghasilkan 951 kuintal limbah TKKS. Jumlah ini adalah rata-rata produktivitas kelapa sawit untuk sehari. Jika diakumulasikan, limbah TKKS yang tidak termanfaatkan akan menumpuk dan memiliki peluang ekonomi yang cukup tinggi karena ketersediaannya yang besar. Namun sebaran Kelapa sawit di Indonesia tidak merata, berdasarkan statistik perkebunan sawit 2017, produksi kelapa sawit di Indonesia didominasi oleh Sumatera sebanyak 67,7% dan Kalimantan sebanyak 28,9%, dan sisanya tersebar di Pulau Jawa, Sulawesi, Maluku, dan Papua[4].



Gambar 2.2 Biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit

TKKS hasil proses rebusan dan perontokan mengandung kadar air sebesar sekitar 65%[8], namun dengan kadar air sebesar ini maka TKKS tidak dapat langsung diumpulkan sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan uap panas atau untuk penggunaan lainnya. Disamping itu bentuk fisik dari TKKS ini juga

masih berbentuk tandan yang tidak beraturan (gambar 2.2). Bentuk fisik seperti ini juga menyulitkan proses pengolahan limbah TKKS ini, karena batang buah dan batang utama memiliki bentuk, densitas dan kekerasan yang berbeda. Terlebih pada permukaan kulit TKKS juga terkandung mineral seperti silika, mangan, dan lain-lain yang dapat menyebabkan mata pisau mudah menumpul ketika dilakukan proses pencacahan.

Pada tabel 2.1 dijelaskan komposisi kimia pada tandan kosong kelapa sawit yang diambil dari beberapa literatur, Tandan kosong kelapa sawit

Tabel 2.1 Komposisi Tandan Kosong Kelapa Sawit Dari Literatur (Farkhan,2016)

Komposisi	Percentase dari TKKS kering	Refferensi	
		Khoo. <i>et al.</i> 1991	Law <i>et al.</i> 2001
Extractives	3.7±0.3	0.9	2.8
Acid-insoluble lignin	18.8±0.3	17.2	17.6
Ash-free-acid- insoluble lignin	17.8±0.2		-
Ash	1.3±0.2	0.7	3.8
Hot-water soluble	7.5±0.8	2.8	9.3
1% NaOH soluble	14.5±2.7	17.2	29.9
Holocellulose	82.4±1.4	70	86.3
Cellulose	62.9±2.0	42.7	
Hemicellulose	28	32.5	
Arabinose	2.5±1.1		
Xtlose	33.1±2.6		
Mannose	1.3±0.01		
Galactose	1.0±0.0		
Glucose	66.4±3.7		
	Singh <i>et al.</i> 1999		
Silica (EDAZ)	1.8 (atomic)		
Silica (TAPPI method)	0.9±0.1		
Copper	0.8±0.7 g/g	23 mg/L	
Calcium	2.8±0.1 g/g	0.25% (CaO)	
Manganese	7.4±0.4 g/g	48 mg/L	
*Iron	10.0 g/g	473 mg/L	
Sodium	11 ± 0.4 g/g		

## 2.2 Karakteristik Biomassa

Karakterisasi suatu bahan bakar padat adalah salah satu tahapan paling penting dalam mengetahui perilaku bahan bakar. Karakteristik dan kualitas biomassa sebagai bahan bakar bervariasi, bergantung dengan jenis biomassa, perlakuan, dan teknologi konversi yang digunakan. Kualitas biomassa sebagai bahan bakar dapat ditingkatkan dengan meningkatkan teknologi konversi atau meningkatkan kapasitas konversi energi biomassa. Namun hal ini memiliki kekurangan, yakni akan meningkatkan biaya operasi penggunaan biomassa.

Tabel 2.2 Karakteristik bahan bakar biomassa padat dan dampaknya (Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, 2008., M. Sander and O. A. N, 1997)

<b>Karakteristik</b>	<b>Dampak</b>
<b>Fisik</b>	
Kandungan Air (%M)	Ketahanan penyimpanan, nilai kalori, pengapian ( <i>self-ignition</i> ), desain ruang bakar
Nilai Kalori (NCV/GCV)	Pemanfaatan biomassa, Desain teknologi konversi biomassa
<i>Volatiles</i> ( <i>materi yang mudah terbakar</i> )	Perilaku dekomposisi termal biomassa
Densitas Partikel	Konduktansi termal, dan perilaku dekomposisi termal bahan bakar
Dimensi Partikel	Teknologi pembakaran yang digunakan, keamanan, pengeringan, pembentukan debu
<i>Bulk Density</i>	Logistik bahan bakar (penyimpanan, transportasi, dan penanganan)
Jamur	Resiko Kesehatan
<b>Kimia</b>	
Kandungan:	
Karbon (C)	Nilai kalori biomassa
Hidrogen (H)	Nilai kalori biomassa
Oksigen (O)	Nilai kalori biomassa
Nitrogen (N)	emisi NOx
Belerang (S)	emisi SOx
Mineral lainnya	Pembentukan korosi, abu

Secara umum, karakteristik biomassa dapat dibagi menjadi dua, karakteristik fisik dan kimia dari biomassa. Setiap karakteristik ini memiliki dampak dalam penggunaan biomassa sebagai bahan bakar. Salah satu contoh karakteristik fisik

adalah ukuran partikel dan distribusi ukuran partikel dari biomassa. Sifat ini akan mempengaruhi sistem pengumpunan bahan bakar serta teknologi konversi pembakaran dari biomassa[1]. Selain itu dalam pembakaran, dampak dari ukuran partikel pada dasarnya adalah aerodinamis. Semakin besar dan padat sebuah partikel memiliki kecenderungan untuk keluar dari api dibawah pengaruh gravitasi dan menjadi residu atau material yang tidak terbakar[10]. Karakteristik biomassa beserta dampaknya dituliskan diulas secara lengkap pada tabel 2.2.

Selain itu karakteristik biomassa dapat dilihat secara fisik, kimiawi, sifat panas, dan kandungan kimia[2]. Terdapat tiga analisis, untuk menentukan sifat kimiawi, yang utama dalam menentukan karakter suatu bahan bakar yakni, analisis proksimasi, analisis ultimasi, dan analisis *thermogravimetric analysis* (TGA). Pada analisis proksimasi, sampel kecil bahan bakar ditimbang, dipanaskan, dan dibakar. Sehingga menghasilkan fraksi massa dari karbon tetap atau *fix carbon* (FC), bahan bakar yang dapat menguap (*volatile matter*/ VM), kebasahan (*moisture*/ M), kadar abu (A). Analisis ultimasi dilakukan untuk mengetahui kadar nilai komponen organik yang terkandung pada bahan bakar, yakni, komposisi karbon (C), oksigen (O), hidrogen (H), Sulphur (S), nitrogen (N). Uji kadar dilakukan untuk mengetahui komponen inorganik yakni potassium (K), sodium (Na), silikon (Si), aluminium (Al), besi (Fe), dan lainnya.

Dalam melihat karakter biomassa sebagai bahan bakar perlu ditentukan sifat dan nilai bakarnya. Setiap bahan bakar memiliki kualitas yang berbeda bergantung dengan kandungannya. Setiap bahan bakar memiliki nilai pembakaran atau nilai kalor (*heating value*) yang menunjukkan jumlah energi yang dilepaskan ketika suatu bahan bakar dibakar secara sempurna dalam suatu proses aliran tunak. Besarnya nilai kalor dari suatu bahan bakar sama dengan harga mutlak dari entalpi pembakaran bahan bakar. Terdapat dua jenis nilai bakar yaitu.

- a. *High Heating Value* (HHV) yaitu nilai kalor atas. Nilai kalor atas ditentukan pada saat  $H_2O$ , atau udara hasil pembakaran pada produk pembakaran berbentuk cairan

- b. *Lower Heating Value* (LHV) yaitu nilai kalor bawah. Nilai kalor bawah ditentukan saat udara hasil pembakaran berbentuk gas

Berikut adalah persamaan untuk memperoleh nilai kalor tinggi (HHV) menurut taksiran dulong.

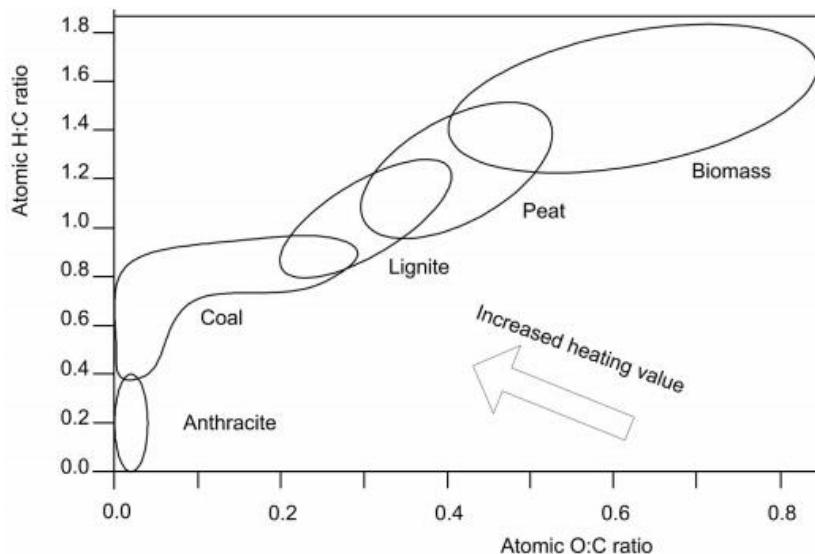
$$HHV = 33950C + 144200 \left( H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9400S \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (2.1)$$

Penentuan nilai kalori bahan bakar biasanya menggunakan bom kalorimeter, namun dapat juga dihitung menggunakan rumus empiris[1].

$$HHV = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.0151N - 0.1034O - 9.9211(ash) \quad (2.2)$$

$$\left[ \frac{MJ}{kg}, d.b. \right]$$

Dimana nilai C, H, S, N, O, dan *ash* dalam *dry basis* sesuai dengan persamaan 2.2, kandungan nilai karbon, hidrogen, dan belerang memberikan dampak positif pada nilai HHV sedangkan kandungan nilai nitrogen dan oksigen memberikan nilai negatif pada HHV[1], [11]. Apabila komposisi kimia biomassa dibandingkan dengan bahan bakar lain, biomassa cenderung memiliki nilai rasio hidrogen dan oksigen yang lebih tinggi. Berikut adalah diagram *Van Krevelen* yang menunjukkan nilai perbandingan hidrogen dan oksigen dari beberapa bahan bakar.



Gambar 2.3 Diagram *Van Krevelen*

Walaupun penentuan karakteristik bahan bakar yang paling umum dan utama adalah penentuan nilai bakar namun karakterisasi ini tidak bisa untuk menentukan efisiensi pembakaran. Efisiensi maksimum dapat diperoleh dengan mencari *flame temperature* atau distribusi suhu pembakaran. Kandungan oksigen (O) yang tinggi akan mempengaruhi kadar udara yang dibutuhkan dalam pembakaran. Distribusi suhu pembakaran dapat diketahui dengan melakukan analisis ultimasi[12] selain itu dapat diukur melalui *flame imaging system*.

### **2.3 Pre-treatment Biomassa**

Penggunaan biomassa sebagai bahan bakar memerlukan perlakuan khusus. Hal ini dikarenakan sifat biomass yang berbeda dengan bahan bakar fosil yang sering digunakan sebagai bahan bakar. Salah satu cara untuk meminimalisir efek negatif dari penggunaan biomassa sebagai bahan bakar adalah melakukan *pre-treatment*. Ada beberapa *pre-treatment* yang dapat dilakukan baik secara mekanik, termal, kimiawi, biologi, atau kombinasi.

#### **2.3.1 Mechanical Pre-Treatment**

Tahap *pre-treatment* biomass yang paling mudah adalah dilakukan *mechanical pre-treatment*. Penggilingan atau pencacahan biomass adalah salah jenis *mechanical pre-treatment*. Penggilingan biomass menjadi hal yang penting dalam penggunaan biomass pada *cofiring* dengan batu bara. Hal ini dikarenakan untuk menyamakan distribusi partikel antara batu bara dan biomass. Sehingga akan memperbaiki campuran pembakaran yang mampu menghasilkan pembakaran yang lebih baik. Dengan penggilingan akan menambah total luas permukaan partikel bakar sehingga akan meningkatkan efisiensi proses pembakaran. *Densification* atau pemadatan adalah salah satu *mechanical pre-treatment* dengan memanfaatkan tekanan sehingga membentuk butiran atau bahan bakar padat, lebih dikenal dengan pelletisasi.

Ukuran partikel biomass disesuaikan dengan *boiler* atau tempat bakar yang digunakan. Untuk jenis FBC biasanya memiliki ukuran partikel <10mm untuk biomass dan <1mm atau< 8mm untuk PFC[13]. Dibandingkan batu bara, ukuran

partikel biomas lebih besar dikarenakan sifat biomass yang lebih reaktif dibandingkan batu bara[1].

### **2.3.2 Torefaksi**

Torefaksi atau pengarangan, merupakan perlakuan termal biomassa (terutama kayu) tanpa adanya oksigen selama kurang lebih 15-60 menit pada temperatur 200-300°C dan tekanan atmosferik[14]. Hasilnya, biomassa akan berubah menjadi produk yang menyerupai arang. Tranformasi torefaksi adalah proses dengan efisiensi tinggi (konversi 85-95%).

Torefaksi digunakan sebagai langkah pengkondisian awal untuk metode konversi biomassa seperti gasifikasi dan *cofiring*. Perlakuan panas tidak hanya mengubah struktur serat, tetapi juga keuletan dari biomassa. Selama proses *torefaksi*, biomassa akan mengalami devolatisasi yang menyebabkan penurunan berat, tetapi kandungan energi awal dari biomassa yang telah mengalami *torefaksi* tersebut tetap terjaga dalam produk padatan sehingga densitas energi dari biomassa menjadi lebih tinggi dibanding biomassa awal. Keseluruhan proses *torefaksi* dapat dibagi menjadi beberapa langkah, seperti pemanasan, pengeringan, *torefaksi*, dan pendinginan[11], [14].

Mekanisme dari torefaksi didasarkan pada reaksi dari 3 komponen utama biomassa, yaitu hemiselulosa, selulosa, dan lignin. Jika temperatur biomassa mencapai 200°C, hemiselulosa mengalami devolatisasi secara terbatas dan pengarbonan (biomassa mulai berwarna kecoklatan). Jika devolatisasi dilanjutkan, pada temperatur mencapai sekitar 250-260°C, lignin dan selulosa sedikit mengalami dekomposisi yang tidak menyebabkan kehilangan berat biomassa secara signifikan.

Perbedaan reaksi pada hemiselulosa, selulosa, dan lignin yang menghasilkan 2 jenis torefaksi. Yang pertama adalah torefaksi ringan (*light torefaksi*) dengan temperatur di bawah 240°C dan ditandai oleh dekomposisi yang signifikan dari hemiselulosa. Sedangkan yang kedua adalah torefaksi berat (*severe torefaksi*) yang terjadi di atas 270°C dan ditandai oleh reaksi selulosa dan lignin.

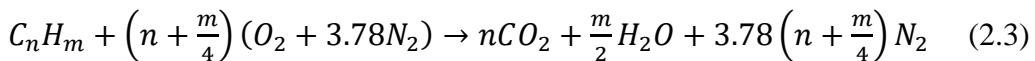
## 2.4 Stokimetri Pembakaran

Terdapat 3 jenis bahan bakar yang dapat digunakan pada pembakaran, yakni padat, cair, dan gas. Komposisi bahan bakar paling sederhana adalah gas, sedangkan bahan bakar cair dan padat memiliki komposisi yang lebih bervariasi. Salah satu bahan bakar padat yang umum digunakan adalah batu bara. Batu bara terbentuk dari dekomposisi biologis dari tumbuh-tumbuhan yang berlangsung dalam jangka waktu yang lama. Batu bara diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan komposisi organiknya. Batu bara tingkat rendah (*low rank coal*) seperti *peat* dan *lignite*, mengalami perubahan yang relatif sedikit, dan memiliki materi yang mudah dilepaskan saat pemanasan. Bahan bakar tingkat tinggi (*high-rank coal*) mempunyai struktur yang keras dan mengandung lebih banyak karbon yang mana akan masih bersisa walaupun setelah dilakukan pemanasan.

Karakteristik bahan bakar padat dapat ditentukan dengan analisis ultimasi dan proksimasi, yang mengidentifikasi tingkat unsur kimia pada bahan bakar padat. Analisis proksimasi adalah analisis yang menentukan fraksi kadar air/ *moisture* (M), bahan yang dapat menguap/ volatil matter (VM), kadar abu/ ash (A), kadar karbon-tetap/ fixed carbon(FC), kadar sulfur (S), dan nilai kalor bahan bakar (HHV). Analisis proksimasi dilakukan dengan menimbang memanaskan, dan membakar semua sampel kecil dari bahan bakar padat, yang kemudian dihitung menggunakan standar tertentu, standar yang biasanya digunakan adalah standar ASTM. Analisis ultimasi adalah analisis komposisi kimiawi dari bahan bakar padat yang dilakukan uji pada laboratorium untuk memperoleh nilai dari kadar unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Pelaporan analisis bahan bakar padat mencantumkan metode atau basis yang digunakan dalam menganalisis komposisi bahan bakar. *Dry basis* biasanya digunakan dalam analisis batu bara untuk mengantisipasi perbedaan penyimpanan dan dampak dari cuaca terhadap bahan bakar.

Udara terdiri dari oksigen, nitrogen, dan sejumlah kecil karbon dioksida, argon, dan spesies lainnya. Karena sebagian besar pengencer di udara adalah nitrogen, maka pendekatan komposisi udara yang sering digunakan adalah 21%

(*mole basis*) oksigen dan 79% (*mole basis*) nitrogen. Meskipun nitrogen tidak signifikan mengubah keseimbangan oksigen dalam reaksi, namun nitrogen memiliki dampak besar pada termodinamika, reaksi kinetik, dan pembentukan polutan dari pembakaran. Stokimetri pembakaran lengkap dari bahan bakar hidrokarbon  $C_nH_m$  menjadi[15].



Sehingga untuk setiap hidrokarbon yang dibakar, akan membutuhkan  $3.78(n+m/4)$  mol udara dan menghasilkan  $3.78(n+m/4)+m/4$  produk pembakaran. Hasil samping dari pembakaran adalah pembentukan arang, dimana terjadi reaksi.



## 2.5 Pembakaran *Co-firing*

*Co firing* atau pembakaran serentak adalah pembakaran dengan kombinasi dua atau lebih bahan bakar. Pembakaran serentak yang paling umum adalah pembakaran serentak antara biomassa dengan batu bara. Pembakaran ini menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan dalam memanfaatkan potensi biomassa dari sisi ekonomi maupun lingkungan. Dalam sisi ekonomi, pemanfaatan biomassa tidak memerlukan investasi pembangkit yang besar. *Co-firing* juga mampu mengurangi emisi GRK (gas rumah kaca) dari pembangkit listrik berbahan bakar batu bara. Selain itu *co-firing* mampu meminimalkan limbah dan masalah lingkungan yang terkait sampah.

*Co-firing* batu bara dan biomassa dalam skala besar, dengan komposisi biomassa diatas 5%, perlu memperhatikan kandungan kimia dan sifat fisik dari komposisi campuran bahan bakar. Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam *co firing* ini adalah persiapan bahan bakar, penyimpanan, *feeding*, perlakuan selama pembakaran yang berdampak pada efisiensi keseluruhan

pembakaran, pembentukan kerak (*slagging* dan *fouling*), erosi, sehingga mampu menurunkan masa pakai peralatan, dan abu yang dihasilkan.

Sifat kimia bahan bakar seperti kadar air (*moisture*), *volatile content*, *ash composition*, emisi NOx dan SOx, emisi merkuri dan klorin. Sifat fisik dari bahan bakar yang diperhatikan adalah ukuran particle atau bentuk, serta *flowability* dalam pembakaran. Batu bara dan biomassa memiliki sifat kimia dan fisik yang berbeda oleh karena itu *cofiring* antara dua bahan bakar ini membutuhkan *pre treatment* agar hasil pembakaran maksimal.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

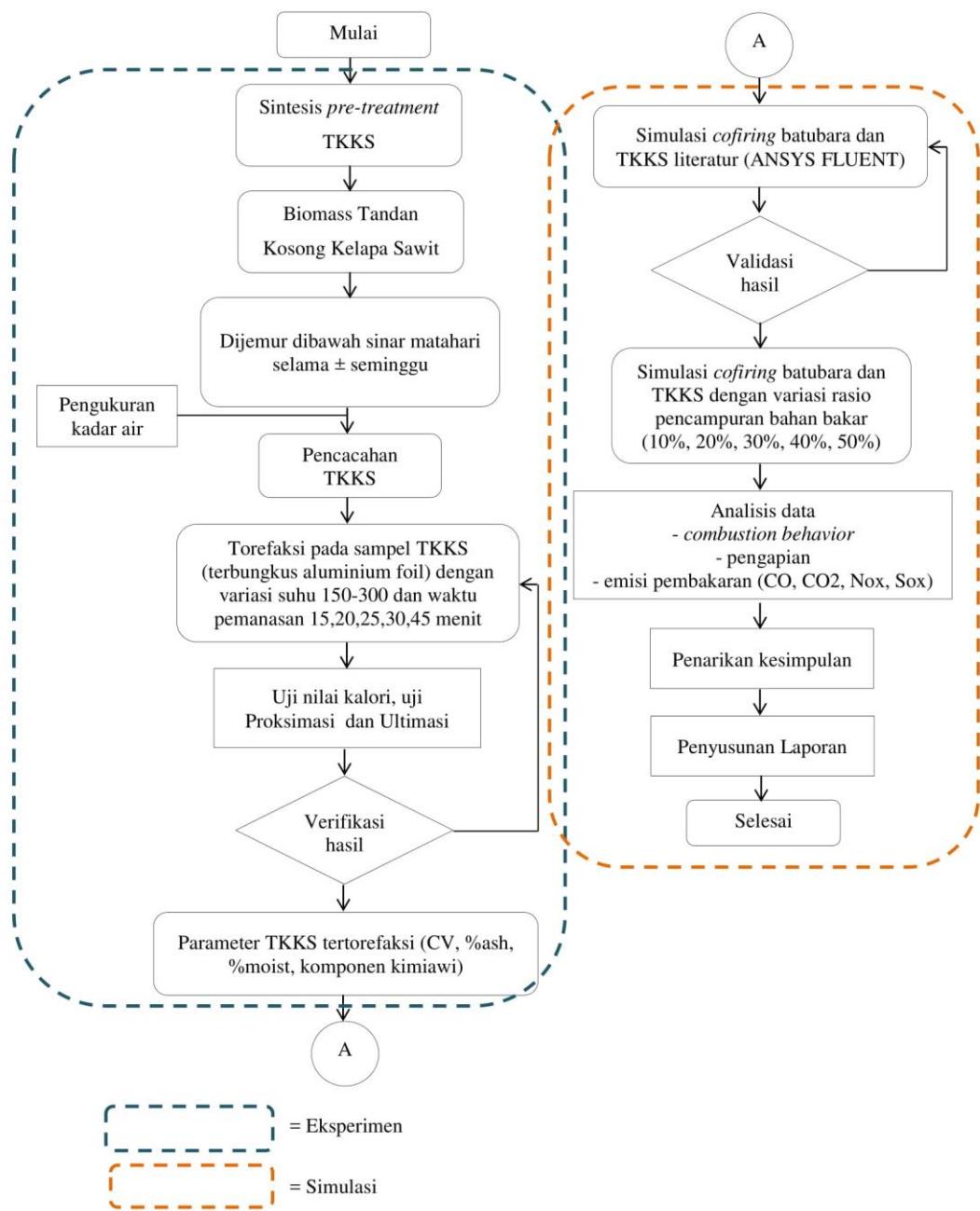
## **BAB 3**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Prosedur Penelitian**

Adapun prosedur penelitian dilakukan dalam dua tahapan yakni studi eksperimental dilanjutkan dengan simulasi. Dalam prosedur eksperimen dilakukan *pre-treatment* pada tandan kosong kelapa sawit dengan memvariasikan waktu dan suhu pada torefaksi. Hasil dari eksperimen akan diuji laboratorium untuk mengetahui karakteristik tandan kosong yang telah dilakukan *pre-treatment* torefaksi. Uji laboratorium yang digunakan adalah uji kandungan nilai bakar pada tandan kosong, yakni uji ultimasi dan proksimasi. Hasil uji proksimasi akan mengetahui karakteristik fisik dari tandan kosong yang telah dilakukan *treatment*. Karakteristik yang akan dianalisis meliputi kadar air (*moisture*), nilai kalor (*calorific value*), kadar abu (*ash*), serta kondisi fisik tandan kosong sebelum dan sesudah dilakukan *treatment*. Uji ultimasi akan menunjukkan karakteristik kimiawi dari biomassa tandan kosong kelapa sawit, meliputi kadar karbon (C), Hidrogen (H), Oksigen (O), Nitrogen (N), dan Sulfur (S). Kadar nilai ini akan sangat berpengaruh dengan nilai kalori dari biomassa tandan kosong, dan hasil uji ultimasi ini lah yang akan dimasukkan dalam simulasi untuk mengetahui fenomena yang terjadi apabila biomassa tandan kosong dilakukan *co-firing* dengan batu bara.

Setelah dilakukan uji proksimasi dan ultimasi, selanjutnya nilai hasil uji akan digunakan sebagai nilai *input boundary condition* dalam simulasi *cofiring* yang akan dilakukan. Simulasi *cofiring* ini dilakukan menggunakan ANSYS FLUENT 18.1. Tipe ruang bakar yang akan digunakan adalah jenis *drop tube furnace*, yakni tipe *boiler* paling sederhana. Udara yang digunakan dalam pembakaran akan dihitung menggunakan AFR *ratio* dan menjadi masukan pada *boundary condition*.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

### **3.2 Prosedur Eksperimen**

Tandan kosong kelapa sawit yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari limbah salah satu pabrik minyak kelapa sawit di Kalimantan Selatan. Tandan kosong kelapa sawit yang masih basah dijemur dibawah sinar matahari selama seminggu untuk mengurangi kadar air secara alami dan mengurangi jamur yang terdapat pada tandan kosong kelapa sawit akibat penyimpanan dan pengiriman tandan kosong kelapa sawit. Tandan kosong kelapa sawit sangat mudah berjamur karena selain mengandung getah dan berserat, sehingga tandan kosong kelapa sawit mudah sekali menjadi tempat mikroba berkembang.

Tandan kosong kelapa sawit yang sudah kering memiliki berat sekitar 1-1.5 kilogram bergantung dari dimensi tandan kosong itu sendiri. Tandan kosong kelapa sawit yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dimensi panjang sekitar 39-42 cm, lebar 20-25 cm, dan diameter 57-74 cm, serta berat 1.1-1.8 kg. Tandan kosong kelapa sawit tersebut kemudian dicacah menjadi bagian-bagian kecil secara manual sehingga bentuknya menjadi lebih homogen.



Gambar 3.2 Tandan kosong kering yang sudah dicacah

Tandan kosong yang sudah dicacah kemudian dibungkus dengan aluminium foil dan divakum, hal ini dilakukan untuk mengurangi kontak dengan

udara secara langsung. Kemudian bungkus tandan kosong diletakkan dalam wadah keramik tertutup. Hal ini dilakukan untuk mengurangi kontak sampel dengan oksigen selama pemanasan berlangsung.



(a)

(b)

Gambar 3.3 Sampel Uji TKKS (a).Sampel TKKS yang terbungkus aluminium foil (b).Penempatan sampel sebelum masuk ke *Furnace*

Sampel yang berada dalam wadah keramik lalu dipanaskan dalam *furnace* selama waktu dan suhu tertentu. Dalam penelitian ini, suhu yang digunakan adalah 150-300 derajat celcius dengan jeda tiap 50 derajat dan rentang waktu, 15, 20, 25, 30, 45 menit. Pendekatan torefaksi yang dilakukan ini menekankan bahwa torefaksi adalah pemanasan biomassa dengan suhu rendah, 200-300 derajat celcius, yang tidak kontak dengan oksigen secara langsung.

### 3.3 Pengujian Hasil Eksperimen

Pengujian eksperimen dari perlakuan pada tandan kosong kelapa sawit dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari hasil perlakuan. Karakterisasi yang dilakukan terdapat dua jenis yakni karakterisasi fisis dan kimiawi. Pengujian laboratorium yang dilakukan adalah karakterisasi bahan bakar yakni uji ultimasi dan proksimasi, dimana pengujian ini merupakan karakterisasi kimiawi bahan bakar yang dalam studi ini, bahan bakar yang diuji adalah tandan kosong hasil perlakuan torefaksi. Karakterisasi bahan bakar menitikberatkan pada analisis kandungan energi pada bahan bakar sampel. Pengujian hasil eksperimen dilakukan di laboratorium yang dapat menganalisis proksimasi dan ultimasi.

Pengujian ultimasi dan proksimasi yang digunakan menggunakan standar ASTM batu bara.

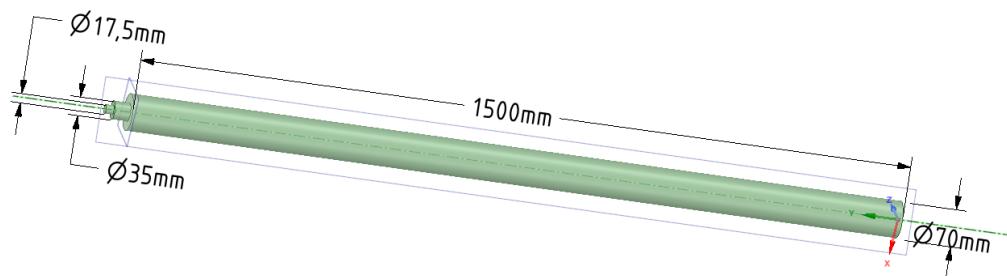
Pengujian proksimasi dan ultimasi akan dilakukan secara *as received* yakni saat tandan kosong telah dilakukan *treatment* dan *dry basis*. Pengujian *heat value* dilakukan pada hasil torrefaksi secara simultan dengan alat *bomb-calorimeter* untuk memperoleh nilai kalor setiap satuan berat.

### 3.4 Simulasi Pembakaran *Co-firing*

Simulasi *Computational Fluid Dynamics* dilakukan sebagai pendekatan, untuk menganalisis fenomena yang terjadi pada pembakaran *cofiring* biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan batu bara. Pembakaran *cofiring* yang akan disimulasikan adalah antara batu bara dengan TKKS yang ditorefaksi serta perbedaan variasi komposisi pembakaran TKKS ter-torefaksi.

#### 3.4.1 Pembuatan Geometri

Simulasi CFD diawali dengan pembuatan geometri *drop tube furnace* yang digunakan dalam simulasi. Pada simulasi geometri *drop tube furnace* yang digunakan adalah *vertical tubular furnace* yang mempunyai kapasitas 1 kW<sub>th</sub>. *Drop tube furnace (DTF)* pada simulasi memiliki dimensi panjang 1.5 meter dan diameter 0.07 meter atau 70 milimeter [16]. Terdapat masukan bahan bakar, *fuel inlet*, diujung *furnace* dan dilanjutkan *gas inlet* sebagai masukan udara untuk pembakaran. Pembakaran pada DTF mengarah ke bawah (*downward direction*).



Gambar 3.4 *Drop Tube Furnace*

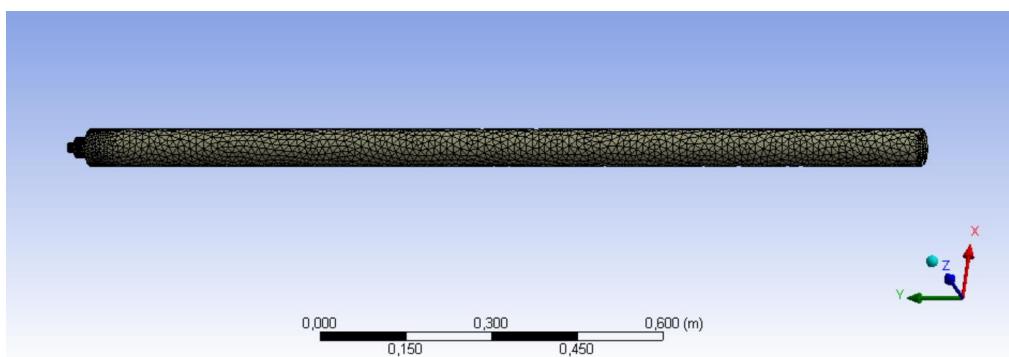
### 3.4.2 Meshing

*Meshing* merupakan pembagian geometri menjadi bagian-bagian yang lebih kecil. Dimana bagian yang lebih kecil tersebut akan disebut control volume yang akan dihitung dengan Persamaan yang sesuai dengan kondisi aliran fluida sebenarnya. Semakin kecil meshing yang dilakukan, maka akan semakin detail perhitungan yang didapat. Berikut adalah ukuran meshing yang digunakan dalam simulasi ini.

Tabel 3.1 Nilai Kualitas hasil *Meshing*

Mesh Quality	Value
Skewness	0.76003
Orthogonal Quality	0.99043
Nodes	8362
Elements	37704

Kualitas hasil simulasi salah satunya ditentukan dengan kualitas hasil meshing yang dilakukan. Berdasarkan tabel 3.1 nilai *skewness* sudah memasuki range baik karena nilai *skewness* yang diharapkan adalah kurang dari 0.98. apabila melihat nilai *orthogonal quality*-nya sebesar 0.99043 nilai ini mendekati standar yang disarankan yakni 1. Apabila nilai *orthogonal quality* mendekati 1 maka hasil meshing tersebut akan mendekati nilai kenyataannya. Geometri yang telah melalui proses meshing ditunjukkan oleh Gambar 3.3 .



Gambar 3.3 Hasil Meshing Geometri Calciner

### **3.4.3 Boundary Condition dan Processing**

Model yang digunakan dalam simulasi ini adalah dalam kondisi transient dan berdasarkan *pressure based-segregated solver* yang mana penyelesaian perhitungan momentum, spesies, energy, dan turbulensi dilakukan secara berurutan. Simulasi yang dilakukan adalah proses pembakaran serentak (*cocombustion*) dengan bahan bakar batu bara dan tandan kosong yang sudah dilakukan *pre-treatment* pada sebuah *drop tube furnace*. Pembakaran menggunakan *non-premixed combustion* karena kombinasi bahan bakar yang digunakan. Serta tidak adanya pembakaran sebelum bahan bakar memasuki ruang bakar. Viskositas yang digunakan adalah k-epsilon standar karena sudah dapat memodelkan aliran turbulen pada pembakaran serentak. Model radiasi yang digunakan adalah *Discrete Ordinates* (DO). Model yang digunakan dalam simulasi dijelaskan lebih lanjut dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.2 Model Simulasi yang digunakan.

Model Persamaan CFD	Model yang digunakan
Viskositas	Realizable k-epsilon, Standard wall function
Radiasi	Discrete Ordinates (DO)
Species Model	Non-Premixed Combustion

Tahapan selanjutnya adalah mendefinisikan kondisi batas pada domain yang telah dibuat. Setelah kondisi batas didefinisikan, akan dimasukkan nilai parameter kondisi simulasi sesuai dengan hasil pengujian. Parameter yang akan digunakan adalah hasil uji ultimat, kandungan unsur kimia karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, dan belerang dari batu bara dan tandan kosong kelapa sawit. Kondisi batas atau *boundary condition* pada simulasi ini ditampilkan dalam tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Kondisi Batas Simulasi

Kondisi Batas	Tipe Kondisi Batas
Fuel Inlet	Mass flow Inlet, DPM escape
Air Inlet	Mass Flow inlet, DPM reflect
Oulet	Pressure Outlet

Setelah pendefinisian kondisi batas, dilanjutkan penentuan *model solver* yang digunakan. Model solusi yang digunakan dijelaskan pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Metode Solusi pada Simulasi Pembakaran

Scheme	SIMPLE
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	PRESTO!
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind

Selanjutnya mengatur nilai kriteria konvergensi dengan mengatur nilai RMS, *residual error*. Nilai RMS yang digunakan sebesar  $10^{-3}$  untuk energi, radiasi, dan pollutant NOx. Jika proses iterasi tidak mencapai kondisi konvergen maka dapat diatur solusi parameter yang lain. Pada simulasi ini menggunakan perhitungan *transient* dengan *time step* sebesar 0.1 detik dan *jumlah time step* 2 serta dilakukan iterasi tiap 500 *time step*. Tipe transien digunakan karena dalam pembakaran memiliki masa tenggang, *residence time*, saat proses pembakaran berlangsung.

### 3.4.3 Post Processing

Post processing dalam CFD adalah pengambilan data yang diperlukan seperti plot kontur, plot grafik, dan streamline yang dihasilkan simulasi pembakaran *cofiring* TKKS dan batu bara. Dalam tugas akhir ini, data yang diperlukan adalah plot kontur temperature dari *furnace*, temperature *outlet*, fraksi massa pollutant NOx, CO<sub>2</sub>, CO, dan SO<sub>2</sub>.

### **3.4.5 Validasi Hasil Simulasi**

Validasi data merupakan salah satu proses penting dalam suatu penelitian terutama untuk simulasi. Melalui proses validasi, dapat diketahui kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi sebenarnya. Validasi hasil dilakukan dengan cara membandingkan temperature outlet *furnace* hasil simulasi dengan temperatur pada referensi. Perbandingan dilakukan dengan melihat besar *error* antara hasil simulasi dan keadaan sebenarnya. Jika nilai *error* lebih dari 10% maka simulasi dianggap tidak cukup merepresentasikan keadaan sebenarnya.

Setelah dilakukan *trial and error* untuk menentukan permodelan dan *set up* simulasi Dalam penelitian ini dilakukan dengan membandingkan parameter hasil dari simulasi dan data pada referensi. Parameter yang akan dibandingkan adalah temperatur keluaran dari *drop tube furnace*. Dari hasil simulasi *cofiring* yang dilakukan suhu keluaran didapat sebesar 1408.1 K sedangkan data dari referensi [17], diperoleh hasil 1536 K. Dilakukan perhitungan *error* simulasi sehingga didapatkan nilai *error* sebesar 8.33%. Dimana nilai ini sudah dibawah dari batas minimal nilai *error* yakni sebesar 10%. Sehingga dari nilai *error* yang diperoleh menunjukkan, bahwa permodelan yang digunakan dan dipilih sebagai model simulasi untuk memodelkan pembakaran *co firing* TKKS dengan batubara di *Drop Tube Furnace*, dapat dikatakan cukup valid dan dapat merepresentasikan pembakaran.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Karakteristik Biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit**

Karakterisasi biomassa tandan kosong kelapa sawit yang telah melalui *pre-treatment* dilakukan dengan menganalisis karakterisasi fisik dan kandungan kimia dari biomassa tersebut. Karakteristik *physical* meliputi dimensi, rupa fisik biomassa, parameter proksimasi yakni kadar air, kadar abu, dan nilai kalor diukur untuk menentukan karakter biomassa tandan kosong tersebut. Karakterisasi kimiawi juga dilakukan dengan menggunakan analisis ultimasi, dimana kandungan karbon (C), Hidrogen (H), oksigen (O), Nitrogen (N), dan Sulfur (S) diukur melalui pengujian ultimasi.

Karakterisasi fisik dan kimiaswi dari suatu bahan bakar, khususnya biomassa perlu dilakukan karena setiap parameter terkait memiliki dampak dalam penggunaan biomassa tersebut sebagai bahan bakar. Kandungan atau kadar air (*moisture content*) dari biomassa akan berdampak pada ketahanan penyimpanan, nilai kalor, serta pengapian yang akan menyebabkan perbedaan pada desain *plant*. Kadar abu akan mempengaruhi pengapian dan pembentukan emisi serta terjadinya *fouling* dan *slagging* pada tungku bakar. Nilai kalor yang terkandung akan mempengaruhi energi yang dapat dihasilkan dari pembakaran biomassa tersebut dalam *plant*. Serta karakteristik fisik mempengaruhi teknologi pembakaran, keamanan, pengeringan biomassa, dan pembentukan debu akibat proses kimia biomassa. Kandungan kimiawi karbon (C), Hidrogen (H), oksigen (O), banyak mempengaruhi kandungan nilai kalor pada biomassa. Sedangkan pada kandungan Nitrogen (N), dan Sulfur (S), mempengaruhi pembentukan emisi hasil pembakaran, khusus pada kandungan sulfur akan berdampak akan terbentuknya korosi pada ruang bakar.

Sifat tandan kosong yang berserabut, dan hidrofilik, membuat air tidak mudah meninggalkan tandan kosong. Air yang terkandung pada tandan kosong ini tidak

mudah dihilangkan dalam pengeringan biasa. Setelah dilakukan torefaksi selama 30 menit pada suhu 300 derajat, tandan kosong mengalami penurunan kadar air sebanyak 31.8%.

Selain pengurangan kadar air yang cukup signifikan, melalui torrefaksi yang diusulkan, warna TKKS yang terbakar menjadi lebih gelap karena perubahan suhu yang meningkat dari cokelat muda ke cokelat gelap (gambar 4.1). Perubahan warna TKKS ini disebabkan oleh devolatisasi biomassa dan peningkatan kandungan karbon dengan meningkatnya suhu torrefaksi. Keadaan vakum, dimana tandan kosong tidak kontak langsung dengan udara bebas, yang diusulkan membuat perubahan warna TKKS tidak terlihat secara signifikan.



Gambar 4.1 Perubahan warna Tandan Kosong setelah dilakukan torefaksi

Perubahan fisik juga terjadi selama proses torrefaksi. Struktur tandan kosong yang ulet dan berserat kuat, sebagian besar hancur melalui pemecahan hemiselulosa dan tingkat molekul selulosa menjadi lebih rendah. Hal ini membuat tandan kosong tertorefaksi menjadi rapuh dan mudah digiling. TKKS hasil torefaksi juga lebih rapuh dari pada TKKS mentah, meskipun tidak serapuh biomassa lain yang telah dilakukan *pre-treatment*.

Kandungan hemiselulosa TKKS yang cukup tinggi, sebesar 28 persen dari massa TKKS kering, membuat keuletan tandan kosong lebih tinggi dibanding biomassa lain. Hemiselulosa merupakan pengikat selulosa dan lignin yang terkandung pada dinding satu sel biomassa TKKS. Pada saat torefaksi, panas yang diberikan menyebabkan ikatan antar penyusun biomassa terputus, fenomena ini

ditandai oleh dengan terdegradasinya hemisellusoa. Secara fisik perubahan tersebut menyebabkan perubahan fisik TKKS berupa sifat keuletan TKKS yang berkurang. Hal ini terjadi akibat tidak adanya hemiselulosa yang berfungsi sebagai pengikat sel biomassa TKKS.

TKKS yang tidak dilakukan torefaksi memiliki nilai kalori sebesar 4013 kal / gr, jika dibandingkan NCV batubara lignite yang digunakan pada kegiatan industri yakni sebesar 4200 kal/gr. Nilai ini cukup tinggi untuk menggenerasikan energi hasil pembakaran. Setelah TKKS melalui proses torefaksi nilai CV cenderung meningkat. Berdasarkan tabel, setiap kenaikan suhu torefaksi akan mengakibatkan nilai kalori dari TKKS meningkat. Kenaikan 20,5% terlihat dari torefaksi TKKS mentah (*raw*), menjadi 4,834 kal / gr.

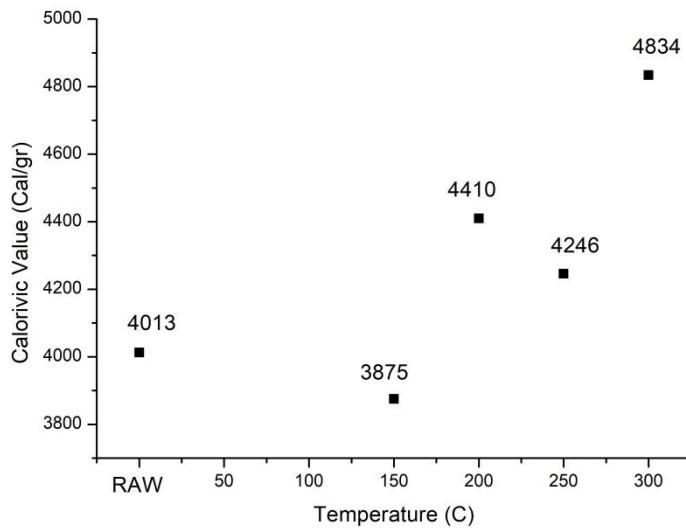
Tabel 4.1 Nilai kalor TKKS dengan variasi suhu torefaksi

Sampel	CV (kal/g)	CV (kJ/kg)
RAW	4013	16855
150	3875	16275
200	4410	18522
250	4246	17833
300	4834	20303
Batu Bara	4200	17640

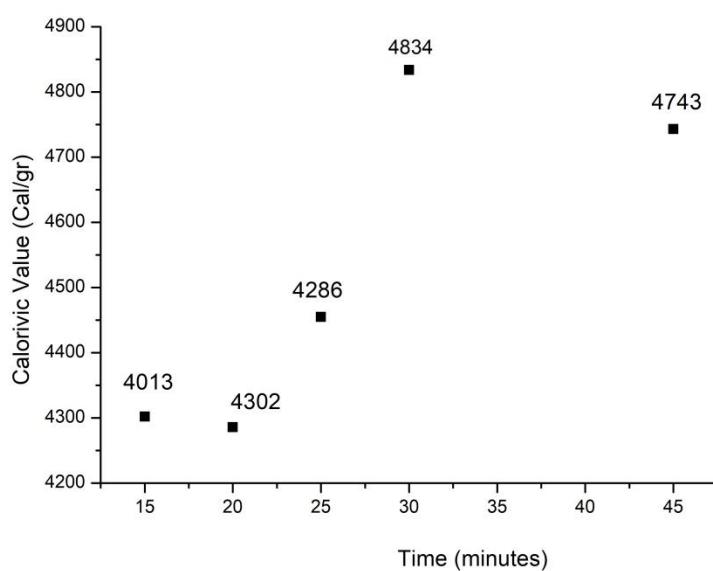
Kenaikan nilai kalori ini terutama disebabkan oleh peningkatan karbon hasil pemanasan. Dimana ikatan O akan meningkat saat dilakukan pemanasan. Kandungan karbon relatif tetap namun karbon akan bereaksi dengan Oksigen membentuk ikatan yang akan menghasilkan hasil produk pembakaran. Selama torefaksi juga terjadi penurunan kandungan oksigen akibat pelepasan kandungan air. Komposisi kimia akan lebih lanjut dibahas pada analisis ultimasi pada subbab 4.4. Berdasarkan tabel nilai kalori dari EFB pada 300 °C pada 30 menit, memiliki nilai kalori 4834 kal/gr, nilai ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan batubara lignite (4200 kal / gr) yang digunakan dalam industri.

Torefaksi yang dilakukan pada TKKS mengubah nilai kalori dari TKKS. Peningkatan suhu dan lama waktu torefaksi akan meningkatkan nilai kalori

TKKS. sesuai dengan gambar grafik 4.2 dan 4.3, dimana saat dilakukan variasi suhu dan lama waktu torefaksi, kecenderungan nilai kalori tandan kosong akan bertambah



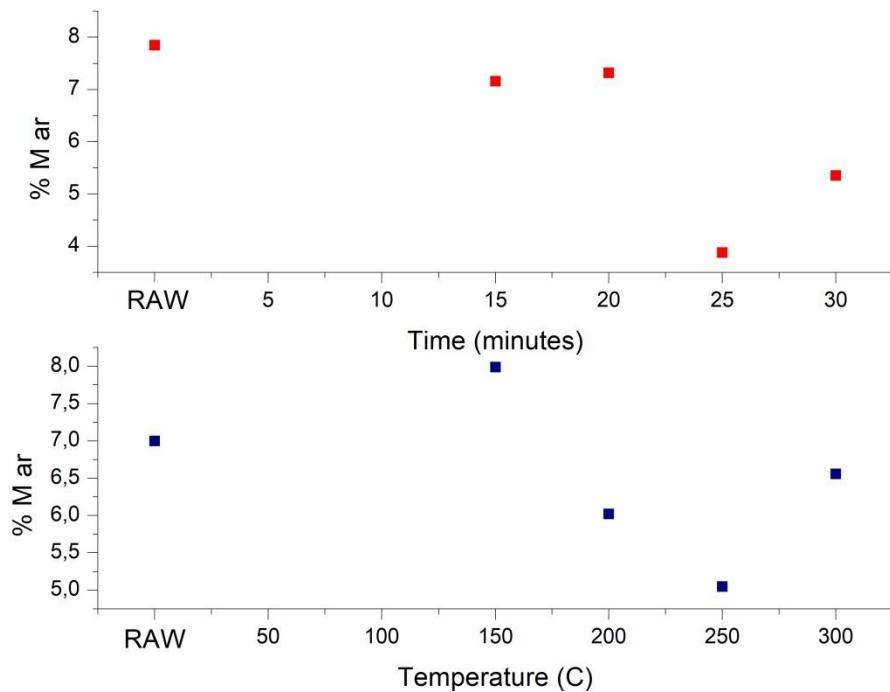
Gambar 4.2 Nilai kalor Tandan kosong setelah dilakukan torefaksi pada rentang suhu 150-300 °C dengan waktu tetap (30 menit)



Gambar 4.3 Nilai kalori TKKS dengan variasi waktu pemanasan pada suhu tetap (300°C)

#### 4.2 Kadar Kebasahan (*Moisture*) dan Kadar Abu (*Ash Content*)

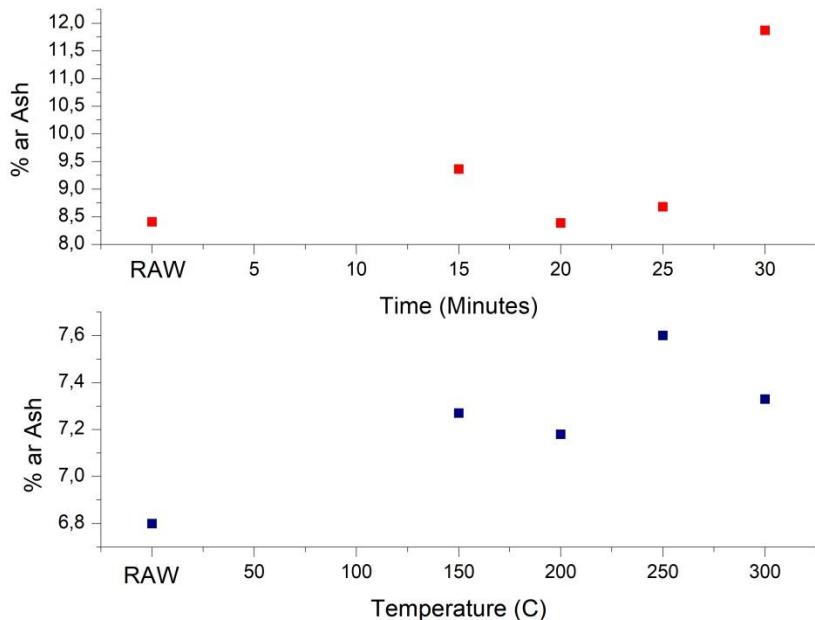
Dibandingkan dengan bahan bakar lain, biomassa mengandung kadar hidrogen (H) dan oksigen (O) yang tinggi. Hal ini membuat biomassa memiliki kadar air lebih tinggi daripada bahan bakar alternatif lainnya. Kandungan air pada bahan bakar akan mempengaruhi proses pembakaran, temperatur adiabatik dari pembakaran, dan volume gas buang tiap satuan energi. Biomassa yang memiliki kandungan air yang cukup tinggi akan memerlukan waktu pengeringan yang lebih lama sebelum dilakukan gasifikasi, atau pembakaran, dimana hal ini membutuhkan ruang bakar yang lebih besar. Selain itu kadar air dalam biomassa yang tinggi akan menyebabkan pengurangan efisiensi dari pembakaran yang dihitung berdasarkan panas yang keluar dari *boiler* setiap besar energi dari nilai kalor bersih biomassa.



Gambar 4.4 Kandungan *moisture ar basis (%)* pada variasi Torefaksi TKKS

Kadar air akan menurun akibat torefaksi, terlepas dari kondisi apapun. Kadar air akan menurun dalam peningkatan suhu maupun dalam peningkatan waktu torefaksi. Kecenderungan ini disebabkan oleh evaporasi air di EFB. Dari salah satu *pre-treatment* yang dilakukan setelah torefaksi selama 30 menit pada suhu

300 derajat, masih ada kandungan air kecil yang tersisa sebanyak 5.35%, hal ini disebabkan oleh keadaan TKKS yang berserat, sehingga memiliki sifat hidrofilik yang cenderung untuk menyimpan air.



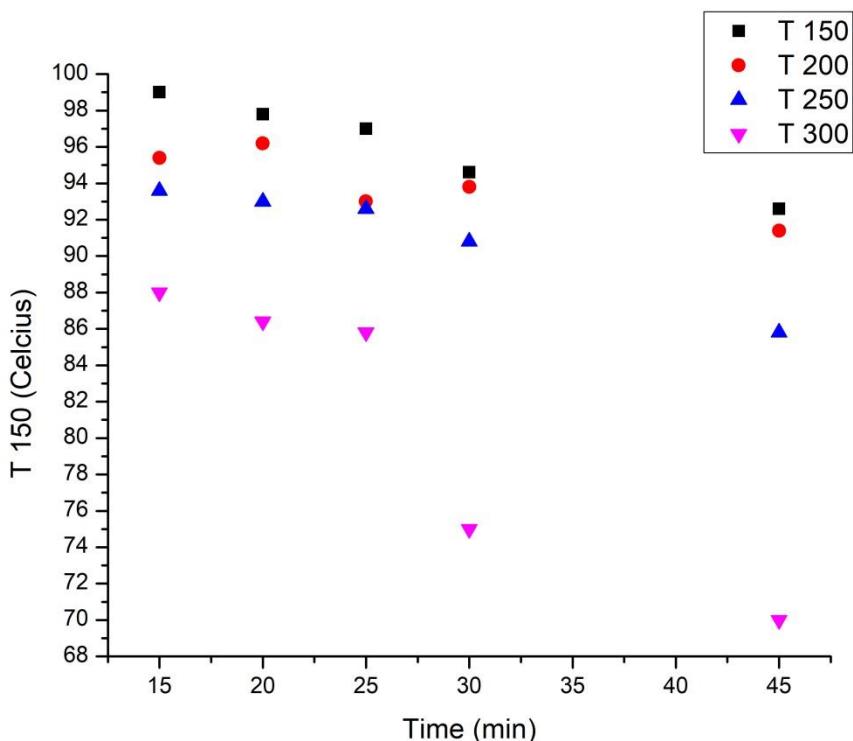
Gambar 4.5 Kandungan Abu ar basis (%) pada variasi Torefaksi TKKS

Kandungan abu pada TKKS diukur dengan pengujian proksimasi menggunakan standar ASTM D3174-12. Secara umum, peningkatan suhu dan waktu torefaksi akan membuat kadar abu pada TKKS meningkat. Hal ini disebabkan oleh sebagian besar hidrogen dan oksigen meninggalkan biomassa akibat pemanasan, sehingga komposisi abu masih dominan pada biomassa TKKS. Selain itu peningkatan kadar abu terjadi disebabkan oleh meningkatnya kandungan karbon, yang mempengaruhi kadar abu.

Kandungan abu paling tinggi dicapai saat torefaksi dengan suhu 300 °Celcius dengan waktu 30 menit. Pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa peningkatan suhu dan waktu torefaksi akan meningkatkan kandungan abu. Grafik atas pada gambar 4.4 menunjukkan perubahan kandungan abu pada peningkatan suhu dengan waktu pemanasan tetap, selama 30 menit. Grafik bagian bawah, menunjukkan perubahan kandungan abu pada peningkatan waktu dengan suhu tetap, 300 °Celcius.

Selain kandungan abu, dilakukan pula analisis kandungan air pada torefaksi TKKS dengan variasi lama torefaksi dan peningkatan suhu torefaksi. Gambar 4.5 menunjukkan perbandingan variasi lama torefaksi dan peningkatan suhu torefaksi.

Kandungan air *moisture ar basis (%)* paling rendah terdapat pada torefaksi suhu 250 °Celcius selama 30 menit, namun pada sampel ini memiliki nilai ash tertinggi, yakni 7.6% *as received basis*(gambar 4.4 ). Penurunan kadar air disebabkan oleh hilangnya ikatan hidrogen dan oksigen akibat perpindahan panas selama torefaksi. Berdasarkan grafik (gambar 4.5) semakin lama waktu torefaksi maka akan menurunkan kandungan air pada TKKS, dan semakin tinggi waktu torefaksi maka semakin menurun juga kandungan air pada TKKS. Namun pada grafik terlihat saat suhu 300 derajat dan waktu 30 menit kecenderungan naik terlihat, hal ini disebabkan oleh uji abu yang dilakukan pada laboratorium kurang maksimal karena sampel terlalu ringan.



Gambar 4.6 Mass Yield TKKS hasil Torefaksi

*Mass yield* dan *energy yield* hasil torefaksi dianalisis untuk melihat nilai materi volatil yang terbakar akibat torefaksi. Gambar 4.6 menyajikan hubungan antara hasil massa dan waktu torefaksi pada setiap perbedaan suhu. Berdasarkan gambar, hasil massa menurun pada peningkatan waktu torefaksi. Kehilangan massa pada torefaksi disebabkan oleh dehidrasi, oksidasi dan devolatisasi dalam reaksi. Sedangkan pada perbedaan suhu, peningkatan temperatur torefaksi akan menurunkan hasil massa masing-masing. Kecenderungan yang sama juga dilaporkan oleh [3].

Pada Torrefaksi yang dilakukan pada suhu 300 derajat, berdasarkan grafik CV yang ditunjukkan pada gambar 4.3. Dapat dilihat bahwa torefaksi pada durasi panjang meningkatkan CV dari TKKS, ini sebanding dengan densitas energinya. Untuk hasil massa, itu menurun dari 88% menjadi 70%, sedangkan kepadatan energi sebagian besar menurun dari 94,34% menjadi 82,73%.

#### 4.4 Analisis Ultimasi

Analisis ultimasi adalah metode karakterisasi penting untuk menganalisis sifat kimia dari TKKS yang diolah. Tabel 4.2 dibawah menyajikan hasil uji ultimasi, sifat kimia dari TKKS mentah (tanpa perlakuan) dengan TKKS yang dibakar serta perbandingan dengan batu bara *lignite*. Berdasarkan Tabel 4.2, biomassa TKKS memiliki kandungan kimia yang lebih tinggi daripada batu bara. Hal ini sesuai dengan literatur dimana menurut diagram *Van Krevelen* rasio Oksigen dan hidrogen dari biomassa lebih tinggi dibandingkan bahan bakar lain, batu bara[1]. Nilai rasio hidrogen TKKS tanpa torefaksi menunjukkan 0.17 sedangkan batu bara hanya 0.11, dan rasio oksigen sebesar 0.92 dibandingkan rasio batubara 0.32.

Setelah dilakukan torefaksi, kandungan karbon (C) dari TKKS meningkat secara signifikan dari 47.85 % menjadi 56.81 %, sementara kandungan Oxygen (O) dan hidrogen (H) menurun seiring bertambahnya suhu torefaksi. Kandungan oksigen dan hidrogen kebanyakan menurun karena proses evaporasi yang terjadi selama proses torefaksi. Sifat-sifat dari TKKS juga dapat diselidiki oleh rasio O / C dan rasio H / C. Hitungan menunjukkan rasio O / C menurun dari 0.92 menjadi

0.63 , sementara rasio H / C menurun dari 0,17 menjadi 0,11. Namun rasio hidrogen dan oksigen TKKS yang telah dilakukan torefaksi tetap lebih tinggi dibandingkan batu bara *Lignite*.

Tabel 4.2 Analisa Ultimasi Sampel TKKS dan Batu bara *lignite*

Sampel	C	H	N	S	O	H/C	O/C
TKKS tanpa perlakuan	47.85	8.02	0.11	0	44.02	0.17	0.92
T-150	53.00	6.07	0.87	0.22	39.85	0.11	0.75
T-200	54.36	6.29	0.67	0.18	38.49	0.12	0.71
T-250	56.01	6.36	0.67	0.23	36.73	0.11	0.66
T-300	56.81	6.22	0.74	0.22	36.02	0.11	0.63
Batu Bara <i>lignite</i>	58.63	5.97	1.04	15.62	18.74	0.10	0.32

Berdasarkan tabel 4.2 rasio hidrogen dan oksigen mengalami penurunan. Rasio hidrogen dan oksigen dari biomassa yang berkurang menunjukkan peningkatan karakteristik TKKS dengan torefaksi, karakteristik yang berubah antara lain nilai kalor, daya tahan terhadap air, dan kemampuan bahan untuk mengalami deformasi bentuk (*grindability*). Dimana semakin kecil nilai rasio hidrogen dan oksigen maka semakin tinggi nilai *grindability*nya. Namun komposisi belerang (S) dan nitrogen (N) meningkat seiring dengan bertambahnya suhu torefaksi. Kandungan belerang TKKS tanpa perlakuan meningkat 0.22 % dan kandungan nitrogen meningkat sebanyak 0.63%. peningkatan unsur belerang dan nitrogen akan berdampak pada emisi pembakaran TKKS. Peningkatan nilai S dan N ini disebabkan karena proses pemanasan dimana suhu dan tekanan tinggi terjadi[18].

Peningkatan suhu torefaksi pada sampel TKKS akan mempengaruhi nilai kalor yang dihasilkan. Sesuai yang dijelaskan pada subbab 4.1, dimana semakin tinggi suhu yang diberikan pada *pre-treatment* torefaksi, akan meningkatkan nilai kalor dari sampel TKKS. nilai kalor suatu bahan bakar sangat bergantung dengan komposisi unsur kimia pada bahan bakar tersebut. Unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S) menentukan nilai kalor suatu bahan bakar dengan dilakukan uji ultimasi berdasarkan stokimetri pembakaran. Sesuai

pendekatan empirik dengan persamaan 2.2, unsur karbon pada bahan bakar memberikan dampak positif pada nilai kalor bahan bakar. Sehingga dengan penambahan suhu torefaksi yang akan meningkatkan unsur karbon pada TKKS, akan meningkatkan nilai bakar TKKS.

#### **4.5 Fenomena Pembakaran Batu Bara dengan TKKS**

Simulasi pembakaran serentak antara batu bara dengan TKKS dilakukan untuk mengidentifikasi fenomena pembakaran yang berlangsung. Simulasi dilakukan menggunakan ANSYS Fluent 18.1, sesuai dengan *set up* yang dijelaskan pada bab 3. Fenomena pembakaran yang diidentifikasi adalah pengapian, distribusi panas pada *furnace* dan emisi hasil pembakaran serentak.

Pada simulasi *cofiring* dilakukan beberapa variasi simulasi, yakni simulasi *cofiring* batu bara dengan TKKS yang sudah dilakukan *pre-treatment* torefaksi dengan batu bara *lignite*. Pada simulasi ini terdapat 4 varian simulasi, yakni TKKS yang ditorefaksi pada suhu 150, 200, 250, dan 300 derajat celcius.

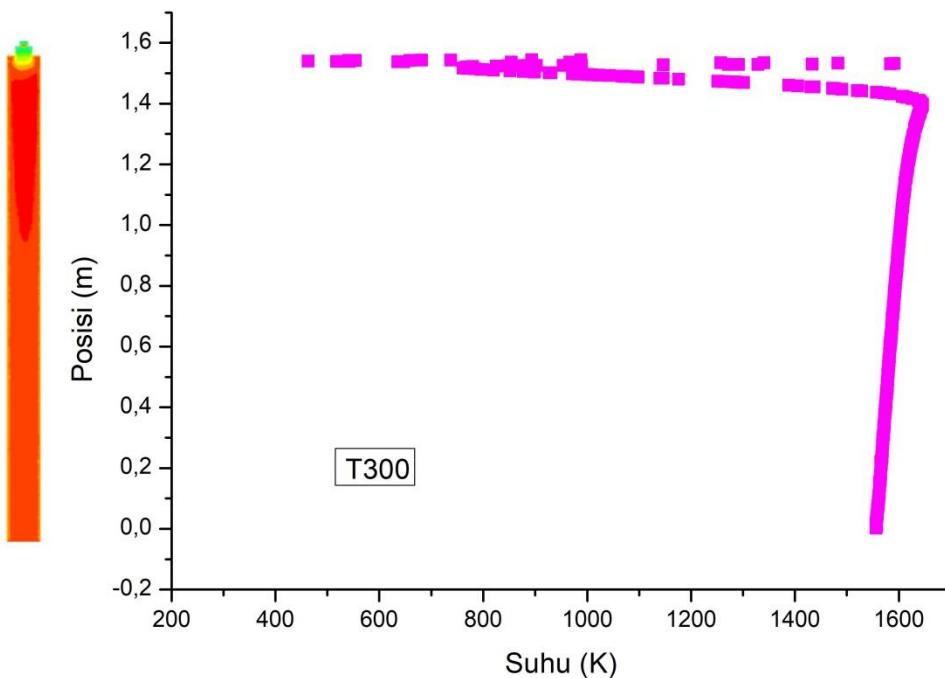
Selanjutnya dilakukan simulasi *cofiring* TKKS dengan batu bara *lignite* dengan variasi persentase TKKS yang digunakan. Variasi komposisi TKKS yang digunakan terdapat 4 variasi, dimana komposisi TKKS menjadi 12.5%, 25%, 37.5%, dan 50% dari total bahan bakar yang dibutuhkan. Pada simulasi dengan variasi komposisi TKKS menggunakan TKKS dengan suhu torefaksi 250°C selama 30 menit.

##### **4.5.1 Hasil Pembakaran *Co-Firing* TKKS dan Batu bara**

Pembakaran *cofiring* TKKS dilakukan dengan menggunakan pendekatan simulasi *computational fluid dynamics* yang dibantu oleh software ANSYS FLUENT 18.1. Setelah dilakukan simulasi, diperoleh data yang menunjukkan fenomena pembakaran *cofiring* antara TKKS dengan batu bara lignite. Fenomena pembakaran yang akan dibahas pada studi kali ini adalah distribusi suhu dalam ruang bakar DTF selama pembakaran *cofiring*, nyala api pembakaran *cofiring*, dan pollutant yang dihasilkan selama pembakaran *cofiring*.

#### 4.5.2 Distribusi Suhu

Dari hasil simulasi, salah satu parameter yang diidentifikasi adalah distribusi temperatur hasil pembakaran *cofiring*. Dari analisis ultimasi dapat dilihat bahwa semakin tinggi suhu torefaksi akan meningkatkan nilai kalori dan unsur C. Unsur karbon dalam bahan bakar menentukan nilai kalori terutama HHV dari bahan bakar. Semakin besar unsur C maka akan semakin besar pula nilai HHV TKKS, hal ini didukung dengan persamaan 2.2, dimana dalam mencari nilai HHV dengan menggunakan pendekatan empirik, unsur karbon memberikan dampak positif pada nilai kalori menjadi bertambah.

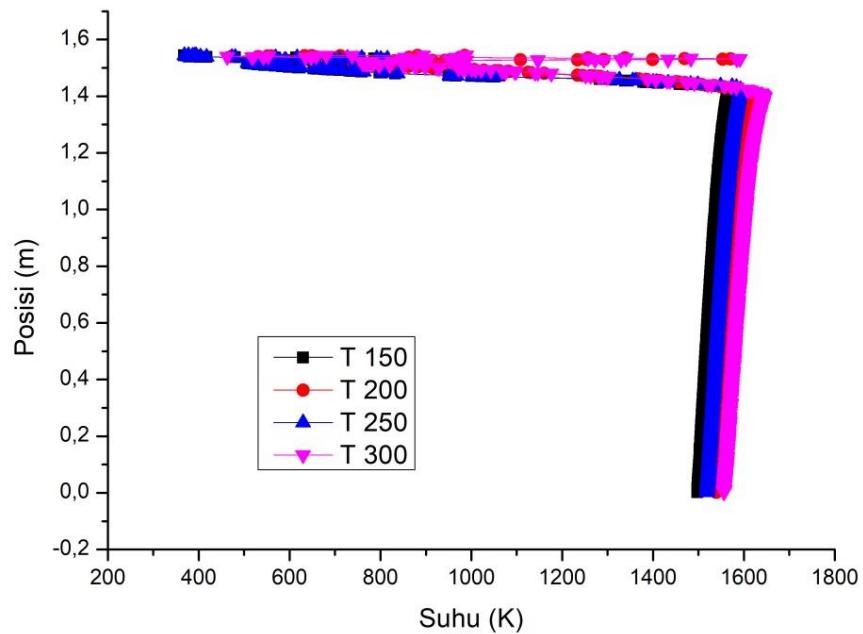


Gambar 4.7 Distribusi Suhu pada *Drop Tube Furnace* dengan sampel torefaksi TKKS 300 °C

Energi yang dihasilkan oleh pembakaran bergantung dengan kualitas nilai bakar bahan bakar yang digunakan. Peningkatan nilai bakar akibat torefaksi akan mempengaruhi hasil pembakaran, salah satunya adalah energi yang dihasilkan.

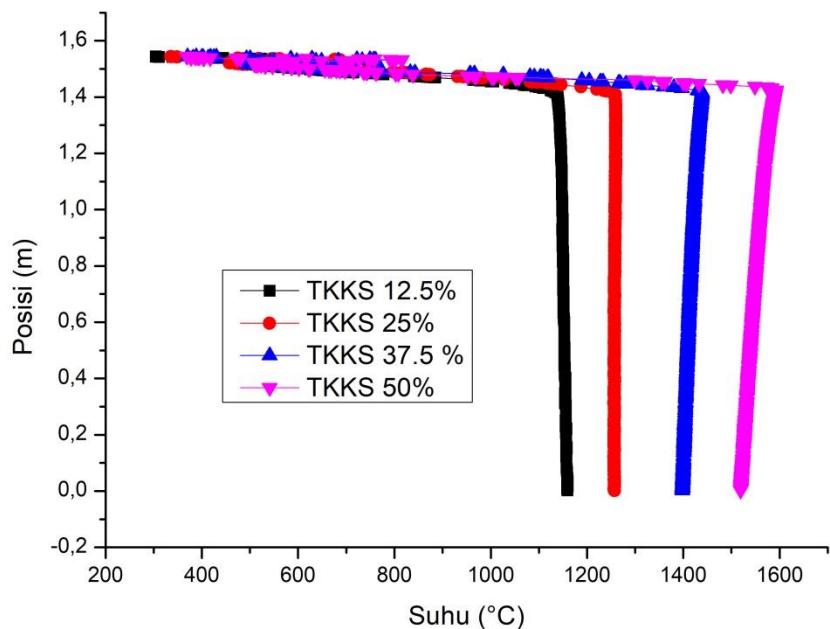
Dengan nilai bakar bahan bakar yang semakin tinggi akan meningkatkan energi yang memperbesar entalpi pembakaran, sehingga hasil suhu pada pembakaran akan semakin tinggi. Pada gambar 4.7 dan 4.8 mempresentasikan distribusi suhu pada *drop tube furnace*. Sumbu Y merepresentasikan panjang *furnace* dari masukan bahan bakar hingga keluaran ruang bakar. Koordinat Y, 1.6 m (bagian atas) merepresentasikan bagian masukan bahan bakar *furnace*.

Oleh karena itu, pembakaran *cofiring* menggunakan TKKS yang sudah ditorefaksi dengan komposisi 50%, semakin besar suhu torefaksinya maka semakin besar pula kalori yang dihasilkan sehingga akan berdampak kepada hasil pembakaran, dengan yang terlihat adalah suhu pembakaran. Pada gambar 4.7, terlihat dengan *cofiring* menggunakan TKKS tertorefaksi 300 derajat maka distribusi temperaturenya paling tinggi diantara TKKS yang ditorefaksi dibawah suhu 300 derajat celcius.



Gambar 4.8 Distribusi Suhu pada DTF dengan variasi suhu torefaksi TKKS

Sesuai hasil pengujian dan telah dibahas pada subbab 4.1, bahwa TKKS yang mengalami torefaksi memiliki nilai kalor yang tinggi, nilai kalor ini disebabkan karena tingginya materi *volatile* akibat torefaksi. Pada distribusi suhu ruang bakar, daerah yang memiliki sebaran suhu yang tinggi menunjukkan lokasi materi *volatile* terbakar. Daerah DTF yang paling banyak terdapat *volatile* terbakar adalah pada ujung masukan udara pembakaran, posisi sekitar 1,4 m. Pada gambar 4.8 menunjukkan sebaran suhu *cofiring* dengan variasi suhu torefaksi TKKS. Semakin besar komposisi TKKS sebagai bahan bakar maka semakin tinggi suhu rata-rata dalam *drop tube furnace*.



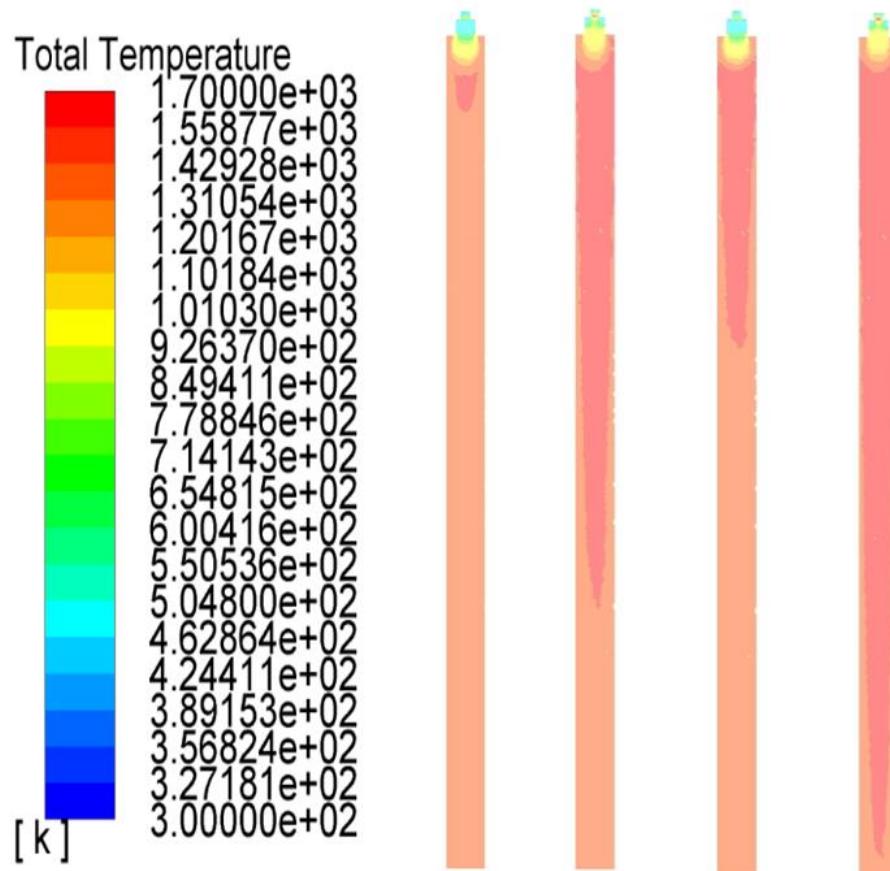
Gambar 4.9 Distribusi Temperatur pada DTF dengan variasi komposisi TKKS

Secara umum, semakin besar komposisi presentase TKKS yang digunakan maka akan menaikkan total suhu pada ruang bakar begitu halnya dengan suhu pada *outlet*. Pada variasi komposisi TKKS 50% menghasilkan temperatur *outlet* tertinggi yakni 1506 K, jika dibandingkan dengan pembakaran batu bara saja tanpa menggunakan TKKS maka suhu *outlet* ruang bakar hanya mencapai 1135 K. Perubahan variasi TKKS pada *cofiring* mempengaruhi nilai kalor pada

campuran bahan bakar, sehingga bentuk dan distribusi api yang terbentuk akibat variasi komposisi bahan bakar akan berubah seiring bertambahnya komposisi TKKS pada bahan bakar campuran.

#### 4.5.3 Distribusi Nyala Api Pembakaran

Pengapian dimulai saat devolatilisasi, dimana materi *volatile* padat pada bahan bakar berubah menjadi gas hingga tersisa arang, berhenti lalu berlanjut hingga massa partikel menurun mencapai keadaan inert, tidak ada reaksi lanjutan. Reaksi pengarangan yang terjadi tercantum pada persamaan 2.3. Pada pengapian, nilai materi *volatile* mempengaruhi fenomena yang terjadi pada pengapian, dimana dapat terjadi pengapian yang homogen atau heterogen.



Gambar 4.10 Distribusi Suhu (nyala api) pada ruang bakar

Pada *cofiring* dengan 50% TKKS tertorefaksi dan batu bara, distribusi suhu yang menunjukkan *flame* pada DTF berbeda untuk setiap jenis torefaksi. Semakin

tinggi suhu torefaksi TKKS semakin rata distribusi suhunya, hal ini menunjukkan bahwa pelepasan materi *volatile* terjadi merata pada ruang bakar sesuai yang ditunjukkan pada gambar 4.9. Dari kiri adalah *cofiring* 50% batubara dengan TKKS yang ditorefaksi pada suhu 150 derajat, dilanjutkan pada suhu 200, 250, dan 300 derajat Celcius. Berdasarkan tampilan kontur temperatur pada gambar 3.9, api menyebar paling merata dan memiliki suhu tertinggi pada campuran torefaksi TKKS 300 derajat. Lidah api pada suhu 200 derajat lebih merata dibandingkan pada T250 dikarenakan komposisi C dari hasil torefaksi T 200 lebih besar dibandingkan torefaksi pada suhu 250 derajat, Tabel 4.2. Selain nilai *volatile* TKKS yang tinggi, hasil torefaksi yang meningkatkan nilai kalor TKKS membuat hasil *cofiring* lebih maksimal.

Selain nilai kalori dan *volatile* yang mempengaruhi nyala api, bentuk partikel biomassa tandan kosong yang melalui torefaksi suhu 300 derajat membuat bentuk partikelnya lebih halus sehingga pengapiannya lebih homogen. Jika melihat kontur TKKS yang ditorefaksi 150 derajat, nyala api yang mencapai suhu tinggi hanya sebagian kecil dalam ruang bakar. Hal ini salah satunya disebabkan oleh bentuk TKKS masih belum homogen dibandingkan dengan TKKS yang melalui torefaksi suhu tinggi.

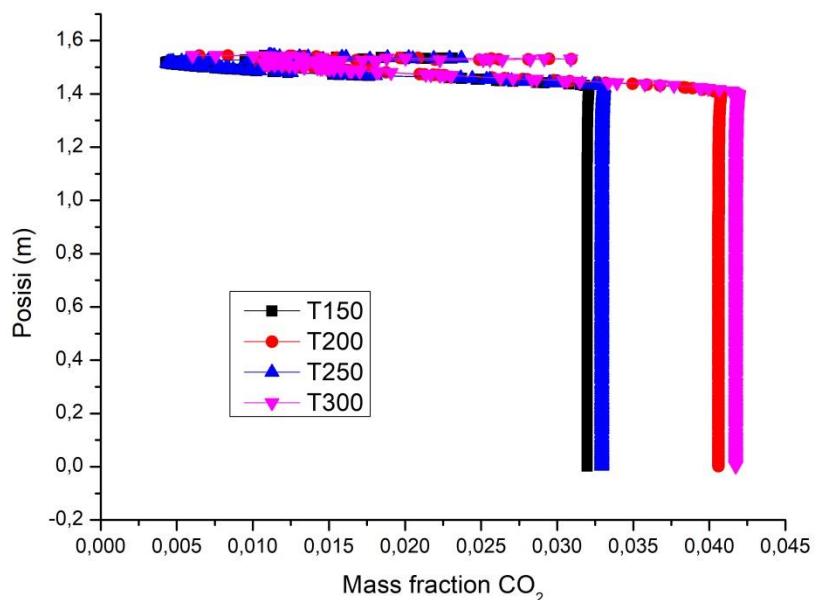
Suhu pengapian yang juga dipengaruhi oleh ukuran partikel bahan bakar. Untuk memunculkan pengapian heterogen, partikel yang lebih besar membutuhkan temperatur yang tinggi. Menurut penelitian yang pernah dilakukan terdapat batas maksimal ukuran partikel agar terjadi pengapian heterogen. Proses pengapian pada batu bara dan biomassa serupa, kecuali terdapat materi *volatile* yang berlebih untuk terjadi reaksi tambahan. Sehingga pada pembakaran biomassa, pengapian homogen lebih sering terjadi. Menurut referensi, ukuran partikel biomassa yang mempengaruhi suhu pengapian biomassa lebih beragam daripada rentang ukuran partikel batu bara.

Hasil simulasi dengan variasi komposisi TKKS dan batu bara pada pembakaran *cofiring* menunjukkan bahwa pada komposisi TKKS yang lebih besar, maka pengapian yang terjadi lebih banyak, sehingga suhu nya lebih tinggi.

Hal ini dikarenakan nilai materi *volatile* dari TKKS lebih tinggi dari batu bara. Panas yang dihasilkan oleh biomassa juga lebih tinggi daripada panas yang dihasilkan oleh batu bara, sehingga suhu nya lebih tinggi.

Kandungan oksigen pada biomassa juga lebih tinggi daripada batubara sehingga memudahkan devolatilisasi. Pada *cofiring* TKKS dengan batubara, pengapian TKKS terjadi lebih dulu dibanding pengapian batu bara. Pengapian terjadi di daerah sekitar *fuel* dan *air inlet* (+/1.4 m pada grafik 4.7 dan 4.8). Pada *cofiring*, pencampuran TKKS dan batu bara memudahkan terjadinya pembakaran bahan bakar di daerah *inlet* sesuai dengan udara yang diberikan.

#### 4.5.4 Distribusi Emisi CO<sub>2</sub>, CO, NOx, dan SO<sub>2</sub>



Gambar 4.11 Emisi CO<sub>2</sub> *cofiring* TKKS tertreatment dan Batu bara

Pembakaran menggunakan biomassa mempengaruhi aspek lingkungan terutama dalam hal emisi hasil pembakaran yang dilepaskan ke atmosfer. Emisi hasil pembakaran berasal dari pembakaran sempurna dan sebagian dalam pembakaran. Biomassa dimana merupakan energi terbarukan memiliki pollutant CO<sub>2</sub> yang termasuk dalam kategori CO<sub>2</sub>-netral karena dipandang dapat

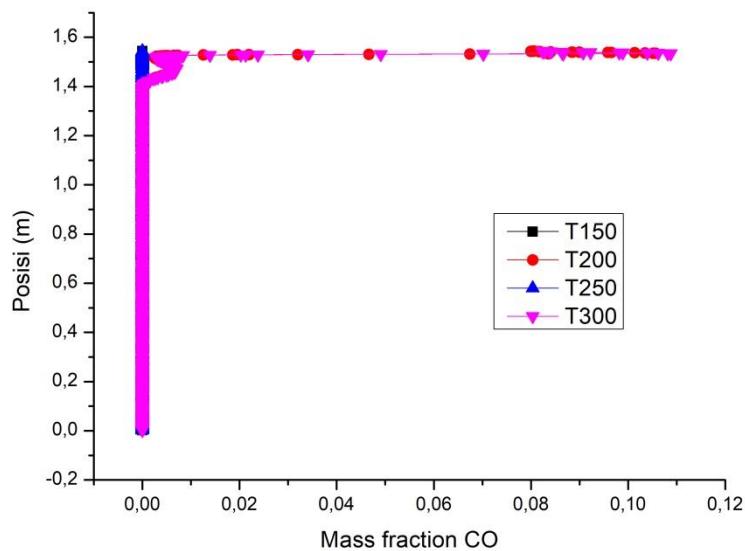
mengimbangi kesetimbangan gas rumah kaca. Namun hal ini dianggap sesuai jika hasil emisi pembakaran tidak sempurna mencapai nilai minimal.

Emisi hasil pembakaran biomassa dibagi menjadi dua jenis, yakni emisi hasil pembakaran sempurna dan emisi hasil pembakaran sebagian (tidak sempurna). Emisi hasil pembakaran sempurna adalah karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ), dan belerang oksida ( $\text{SO}_2$ ), sedangkan emisi hasil pembakaran sebagian adalah karbon monoksida (CO).

Gambar 4.10 menunjukkan distribusi emisi karbon dioksida pada DTF. Semakin tinggi suhu torefaksi TKKS akan menyebabkan semakin tingginya konsentrasi emisi karbon dioksida hasil pembakaran. Rata-rata fraksi massa karbon dioksida pada outlet DTF dengan torefaksi TKKS 150, 200, 250, dan 300 derajat celcius adalah, 0.032, 0.041, 0.033 dan 0.042. berdasarkan persamaan pembakaran, 2.1, unsur karbon akan banyak berubah menjad karbon dioksida, tingginya nilai karbon dioksida menunjukkan tingkat pembakaran sempurna lebih banyak terjadi. Selain itu unsur karbon pada batu bara yang masih lebih tinggi daripada TKKS, membuat kandungan karbon dioksida mengecil seiring dengan digantinya unsur karbon dari batubara menjadi unsur karbon yang berasal dari TKKS.

Pada DTF, posisi karbon dioksida paling besar berada disekitar *combustor*, hal ini disebabkan oleh karbon dioksida yang memiliki nilai kerapatan yang tinggi dibanding gas lain, sehingga memiliki kapasitas panas yang lebih besar dari gas lain. Fraksi karbon dioksida ini juga menandakan bahwa lebih banyak pembakaran sempurna yang terjadi di setelah *combustor*.

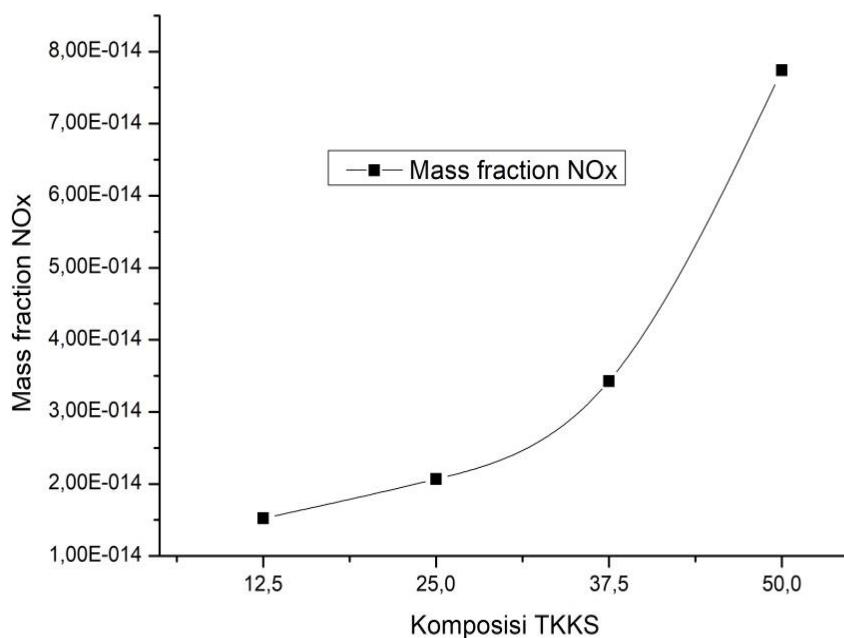
Emisi Karbon monooksida menunjukkan pembakaran yang terjadi adalah pembakaran sebagian yang meninggalkan residu. Karbon monooksida yang tidak berbau, berwarna, sangat berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan. Oleh karena itu diperlukan suatu upaya untuk mengurangi emisi karbon monooksida, salah satu caranya dengan menggunakan bahan bakar yang memiliki nilai *volatile* yang tinggi, serta luas permukaan kecil agar pembakaran sempurna lebih mudah terjadi.



Gambar 4.12 Distribusi CO pada *cofiring* dengan *torrefied* TKKS

Berdasarkan gambar grafik 9.12, hasil CO pada cofiring hampir mendekati 0, atau sedikit sekali, namun pada *cofiring* dengan TKKS yang ditorefaksi pada suhu 200 dan 300 terdapat peningkatan. Begitu pula dengan peningkatan komposisi TKKS dalam *cofiring* akan meningkatkan emisi CO. Karena unsur *volatile* pada TKKS yang tinggi beroksidasi pada suhu tinggi yang akan membentuk CO.

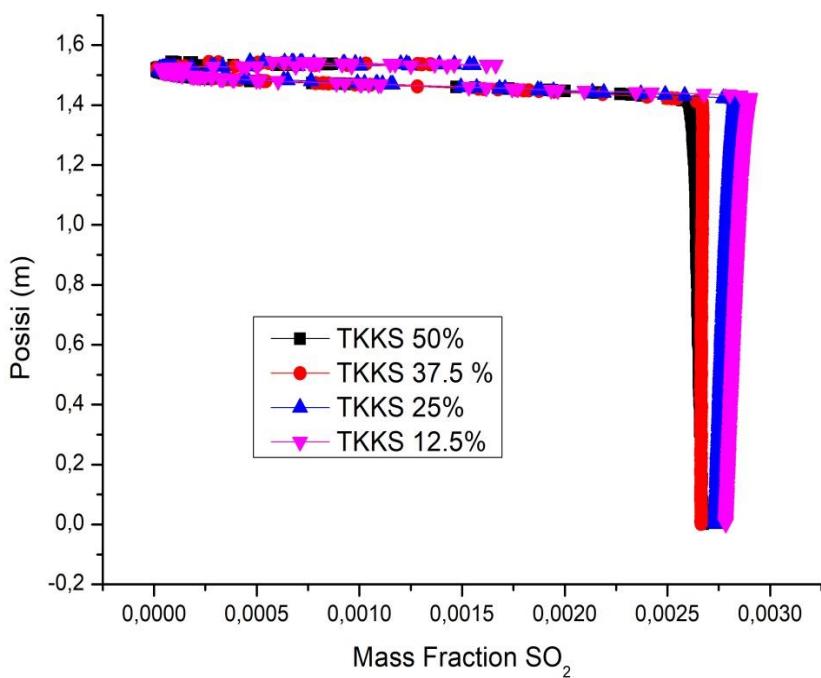
Emisi NOx juga diidentifikasi dalam studi kali ini, pembentukan emisi NO didominasi oleh pembentukan NO karena panas. Semakin tinggi temperatur pembakaran maka emisi NOx juga akan semakin meningkat. Penggunaan *torrefied* TKKS yang memiliki nilai karbon dan volatil yang tinggi akan memicu peningkatan suhu ditambah apalagi jika diimbangi oleh penambahan komposisi TKKS. Sehingga pembakaran *cofiring* dengan peningkatan komposisi TKKS akan meningkatkan emisi NOx.



Gambar 4.13 Dampak Variasi Komposisi TKKS pada pollutant NOx

Berdasarkan gambar 4.14, memperlihatkan emisi pembakaran *cofiring* dengan variasi suhu torefaksi. Nilai emisi NOx terlihat fluktuatif dengan kecenderungan naik. Nilai emisi NOx dengan variasi torefaksi mengikuti dengan kandungan unsur nitrogen yang terkadnung pada TKKS hasil torefaksi. Torefaksi pada suhu 250 derajat menghasilkan nilai unsur nitrogen yang kecil, tabel 4.2, sehingga menurunkan emisi NOx yang terjadi jika TKKS dibakar.

Emisi lainnya yang dianalisis adalah pembentukan sulfur dioksida, dimana emisi ini jika berlebihan akan menyebabkan hujan asam yang merugikan untuk lingkungan. Pada pembakaran *cofiring* dengan *torrefied* TKKS dengan variasi suhu torefaksi akan meningkatkan emisi SO<sub>2</sub> namun nilainya tidak sebesar apabila menggunakan batu bara saja sebagai bahan bakar. Emisi pembakaran batu bara saja akan menghasilkan mass fraction SO<sub>2</sub> sebesar 0.0077, nilai ini masih lebih besar daripada emisi SO<sub>2</sub> dengan torefaksi TKKS suhu 300 derajat sebesar 0.002757.

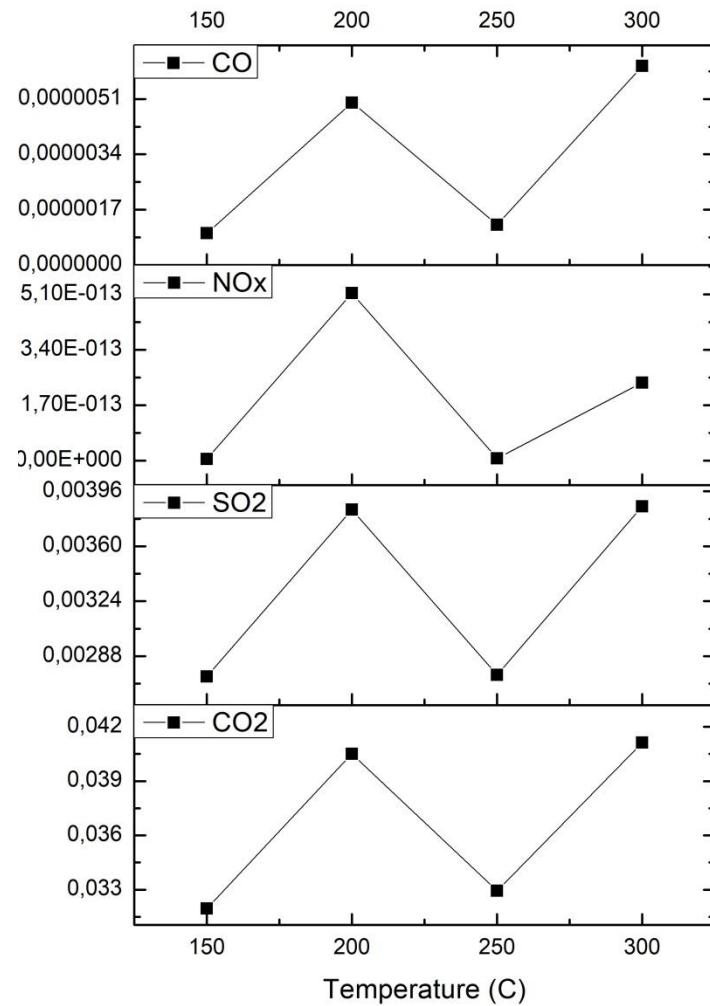


Gambar 4.14 Distribusi SO<sub>2</sub> pada DTF dengan variasi komposisi

Kandungan belerang pada *torrefied* TKKS yang meningkat seiring peningkatan suhu torefaksi menyebabkan peningkatan emisi SO<sub>2</sub> jika dilakukan *cofiring*. Berkebalikan pada *cofiring* TKKS dengan batubara dengan variasi komposisi TKKS. Semakin banyak TKKS yang digunakan, akan memperkecil hasil emisi SO<sub>2</sub>.

Secara umum emisi hasil pembakaran *cofiring* TKKS dengan batu bara lignite dengan variasi *pre-treatment* torefaksi pada TKKS dapat dilihat pada gambar 4.15. Pembakaran *cofiring* TKKS dengan variasi peningkatan suhu torefaksi pada TKKS akan meningkatkan emisi pembakaran seiring dengan meningkatnya suhu torefaksi. Hal ini disebabkan oleh karakteristik bahan bakar yang berubah akibat torefaksi. Karakteristik yang berubah dijelaskan pada subbab 4.1 hingga 4.3. pada grafik terlihat fluktuasi pada suhu 250 derajat celcius, dimana nilai emisi menurun, nilai yang menurun ini disebabkan oleh keseragaman pada pengujian sampel. Sampel TKKS pada suhu torefaksi 250 derajat celcius memiliki bentuk yang lebih seragam dibanding sampel lain. Keseragaman inilah yang akan

merubah hasil pembakaran *cofiring* pada TKKS torefaksi 250 derajat dengan batu bara. Gambar 4.15 adalah grafik yang menunjukkan hasil emisi dari pembakaran *cofiring* batu bara lignite dengan TKKS, yang dilakukan torefaksi dengan variasi suhu.



Gambar 4.15 Emisi pada Outlet DTF variasi torefaksi TKKS

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Adapun hal-hal yang bisa disimpulkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Studi *pre-treatment* biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit telah dilakukan oleh penulis. *Pre-treatment* torefaksi dilakukan pada TKKS dapat meningkatkan kualitas TKKS sebagai biomassa. Adapun pengaruh torefaksi sebagai *pre-treatment* biomassa tandan kosong kelapa sawit sebagai berikut.
  1. Torefaksi sebagai *pre-treatment* mengubah karakteristik fisik dan kimiawi dari sampel TKKS. Struktur tandan kosong yang ulet dan berserat kuat, hancur melalui pemecahan hemiselulosa dan tingkat molekul selulosa menjadi lebih rendah akibat torefaksi.
  2. Kadar air (*moisture*) dari TKKS akan menurun seiring dengan peningkatan suhu torefaksi dan penambahan waktu torefaksi. Sebaliknya pada kadar abu (*ash*) akan meningkat seiring peningkatan suhu torefaksi dan penambahan waktu torefaksi
  3. Nilai kalori TKKS meningkat seiring dengan peningkatan suhu dan waktu torefaksi. Nilai kalori dari TKKS yang dilakukan torefaksi pada suhu 300 °C dengan suhu 30 menit, memiliki nilai kalori 4834 kal/gr, nilai ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan batubara lignite (4200 kal / gr) yang digunakan dalam industri.
  4. Berdasarkan analisis ultimasi, kandungan karbon (C) meningkat secara signifikan, begitu pula dengan kandungan belerang (S). Sementara kandungan Oxygen (O) dan hidrogen (H) menurun sehingga rasio H/C dan O/C juga ikut menurun.
- b. Simulasi *cofiring* telah dilakukan dengan menggunakan TKKS yang tertorefaksi, dan variasi komposisi bahan bakar TKKS. Pembakaran *cofiring* dengan menggunakan TKKS yang sudah melalui torefaksi memiliki

fenomena pembakaran yang berbeda dibandingkan dengan *cofiring* dengan TKKS tanpa torefaksi.

1. Pada *cofiring* batu bara dengan TKKS yang dilakukan torefaksi, memiliki distribusi suhu pembakaran yang merata dengan suhu hasil pembakaran yang tinggi. Nilai ini dipengaruhi oleh peningkatan nilai kalori dan bentuk fisik TKKS yang berubah setelah dilakukan torefaksi.
2. Emisi yang dihasilkan oleh *co firing* TKKS sangat bergantung dengan kandungan unsur kimiawi hasil uji ultimasi bahan. Nilai emisi karbon karbon monooksida (CO), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan Sulfur dioksida meningkat seiring dengan bertambahnya komposisi kimia akibat torefaksi. Emisi NOx meningkat seiring dengan bertambahnya suhu hasil pembakaran, sehingga semakin besar komposisi TKKs dalam *cofiring* maka akan meningkatkan emisi NOx.
3. Variasi suhu torefaksi TKKS pada pembakaran *cofiring* akan meningkatkan hasil emisi SO. Namun kecenderungan sebaliknya terjadi pada peningkatan komposisi TKKS. Semakin sedikit komposisi TKKS akan menghasilkan emisi SO yang besar karena batubara memiliki kandungan belerang yang tinggi dibandingkan biomassa.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sjaak van Loo and Jaap Koppejan. p., Ed., *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Earthscan, 2008.
- [2] T. Nussbaumer, “Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals , Technologies , and Primary Measures for Emission Reduction †,” pp. 1510–1521, 2003.
- [3] USDA, “World Agricultural Production,” *Circ. Ser. May 2014*, pp. 1–29, 2017.
- [4] Bambang, “Statistik Perkebunan Indonesia 2015 -2017 Kelapa Sawit,” *Sawit*, p. 81, 2017.
- [5] Farkhan, “Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Untuk Komposit Dan Aplikasinya Pada Struktur Bergerak Mesin Cnc Perkayuan,” Institut Pertanian Bogor, 2016.
- [6] G. K. Parshetti, A. Quek, R. Betha, and R. Balasubramanian, “TGA-FTIR investigation of co-combustion characteristics of blends of hydrothermally carbonized oil palm biomass (EFB) and coal,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 118, pp. 228–234, 2014.
- [7] J. Koppejan, S. Sokhansanj, S. Melin, and S. Madrali, “Status overview of torrefaction technologies,” *IEA Bioenergy Task 32*, no. December, pp. 1–54, 2012.
- [8] Y. Uemura, V. Sellappah, T. H. Trinh, S. Hassan, and K. ichiro Tanoue, “Torrefaction of empty fruit bunches under biomass combustion gas atmosphere,” *Bioresour. Technol.*, vol. 243, pp. 107–117, 2017.
- [9] M. Sander and O. A. N, “ASH FROM CEREAL AND RAPE STRAW USED FOR HEAT PRODUCTION: LIMING EFFECT AND CONTENTS OF PLANT NUTRIENTS AND HEAVY METALS,” *Water,Air, Pollut.*, no. 93, pp. 93–108, 1997.

- [10] M. U. Monir, A. Abd Aziz, R. A. Kristanti, and A. Yousuf, “Co-gasification of empty fruit bunch in a downdraft reactor: A pilot scale approach,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 1, pp. 39–49, 2018.
- [11] J. J. Chew and V. Doshi, “Recent advances in biomass pretreatment - Torrefaction fundamentals and technology,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 4212–4222, 2011.
- [12] A. Demirbaş, “Relationships between lignin contents and fixed carbon contents of biomass samples,” *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 9. pp. 1481–1486, 2003.
- [13] B. N. Madanayake, S. Gan, C. Eastwick, and H. K. Ng, “Biomass as an energy source in coal co-firing and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 159, pp. 287–305, 2017.
- [14] J. Koppejan and P. Biomass, “Status overview of torrefaction technologies,” no. December, 2012.
- [15] J. H. Flagan, Richard C. Seinfeld, *Fundamentals of air pollution engineering*, vol. 1, no. 1. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [16] A. Darmawan, D. Budianto, M. Aziz, and K. Tokimatsu, “Cofiring Assessment of Hydrothermally-treated Empty Fruit Bunch and Low Rank Coal in a Drop Tube Furnace,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1545–1550, 2017.
- [17] A. Darmawan, D. Budianto, M. Aziz, and K. Tokimatsu, “Cofiring assessment of hydrothermally-treated empty fruit bunch and low rank coal in a drop tube furnace,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1545–1550, 2017.
- [18] B. Bevan, A. Ahmad, A. Johari, T. Amran, and T. Abdullah, “Torrefaction of Pelletized Oil Palm Empty Fruit Bunches,” *21st Int. Symp. Alcohol Fuels – 21st ISAF*, pp. 15–19, 2015.

## LAMPIRAN

### Data Produksi Minyak Sawit Dunia

Country/ Region	Production (million metric tons)			Change in Production	
	Prel.		2018/19 Proj.	From last year	
	2016/17	2017/18	May	MMT	Percent
<b>Oilseed, Copra</b>					
Phillipines	2.30	2.60	2.70	0.10	3.85
Indonesia	1.58	1.45	1.42	-0.03	-2.07
India	0.72	0.75	0.75	0.00	0.00
Vietnam	0.26	0.28	0.29	0.00	0.00
Mexico	0.21	0.21	0.22	0.01	4.76
Papua New Guinea	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00
Thailand	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00
Sri Lanka	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00
Solomon Islands	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00
Vanuatu/ New Hebrides	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00
World	5.51	5.73	5.83	0.10	1.75
<b>Oilseed, Palm Kernel</b>					
Indonesia	9.50	10.20	10.60	0.40	3.92
Malaysia	4.78	5.20	5.30	0.10	19.20
Thailand	0.75	0.82	0.87	0.05	6.10
Nigeria	0.73	0.73	0.73	0.00	0.00
Colombia	0.24	0.28	0.30	0.02	7.14
Papua New Guinea	0.16	0.17	0.17	0.00	0.00
Guatemala	0.15	0.15	0.15	0.00	0.00
Honduras	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00
Brazil	0.12	0.13	0.14	0.01	7.69
Ecuador	0.11	0.12	0.12	0.00	0.00
World	17.36	18.61	19.19	0.58	3.12
<b>Oil, Palm</b>					
Indonesia	36.00	38.50	40.50	2.00	5.19
Malaysia	18.86	20.50	21.00	0.50	2.44
Thailand	2.50	2.70	2.90	0.20	7.41
Colombia	1.15	1.25	1.35	0.10	8.00
Nigeria	0.97	0.97	0.97	0.00	0.00
Guatemala	0.74	0.74	0.74	0.00	0.00
Papua New Guinea	0.65	0.63	0.63	0.00	0.00
Ecuador	0.57	0.59	0.61	0.02	3.39
Honduras	0.62	0.58	0.58	0.00	0.00
Ghana	0.52	0.52	0.52	0.00	0.00
World	65.27	69.72	72.58	2.86	4.10

## Hasil Uji Proksimasi

No	Nama Contoh	Jenis Uji	Hasil	Satuan	Metode Pengujian
1	RAW	Ash Content	8.41	%,Adb	ASTM D 3174-12
		Moisture In Sample	7.85	%, Ar	ASTM D 3174-11
		Kalori	4013	Cal/gr	Bomb Kalorimeter
2	150/30	Ash Content	9.3	%,Adb	ASTM D 3174-10
		Moisture In Sample	8.78	%, Ar	ASTM D 3174-9
		Kalori	3875	Cal/gr	Bomb Kalorimeter
3	200/30	Ash Content	7.74	%,Adb	ASTM D 3174-8
		Moisture In Sample	7.38	%, Ar	ASTM D 3174-7
		Kalori	4141	Cal/gr	Bomb Kalorimeter
4	250/30	Ash Content	7.34	%,Adb	ASTM D 3174-6
		Moisture In Sample	2.4	%, Ar	ASTM D 3174-5
		Kalori	4246	Cal/gr	Bomb Kalorimeter
5	300/15	Ash Content	9.36	%,Adb	ASTM D 3174-4
		Moisture In Sample	7.16	%, Ar	ASTM D 3174-3
		Kalori	4302	Cal/gr	Bomb Kalorimeter
6	300/20	Ash Content	8.39	%,Adb	ASTM D 3174-2
		Moisture In Sample	7.32	%, Ar	ASTM D 3174-1
		Kalori	4286	Cal/gr	Bomb Kalorimeter
7	300/25	Ash Content	8.68	%,Adb	ASTM D 3174-0
		Moisture In Sample	3.88	%, Ar	ASTM D 3174-1
		Kalori	4455	Cal/gr	Bomb Kalorimeter
8	300/30	Ash Content	11.87	%,Adb	ASTM D 3174-2
		Moisture In Sample	5.35	%, Ar	ASTM D 3174-3
		Kalori	4834	Cal/gr	Bomb Kalorimeter
9	300/45	Ash Content	12.95	%,Adb	ASTM D 3174-4
		Moisture In Sample	5.12	%, Ar	ASTM D 3174-5
		Kalori	4743	Cal/gr	Bomb Kalorimeter

## Hasil Uji Ultimasi

Sampel	Parameters	Unit	A R	D B	Test Method
150/30	Total moisture	% wt	7.99	-	ASTM D 3302 - 17
	Ash content	% wt	7.27	7.9	ASTM D 3174 - 12
	Carbon	% wt	44.91	48.81	ASTM D 5373 - 16
	Hydrogen	% wt	5.14	5.59	ASTM D 5373 - 16
	Nitrogen	% wt	0.74	0.8	ASTM D 5373 - 16
	Sulfur	% wt	0.18	0.2	ASTM D 4239 - 17e2
	Oxygen	% wt	33.77	36.7	ASTM D 3176 - 15
200/30	Total moisture	% wt	6.02	-	ASTM D 3302 - 17
	Ash content	% wt	7.18	7.64	ASTM D 3174 - 12
	Carbon	% wt	47.19	50.21	ASTM D 5373 - 16
	Hydrogen	% wt	5.46	5.81	ASTM D 5373 - 16
	Nitrogen	% wt	0.59	0.62	ASTM D 5373 - 16
	Sulfur	% wt	0.16	0.17	ASTM D 4239 - 17e2
	Oxygen	% wt	33.4	35.55	ASTM D 3176 - 15
250/30	Total moisture	% wt	05-Mei	-	ASTM D 3302 - 17
	Ash content	% wt	7.6	8.01	ASTM D 3174 - 12
	Carbon	% wt	48.92	51.52	ASTM D 5373 - 16
	Hydrogen	% wt	5.56	5.85	ASTM D 5373 - 16
	Nitrogen	% wt	0.59	0.62	ASTM D 5373 - 16
	Sulfur	% wt	0.2	0.21	ASTM D 4239 - 17e2
	Oxygen	% wt	32.08	33.79	ASTM D 3176 - 15
300/30	Total moisture	% wt	6.56	-	ASTM D 3302 - 17
	Ash content	% wt	7.33	7.85	ASTM D 3174 - 12
	Carbon	% wt	48.92	52.35	ASTM D 5373 - 16
	Hydrogen	% wt	5.36	5.73	ASTM D 5373 - 16
	Nitrogen	% wt	0.64	0.68	ASTM D 5373 - 16
	Sulfur	% wt	0.18	0.2	ASTM D 4239 - 17e2
	Oxygen	% wt	31.01	33.19	ASTM D 3176 - 15
300/45	Total moisture	% wt	3.77	-	ASTM D 3302 - 17
	Ash content	% wt	9.58	9.96	ASTM D 3174 - 12
	Carbon	% wt	50.28	52.25	ASTM D 5373 - 16
	Hydrogen	% wt	5.19	5.4	ASTM D 5373 - 16
	Nitrogen	% wt	0.81	0.84	ASTM D 5373 - 16
	Sulfur	% wt	0.15	0.16	ASTM D 4239 - 17e2
	Oxygen	% wt	30.22	31.39	ASTM D 3176 - 15

## Distribusi Suhu

150		200		250		300	
x	y	x	y	x	y	x	y
8.13E-06	1502.66	1.08E-05	1573.31	0.00042	1.54E+03	9.78E-06	1541.68
9.46E-06	1502.76	1.19E-05	1573.38	0.00042	1.54E+03	9.87E-06	1541.69
1.19E-05	1502.93	1.23E-05	1573.28	0.00042	1.54E+03	1.16E-05	1541.54
1.22E-05	1502.9	1.72E-05	1573.61	0.00042	1.54E+03	1.20E-05	1541.58
1.61E-05	1503.07	2.46E-05	1573.74	0.00043	1.54E+03	1.91E-05	1541.7
2.46E-05	1503.18	2.55E-05	1573.74	0.00043	1.54E+03	2.47E-05	1541.52
2.54E-05	1503.2	2.55E-05	1573.74	0.00043	1.54E+03	2.57E-05	1541.66
2.55E-05	1503.2	2.55E-05	1573.74	0.00043	1.54E+03	2.59E-05	1541.68
2.62E-05	1503.3	2.66E-05	1573.94	0.00043	1.54E+03	2.62E-05	1541.73
2.67E-05	1503.36	2.69E-05	1573.93	0.00044	1.54E+03	2.80E-05	1541.97
2.68E-05	1503.36	3.05E-05	1574.03	0.00044	1.54E+03	2.82E-05	1541.99
2.86E-05	1503.41	3.65E-05	1574.09	0.00044	1.54E+03	3.60E-05	1542.06
3.65E-05	1503.56	3.73E-05	1574.2	0.00044	1.54E+03	4.24E-05	1542.97
3.76E-05	1503.65	4.45E-05	1574.41	0.00045	1.54E+03	4.56E-05	1543.06
4.46E-05	1503.85	4.54E-05	1574.4	0.00045	1.54E+03	4.66E-05	1543.02
4.54E-05	1503.84	4.72E-05	1574.36	0.00045	1.54E+03	4.74E-05	1542.99
4.72E-05	1503.82	4.83E-05	1574.46	0.00045	1.54E+03	4.85E-05	1543.13
4.82E-05	1503.88	5.02E-05	1574.65	0.00045	1.54E+03	4.93E-05	1543.23
5.02E-05	1504.01	5.33E-05	1574.86	0.00046	1.54E+03	5.06E-05	1543.33
5.32E-05	1504.15	6.02E-05	1574.71	0.00046	1.54E+03	5.62E-05	1543.14
6.03E-05	1504.03	6.78E-05	1575.17	0.00047	1.54E+03	6.00E-05	1542.73
6.79E-05	1504.43	7.01E-05	1575.31	0.00047	1.54E+03	6.06E-05	1542.7
7.01E-05	1504.54	7.25E-05	1575.2	0.00047	1.54E+03	6.08E-05	1542.69
7.24E-05	1504.52	7.29E-05	1575.18	0.00047	1.54E+03	7.04E-05	1543.62
7.30E-05	1504.51	7.57E-05	1575.78	0.00048	1.54E+03	7.16E-05	1543.68
7.57E-05	1504.95	7.61E-05	1575.76	0.00048	1.54E+03	7.38E-05	1543.53
7.61E-05	1504.94	7.62E-05	1575.74	0.00048	1.54E+03	7.45E-05	1543.7
7.64E-05	1504.94	8.79E-05	1576.38	0.00048	1.54E+03	7.66E-05	1543.48
8.78E-05	1505.39	8.80E-05	1576.4	0.00049	1.54E+03	7.78E-05	1543.35
8.80E-05	1505.41	8.94E-05	1576.57	0.00049	1.54E+03	8.62E-05	1543.94
9.05E-05	1505.57	9.27E-05	1576.87	0.00049	1.54E+03	8.89E-05	1544.45
9.27E-05	1505.67	9.33E-05	1576.91	0.0005	1.54E+03	9.17E-05	1544.87
9.32E-05	1505.69	9.95E-05	1576.73	0.0005	1.54E+03	9.43E-05	1545.41
9.95E-05	1505.6	0.00011	1577.02	0.0005	1.54E+03	9.45E-05	1545.4
0.00011	1505.91	0.00011	1577.02	0.00051	1.54E+03	9.97E-05	1545.15
0.00011	1505.91	0.00011	1576.98	0.00051	1.54E+03	0.0001	1545.39
0.00011	1505.89	0.00011	1577.28	0.00051	1.54E+03	0.0001	1545.37

0.00011	1506.18	0.00011	1577.31	0.00052	1.54E+03	0.00011	1545.15
0.00011	1506.22	0.00011	1577.31	0.00052	1.54E+03	0.00011	1545.5
0.00011	1506.23	0.00011	1577.35	0.00052	1.54E+03	0.00011	1545.63
0.00011	1506.25	0.00012	1576.71	0.00052	1.54E+03	0.00011	1545.57
0.00012	1505.85	0.00012	1576.71	0.00052	1.54E+03	0.00012	1544.76
0.00012	1505.85	0.00012	1577.2	0.00052	1.54E+03	0.00012	1544.76
0.00012	1506.29	0.00012	1577.34	0.00053	1.54E+03	0.00012	1545.27
0.00012	1506.43	0.00013	1577.63	0.00053	1.54E+03	0.00012	1545.68
0.00013	1506.74	0.00013	1577.64	0.00053	1.54E+03	0.00013	1545.93
0.00013	1506.75	0.00013	1578.22	0.00054	1.54E+03	0.00013	1545.76
0.00013	1507.07	0.00014	1578.26	0.00054	1.54E+03	0.00013	1545.88
0.00014	1507.14	0.00014	1578.27	0.00054	1.54E+03	0.00014	1547.36
0.00014	1507.15	0.00014	1578.39	0.00055	1.54E+03	0.00014	1547.38
0.00014	1507.26	0.00014	1578.44	0.00055	1.54E+03	0.00014	1547.38
0.00014	1507.31	0.00015	1578.58	0.00056	1.54E+03	0.00014	1547.38
0.00015	1507.43	0.00015	1578.45	0.00056	1.54E+03	0.00014	1547.39
0.00015	1507.36	0.00015	1578.52	0.00056	1.54E+03	0.00014	1547.38
0.00015	1507.41	0.00015	1578.58	0.00056	1.54E+03	0.00014	1547.37
0.00015	1507.45	0.00015	1578.77	0.00057	1.54E+03	0.00014	1547.47
0.00015	1507.59	0.00016	1579.07	0.00057	1.54E+03	0.00014	1547.55
0.00016	1507.82	0.00016	1579.15	0.00057	1.54E+03	0.00015	1547.65
0.00016	1507.88	0.00016	1578.67	0.00058	1.54E+03	0.00015	1547.59
0.00016	1507.61	0.00017	1579.51	0.00058	1.54E+03	0.00015	1547.63
0.00017	1508.25	0.00017	1579.57	0.00058	1.54E+03	0.00015	1547.71
0.00017	1508.33	0.00017	1579.59	0.00059	1.54E+03	0.00015	1547.75
0.00017	1508.35	0.00017	1579.76	0.00059	1.54E+03	0.00015	1547.84
0.00018	1508.51	0.00018	1579.87	0.00059	1.54E+03	0.00016	1548.02
0.00018	1508.56	0.00018	1579.98	0.00059	1.54E+03	0.00016	1546.79
0.00018	1508.64	0.00018	1580.01	0.00059	1.54E+03	0.00017	1548.47
0.00018	1508.72	0.00019	1580.03	0.0006	1.54E+03	0.00017	1548.58
0.00019	1508.77	0.00019	1580.13	0.0006	1.54E+03	0.00017	1548.92
0.00019	1508.87	0.00019	1580.33	0.00061	1.54E+03	0.00018	1549.02
0.00019	1508.98	0.00019	1580.34	0.00061	1.54E+03	0.00018	1549.03
0.00019	1508.99	0.00019	1580.38	0.00061	1.54E+03	0.00018	1549.17
0.00019	1509.04	0.0002	1580.49	0.00061	1.54E+03	0.00018	1549.18
0.0002	1509.22	0.0002	1580.49	0.00061	1.54E+03	0.00019	1549.2
0.0002	1509.23	0.0002	1580.58	0.00061	1.54E+03	0.00019	1549.24
0.0002	1509.41	0.0002	1580.58	0.00062	1.54E+03	0.00019	1549.35
0.0002	1509.42	0.0002	1580.62	0.00062	1.54E+03	0.00019	1549.44
0.0002	1509.44	0.00021	1580.66	0.00062	1.54E+03	0.0002	1549.75
0.00021	1509.43	0.00021	1580.49	0.00063	1.55E+03	0.0002	1549.79

0.00021	1509.27	0.00021	1580.47	0.00063	1.55E+03	0.0002	1549.79
0.00021	1509.26	0.00022	1580.72	0.00063	1.55E+03	0.0002	1549.82
0.00022	1509.47	0.00022	1580.87	0.00064	1.55E+03	0.0002	1549.41
0.00022	1509.59	0.00022	1580.95	0.00064	1.55E+03	0.0002	1549.81
0.00022	1509.67	0.00023	1581.7	0.00064	1.55E+03	0.00021	1549.83
0.00023	1510.21	0.00023	1581.79	0.00064	1.55E+03	0.00021	1549.7
0.00023	1510.26	0.00023	1581.88	0.00064	1.55E+03	0.00021	1549.29
0.00023	1510.53	0.00023	1581.89	0.00064	1.55E+03	0.00022	1549.51
0.00023	1510.53	0.00023	1581.91	0.00065	1.55E+03	0.00022	1549.72
0.00023	1510.54	0.00024	1582.15	0.00065	1.55E+03	0.00022	1549.58
0.00024	1510.69	0.00024	1582.32	0.00065	1.55E+03	0.00022	1549.69
0.00024	1510.89	0.00025	1582.4	0.00066	1.55E+03	0.00022	1549.74
0.00025	1510.97	0.00025	1582.45	0.00066	1.55E+03	0.00023	1550.61
0.00025	1511.02	0.00026	1582.49	0.00066	1.55E+03	0.00023	1550.66
0.00026	1511.08	0.00026	1582.51	0.00066	1.55E+03	0.00024	1550.88
0.00026	1511.12	0.00026	1582.57	0.00066	1.55E+03	0.00024	1551.46
0.00026	1511.24	0.00026	1582.82	0.00067	1.55E+03	0.00024	1551.46
0.00026	1511.45	0.00027	1583.28	0.00067	1.55E+03	0.00025	1551.86
0.00027	1511.82	0.00027	1583.29	0.00067	1.55E+03	0.00025	1551.88
0.00027	1511.84	0.00027	1583.29	0.00067	1.55E+03	0.00025	1551.88
0.00027	1511.84	0.00027	1583.33	0.00068	1.55E+03	0.00026	1551.9
0.00027	1511.89	0.00028	1583.42	0.00068	1.55E+03	0.00026	1551.92
0.00028	1511.98	0.00028	1583.47	0.00069	1.55E+03	0.00026	1551.94
0.00028	1512.01	0.00028	1583.62	0.00069	1.55E+03	0.00026	1551.96
0.00028	1512.15	0.00029	1583.07	0.00069	1.55E+03	0.00026	1552.34
0.00029	1511.83	0.00029	1584.11	0.00069	1.55E+03	0.00027	1553
0.00029	1512.62	0.0003	1584.17	0.00069	1.55E+03	0.00027	1553.01
0.0003	1512.69	0.0003	1584.24	0.00069	1.55E+03	0.00028	1553.07
0.0003	1512.73	0.0003	1584.35	0.0007	1.55E+03	0.00028	1553.06
0.0003	1512.8	0.0003	1584.17	0.0007	1.55E+03	0.00028	1553.14
0.0003	1512.73	0.00031	1584.36	0.00071	1.55E+03	0.00028	1553.21
0.00031	1512.88	0.00031	1584.49	0.00071	1.55E+03	0.00028	1553.23
0.00031	1512.97	0.00031	1585.01	0.00071	1.55E+03	0.00029	1552.07
0.00031	1513.26	0.00031	1584.97	0.00071	1.55E+03	0.0003	1553.98
0.00031	1513.25	0.00032	1585.18	0.00071	1.55E+03	0.0003	1553.98
0.00032	1513.39	0.00032	1585.18	0.00071	1.55E+03	0.0003	1553.99
0.00032	1513.4	0.00032	1585.19	0.00071	1.55E+03	0.0003	1554.2
0.00032	1513.45	0.00033	1585.46	0.00072	1.55E+03	0.0003	1553.79
0.00033	1513.83	0.00033	1585.49	0.00072	1.55E+03	0.00031	1553.89
0.00033	1513.86	0.00033	1585.73	0.00073	1.55E+03	0.00031	1553.97
0.00033	1514.05	0.00033	1585.8	0.00073	1.55E+03	0.00031	1554.92

0.00033	1514.11	0.00034	1586.09	0.00073	1.55E+03	0.00031	1554.84
0.00034	1514.4	0.00034	1586.04	0.00073	1.55E+03	0.00032	1555.09
0.00034	1514.39	0.00034	1585.99	0.00073	1.55E+03	0.00033	1555.43
0.00034	1514.37	0.00034	1586.01	0.00073	1.55E+03	0.00033	1555.5
0.00034	1514.38	0.00035	1586.05	0.00073	1.55E+03	0.00033	1555.5
0.00035	1514.41	0.00035	1586.05	0.00074	1.55E+03	0.00033	1555.81
0.00035	1514.42	0.00035	1586.27	0.00074	1.55E+03	0.00033	1555.84
0.00035	1514.66	0.00036	1586.24	0.00074	1.55E+03	0.00034	1555.94
0.00036	1514.63	0.00036	1586.44	0.00074	1.55E+03	0.00034	1555.69
0.00036	1514.78	0.00036	1586.67	0.00075	1.55E+03	0.00034	1555.4
0.00036	1514.95	0.00036	1586.86	0.00075	1.55E+03	0.00034	1555.47
0.00036	1515.16	0.00036	1586.93	0.00075	1.55E+03	0.00035	1555.49
0.00036	1515.24	0.00037	1587.03	0.00075	1.55E+03	0.00035	1555.5
0.00037	1515.34	0.00037	1587.14	0.00076	1.55E+03	0.00035	1555.68
0.00037	1515.47	0.00037	1587.2	0.00076	1.55E+03	0.00036	1555.56
0.00037	1515.52	0.00038	1587.03	0.00076	1.55E+03	0.00036	1556.18
0.00038	1515.44	0.00038	1586.98	0.00076	1.55E+03	0.00036	1556.87
0.00038	1515.47	0.00039	1587.59	0.00077	1.55E+03	0.00036	1557
0.00039	1515.94	0.00039	1587.55	0.00077	1.55E+03	0.00037	1557.11
0.00039	1515.96	0.00039	1587.75	0.00078	1.55E+03	0.00037	1557.15
0.00039	1516.09	0.0004	1587.73	0.00078	1.55E+03	0.00037	1557.19
0.0004	1516.08	0.0004	1587.71	0.00079	1.55E+03	0.00037	1557.28
0.0004	1516.08	0.0004	1587.91	0.00079	1.55E+03	0.00038	1556.81
0.0004	1516.22	0.0004	1588.32	0.00079	1.55E+03	0.00038	1556.77
0.0004	1516.54	0.00041	1588.54	0.0008	1.55E+03	0.00039	1557.69
0.00041	1516.73	0.00041	1589.1	0.0008	1.55E+03	0.00039	1557.65
0.00041	1516.95	0.00042	1589.15	0.00081	1.55E+03	0.00039	1557.77
0.00042	1516.98	0.00042	1589.12	0.00081	1.55E+03	0.0004	1557.73
0.00042	1516.94	0.00042	1589.03	0.00081	1.55E+03	0.0004	1557.71
0.00042	1516.9	0.00042	1589.13	0.00082	1.55E+03	0.0004	1557.99
0.00042	1516.96	0.00042	1589.26	0.00082	1.55E+03	0.0004	1558.36
0.00042	1517.09	0.00042	1589.26	0.00082	1.55E+03	0.00041	1558.7
0.00042	1517.12	0.00043	1589.22	0.00082	1.55E+03	0.00041	1559.19
0.00043	1517.28	0.00043	1589.4	0.00083	1.55E+03	0.00041	1559.15
0.00043	1517.43	0.00043	1589.4	0.00083	1.55E+03	0.00042	1559.2
0.00043	1517.44	0.00043	1589.4	0.00083	1.55E+03	0.00042	1559.06
0.00043	1517.45	0.00043	1589.53	0.00084	1.55E+03	0.00042	1559.6
0.00043	1517.51	0.00044	1589.89	0.00084	1.55E+03	0.00042	1559.63
0.00044	1517.87	0.00044	1589.92	0.00084	1.55E+03	0.00042	1559.64
0.00044	1517.89	0.00045	1590.48	0.00085	1.55E+03	0.00042	1559.59
0.00045	1518.18	0.00045	1590.49	0.00085	1.55E+03	0.00043	1559.52

0.00045	1518.2	0.00045	1590.44	0.00085	1.55E+03	0.00043	1559.63
0.00045	1518.23	0.00045	1590.48	0.00085	1.55E+03	0.00043	1559.62
0.00046	1518.32	0.00046	1590.6	0.00086	1.56E+03	0.00043	1559.58
0.00046	1518.51	0.00046	1590.92	0.00087	1.56E+03	0.00044	1560.12
0.00046	1518.74	0.00047	1590.98	0.00087	1.56E+03	0.00044	1560.35
0.00047	1518.85	0.00047	1590.99	0.00087	1.56E+03	0.00044	1560.38
0.00047	1518.86	0.00047	1591.27	0.00087	1.56E+03	0.00045	1560.78
0.00047	1519.12	0.00047	1591.3	0.00087	1.56E+03	0.00045	1560.88
0.00047	1519.13	0.00047	1591.35	0.00087	1.56E+03	0.00045	1560.91
0.00047	1519.18	0.00048	1590.96	0.00088	1.56E+03	0.00045	1560.83
0.00048	1518.91	0.00049	1591.49	0.00088	1.56E+03	0.00045	1560.78
0.00048	1519.26	0.00049	1591.77	0.00088	1.56E+03	0.00045	1560.84
0.00049	1519.56	0.00049	1591.81	0.00089	1.56E+03	0.00046	1560.9
0.00049	1519.6	0.00049	1591.82	0.00089	1.56E+03	0.00046	1560.95
0.00049	1519.63	0.00049	1591.83	0.0009	1.56E+03	0.00046	1561.25
0.00049	1519.71	0.0005	1591.98	0.0009	1.56E+03	0.00047	1561.45
0.0005	1519.83	0.0005	1592.01	0.0009	1.56E+03	0.00047	1561.61
0.0005	1519.91	0.0005	1592.02	0.0009	1.56E+03	0.00047	1561.94
0.0005	1519.92	0.0005	1592.16	0.00136	1.59E+03	0.00047	1561.97
0.0005	1520.07	0.00051	1592.3	0.00136	1.59E+03	0.00048	1562.03
0.00051	1520.22	0.00051	1592.72	0.00135	1.58E+03	0.00048	1561.63
0.00051	1520.53	0.00052	1592.87	0.00135	1.58E+03	0.00049	1562.47
0.00052	1520.66	0.00052	1592.94	0.00135	1.58E+03	0.00049	1562.47
0.00052	1520.71	0.00052	1593.04	0.00135	1.58E+03	0.00049	1562.42
0.00052	1520.78	0.00052	1593.18	0.00134	1.58E+03	0.00049	1562.5
0.00052	1520.92	0.00053	1593.3	0.00134	1.58E+03	0.00049	1562.47
0.00053	1521.03	0.00053	1593.07	0.00134	1.58E+03	0.0005	1562.57
0.00053	1520.97	0.00053	1593.1	0.00134	1.58E+03	0.0005	1562.61
0.00053	1521.03	0.00053	1593.11	0.00134	1.58E+03	0.0005	1562.68
0.00053	1521.04	0.00054	1593.67	0.00133	1.58E+03	0.00051	1562.8
0.00054	1521.44	0.00054	1593.69	0.00133	1.58E+03	0.00051	1562.89
0.00054	1521.45	0.00054	1593.17	0.00133	1.58E+03	0.00052	1563.59
0.00054	1521.09	0.00055	1593.62	0.00133	1.58E+03	0.00052	1563.64
0.00055	1521.54	0.00055	1593.64	0.00132	1.58E+03	0.00052	1563.67
0.00055	1521.58	0.00055	1594.09	0.00132	1.58E+03	0.00052	1563.88
0.00055	1521.93	0.00056	1594.36	0.00132	1.58E+03	0.00052	1564
0.00056	1522.15	0.00056	1594.46	0.00131	1.58E+03	0.00053	1564.18
0.00056	1522.25	0.00056	1594.51	0.00131	1.58E+03	0.00053	1563.77
0.00056	1522.33	0.00056	1594.53	0.00131	1.58E+03	0.00053	1563.78
0.00056	1522.36	0.00057	1594.44	0.0013	1.58E+03	0.00053	1563.78
0.00057	1522.32	0.00057	1594.74	0.0013	1.58E+03	0.00054	1564.55

0.00057	1522.54	0.00058	1595.29	0.0013	1.58E+03	0.00054	1564.56
0.00058	1522.95	0.00058	1595.32	0.0013	1.58E+03	0.00054	1564.56
0.00058	1522.99	0.00058	1595.34	0.00129	1.58E+03	0.00054	1563.73
0.00058	1523.04	0.00059	1595.57	0.00129	1.58E+03	0.00055	1564.11
0.00059	1523.34	0.00059	1595.61	0.00129	1.58E+03	0.00055	1564.14
0.00059	1523.39	0.00059	1595.65	0.00129	1.58E+03	0.00056	1564.87
0.00059	1523.43	0.0006	1595.81	0.00129	1.58E+03	0.00056	1565.31
0.0006	1523.53	0.0006	1595.87	0.00128	1.58E+03	0.00056	1565.34
0.0006	1523.56	0.0006	1596.05	0.00128	1.58E+03	0.00056	1565.35
0.0006	1523.72	0.00061	1596.25	0.00128	1.58E+03	0.00056	1565.36
0.00061	1523.87	0.00061	1596.39	0.00128	1.58E+03	0.00057	1565.2
0.00061	1524.01	0.00061	1596.63	0.00127	1.58E+03	0.00057	1565.64
0.00061	1524.22	0.00062	1596.78	0.00127	1.58E+03	0.00058	1566.2
0.00062	1524.36	0.00062	1596.73	0.00127	1.58E+03	0.00058	1566.13
0.00062	1524.31	0.00062	1597.03	0.00126	1.58E+03	0.00058	1566.13
0.00062	1524.64	0.00062	1597.07	0.00126	1.58E+03	0.00058	1566.15
0.00062	1524.66	0.00062	1597.16	0.00126	1.58E+03	0.00058	1566.36
0.00062	1524.71	0.00063	1597.41	0.00126	1.58E+03	0.00059	1566.6
0.00063	1524.93	0.00064	1597.75	0.00126	1.58E+03	0.00059	1566.64
0.00064	1525.03	0.00064	1597.78	0.00126	1.58E+03	0.00059	1566.67
0.00064	1525.1	0.00064	1597.82	0.00125	1.58E+03	0.0006	1566.78
0.00064	1525.17	0.00064	1597.85	0.00125	1.58E+03	0.0006	1566.86
0.00064	1525.2	0.00064	1597.85	0.00124	1.58E+03	0.0006	1567.04
0.00064	1525.2	0.00064	1597.94	0.00124	1.58E+03	0.00061	1567.32
0.00064	1525.24	0.00065	1598.13	0.00124	1.57E+03	0.00061	1567.39
0.00065	1525.4	0.00065	1598.29	0.00123	1.57E+03	0.00061	1567.71
0.00065	1525.55	0.00065	1598.31	0.00123	1.57E+03	0.00061	1567.82
0.00065	1525.57	0.00066	1598.43	0.00123	1.57E+03	0.00062	1567.66
0.00066	1525.74	0.00066	1598.7	0.00123	1.57E+03	0.00062	1567.98
0.00066	1525.95	0.00066	1598.73	0.00122	1.57E+03	0.00062	1568.13
0.00066	1525.97	0.00067	1599.03	0.00122	1.57E+03	0.00063	1568.45
0.00067	1526.23	0.00067	1599.03	0.00122	1.57E+03	0.00063	1568.58
0.00067	1526.25	0.00067	1599.02	0.00122	1.57E+03	0.00064	1569.09
0.00067	1526.26	0.00067	1599.06	0.00121	1.57E+03	0.00064	1569.1
0.00067	1526.27	0.00067	1599.22	0.00121	1.57E+03	0.00064	1569.14
0.00067	1526.55	0.00068	1599.3	0.0012	1.57E+03	0.00064	1569.11
0.00068	1526.68	0.00068	1599.24	0.0012	1.57E+03	0.00064	1569.18
0.00068	1526.71	0.00068	1599.19	0.0012	1.57E+03	0.00064	1569.26
0.00068	1526.69	0.00068	1599.56	0.0012	1.57E+03	0.00065	1569.51
0.00068	1526.96	0.00069	1599.66	0.0012	1.57E+03	0.00065	1569.71
0.00069	1527.08	0.00069	1599.92	0.00119	1.57E+03	0.00065	1569.72

## Mass Fraction CO

150		200		250		300	
x	y	x	y	x	y	x	y
8.13E-06	1.23E-06	1.08E-05	8.06E-06	4.21E-04	1.94E-06	9.78E-06	7.08E-06
9.46E-06	1.24E-06	1.19E-05	8.07E-06	4.19E-04	1.93E-06	9.87E-06	7.08E-06
1.19E-05	1.24E-06	1.23E-05	8.05E-06	4.17E-04	1.93E-06	1.16E-05	7.07E-06
1.22E-05	1.24E-06	1.72E-05	8.10E-06	4.17E-04	1.93E-06	1.20E-05	7.07E-06
1.61E-05	1.24E-06	2.46E-05	8.12E-06	4.25E-04	1.94E-06	1.91E-05	7.08E-06
2.46E-05	1.24E-06	2.55E-05	8.12E-06	4.25E-04	1.94E-06	2.47E-05	7.07E-06
2.54E-05	1.24E-06	2.55E-05	8.12E-06	4.25E-04	1.94E-06	2.57E-05	7.08E-06
2.55E-05	1.24E-06	2.55E-05	8.12E-06	4.25E-04	1.94E-06	2.59E-05	7.09E-06
2.62E-05	1.24E-06	2.66E-05	8.15E-06	4.28E-04	1.94E-06	2.62E-05	7.09E-06
2.67E-05	1.24E-06	2.69E-05	8.15E-06	4.36E-04	1.95E-06	2.80E-05	7.11E-06
2.68E-05	1.24E-06	3.05E-05	8.17E-06	4.40E-04	1.96E-06	2.82E-05	7.11E-06
2.86E-05	1.25E-06	3.65E-05	8.18E-06	4.40E-04	1.96E-06	3.60E-05	7.13E-06
3.65E-05	1.25E-06	3.73E-05	8.20E-06	4.40E-04	1.96E-06	4.24E-05	7.22E-06
3.76E-05	1.25E-06	4.45E-05	8.24E-06	4.47E-04	1.96E-06	4.56E-05	7.23E-06
4.46E-05	1.25E-06	4.54E-05	8.23E-06	4.50E-04	1.96E-06	4.66E-05	7.22E-06
4.54E-05	1.25E-06	4.72E-05	8.22E-06	4.51E-04	1.96E-06	4.74E-05	7.22E-06
4.72E-05	1.25E-06	4.83E-05	8.24E-06	4.53E-04	1.96E-06	4.85E-05	7.24E-06
4.82E-05	1.25E-06	5.02E-05	8.27E-06	4.55E-04	1.96E-06	4.93E-05	7.25E-06
5.02E-05	1.25E-06	5.33E-05	8.31E-06	4.61E-04	1.97E-06	5.06E-05	7.26E-06
5.32E-05	1.26E-06	6.02E-05	8.28E-06	4.61E-04	1.97E-06	5.62E-05	7.24E-06
6.03E-05	1.25E-06	6.78E-05	8.36E-06	4.65E-04	1.97E-06	6.00E-05	7.20E-06
6.79E-05	1.26E-06	7.01E-05	8.38E-06	4.69E-04	1.98E-06	6.06E-05	7.20E-06
7.01E-05	1.26E-06	7.25E-05	8.36E-06	4.74E-04	1.99E-06	6.08E-05	7.19E-06
7.24E-05	1.26E-06	7.29E-05	8.36E-06	4.75E-04	1.99E-06	7.04E-05	7.29E-06
7.30E-05	1.26E-06	7.57E-05	8.46E-06	4.76E-04	1.99E-06	7.16E-05	7.30E-06
7.57E-05	1.27E-06	7.61E-05	8.45E-06	4.79E-04	1.98E-06	7.38E-05	7.28E-06
7.61E-05	1.27E-06	7.62E-05	8.45E-06	4.83E-04	1.99E-06	7.45E-05	7.30E-06
7.64E-05	1.27E-06	8.79E-05	8.57E-06	4.84E-04	1.99E-06	7.66E-05	7.28E-06
8.78E-05	1.28E-06	8.80E-05	8.57E-06	4.87E-04	1.99E-06	7.78E-05	7.27E-06
8.80E-05	1.28E-06	8.94E-05	8.60E-06	4.90E-04	2.00E-06	8.62E-05	7.33E-06
9.05E-05	1.28E-06	9.27E-05	8.66E-06	4.92E-04	2.00E-06	8.89E-05	7.38E-06
9.27E-05	1.28E-06	9.33E-05	8.66E-06	4.95E-04	2.00E-06	9.17E-05	7.42E-06
9.32E-05	1.28E-06	9.95E-05	8.62E-06	5.01E-04	2.00E-06	9.43E-05	7.48E-06
9.95E-05	1.28E-06	0.00011	8.67E-06	5.05E-04	2.01E-06	9.45E-05	7.48E-06
0.00011	1.28E-06	0.00011	8.67E-06	5.06E-04	2.01E-06	9.97E-05	7.45E-06
0.00011	1.28E-06	0.00011	8.66E-06	5.06E-04	2.01E-06	0.0001	7.48E-06
0.00011	1.28E-06	0.00011	8.72E-06	5.11E-04	2.01E-06	0.0001	7.48E-06

0.00011	1.29E-06	0.00011	8.72E-06	5.16E-04	2.01E-06	0.00011	7.46E-06
0.00011	1.29E-06	0.00011	8.72E-06	5.16E-04	2.01E-06	0.00011	7.50E-06
0.00011	1.29E-06	0.00011	8.73E-06	5.17E-04	2.02E-06	0.00011	7.51E-06
0.00011	1.29E-06	0.00012	8.60E-06	5.18E-04	2.02E-06	0.00011	7.50E-06
0.00012	1.28E-06	0.00012	8.60E-06	5.21E-04	2.02E-06	0.00012	7.42E-06
0.00012	1.28E-06	0.00012	8.69E-06	5.22E-04	2.02E-06	0.00012	7.42E-06
0.00012	1.29E-06	0.00012	8.72E-06	5.27E-04	2.03E-06	0.00012	7.47E-06
0.00012	1.29E-06	0.00013	8.77E-06	5.29E-04	2.02E-06	0.00012	7.52E-06
0.00013	1.30E-06	0.00013	8.77E-06	5.31E-04	2.02E-06	0.00013	7.55E-06
0.00013	1.30E-06	0.00013	8.88E-06	5.36E-04	2.03E-06	0.00013	7.53E-06
0.00013	1.30E-06	0.00014	8.89E-06	5.41E-04	2.03E-06	0.00013	7.54E-06
0.00014	1.30E-06	0.00014	8.89E-06	5.44E-04	2.02E-06	0.00014	7.69E-06
0.00014	1.30E-06	0.00014	8.91E-06	5.45E-04	2.03E-06	0.00014	7.69E-06
0.00014	1.31E-06	0.00014	8.91E-06	5.48E-04	2.03E-06	0.00014	7.69E-06
0.00014	1.31E-06	0.00015	8.93E-06	5.57E-04	2.04E-06	0.00014	7.69E-06
0.00015	1.31E-06	0.00015	8.91E-06	5.60E-04	2.05E-06	0.00014	7.69E-06
0.00015	1.31E-06	0.00015	8.92E-06	5.61E-04	2.05E-06	0.00014	7.69E-06
0.00015	1.31E-06	0.00015	8.93E-06	5.61E-04	2.05E-06	0.00014	7.69E-06
0.00015	1.31E-06	0.00015	8.96E-06	5.65E-04	2.05E-06	0.00014	7.70E-06
0.00015	1.31E-06	0.00016	9.01E-06	5.68E-04	2.06E-06	0.00014	7.71E-06
0.00016	1.31E-06	0.00016	9.02E-06	5.75E-04	2.07E-06	0.00015	7.73E-06
0.00016	1.31E-06	0.00016	8.92E-06	5.80E-04	2.06E-06	0.00015	7.72E-06
0.00016	1.31E-06	0.00017	9.08E-06	5.80E-04	2.06E-06	0.00015	7.72E-06
0.00017	1.32E-06	0.00017	9.09E-06	5.81E-04	2.06E-06	0.00015	7.73E-06
0.00017	1.32E-06	0.00017	9.10E-06	5.85E-04	2.07E-06	0.00015	7.74E-06
0.00017	1.32E-06	0.00017	9.13E-06	5.91E-04	2.08E-06	0.00015	7.75E-06
0.00018	1.32E-06	0.00018	9.14E-06	5.93E-04	2.08E-06	0.00016	7.77E-06
0.00018	1.32E-06	0.00018	9.16E-06	5.94E-04	2.08E-06	0.00016	7.65E-06
0.00018	1.33E-06	0.00018	9.16E-06	5.95E-04	2.08E-06	0.00017	7.82E-06
0.00018	1.33E-06	0.00019	9.16E-06	5.97E-04	2.08E-06	0.00017	7.83E-06
0.00019	1.33E-06	0.00019	9.18E-06	5.99E-04	2.08E-06	0.00017	7.87E-06
0.00019	1.33E-06	0.00019	9.21E-06	6.07E-04	2.09E-06	0.00018	7.88E-06
0.00019	1.33E-06	0.00019	9.22E-06	6.07E-04	2.09E-06	0.00018	7.88E-06
0.00019	1.33E-06	0.00019	9.22E-06	6.09E-04	2.09E-06	0.00018	7.90E-06
0.00019	1.33E-06	0.0002	9.24E-06	6.10E-04	2.09E-06	0.00018	7.90E-06
0.0002	1.33E-06	0.0002	9.24E-06	6.14E-04	2.10E-06	0.00019	7.90E-06
0.0002	1.33E-06	0.0002	9.25E-06	6.14E-04	2.10E-06	0.00019	7.91E-06
0.0002	1.34E-06	0.0002	9.25E-06	6.19E-04	2.10E-06	0.00019	7.92E-06
0.0002	1.34E-06	0.0002	9.26E-06	6.22E-04	2.10E-06	0.00019	7.93E-06
0.0002	1.34E-06	0.00021	9.27E-06	6.24E-04	2.10E-06	0.0002	7.96E-06
0.00021	1.34E-06	0.00021	9.23E-06	6.29E-04	2.11E-06	0.0002	7.96E-06

0.00021	1.33E-06	0.00021	9.23E-06	6.29E-04	2.11E-06	0.0002	7.96E-06
0.00021	1.33E-06	0.00022	9.26E-06	6.32E-04	2.11E-06	0.0002	7.97E-06
0.00022	1.34E-06	0.00022	9.28E-06	6.39E-04	2.12E-06	0.0002	7.93E-06
0.00022	1.34E-06	0.00022	9.30E-06	6.41E-04	2.12E-06	0.0002	7.97E-06
0.00022	1.34E-06	0.00023	9.44E-06	6.41E-04	2.12E-06	0.00021	7.97E-06
0.00023	1.35E-06	0.00023	9.45E-06	6.41E-04	2.12E-06	0.00021	7.96E-06
0.00023	1.35E-06	0.00023	9.46E-06	6.42E-04	2.12E-06	0.00021	7.92E-06
0.00023	1.36E-06	0.00023	9.46E-06	6.43E-04	2.12E-06	0.00022	7.94E-06
0.00023	1.36E-06	0.00023	9.47E-06	6.48E-04	2.12E-06	0.00022	7.96E-06
0.00023	1.36E-06	0.00024	9.51E-06	6.54E-04	2.13E-06	0.00022	7.94E-06
0.00024	1.36E-06	0.00024	9.54E-06	6.54E-04	2.13E-06	0.00022	7.96E-06
0.00024	1.36E-06	0.00025	9.55E-06	6.55E-04	2.13E-06	0.00022	7.96E-06
0.00025	1.36E-06	0.00025	9.55E-06	6.57E-04	2.13E-06	0.00023	8.06E-06
0.00025	1.36E-06	0.00026	9.56E-06	6.58E-04	2.13E-06	0.00023	8.07E-06
0.00026	1.36E-06	0.00026	9.56E-06	6.62E-04	2.14E-06	0.00024	8.09E-06
0.00026	1.36E-06	0.00026	9.56E-06	6.63E-04	2.14E-06	0.00024	8.15E-06
0.00026	1.37E-06	0.00026	9.61E-06	6.68E-04	2.13E-06	0.00024	8.15E-06
0.00026	1.37E-06	0.00027	9.69E-06	6.72E-04	2.15E-06	0.00025	8.19E-06
0.00027	1.37E-06	0.00027	9.69E-06	6.73E-04	2.15E-06	0.00025	8.19E-06
0.00027	1.37E-06	0.00027	9.69E-06	6.74E-04	2.15E-06	0.00025	8.19E-06
0.00027	1.37E-06	0.00027	9.70E-06	6.79E-04	2.15E-06	0.00026	8.20E-06
0.00027	1.38E-06	0.00028	9.71E-06	6.81E-04	2.15E-06	0.00026	8.20E-06
0.00028	1.38E-06	0.00028	9.72E-06	6.85E-04	2.15E-06	0.00026	8.20E-06
0.00028	1.38E-06	0.00028	9.74E-06	6.86E-04	2.15E-06	0.00026	8.21E-06
0.00028	1.38E-06	0.00029	9.62E-06	6.87E-04	2.15E-06	0.00026	8.25E-06
0.00029	1.37E-06	0.00029	9.82E-06	6.94E-04	2.16E-06	0.00027	8.32E-06
0.00029	1.39E-06	0.0003	9.83E-06	6.95E-04	2.16E-06	0.00027	8.32E-06
0.0003	1.39E-06	0.0003	9.84E-06	6.95E-04	2.16E-06	0.00028	8.33E-06
0.0003	1.39E-06	0.0003	9.86E-06	6.97E-04	2.17E-06	0.00028	8.32E-06
0.0003	1.39E-06	0.0003	9.82E-06	6.98E-04	2.17E-06	0.00028	8.33E-06
0.0003	1.39E-06	0.00031	9.85E-06	7.05E-04	2.17E-06	0.00028	8.34E-06
0.00031	1.39E-06	0.00031	9.87E-06	7.07E-04	2.17E-06	0.00028	8.34E-06
0.00031	1.39E-06	0.00031	9.97E-06	7.08E-04	2.18E-06	0.00029	8.23E-06
0.00031	1.40E-06	0.00031	9.96E-06	7.08E-04	2.18E-06	0.0003	8.43E-06
0.00031	1.40E-06	0.00032	1.00E-05	7.09E-04	2.18E-06	0.0003	8.43E-06
0.00032	1.40E-06	0.00032	1.00E-05	7.10E-04	2.18E-06	0.0003	8.43E-06
0.00032	1.40E-06	0.00032	1.00E-05	7.13E-04	2.18E-06	0.0003	8.45E-06
0.00032	1.40E-06	0.00033	1.00E-05	7.16E-04	2.18E-06	0.0003	8.41E-06
0.00033	1.40E-06	0.00033	1.00E-05	7.20E-04	2.17E-06	0.00031	8.42E-06
0.00033	1.41E-06	0.00033	1.01E-05	7.27E-04	2.19E-06	0.00031	8.43E-06
0.00033	1.41E-06	0.00033	1.01E-05	7.28E-04	2.19E-06	0.00031	8.53E-06

0.00033	1.41E-06	0.00034	1.01E-05	7.29E-04	2.19E-06	0.00031	8.52E-06
0.00034	1.41E-06	0.00034	1.01E-05	7.30E-04	2.19E-06	0.00032	8.55E-06
0.00034	1.41E-06	0.00034	1.01E-05	7.32E-04	2.19E-06	0.00033	8.58E-06
0.00034	1.41E-06	0.00034	1.01E-05	7.33E-04	2.19E-06	0.00033	8.59E-06
0.00034	1.41E-06	0.00035	1.01E-05	7.34E-04	2.20E-06	0.00033	8.59E-06
0.00035	1.41E-06	0.00035	1.01E-05	7.38E-04	2.20E-06	0.00033	8.63E-06
0.00035	1.41E-06	0.00035	1.02E-05	7.42E-04	2.20E-06	0.00033	8.63E-06
0.00035	1.42E-06	0.00036	1.02E-05	7.43E-04	2.21E-06	0.00034	8.64E-06
0.00036	1.42E-06	0.00036	1.02E-05	7.43E-04	2.21E-06	0.00034	8.62E-06
0.00036	1.42E-06	0.00036	1.02E-05	7.46E-04	2.21E-06	0.00034	8.59E-06
0.00036	1.42E-06	0.00036	1.03E-05	7.47E-04	2.21E-06	0.00034	8.60E-06
0.00036	1.43E-06	0.00036	1.03E-05	7.49E-04	2.21E-06	0.00035	8.60E-06
0.00036	1.43E-06	0.00037	1.03E-05	7.55E-04	2.22E-06	0.00035	8.61E-06
0.00037	1.43E-06	0.00037	1.03E-05	7.60E-04	2.22E-06	0.00035	8.63E-06
0.00037	1.43E-06	0.00037	1.03E-05	7.61E-04	2.22E-06	0.00036	8.62E-06
0.00037	1.43E-06	0.00038	1.03E-05	7.62E-04	2.22E-06	0.00036	8.68E-06
0.00038	1.43E-06	0.00038	1.03E-05	7.64E-04	2.22E-06	0.00036	8.76E-06
0.00038	1.43E-06	0.00039	1.04E-05	7.65E-04	2.22E-06	0.00036	8.77E-06
0.00039	1.44E-06	0.00039	1.04E-05	7.74E-04	2.22E-06	0.00037	8.78E-06
0.00039	1.44E-06	0.00039	1.04E-05	7.80E-04	2.23E-06	0.00037	8.79E-06
0.00039	1.44E-06	0.0004	1.04E-05	7.80E-04	2.23E-06	0.00037	8.79E-06
0.0004	1.44E-06	0.0004	1.04E-05	7.87E-04	2.24E-06	0.00037	8.80E-06
0.0004	1.44E-06	0.0004	1.04E-05	7.92E-04	2.25E-06	0.00038	8.75E-06
0.0004	1.44E-06	0.0004	1.05E-05	7.94E-04	2.25E-06	0.00038	8.75E-06
0.0004	1.45E-06	0.00041	1.05E-05	7.95E-04	2.25E-06	0.00039	8.85E-06
0.00041	1.45E-06	0.00041	1.06E-05	7.96E-04	2.25E-06	0.00039	8.85E-06
0.00041	1.45E-06	0.00042	1.06E-05	8.06E-04	2.26E-06	0.00039	8.86E-06
0.00042	1.45E-06	0.00042	1.06E-05	8.07E-04	2.26E-06	0.0004	8.86E-06
0.00042	1.45E-06	0.00042	1.06E-05	8.08E-04	2.26E-06	0.0004	8.85E-06
0.00042	1.45E-06	0.00042	1.06E-05	8.19E-04	2.27E-06	0.0004	8.88E-06
0.00042	1.45E-06	0.00042	1.06E-05	8.20E-04	2.27E-06	0.0004	8.92E-06
0.00042	1.46E-06	0.00042	1.06E-05	8.22E-04	2.27E-06	0.00041	8.96E-06
0.00042	1.46E-06	0.00043	1.06E-05	8.24E-04	2.28E-06	0.00041	9.01E-06
0.00043	1.46E-06	0.00043	1.07E-05	8.26E-04	2.28E-06	0.00041	9.00E-06
0.00043	1.46E-06	0.00043	1.07E-05	8.27E-04	2.28E-06	0.00042	9.01E-06
0.00043	1.46E-06	0.00043	1.07E-05	8.29E-04	2.28E-06	0.00042	9.00E-06
0.00043	1.46E-06	0.00043	1.07E-05	8.40E-04	2.29E-06	0.00042	9.05E-06
0.00043	1.46E-06	0.00044	1.07E-05	8.41E-04	2.29E-06	0.00042	9.06E-06
0.00044	1.47E-06	0.00044	1.07E-05	8.41E-04	2.29E-06	0.00042	9.06E-06
0.00044	1.47E-06	0.00045	1.08E-05	8.47E-04	2.30E-06	0.00042	9.05E-06
0.00045	1.47E-06	0.00045	1.08E-05	8.53E-04	2.30E-06	0.00043	9.05E-06

0.00045	1.47E-06	0.00045	1.08E-05	8.53E-04	2.30E-06	0.00043	9.06E-06
0.00045	1.47E-06	0.00045	1.08E-05	8.54E-04	2.30E-06	0.00043	9.06E-06
0.00046	1.47E-06	0.00046	1.08E-05	8.64E-04	2.31E-06	0.00043	9.05E-06
0.00046	1.48E-06	0.00046	1.09E-05	8.65E-04	2.31E-06	0.00044	9.11E-06
0.00046	1.48E-06	0.00047	1.09E-05	8.68E-04	2.32E-06	0.00044	9.13E-06
0.00047	1.48E-06	0.00047	1.09E-05	8.69E-04	2.32E-06	0.00044	9.14E-06
0.00047	1.48E-06	0.00047	1.10E-05	8.69E-04	2.32E-06	0.00045	9.18E-06
0.00047	1.49E-06	0.00047	1.10E-05	8.73E-04	2.32E-06	0.00045	9.19E-06
0.00047	1.49E-06	0.00047	1.10E-05	8.74E-04	2.32E-06	0.00045	9.19E-06
0.00047	1.49E-06	0.00048	1.09E-05	8.80E-04	2.33E-06	0.00045	9.19E-06
0.00048	1.48E-06	0.00049	1.10E-05	8.80E-04	2.33E-06	0.00045	9.18E-06
0.00048	1.49E-06	0.00049	1.10E-05	8.80E-04	2.33E-06	0.00045	9.19E-06
0.00049	1.49E-06	0.00049	1.11E-05	8.87E-04	2.33E-06	0.00046	9.20E-06
0.00049	1.49E-06	0.00049	1.11E-05	8.90E-04	2.34E-06	0.00046	9.20E-06
0.00049	1.49E-06	0.00049	1.10E-05	8.95E-04	2.34E-06	0.00046	9.24E-06
0.00049	1.49E-06	0.0005	1.11E-05	8.96E-04	2.34E-06	0.00047	9.26E-06
0.0005	1.50E-06	0.0005	1.11E-05	8.97E-04	2.34E-06	0.00047	9.27E-06
0.0005	1.50E-06	0.0005	1.11E-05	9.02E-04	2.35E-06	0.00047	9.31E-06
0.0005	1.50E-06	0.0005	1.11E-05	1.36E-03	2.92E-06	0.00047	9.31E-06
0.0005	1.50E-06	0.00051	1.11E-05	1.36E-03	2.92E-06	0.00048	9.32E-06
0.00051	1.50E-06	0.00051	1.12E-05	1.35E-03	2.91E-06	0.00048	9.28E-06
0.00051	1.51E-06	0.00052	1.12E-05	1.35E-03	2.90E-06	0.00049	9.36E-06
0.00052	1.51E-06	0.00052	1.12E-05	1.35E-03	2.90E-06	0.00049	9.36E-06
0.00052	1.51E-06	0.00052	1.12E-05	1.35E-03	2.90E-06	0.00049	9.36E-06
0.00052	1.51E-06	0.00052	1.13E-05	1.34E-03	2.89E-06	0.00049	9.37E-06
0.00052	1.51E-06	0.00053	1.13E-05	1.34E-03	2.89E-06	0.00049	9.37E-06
0.00053	1.52E-06	0.00053	1.12E-05	1.34E-03	2.89E-06	0.0005	9.38E-06
0.00053	1.51E-06	0.00053	1.12E-05	1.34E-03	2.88E-06	0.0005	9.39E-06
0.00053	1.52E-06	0.00053	1.12E-05	1.34E-03	2.88E-06	0.0005	9.40E-06
0.00053	1.52E-06	0.00054	1.13E-05	1.33E-03	2.87E-06	0.00051	9.41E-06
0.00054	1.52E-06	0.00054	1.13E-05	1.33E-03	2.87E-06	0.00051	9.42E-06
0.00054	1.52E-06	0.00054	1.12E-05	1.33E-03	2.85E-06	0.00052	9.49E-06
0.00054	1.52E-06	0.00055	1.13E-05	1.33E-03	2.85E-06	0.00052	9.50E-06
0.00055	1.52E-06	0.00055	1.13E-05	1.32E-03	2.85E-06	0.00052	9.50E-06
0.00055	1.52E-06	0.00055	1.14E-05	1.32E-03	2.84E-06	0.00052	9.52E-06
0.00055	1.53E-06	0.00056	1.14E-05	1.32E-03	2.84E-06	0.00052	9.53E-06
0.00056	1.53E-06	0.00056	1.15E-05	1.31E-03	2.83E-06	0.00053	9.55E-06
0.00056	1.53E-06	0.00056	1.15E-05	1.31E-03	2.83E-06	0.00053	9.51E-06
0.00056	1.53E-06	0.00056	1.15E-05	1.31E-03	2.83E-06	0.00053	9.51E-06
0.00056	1.54E-06	0.00057	1.15E-05	1.30E-03	2.82E-06	0.00053	9.51E-06
0.00057	1.53E-06	0.00057	1.15E-05	1.30E-03	2.81E-06	0.00054	9.60E-06

0.00057	1.54E-06	0.00058	1.16E-05	1.30E-03	2.81E-06	0.00054	9.60E-06
0.00058	1.54E-06	0.00058	1.16E-05	1.30E-03	2.81E-06	0.00054	9.60E-06
0.00058	1.54E-06	0.00058	1.16E-05	1.29E-03	2.80E-06	0.00054	9.52E-06
0.00058	1.55E-06	0.00059	1.16E-05	1.29E-03	2.80E-06	0.00055	9.56E-06
0.00059	1.55E-06	0.00059	1.16E-05	1.29E-03	2.79E-06	0.00055	9.56E-06
0.00059	1.55E-06	0.00059	1.16E-05	1.29E-03	2.79E-06	0.00056	9.64E-06
0.00059	1.55E-06	0.0006	1.17E-05	1.29E-03	2.78E-06	0.00056	9.69E-06
0.0006	1.55E-06	0.0006	1.17E-05	1.28E-03	2.78E-06	0.00056	9.69E-06
0.0006	1.55E-06	0.0006	1.17E-05	1.28E-03	2.78E-06	0.00056	9.69E-06
0.0006	1.56E-06	0.00061	1.17E-05	1.28E-03	2.77E-06	0.00056	9.70E-06
0.00061	1.56E-06	0.00061	1.18E-05	1.28E-03	2.77E-06	0.00057	9.68E-06
0.00061	1.56E-06	0.00061	1.18E-05	1.27E-03	2.77E-06	0.00057	9.73E-06
0.00061	1.56E-06	0.00062	1.18E-05	1.27E-03	2.76E-06	0.00058	9.79E-06
0.00062	1.57E-06	0.00062	1.18E-05	1.27E-03	2.76E-06	0.00058	9.78E-06
0.00062	1.57E-06	0.00062	1.19E-05	1.26E-03	2.75E-06	0.00058	9.78E-06
0.00062	1.57E-06	0.00062	1.19E-05	1.26E-03	2.75E-06	0.00058	9.78E-06
0.00062	1.57E-06	0.00062	1.19E-05	1.26E-03	2.75E-06	0.00059	9.84E-06
0.00063	1.58E-06	0.00064	1.20E-05	1.26E-03	2.75E-06	0.00059	9.84E-06
0.00064	1.58E-06	0.00064	1.20E-05	1.26E-03	2.74E-06	0.00059	9.85E-06
0.00064	1.58E-06	0.00064	1.20E-05	1.25E-03	2.73E-06	0.0006	9.86E-06
0.00064	1.58E-06	0.00064	1.20E-05	1.25E-03	2.73E-06	0.0006	9.86E-06
0.00064	1.58E-06	0.00064	1.20E-05	1.24E-03	2.72E-06	0.0006	9.88E-06
0.00064	1.58E-06	0.00064	1.20E-05	1.24E-03	2.72E-06	0.00061	9.91E-06
0.00064	1.58E-06	0.00065	1.21E-05	1.24E-03	2.70E-06	0.00061	9.92E-06
0.00065	1.58E-06	0.00065	1.21E-05	1.23E-03	2.70E-06	0.00061	9.96E-06
0.00065	1.58E-06	0.00065	1.21E-05	1.23E-03	2.70E-06	0.00061	9.97E-06
0.00065	1.58E-06	0.00066	1.21E-05	1.23E-03	2.70E-06	0.00062	9.96E-06
0.00066	1.59E-06	0.00066	1.21E-05	1.23E-03	2.70E-06	0.00062	9.99E-06
0.00066	1.59E-06	0.00066	1.22E-05	1.22E-03	2.70E-06	0.00062	1.00E-05
0.00066	1.59E-06	0.00067	1.22E-05	1.22E-03	2.69E-06	0.00063	1.00E-05
0.00067	1.59E-06	0.00067	1.22E-05	1.22E-03	2.68E-06	0.00063	1.01E-05
0.00067	1.60E-06	0.00067	1.22E-05	1.22E-03	2.68E-06	0.00064	1.01E-05
0.00067	1.60E-06	0.00067	1.22E-05	1.21E-03	2.68E-06	0.00064	1.01E-05
0.00067	1.60E-06	0.00067	1.22E-05	1.21E-03	2.67E-06	0.00064	1.01E-05
0.00067	1.60E-06	0.00068	1.22E-05	1.20E-03	2.66E-06	0.00064	1.01E-05
0.00068	1.60E-06	0.00068	1.22E-05	1.20E-03	2.66E-06	0.00064	1.01E-05
0.00068	1.60E-06	0.00068	1.22E-05	1.20E-03	2.66E-06	0.00064	1.01E-05
0.00068	1.60E-06	0.00068	1.23E-05	1.20E-03	2.66E-06	0.00065	1.02E-05
0.00068	1.61E-06	0.00069	1.23E-05	1.20E-03	2.66E-06	0.00065	1.02E-05
0.00069	1.61E-06	0.00069	1.23E-05	1.19E-03	2.65E-06	0.00065	1.02E-05

## Mass Fraction CO<sub>2</sub>

150		200		250		300	
x	y	x	y	x	y	x	y
8.13E-06	0.03197	1.08E-05	0.04177	0.00042	0.03294	9.78E-06	0.04064
9.46E-06	0.03197	1.19E-05	0.04177	0.00042	0.03294	9.87E-06	0.04064
1.19E-05	0.03197	1.23E-05	0.04177	0.00042	0.03294	1.16E-05	0.04064
1.22E-05	0.03197	1.72E-05	0.04177	0.00042	0.03294	1.20E-05	0.04064
1.61E-05	0.03197	2.46E-05	0.04177	0.00043	0.03294	1.91E-05	0.04064
2.46E-05	0.03197	2.55E-05	0.04177	0.00043	0.03294	2.47E-05	0.04064
2.54E-05	0.03197	2.55E-05	0.04177	0.00043	0.03294	2.57E-05	0.04064
2.55E-05	0.03197	2.55E-05	0.04177	0.00043	0.03294	2.59E-05	0.04064
2.62E-05	0.03197	2.66E-05	0.04177	0.00043	0.03294	2.62E-05	0.04064
2.67E-05	0.03197	2.69E-05	0.04177	0.00044	0.03294	2.80E-05	0.04064
2.68E-05	0.03197	3.05E-05	0.04177	0.00044	0.03294	2.82E-05	0.04064
2.86E-05	0.03197	3.65E-05	0.04177	0.00044	0.03294	3.60E-05	0.04064
3.65E-05	0.03197	3.73E-05	0.04177	0.00044	0.03294	4.24E-05	0.04064
3.76E-05	0.03197	4.45E-05	0.04177	0.00045	0.03294	4.56E-05	0.04064
4.46E-05	0.03197	4.54E-05	0.04177	0.00045	0.03294	4.66E-05	0.04064
4.54E-05	0.03197	4.72E-05	0.04177	0.00045	0.03294	4.74E-05	0.04064
4.72E-05	0.03197	4.83E-05	0.04177	0.00045	0.03294	4.85E-05	0.04064
4.82E-05	0.03197	5.02E-05	0.04177	0.00045	0.03294	4.93E-05	0.04064
5.02E-05	0.03197	5.33E-05	0.04177	0.00046	0.03294	5.06E-05	0.04064
5.32E-05	0.03197	6.02E-05	0.04177	0.00046	0.03294	5.62E-05	0.04064
6.03E-05	0.03197	6.78E-05	0.04177	0.00047	0.03294	6.00E-05	0.04064
6.79E-05	0.03197	7.01E-05	0.04177	0.00047	0.03294	6.06E-05	0.04064
7.01E-05	0.03197	7.25E-05	0.04177	0.00047	0.03294	6.08E-05	0.04064
7.24E-05	0.03197	7.29E-05	0.04177	0.00047	0.03294	7.04E-05	0.04064
7.30E-05	0.03197	7.57E-05	0.04177	0.00048	0.03294	7.16E-05	0.04064
7.57E-05	0.03197	7.61E-05	0.04177	0.00048	0.03294	7.38E-05	0.04064
7.61E-05	0.03197	7.62E-05	0.04177	0.00048	0.03294	7.45E-05	0.04064
7.64E-05	0.03197	8.79E-05	0.04177	0.00048	0.03294	7.66E-05	0.04064
8.78E-05	0.03197	8.80E-05	0.04177	0.00049	0.03294	7.78E-05	0.04064
8.80E-05	0.03197	8.94E-05	0.04177	0.00049	0.03294	8.62E-05	0.04064
9.05E-05	0.03197	9.27E-05	0.04177	0.00049	0.03294	8.89E-05	0.04064
9.27E-05	0.03197	9.33E-05	0.04177	0.0005	0.03294	9.17E-05	0.04064
9.32E-05	0.03197	9.95E-05	0.04177	0.0005	0.03294	9.43E-05	0.04064
9.95E-05	0.03197	0.00011	0.04177	0.0005	0.03294	9.45E-05	0.04064
0.00011	0.03197	0.00011	0.04177	0.00051	0.03294	9.97E-05	0.04064
0.00011	0.03197	0.00011	0.04177	0.00051	0.03294	0.0001	0.04064
0.00011	0.03197	0.00011	0.04177	0.00051	0.03294	0.0001	0.04064











## Mass Fraction SO<sub>2</sub>

Mass Fraction SO <sub>2</sub>							
150		200		250		300	
x	y	x	y	x	y	x	y
8.13E-06	0.00277	1.08E-05	0.00396	0.00042	0.00281	9.78E-06	0.00389
9.46E-06	0.00277	1.19E-05	0.00396	0.00042	0.00281	9.87E-06	0.00389
1.19E-05	0.00277	1.23E-05	0.00396	0.00042	0.00281	1.16E-05	0.00389
1.22E-05	0.00277	1.72E-05	0.00396	0.00042	0.00281	1.20E-05	0.00389
1.61E-05	0.00277	2.46E-05	0.00396	0.00043	0.00281	1.91E-05	0.00389
2.46E-05	0.00277	2.55E-05	0.00396	0.00043	0.00281	2.47E-05	0.00389
2.54E-05	0.00277	2.55E-05	0.00396	0.00043	0.00281	2.57E-05	0.00389
2.55E-05	0.00277	2.55E-05	0.00396	0.00043	0.00281	2.59E-05	0.00389
2.62E-05	0.00277	2.66E-05	0.00396	0.00043	0.00281	2.62E-05	0.00389
2.67E-05	0.00277	2.69E-05	0.00396	0.00044	0.00281	2.80E-05	0.00389
2.68E-05	0.00277	3.05E-05	0.00396	0.00044	0.00281	2.82E-05	0.00389
2.86E-05	0.00277	3.65E-05	0.00396	0.00044	0.00281	3.60E-05	0.00389
3.65E-05	0.00277	3.73E-05	0.00396	0.00044	0.00281	4.24E-05	0.00389
3.76E-05	0.00277	4.45E-05	0.00396	0.00045	0.00281	4.56E-05	0.00389
4.46E-05	0.00277	4.54E-05	0.00396	0.00045	0.00281	4.66E-05	0.00389
4.54E-05	0.00277	4.72E-05	0.00396	0.00045	0.00281	4.74E-05	0.00389
4.72E-05	0.00277	4.83E-05	0.00396	0.00045	0.00281	4.85E-05	0.00389
4.82E-05	0.00277	5.02E-05	0.00396	0.00045	0.00281	4.93E-05	0.00389
5.02E-05	0.00278	5.33E-05	0.00396	0.00046	0.00281	5.06E-05	0.00389
5.32E-05	0.00278	6.02E-05	0.00396	0.00046	0.00281	5.62E-05	0.00389
6.03E-05	0.00278	6.78E-05	0.00396	0.00047	0.00281	6.00E-05	0.00389
6.79E-05	0.00278	7.01E-05	0.00396	0.00047	0.00281	6.06E-05	0.00389
7.01E-05	0.00278	7.25E-05	0.00396	0.00047	0.00281	6.08E-05	0.00389
7.24E-05	0.00278	7.29E-05	0.00396	0.00047	0.00281	7.04E-05	0.00389
7.30E-05	0.00278	7.57E-05	0.00396	0.00048	0.00281	7.16E-05	0.00389
7.57E-05	0.00278	7.61E-05	0.00396	0.00048	0.00281	7.38E-05	0.00389
7.61E-05	0.00278	7.62E-05	0.00396	0.00048	0.00281	7.45E-05	0.00389
7.64E-05	0.00278	8.79E-05	0.00396	0.00048	0.00281	7.66E-05	0.00389
8.78E-05	0.00278	8.80E-05	0.00396	0.00049	0.00281	7.78E-05	0.00389
8.80E-05	0.00278	8.94E-05	0.00396	0.00049	0.00281	8.62E-05	0.00389
9.05E-05	0.00278	9.27E-05	0.00396	0.00049	0.00281	8.89E-05	0.00389
9.27E-05	0.00278	9.33E-05	0.00396	0.0005	0.00281	9.17E-05	0.0039
9.32E-05	0.00278	9.95E-05	0.00396	0.0005	0.00281	9.43E-05	0.0039
9.95E-05	0.00278	0.00011	0.00396	0.0005	0.00281	9.45E-05	0.0039
0.00011	0.00278	0.00011	0.00396	0.00051	0.00281	9.97E-05	0.0039
0.00011	0.00278	0.00011	0.00396	0.00051	0.00281	0.0001	0.0039













## **BIODATA PENULIS**



Penulis lahir di Kota Gresik, Jawa Timur pada tanggal 18 Janurai 1996. Tamat SDN Kutorejo I Tuban (2008), SMP Negeri 1I Tuban (2010) ,SMA Negeri I Tuban (2012), Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2012-2016). Bidang minat yang diambil penulis ketika menempuh perkuliahan adalah Bidang Minat Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Penulis melanjutkan studi di Pascasarjana Teknik Fisika ITS, di bidang Rekayasa Energi Terbarukan pada tahun 2016. Penulis fokus pada bidang rekayasa energi terbarukan pada pembakaran biomassa sebagai penelitian tesisnya. Penulis dapat dihubungkan melalui alamat email [endahlaksmi@gmail.com](mailto:endahlaksmi@gmail.com)