



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS UNJUK KERJA TURBIN GAS BIOENERGI MIKRO PROTO
X-2 DENGAN BAHAN BAKAR CAIR (CAMPURAN SOLAR DAN
MINYAK JARAK)**

SKRIPSI

EKA PRASETYA KUSUMA

1006807831

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JANUARI 2013**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS UNJUK KERJA TURBIN GAS BIOENERGI MIKRO PROTO
X-2 DENGAN BAHAN BAKAR CAIR (CAMPURAN SOLAR DAN
MINYAK JARAK)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

EKA PRASETYA KUSUMA

1006807831

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JANUARI 2013**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Eka Prasetya Kusuma

NPM : 1006807831

Tanda Tangan :



Tanggal : 9 Januari 2013

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Eka Prasetya Kusuma
NPM : 1006807831
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi :

ANALISIS UNJUK KERJA TURBIN GAS BIOENERGI MIKRO PROTO X-2 DENGAN BAHAN BAKAR CAIR (CAMPURAN SOLAR DAN MINYAK JARAK)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Ir. Ahmad Indra Siswantara

Penguji : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, MT

Penguji : Dr. Ir. Warjito, M.Eng

Penguji : Steven Darmawan, S.T. M.T

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Januari 2013

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan nikmat iman yang telah diberikan. Sholawat dan salam tak lupa saya panjatkan kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW. Sehingga dengan rahmat dari Allah SWT dan petunjuk risalah Nabi Muhammad SAW, saya dapat menyelesaikan dengan baik skripsi yang berjudul :

ANALISIS UNJUK KERJA TURBIN GAS BIOENERGI MIKRO PROTO X-2 DENGAN BAHAN BAKAR CAIR (CAMPURAN SOLAR DAN MINYAK JARAK)

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Ahmad Indra Siswantara, selaku dosen pembimbing skripsi dan juga pembimbing akademis yang telah membimbing dan mengarahkan dengan sangat baik sekali, senantiasa memberikan semangat, kepercayaan, dan bantuan yang sangat luar biasa, serta membagi ilmunya dan pengalamannya sehingga pengerjaan skripsi menjadi lebih lancar.
2. Steven Darmawan ST., MT., selaku dosen pembimbing kedua yang turut menyediakan banyak waktu, tenaga, dan pikiran untuk penyusunan alat, pengambilan data, dan arahan dalam penyusunan skripsi ini.
3. Orang tua tercinta penulis yang selalu mendoakan penulis untuk kelancaran pengerjaan skripsi dan cita – cita penulis.
4. Segenap jajaran Dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah sangat membantu perkembangan diri penulis dengan memberikan ilmu dan pengetahuan selama masa perkuliahan.

5. Teman – teman setia skripsi penulis (Djuang, Aziz), yang telah bekerja sama dengan sangat hebat sekali dan telah memberikan semangat, teguran, bantuan, serta kebaikan yang sangat tidak ternilai sekali dalam pengerjaan skripsi ini.
6. Mas okwaldu purba.ST sebagai mahasiswa S2 yang satu bimbingan dengan bapak Dr. Ir. Ahmad Indra Siswantara yang telah banyak membantu dan meluangkan waktunya untuk skripsi ini.
7. Teman – teman Mesin ekstensi angkatan 2010, yang selalu menjadi teman, sahabat, dan keluarga kedua dalam kehidupan sehari – hari selama masa perkuliahan.
8. Destriana Safitria , yang sangat setia dan tidak pernah berhenti dalam memberikan dukungan, semangat, doa, dan teguran dalam mengerjakan skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu ke depannya.

Depok, 9 Januari 2013

Penulis

Eka Prasetya Kusuma

NPM : 1006807831

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK
KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Eka Prasetya Kusuma
NPM : 1006807831
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty - Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

***ANALISIS UNJUK KERJA TURBIN GAS BIOENERGI MIKRO PROTO X-2 DENGAN
BAHAN BAKAR CAIR (CAMPURAN SOLAR DAN MINYAK JARAK)***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 9 Januari 2013

Yang menyatakan



(Eka Prasetya Kusuma)

ABSTRAK

Nama : Eka Prasetya Kusuma
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Analisis Unjuk Kerja Turbin Gas Bioenergi Mikro Proto X-2 dengan Bahan Bakar Cair (Campuran Solar dan Minyak Jarak)

Kebutuhan bahan bakar fosil terus meningkat sementara ketersediaannya semakin menipis, hal ini mendorong penggunaan bahan bakar alternatif. Salah satu bahan bakar alternatif yang dapat digunakan adalah minyak jarak pagar. Penelitian dilakukan pada Turbin gas bioenergi mikro proto X-2 yang merupakan pembangkit listrik skala mikro. Pengujian yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan rasio campuran dengan unjuk kerja terbaik dari solar dan minyak jarak pagar, yaitu 2,5%, 5%, 7,5% dan 10%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan minyak jarak pagar 10% memiliki performa yang paling baik dengan putaran turbin mencapai 38.795 [rpm]. Sedangkan penambahan minyak jarak pagar 2.5% memiliki performa paling rendah dengan putaran turbin mencapai 38.313 [rpm]. Namun minyak jarak pagar tidak dapat diaplikasikan dalam keadaan murni karena memiliki tingkat viskositas yang tinggi.

Kata kunci : Turbin Gas Mikro, Minyak Jarak, Bioenergi, bahan bakar alternatif

ABSTRACT

Name : Eka Prasetya Kusuma
Major : *Mechanical Engineering*
Title : *Performance Analysis of Proto X-2 Micro Bioenergy Gas Turbine with Liquid Fuel (Blend of Diesel and Jatropha Curcus Oil)*

The need of fuel fosil increased while the resource being depleted, this matter let to the use of an alternative fuel. One of the alternatif fuel is jatropha curcus oil. The research has been done to Proto X-2 micro bioenergy gas turbine which is one of micro power plant. The aim is to get the rasio with the best performance result of the jatropha curcus oil and diesel from 2,5%, 5%, 7,5% and 10%. The result shown that the addition of 10% jatropha curcus oil have the best performance with turbin speed 38.795 [rpm]. While the addition 2,5% jatropha curcus oil have the lowest performance with the turbin speed 38.313 [rpm]. However jatropha curcus oil cannot be applied purely due to its high viscosity.

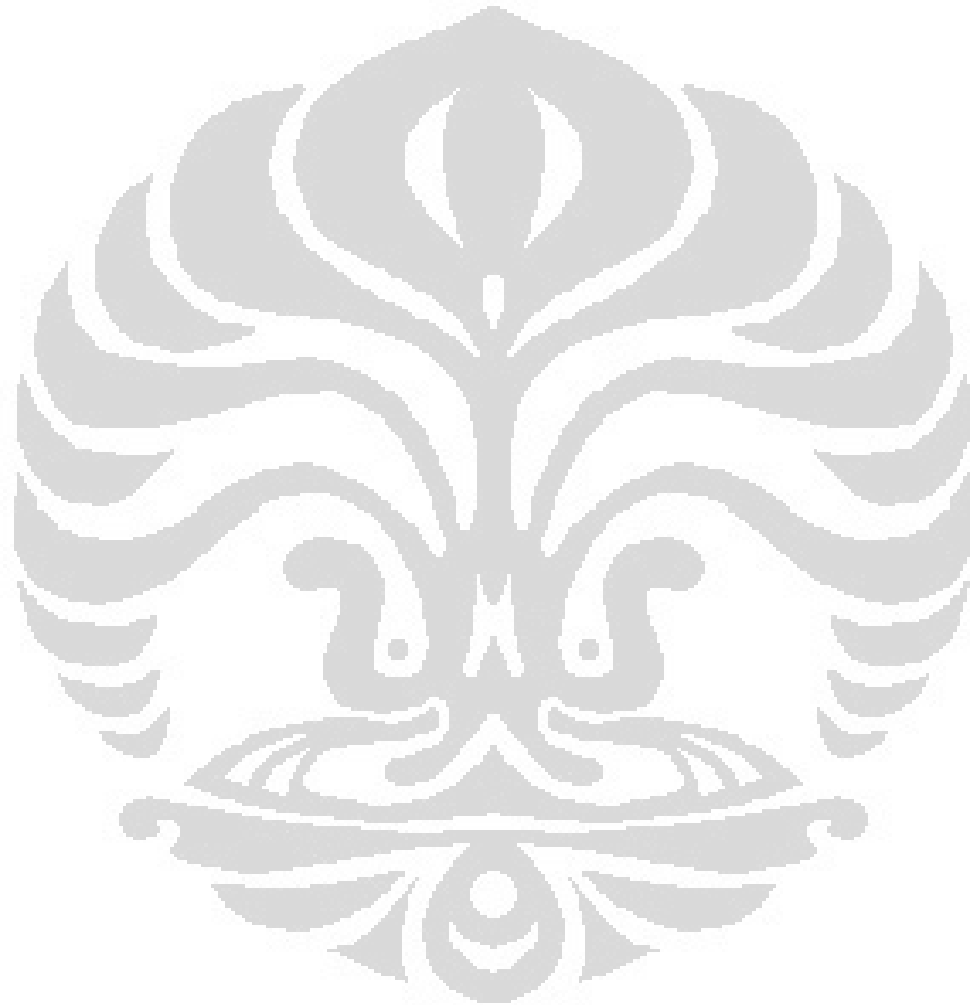
Keywords : Micro Gas Turbine, Jatropha Curcus Oil, Bioenergy, Alternative fuels

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Penelitian.....	4
1.5 Metodologi Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Turbin Gas.....	6
2.1.1 Klasifikasi Turbin Gas	7
2.1.2 Siklus-siklus Turbin Gas	9
2.2. Ruang Bakar.....	10

2.3. Unjuk Kerja Ruang Bakar	12
2.4. Pembakaran.....	13
2.4.1. Hukum Termodinamika.....	13
2.4.2. Entalpy Pembakaran.....	13
2.4.3. Ekuivalen Rasio.....	14
2.4.4. Suhu Nyala Adiabatik.....	14
2.5 Minyak Jarak Pagar	16
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....	18
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	18
3.2. Peralatan dan Perlengkapan Pengujian	19
3.3. Skema Pengujian	22
3.4. Ruang Bakar Pada Turbin Gas	22
3.5. Bahan Bakar	26
3.6. Kondisi Pengujian	27
3.7. Proses Pengujian	27
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1. Data Hasil Eksperimen.....	29
4.2. Pengolahan Data Hasil Eksperimen.....	30
4.3. Grafik Pengolahan Data.....	34
4.4. Compressor Performance Map.....	38
4.5. Perhitungan Pembakaran.....	39
4.5.1. Perhitungan Pembakaran Minyak Jarak 10% ...	39
4.5.2. Perhitungan Pembakaran Minyak Jarak 7.5%....	46
4.5.3. Perhitungan Pembakaran Minyak Jarak 5%.....	52
4.5.4. Perhitungan Pembakaran Minyak Jarak 2.5%....	59

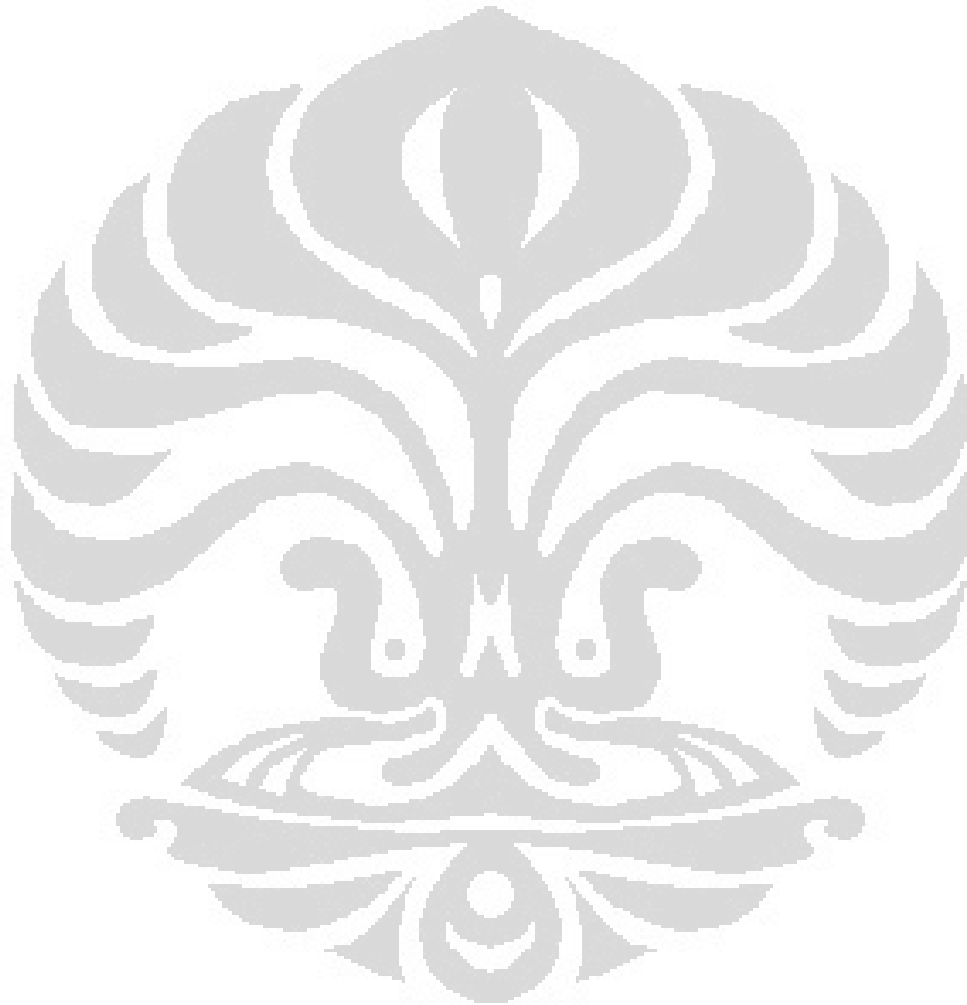
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	62
5.1. Kesimpulan.....	62
5.2. Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA.....	64
LAMPIRAN	65



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema Sistem Gas Turbin Sederhana	6
Gambar 2.2	Skema Turbin Gas Siklus Terbuka.....	7
Gambar 2.3	Skema Turbin Gas Siklus Tertutup.....	8
Gambar 2.4	Siklus Brayton	10
Gambar 2.5	<i>Schematic of adiabatic flame temperature</i>	15
Gambar 2.6	Struktur Kimia Minyak Jarak Pagar	17
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	18
Gambar 3.2	Turbin Gas Micro Proto X-2 tampak depan.....	19
Gambar 3.3	Turbin Gas Micro Proto X-2 tampak belakang beserta panel.....	19
Gambar 3.4	Pompa oli dan motor listrik.....	20
Gambar 3.5	<i>Pressure gauge</i>	20
Gambar 3.6	<i>Thermocouple</i>	21
Gambar 3.7	Tachometer non kontak omron (kanan) yang dibandingkan dengan tachometer krisbow (kiri) pada putaran turbin yang sama.....	21
Gambar 3.8	Posisi <i>pressure gauge, digital temperature, dan tachometer</i> pada panel.....	21
Gambar 3.9	Skema pengujian turbin gas micro proto X- 2.....	22
Gambar 3.10	Saluran masuk ruang bakar tampak samping (kiri) dan atas (kanan).....	22

Gambar 3.11	<i>Swirler</i> pada ruang bakar tampak samping (kiri) dan atas (kanan).....	23
Gambar 3.12	contoh Nozzle yang digunakan pada <i>swirler</i>	23
Gambar 3.13	Proses uji nyala <i>nozzle</i> yang terdapat pada <i>swirler</i>	24
Gambar 3.14	Busi pada ruang bakar.....	24
Gambar 3.15	Proses pemercikan nyala busi pada <i>swirler</i>	24
Gambar 3.16	<i>Combustion liner</i> tampak samping.....	25
Gambar 3.17	<i>Combustion liner</i> tampak atas.....	25
Gambar 3.18	Proses bongkar pasang ruang bakar.....	25
Gambar 3.19	campuran minyak jarak dan diesel dari 2.5%, 5%, 7.5% dan 10%.....	26
Gambar 3.20	Tangki serta tabung ukur bahan bakar dalam keadaan kosong (kiri) dan terisi (kanan).....	26
Gambar 3.21	Proses pengukuran debit aliran bahan bakar pada tabung 16 [mL].....	27
Gambar 4.1	Grafik <i>Flow rate</i> bahan bakar vs T3.....	34
Gambar 4.2	Grafik <i>Flow rate</i> bahan bakar vs Rpm.....	34
Gambar 4.3	Grafik <i>Flow rate</i> bahan bakar vs P1/P0	36
Gambar 4.4	Grafik <i>Flow rate</i> bahan bakar vs AFR	36
Gambar 4.5	Grafik Fraksi Volume minyak jarak vs Rpm Maksimum	37
Gambar 4.6	Grafik Fraksi volume minyak jarak vs fuel flow rate average	37

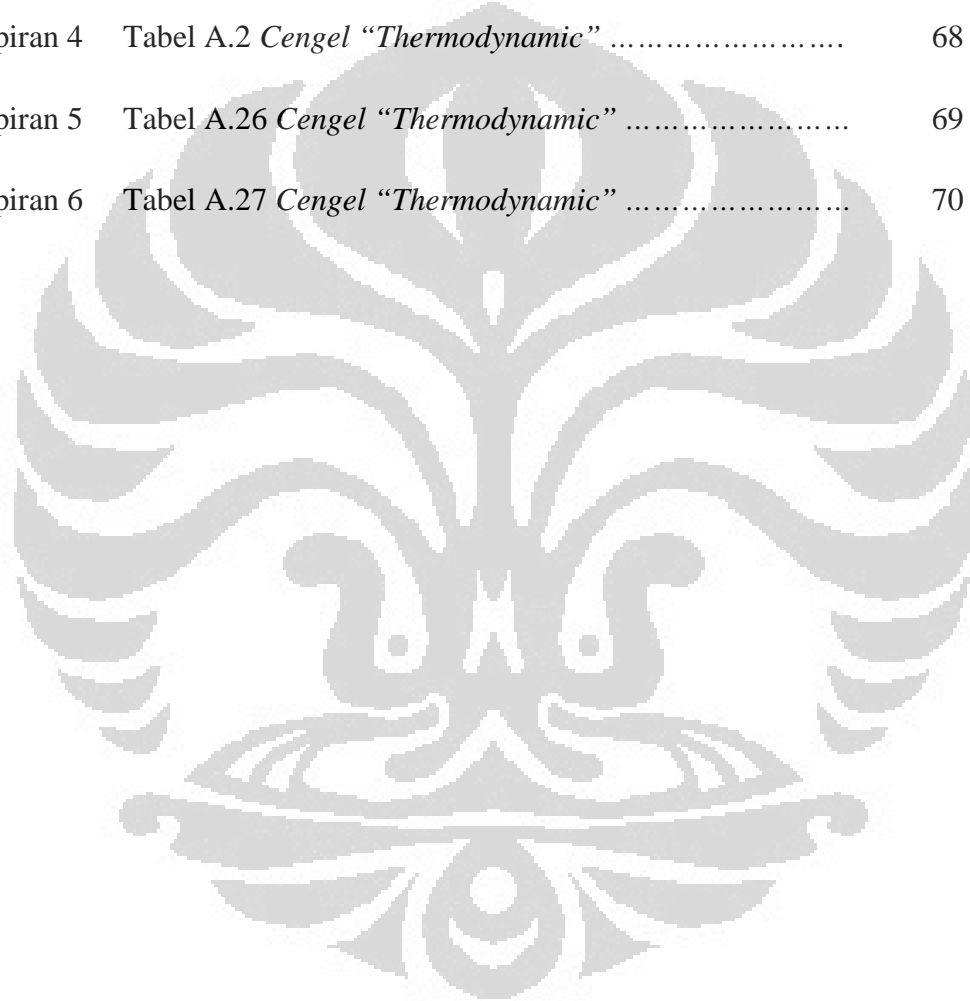


DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Percobaan menggunakan minyak jarak 2.5%	29
Tabel 4.2	Percobaan menggunakan minyak jarak 5%	29
Tabel 4.3	Percobaan menggunakan minyak jarak 7.5%.....	30
Tabel 4.4	Percobaan menggunakan minyak jarak 10%	30
Tabel 4.5	Pengolahan data minyak jarak 2.5%.....	31
Tabel 4.6	Pengolahan data minyak jarak 5%.....	32
Tabel 4.7	Pengolahan data minyak jarak 7.5%	32
Tabel 4.8	Pengolahan data minyak jarak 10%	32
Tabel 4.9	Pengolahan Data rata-rata minyak jarak 2.5%	33
Tabel 4.10	Pengolahan data rata-rata minyak jarak 5%	33
Tabel 4.11	Pengolahan data rata-rata minyak jarak 7.5%	33
Tabel 4.12	Pengolahan data rata-rata minyak jarak 10%	33
Tabel 4.13	Tabel iterasi minyak jarak 10%.....	44
Tabel 4.14	Tabel iterasi minyak jarak 7.5%	50
Tabel 4.15	Tabel iterasi minyak jarak 5%.....	55
Tabel 4.16	Tabel iterasi minyak jarak 2.5%	60

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Tabel B.2 <i>Turn “an introduction to combustion”</i>	65
Lampiran 2	Tabel C.1 <i>Turn “an introduction to combustion”</i>	66
Lampiran 3	Tabel A.1 <i>Cengel “Thermodynamic”</i>	67
Lampiran 4	Tabel A.2 <i>Cengel “Thermodynamic”</i>	68
Lampiran 5	Tabel A.26 <i>Cengel “Thermodynamic”</i>	69
Lampiran 6	Tabel A.27 <i>Cengel “Thermodynamic”</i>	70



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Beberapa tahun ke depan kebutuhan minyak bumi semakin besar, sementara berdasarkan beberapa laporan disebutkan bahwa cadangan minyak dunia semakin menipis. Hal ini menuntut beberapa upaya untuk diciptakan bahan bakar alternatif, mengingat minyak bumi merupakan bahan galian yang sifatnya tidak dapat tumbuh kembali. Upaya yang telah dilakukan untuk menghadapi krisis energi ini diantaranya dengan memanfaatkan sumber energi dari matahari, batu bara dan nuklir serta mengembangkan bahan bakar dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui meskipun sebatas penelitian dan kapasitas yang terbatas.

Saat ini pengembangan bahan bakar alternatif bertumpu pada minyak kelapa (*coconut oil*) dan minyak sawit (*crude palm oil*) yang merupakan dua sumber minyak nabati dari beberapa minyak nabati yang memiliki potensi sebagai bahan bakar motor diesel (biodiesel). Hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa minyak kelapa dapat digunakan sebagai bahan bakar motor diesel, baik sebagai campuran dengan minyak solar atau 100% minyak kelapa. Sementara penggunaan bahan baku ini untuk industri akan semakin besar, sehingga terjadi rebutan kebutuhan beberapa bahan baku industri dan pengembangan energi alternatif yang pada akhirnya memicu kenaikan harga komoditas tersebut. Oleh karenanya dibutuhkan upaya terpadu dalam mencari dan mengembangkan bahan baku minyak nabati sebagai bahan bakar alternative yang tidak berfungsi sebagai bahan baku konsumsi industri dan makanan.

Beberapa tumbuhan penghasil lemak yang dapat digunakan sebagai bahan baku biodiesel sangat beragam, namun dalam perkembangannya kebutuhan tersebut berbenturan dengan kebutuhan produksi dan pangan masyarakat. Oleh karenanya pemilihan bahan baku biodiesel sangat penting untuk mencegah timbulnya distorsi kebutuhan antara kebutuhan pangan dengan kebutuhan produksi. Beberapa tumbuhan penghasil lemak yang banyak tumbuh di Indonesia diantaranya kelapa sawit, kelapa dan jarak. Penggunaan minyak kelapa dan minyak kelapa sawit sangat besar kebutuhannya untuk industri pangan, sementara

itu masyarakat mengenal tanaman jarak sebagai tanaman semak pembatas pagar yang belum dimanfaatkan secara maksimal. Dengan demikian permasalahan dapat dirumuskan sebagai berikut : Bagaimanakah karakteristik bahan bakul alternatif minyak jarak dibandingkan solar, dan bagaimanakah kinerja motor diesel serta konsumsi bahan bakarnya?

Penggunaan secara langsung minyak jarak pagar kurang baik pada mesin, karena memiliki berat molekul yang besar, jauh lebih besar dari biodiesel, sehingga menghasilkan senyawa yang dapat menghasilkan kerusakan pada mesin, di samping itu memiliki viskositas yang tinggi dapat membuat pembakaran di dalam mesin diesel tidak baik karena ketika minyak jarak pagar disemprotkan ke dalam pembakaran hasil dari injeksi tidak berwujud kabut yang mudah menguap melainkan tetesan bahan bakar yang sulit terbakar. Beberapa saran diusulkan dengan mengganti karakteristik dari mesin yang akan menggunakan minyak jarak pagar secara langsung sebagai bahan pengganti solar. Cara lain dapat dibuat dengan mengubah karakteristik dari minyak jarak pagar sehingga dapat menyerupai solar.

Minyak jarak pagar bila digunakan secara langsung tanpa melalui proses transesterifikasi digolongkan dalam *Bio-oil* atau *Pure Plant Oil*. *Bio-oil* ini sebagai bahan bakar dari sumber nabati untuk dimanfaatkan secara langsung untuk mensubstitusi dan mengurangi konsumsi solar industri, minyak diesel dan minyak bakar.

Penggunaan pembangkit daya turbin gas berbahan bakar minyak jarak yang merupakan energi alternatif secara umum dianggap sebagai pilihan untuk pengganti bahan bakar fosil. Namun ada aspek-aspek yang harus dipenuhi yaitu : penyediaan bahan baku harus tidak bersinggungan dengan produksi makanan, transportasi dan distribusi produk yang minimal dan energi yang diperlukan untuk memperbaiki ekosistem dari minyak jarak harus dioptimalkan [1].

Aplikasi turbin gas sangat luas dan beragam, diantaranya sebagai mesin penggerak generator listrik, kendaraan darat, kapal laut dan pesawat terbang. Sebagai pembangkit tenaga listrik, turbin gas biasanya dipakai untuk mengisi beban puncak dan beban menengah, bahkan ada pula yang memakai beban rendah. Selain itu mikro turbin gas skala kecil juga dapat digunakan pembangkit

daya di pedesaan. Faktor teknis utama yang menantang program pembangunan turbin gas mikro efek skala kecil : angka Reynolds rendah di bagian aliran *turbomachinery* kental menyebabkan kerugian yang relatif tinggi; jarak ujung relatif tinggi karena keterbatasan toleransi manufaktur dan bantalan; besar perbandingan wilayah dengan volume ruang bakar mengakibatkan kerugian panas tinggi dan perpindahan panas disengaja untuk kompresor ; kerugian sistem yang relatif tinggi tambahan karena tingkat output daya rendah [2].

Konstruksi dan cara kerjanya turbin gas adalah sangat mudah didalam ektras (gambar desain), tetapi kenyataanya bila diwujudkan sangat sukar karena ada hubungannya dengan pemakaian bahan bakar turbin harus hemat.

Turbin gas mempunyai arti yang sangat besar, karena untuk penggerak pesawat terbang dengan daya yang besar harus memakai turbin gas dan sudah tidak bias diganti lagi, sebab ukuran luar dan berat turbin gas tidak bisa disaingi oleh motor bakar torak.

Turbin gas memiliki beberapa kelebihan, yaitu :

1. Instalasi cepat, ukuran sistem, massa dan biaya investasi relatif lebih rendah jika disbanding dengan instalasi turbin uap dan motor diesel.
2. Dalam keadaan dingin dapat distart hingga dapat dibebani penuh dalam waktu yang sangat singkat.
3. Getaran yang dihasilkan jauh lebih kecil dibandingkan pembangkit lainnya.
4. Pelumasan pada turbin gas lebih sederhana, karena pelumasnya praktis tidak berhubungan dengan proses pembakaran, sehingga konsumsi pelumas kecil.
5. Efisiensi mekanis lebih baik.
6. Dapat menggunakan bermacam-macam bahan bakar.
7. Gas buangnya bersih, karena udara yang terikut didalam ruang bakarnya jauh lebih banyak dari kebutuhan proses pembakrannya akibat proses pembakarannya mendekati sempurna.

Disamping kelebihan.kelebihan tersebut gas turbin juga mempunyai kelemahan-kelemahan, diantaranya efisiensi termal yang rendah, degradasi komponen yang terlalu cepat, dan bencana kegagalan sistem. Kesemuanya itu

diakibatkan ketidakstabilan pembakaran yang disebabkan oleh efek kopling dari panas yang dihasilkan oleh ruang bakar tidak tetap dan perubahan tekanan akustik gas yang masuk ke ruang bakar [3].

1.2. PERUMUSAN MASALAH

Proses pembakaran sangat mempengaruhi sistem perputaran dari poros turbin. Jika sistem tidak memiliki tingkat efisiensi dan efektifitas yang baik maka perputaran dari poros turbin tidak akan maksimal. Sehingga perlu dilakukan analisa dalam ruang pembakaran yang meliputi proses pembakaran dan tingkat efisiensinya.

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah :

1. Mengamati proses pembakaran yang terjadi pada ruang pembakaran.
2. Uji pembakaran dengan menggunakan bahan bakar campuran minyak jaran dan diesel
3. Mengetahui simulasi proses pembakaran yang terjadi pada ruang bakar Turbin Gas Mikro Proto X-2.

1.4. BATASAN PENELITIAN

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Proses pembakaran yang terjadi diasumsikan dalam keadaan adiabatic.
2. Pengujian ruang bakar Turbin Gas Mikro Proto X-2 dengan menggunakan bahan bakar campuran minyak jaran dan solar.

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang dilakukan penulis meliputi :

1. Menentukan topik penelitian.
2. Melakukan studi literature yang berkaitan.
3. Perencanaan dan pengumpulan data-data pendukung penelitian.
4. Melaksanakan tahap pengumpulan data.
5. Melakukan perhitungan performa terhadap objek penelitian sesuai dengan batasan masalah yang telah ditentukan.
6. Melakukan analisa terhadap hasil perhitungan.
7. Membuat kesimpulan.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Pembahasan penelitian ini terdiri dari beberapa bab dengan sistematika sebagai berikut :

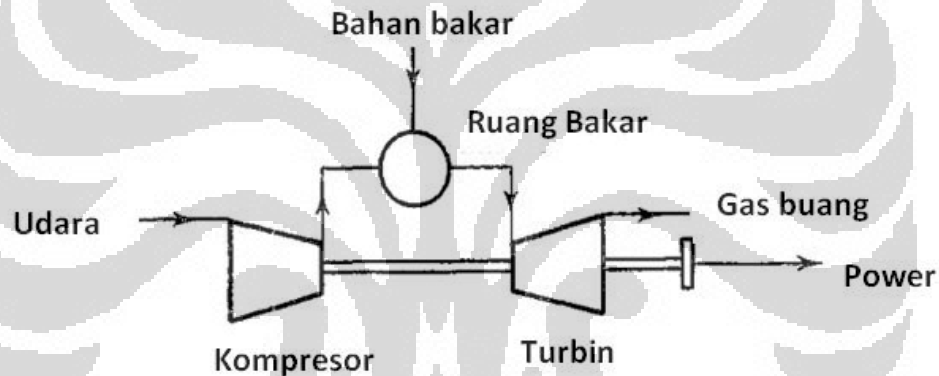
- a. BAB I yaitu pendahuluan yang menjelaskan tentang latar belakang penelitian, permasalahan, tujuan dari penelitian, batasan penelitian, metodologi penelitian, dan sistematika penelitian.
- b. BAB II dasar teori yang menjadi landasan dilakukannya penelitian yang meliputi turbin gas dan ruang bakar turbin gas.
- c. BAB III merupakan metode penelitian yang dimulai dari pengumpulan data dilanjutkan dengan pengolahan data.
- d. BAB IV bahasan mengenai pengumpulan dan pengolahan data dari hasil pengujian.
- e. BAB V kesimpulan dari hasil penelitian

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 TURBIN GAS

Turbin gas merupakan peralatan pembangkit tenaga dengan memanfaatkan gas sebagai fluida untuk memutar turbin dengan pembakaran eksternal. Di dalam turbin gas energi kinetik di konversikan menjadi energi mekanik melalui udara bertekanan yang memutar roda turbin sehingga menghasilkan daya. Sistem turbin gas yang paling sederhana terdiri dari tiga komponen yaitu kompresor, ruang bakar dan turbin gas [4].



Gambar 2.1 Sekama sistem gas turbin sederhana [5]

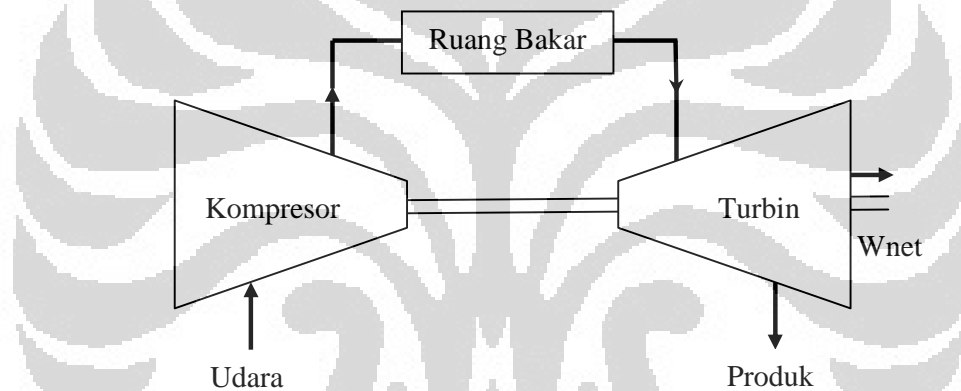
Udara masuk kedalam kompresor melalui saluran masuk udara (*inlet*). Kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, sehingga temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara bertekanan ini masuk kedalam ruang bakar. Di dalam ruang bakar dilakukan proses pembakaran dengan cara mencampurkan udara bertekanan dan bahan bakar. Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. Gas hasil pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan

aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut digunakan untuk memutar kompresornya sendiri dan memutar beban lainnya seperti generator listrik, dll. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (*exhaust*).

2.1.1 Klasifikasi Turbin Gas

Turbin gas dapat dibedakan berdasarkan siklusnya, konstruksi poros dan lainnya. Menurut siklusnya turbin gas terdiri dari:

1. Turbin Gas Siklus Terbuka



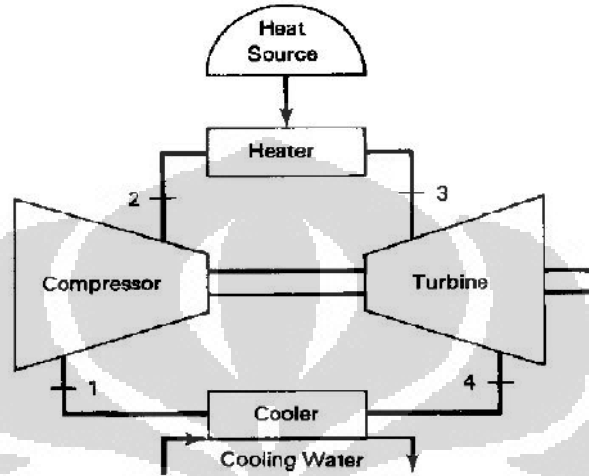
Gambar 2.2 Skema Turbin gas siklus terbuka

(<http://www.muellerenvironmental.com/documents/GER3567H.pdf>, hal 3. Diunduh 12 November 2012)

Udara segar pada kondisi ambien (atmosfir) disedot masuk ke dalam kompresor, dimana terjadi peningkatan suhu dan tekanan . Udara bertekanan tinggi diproses di dalam ruang pembakaran, dimana bahan bakar dibakar pada tekanan konstan. Gas temperatur tinggi yang dihasilkan kemudian masuk turbin, di mana gas temperatur tinggi dan bahan bakar dibakar pada tekanan atmosfer sehingga menghasilkan tenaga.

Gas buang yang dihasilkan turbin dibuang keluar (tidak disirkulasikan kembali), menyebabkan siklus harus diklasifikasikan sebagai siklus terbuka.

2. Turbin gas siklus Tertutup



Gambar 2.3 Skema turbin gas siklus tertutup

(<http://www.muellerenvironmental.com/documents/GER3567H.pdf>, hal 4. Diunduh 12 November 2012)

Cara kerja turbin gas siklus tertutup, secara keseluruhan hampir sama dengan siklus terbuka, yaitu di sini proses kompresi dan ekspansi tetap sama, akan tetapi proses pembakaran digantikan oleh masukan kalor tekanan konstan dari sumber eksternal, dan proses pembuangan digantikan oleh pembuangan kalor tekanan konstan pada suhu ambien.

Berdasarkan konstruksi porosnya Dalam industri turbin gas umumnya diklasifikasikan dalam dua jenis yaitu :

1. Turbin Gas Poros Tunggal (*Single Shaft*)

Turbin jenis ini digunakan untuk menggerakkan generator listrik yang menghasilkan energi listrik untuk keperluan proses di industri.

2. Turbin Gas Poros Ganda (*Double Shaft*)

Turbin jenis ini merupakan turbin gas yang terdiri dari turbin bertekanan tinggi dan turbin bertekanan rendah, dimana turbin gas ini digunakan untuk menggerakkan beban yang berubah seperti kompresor pada unit proses.

2.1.2. Siklus-Siklus Turbin Gas

Tiga siklus turbin gas yang dikenal secara umum yaitu:

1. Siklus Ericson

Merupakan siklus mesin kalor yang dapat balik (*reversible*) yang terdiri dari dua proses isotermis dapat balik (*reversible isothermic*) dan dua proses isobarik dapat balik (*reversible isobaric*). Proses perpindahan panas pada proses isobarik berlangsung di dalam komponen siklus internal (*regenerator*), dimana efisiensi termalnya adalah :

$$\eta_{th} = 1 - T_l/T_h \quad (2.1)$$

dimana :

T_l = temperatur buang

T_h = temperatur panas.

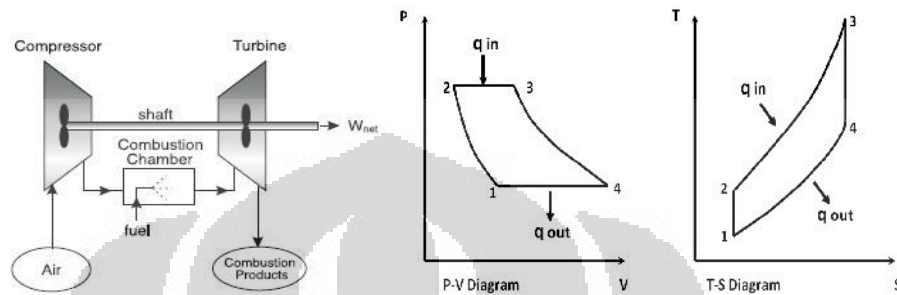
2. Siklus Stirling

Merupakan siklus mesin kalor dapat balik, yang terdiri dari dua proses isotermis dapat balik (*isothermal reversible*) dengan volume tetap (*isokhorik*). Efisiensi termalnya sama dengan efisiensi termal pada siklus Ericson.

3. Siklus Brayton

Siklus ini merupakan siklus daya termodinamika ideal untuk turbin gas, sehingga saat ini siklus ini yang sangat populer digunakan oleh pembuat mesin *turbine* atau *manufacturer* dalam analisa untuk *performance upgrading*.

Siklus Brayton ini terdiri dari proses kompresi isentropik yang diakhiri dengan proses pelepasan panas pada tekanan konstan. Pada siklus Brayton tiap-tiap keadaan proses dapat dianalisa secara berikut:



Gambar 2.4 Siklus Bryton

(<http://noerpamoengkas.wordpress.com/2009/03/31/siklus-brayton-ideal/>. Diunduh

12 November 2012)

- Proses 1—2, (kompresi isotropik); Kerja yang dibutuhkan oleh kompresor
- Proses 2—3, (tekanan konstan) dalam pemasukan bahan bakar
- Proses 3—4, (ekspansi); Daya yang dibutuhkan turbin
- Proses 4—1, (tekan konstan); Jumlah kalor yang dilepas

Siklus ini terdiri dari dua proses adiabatik maupun balik menjadi isotropik dan dua proses tekanan tetap. Udara di atmosfer dikompresikan oleh kompresor sehingga terjadi perubahan tekanan dari P_1 menjadi P_2 dan kemudian mengalir ke ruang bakar, di dalam ruang bakar di masukkan bahan bakar sehingga dengan adanya temperatur ruang bakar maka terjadilah pembakaran.

2.2 RUANG BAKAR

Ruang bakar pada turbin gas adalah perangkat yang merupakan tempat berlangsungnya serangkaian proses *physicochemistry*, antara lain : berlangsung dinamika gas nonstasioner, pembakaran turbulen dari berbagai jenis bahan bakar, panas dan pertukaran massa, dan pembentukan oksida NO_x , CO dan lain-lain [11 (Lysenkoa)]

Proses yang terjadi pada bagian ini yaitu pembakaran antara bahan bakar dengan fluida kerja berupa udara bertekanan tinggi. Dalam proses ini energi panas diubah menjadi energi kinetik dengan mengarahkan udara panas ke *transition pieces* yang juga berfungsi sebagai *nozzle* yang kemudian energi kinetik ini akan diproses oleh turbin.

Ruang bakar terdiri dari beberapa komponen diantaranya:

1. *Combustion Chamber*

Yaitu tempat terjadinya pencampuran antara udara yang telah dikompresi dengan bahan bakar yang disemburkan oleh *nozzle*.

2. *Combustion Liners*

Terdapat didalam *combustion chamber* yang memiliki fungsi sebagai tempat berlangsungnya pembakaran.

3. *Cross Fire Tubes*

Komponen yang melapisi sebagian *combustion liner* dan komponen ini memiliki lubang-lubang untuk meratakan nyala api pada ruang combustion chamber.

4. *Swirler*

Yaitu komponen yang berfungsi sebagai pemilah antara bahan bakar dan udara, bahan bakar disemburkan melalui bagian tengah *swirler* (oleh *nozzle*) dan udara mengalir pada bagian sisi *swirler*.

5. *Fuel Nozzle*

Memiliki fungsi sebagai penyuplai bahan bakar ke dalam *combustion liner*.

6. *Ignitor*

Komponen yang memercikkan api sebagai proses awal pembakaran di dalam *combustion chamber* agar campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar.

7. *Transition Pieces*

Terletak pada bagian akhir ruang bakar. Bagian ini memiliki fungsi seperti *nozzle* yaitu mengarahkan gas hasil pembakaran ke dalam rumah turbin.

2.3 UNJUK KERJA RUANG BAKAR

Pressure drop pada ruang bakar dapat dihitung dengan rumusan sebagai berikut :

$$\Delta P_{cc} = \frac{P_2 - P_3}{P_2} \times 100\% \quad (2.2)$$

Dimana :

ΔP_{cc} = pressure loss

P_2 = tekanan masuk ruang bakar (bar)

P_3 = tekanan keluar ruang bakar (bar)

Energi pembakaran dapat dihitung dengan perumusan :

$$E = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

$$E_{pembakaran} = (m_a + m_f) \cdot c_{pg} \cdot (T_3 - T_2) \quad (2.4)$$

dimana : m_f = laju massa bahan bakar (kg/s)

m_a = laju massa udara (kg/s)

c_{pg} = kalor spesifik (J/kg.°C)

T_2 = temperatur masuk ruang bakar (°C)

T_3 = temperatur keluar ruang bakar (°C)

Perumusan lain untuk perhitungan energy pembakaran berdasarkan nilai efisiensi ruang pembakaran adalah :

$$E_{pembakaran} = m_f \cdot \eta_{cc} \cdot LHV \quad (2.5)$$

Dimana :

m_f = laju massa bahan bakar (kg/s)

η_{cc} = efisiensi ruang bakar (%)

LHV = nilai kalor bawah bahan bakar (J/kg.K)

Rasio antara massa udara dengan massa bahan bakar (A/F)

$$A/F = \frac{m_a}{m_f} \quad (2.6)$$

2.4 PEMBAKARAN

2.4.1 Hukum 1 Termodinamika

Hukum pertama termodinamika atau hukum kekekalan energy dapat diterapkan baik untuk *reacting system* ataupun *nonreacting system*. Pembakaran dikategorikan kedalam *reacting system*. Dalam pembakaran pada kondisi awal (V_1, T_1) system berisi bahan bakar dan udara sebagai reaktan (R), ketika proses pembakaran terjadi maka reaksi pembakaran menghasilkan product (P) pada kondisi akhir (V_2, T_2). Hukum pertama termodinamika menunjukkan bahwa panas yang dilepas oleh reaksi kimia haruslah sama dengan perubahan internal energy (U) pada kondisi awal dan kondisi akhir. Untuk memenuhi hukum kesetimbangan energy maka panas yang dilepas oleh reaksi kimia dievaluasi pada kondisi :

$$U_{P2} - U_{R1} = (U_{P2} - U_{P0}) + (U_{P0} - U_{R0}) + (U_{R0} - U_{R1}) \quad (2.7)$$

U merupakan total energy dan notasi "0" menunjukkan referensi keadaan. Perubahan energy dalam digabungkan dengan membawa reaktan dari kondisi 1 ke kondisi 2 dan produk dari kondisi 0 ke kondisi 2 dapat dinyatakan dalam istilah temperature dengan asumsi nilai rata-rata untuk C_v adalah:

$$(U_{R0} - U_{R1}) = \sum_i^{all\ reactant} m_i C_{vi} (T_0 - T_1) \quad (2.8)$$

2.4.2 Entalpy Pembakaran

Pembentukan entalpi di definisikan sebagai kenaikan entalpi ketika sebuah nyawa dibentuk dari elemen-elemen penyusunnya dalam bentuk-bentuk alaminya pada standar temperature dan tekanan. Jadi reaksi entalpi bisa dihitung dengan menggunakan pembentukan entalpi.

$$\Delta h_{pembakaran} = h_{product} - h_{reactant} \quad (2.9)$$

2.4.3 Ekuivalen Rasio

Ekuivalen rasio digunakan dalam penghitungan pembakaran untuk mendefinisikan kekuatan sebuah campuran. Pembakaran dengan jumlah udara

kurang dari persyaratan udara stoikiometri adalah bahan bakar kaya, dan pembakaran dengan udara lebih dari persyaratan udara stoikiometri disebut pembakaran miskin. Ekuivalen rasio didefinisikan sebagai:

$$Q = \frac{(A/F)_{st}}{(A/F)_{actual}} \quad (2.10)$$

2.4.4 Suhu Nyala Adiabatik

Suhu nyala adiabatik adalah suhu maksimum nyala bahan bakar yang terjadi tanpa adanya perpindahan panas ke sekelilingnya dan tidak ada kerja dari luar yang dilakukan.

Perhitungan suhu nyala adiabatik didasarkan atas persentase massa dari kandungan carbon, hidrogen, oksigen dan nitrogen.

Berdasarkan Yunus A. Cengel (*Thermodynamic an engineering approach*) persamaan suhu nyala adiabatic diturunkan dari persamaan :

$$Q - W = \sum N_p (\bar{h}^\circ_f + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p - \sum N_r (\bar{h}^\circ_f + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r \quad (2.11)$$

$$Q - W = H_{prod} - H_{react} \quad (2.12)$$

Dimana :

Q = Heat transfer ke sistem lingkungan

W = Work energy transfer yang disebabkan oleh perbedaan temperatur

N_p = Molar product

N_r = Molar reaktan

\bar{h}°_f = Enthalpy pembentukan [kJ/kmol]

\bar{h} = Enthalpy pada temperature adiabatic [kJ/kmol]

\bar{h}° = Enthalpy pada temperature tertentu [kJ/kmol]

Karena tidak ada heat loss dan tidak ada kerja ke lingkungan sehingga $Q = 0$ dan $W = 0$, maka nilai enthalpy adalah :

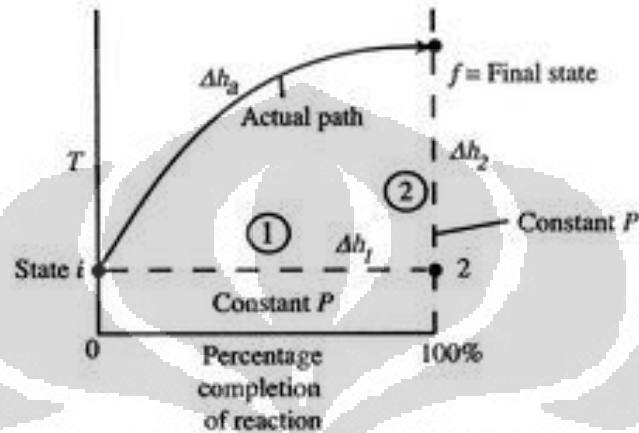
$$H_{prod} = H_{react} \quad (2.13)$$

H_{prod} = enthalpy product [kJ/kmol]

H_{react} = enthalpy reactant [kJ/kmol]

Perhitungan suhu nyala adiabatik terbagi menjadi dua jenis yaitu konstan volume adiabatik temperatur dan konstan pressure adiabatik temperatur.

Jika dilihat dari siklus brayton, tekanan pada combustion chamber diasumsikan dalam keadaan konstan, maka persamaan temperatur nyala adiabatik adalah sebagai berikut.



Gambar 2.5 Schematic of adiabatic flame temperature.

(<http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node111.html> diunduh 12

November 2012)

Persamaan untuk suhu adiabatik dengan tekanan konstan adalah :

$$\Delta h_1 + \Delta h_2 = \Delta h_{adiabatik} = 0 \quad (2.14)$$

$$H_{Product 2} + H_{Reactant 1} = 0 \quad (2.15)$$

$$-q = (\bar{h}^{\circ}_f)_{unit\ massa} \quad (2.16)$$

$$C_{p, avg} (T_f - T_2) = q_1 \quad (2.17)$$

$$(T_f - T_2) = \frac{q_1}{C_{p, avg}} = \frac{(\bar{h}^{\circ}_f)_{unit\ massa}}{C_{p, avg}} \quad (2.18)$$

Dimana :

Δh = Perubahan entalpi

q = Kalor reaksi

C_p = Kapasitas panas

(\bar{h}°_f) = Kalor pembentukan

T_f = Suhu nyala adiabatik

Dari hukum thermodinamika 1 :

$$H_{P2} - H_{R1} = (H_{P2} - H_{P0}) + (H_{P0} - H_{R0}) + (H_{R0} - H_{R1}) \quad (2.19)$$

Karena tekanan konstan maka :

$$H_{P2} - H_{R1} = 0 \quad (2.20)$$

Karena reaktan (bahan bakar dan udara) tidak mengalami kenaikan suhu sebelum dibakar maka :

$$(H_{R0} - H_{R1}) = 0 \quad (2.21)$$

Dimana untuk $(H_{P0} - H_{R0})$ nilainya adalah :

$$(H_{P0} - H_{R0}) = \Delta h \quad (2.22)$$

Maka persamaannya menjadi :

$$H_{P2} - H_{R1} = (H_{P2} - H_{P0}) + (H_{P0} - H_{R0}) + (H_{R0} - H_{R1}) \quad (2.23)$$

$$0 = (H_{P2} - H_{P0}) + \Delta h + 0 \quad (2.24)$$

Sehingga

$$-\Delta h = \sum_k^{all\ product} m_k C_{pk} (T_2 - T_0) \quad (2.25)$$

Dimana nilai C_{pk} untuk gas :

$$C_{pk} = a + bT_{Cp} + cT_{Cp}^2 + dT_{Cp}^3 \quad (2.26)$$

Untuk nilai a,b,c dan d dapat dilihat dari tabel A2 [9].

Dengan temperature rata-rata panas spesifik (T_{Cp}) yaitu :

$$T_{Cp} = \frac{T_f + T_0}{2} = 0 \quad (2.27)$$

2.5 MINYAK JARAK PAGAR

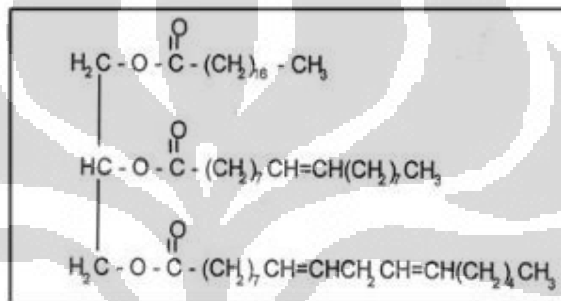
Minyak jarak pagar termasuk dalam golongan minyak lemak atau *fatty oil*. Minyak jarak pagar merupakan trigliserida dari asam risinoleat. Minyak jarak pagar umumnya tidak berwarna, namun banyak dijumpai minyak jarak pagar yang berwarna bening kekuningan. Minyak jarak pagar mempunyai rasa asam dan dapat dibedakan dengan trigliserida lainnya karena bobot jenis, kekentalan dan bilangan asam yang nilainya relative tinggi.

Karakteristik minyak jarak pagar perlu dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat fisiko kimia minyak jarak pagar dengan cara kempa menggunaan mesin hidrolik (tekanan 20 ton).

Tabel 2.1 karakteristik sifat fisika kimia minyak jarak pagar

Parameter fisik	Nilai
Warna	kuning
Massa Jenis g/cm ³	0.9157
Flash Point , °C	270
Pour Point , °C	0
Viskositas Kinematikt 40°C, cSt	34.17
Viskositas Kinematikt 100°C, cSt	7.95
Viskositas Indeks	217
Kadar air , %	0.07
Indeks bias 25°C	1.4655

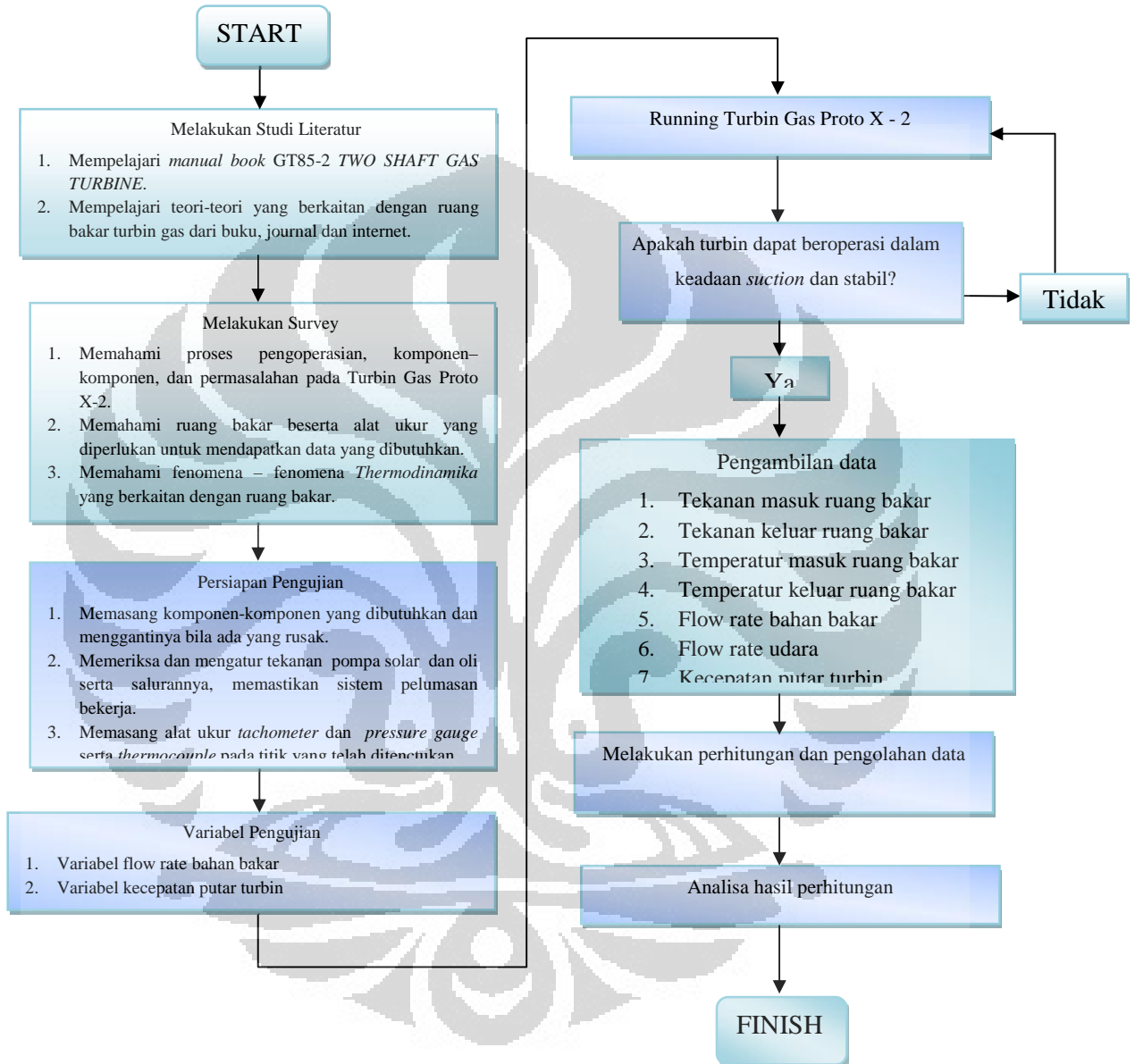
Rumus struktur kimia dari biji minyak jarak pagar adalah :



Gambar 2.6 Struktur kimia minyak jarak pagar
 Sumber : Bio-Technology Reasearch Center ITB,2005

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. DIAGRAM ALIR PENELITIAN



Gambar 3.1 diagram alir penelitian

3.2 PERALATAN DAN PERLENGKAPAN PENGUJIAN

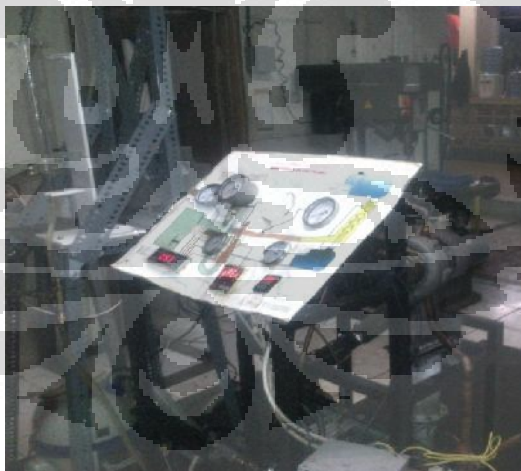
Alat-alat dan perlengkapan yang diperlukan dalam proses pengujian ruang bakar turbin gas micro proto X-2 adalah :

a. Turbin Gas Bioenergi Mikro Proto X-2

Dalam pengujian ruang bakar turbin gas, pengujian dilakukan dengan menggunakan turbin gas bioenergi mikro proto X-2



Gambar 3.2 Turbin gas Bioenergi Micro Proto X-2 tampak depan



Gambar 3.3 Turbin Gas Bioenergi Micro Proto X-2 tampak belakang beserta panel

Turbin gas bioenergi mikro proto X-2 terdiri dari *turbocharger*, Garret TA31, ruang bakar dan annulus. Annulus berfungsi menyuplai udara dari blower dan kompresor saat proses *start up*.

b. Pompa bahan bakar

Pompa bahan bakar merupakan alat yang berguna untuk menyuplai bahan bakar ke dalam ruang bakar.

c. Pompa oli

Pompa pada oli berguna untuk menyuplai oli menuju turbin yang berguna untuk melumasi serta mendinginkan sistem pada turbin.



Gambar 3.4 Pompa oli dan motor listrik

d. *Pressure Gauge*

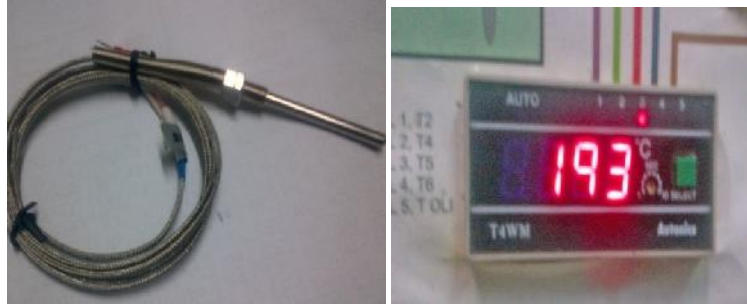
Pressure gauge digunakan untuk mengukur tekanan pada setiap titik yang telah ditentukan. Range *pressure gauge* yang digunakan adalah 0 – 400 mbar



Gambar 3.5 *Pressure gauge*

e. *Thermocouple*

Thermocouple adalah sensor suhu yang digunakan untuk mengubah perbedaan suhu dalam benda menjadi perubahan tegangan listrik (voltase) yang kemudian nilai suhu di tampilkan ke dalam display berbentuk digital temperatur. *Thermocouple* yang digunakan adalah tipe K karena range yang di berikan yaitu $-200\text{ }^{\circ}\text{C} - 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$



Gambar 3.6 *Thermocouple tipe K (kiri) dan display temperature digital (kanan)*

f. *Tachometer*

Tachometer digunakan untuk mengukur kecepatan putar turbin, tachometer yang digunakan adalah tachometer non kontak omron.



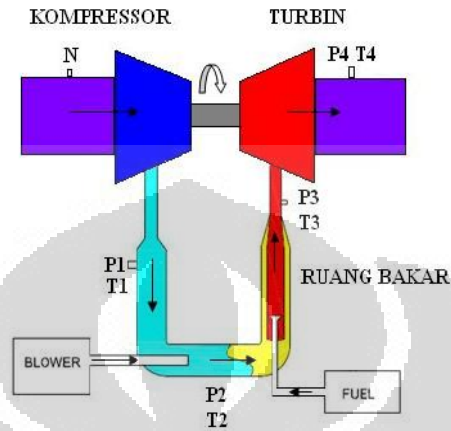
Gambar 3.7 *Tachometer non kontak (kanan) yang dibandingkan dengan tachometer (kiri) pada putaran turbin yang sama*



Gambar 3.8 *Posisi pressure gauge, digital temperature, dan tachometer pada panel*

3.3 SKEMA PENGUJIAN

Berikut ini adalah skema pengujian dalam pengoperasian turbin gas bioenergi mikro proto X-2 :



Gambar 3.9 Skema pengujian turbin gas micro

3.4 RUANG BAKAR PADA TURBIN GAS

Ruang bakar pada turbin gas memiliki beberapa komponen, urutannya adalah sebagai berikut :

- a. Saluran masuk ruang bakar

Saluran masuk ruang bakar merupakan tempat penyalur bahan bakar dan udara serta tempat terjadinya pemercikan untuk proses pembakaran. Pada saluran masuk ruang bakar terdapat *swirler*, *nozzle* dan busi. Bahan bakar disemburkan melalui *nozzle*, sementara udara mengalir melalui sisi samping *swirler*.



Gambar 3.10 Saluran masuk ruang bakar tampak samping (kiri) dan atas (kanan)

b. Swirler

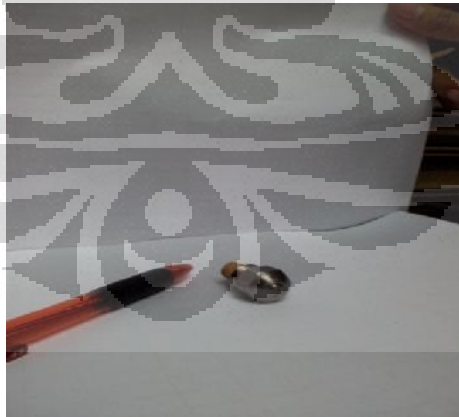
Swirler merupakan tempat terjadinya proses penyemburan api, *swirler* juga merupakan wadah untuk spiritus yang akan dipercik dengan menggunakan busi dimana hal ini merupakan sebagai proses awal terjadinya pemanasan di ruang bakar. Pada *swirler* terdapat *nozzle* yang merupakan bagian penyembur bahan bakar.



Gambar 3.11 *Swirler* pada ruang bakar tampak samping (kiri) dan atas (kanan)

c. Nozzle

Nozzle yang digunakan untuk ruang bakar pada *swirler* adalah *nozzle* tipe S dengan flow rate 0.75 GPH sudut 45°. *Nozzle* ini dipasang pada bagian dalam *swirler*.



Gambar 3.12 contoh *Nozzle* yang digunakan pada *swirler*



Gambar 3.13 *Proses uji nyala nozzle yang terdapat pada swirler*

d. Busi

Busi merupakan pemercik yang berguna untuk membuat spiritus yang terdapat di dalam *swirler* terbakar pada proses awal pembakaran.



Gambar 3.14 *Busi pada ruang bakar*



Gambar 3.15 *Proses pemercikan nyala busi pada swirler*

e. *Combustion liner*

Combustion liner adalah tempat terjadinya pembakaran dan merupakan pengarah agar api dapat masuk ke dalam rumah turbin.



Gambar 3.16 *Combustion liner* tampak samping



Gambar 3.17 *Combustion liner* tampak atas



Gambar 3.18 *Proses bongkar pasang ruang bakar*

3.5 BAHAN BAKAR

Bahan bakar yang digunakan adalah campuran minyak jarak pagar dengan solar dari Shell. Campuran minyak jarak pagar yang digunakan sebesar 2.5%, 5%, 7.5% dan 10%. Bahan bakar ini ditampung dengan tangki kemudian dialirkan melalui tabung ukur dengan cara dihisap oleh pompa bahan bakar. Kemudian bahan bakar masuk ke dalam ruang bakar untuk proses selanjutnya yaitu proses pembakaran.

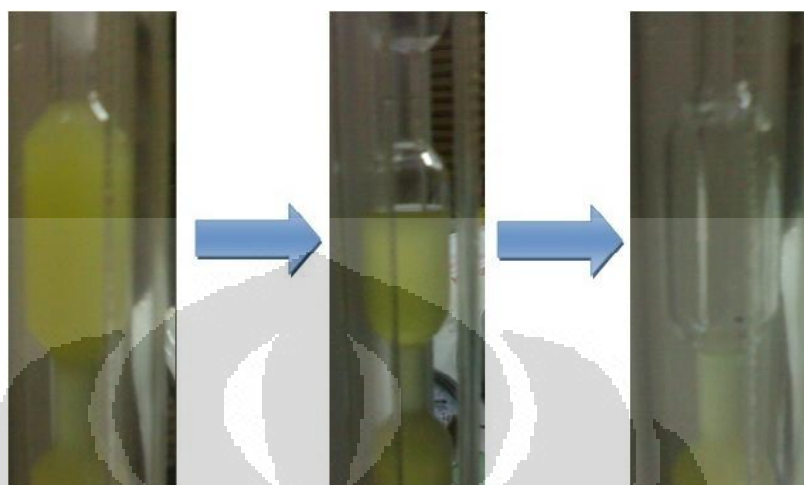


Gambar 3.19 campuran minyak jarak dan diesel dari 2.5%, 5%, 7.5% dan 10%



Gambar 3.20 Tangki serta tabung ukur bahan bakar dalam keadaan kosong (kiri) dan terisi (kanan)

Debit bahan bakar dapat diukur pada tabung ukur berukuran 16 [mL] dengan menggunakan stopwatch.



Gambar 3.21 Proses pengukuran debit aliran bahan bakar dengan tabung 16 [mL]

3.6 KONDISI PENGUJIAN

Data pengujian yang dibutuhkan dalam analisa ruang bakar yaitu :

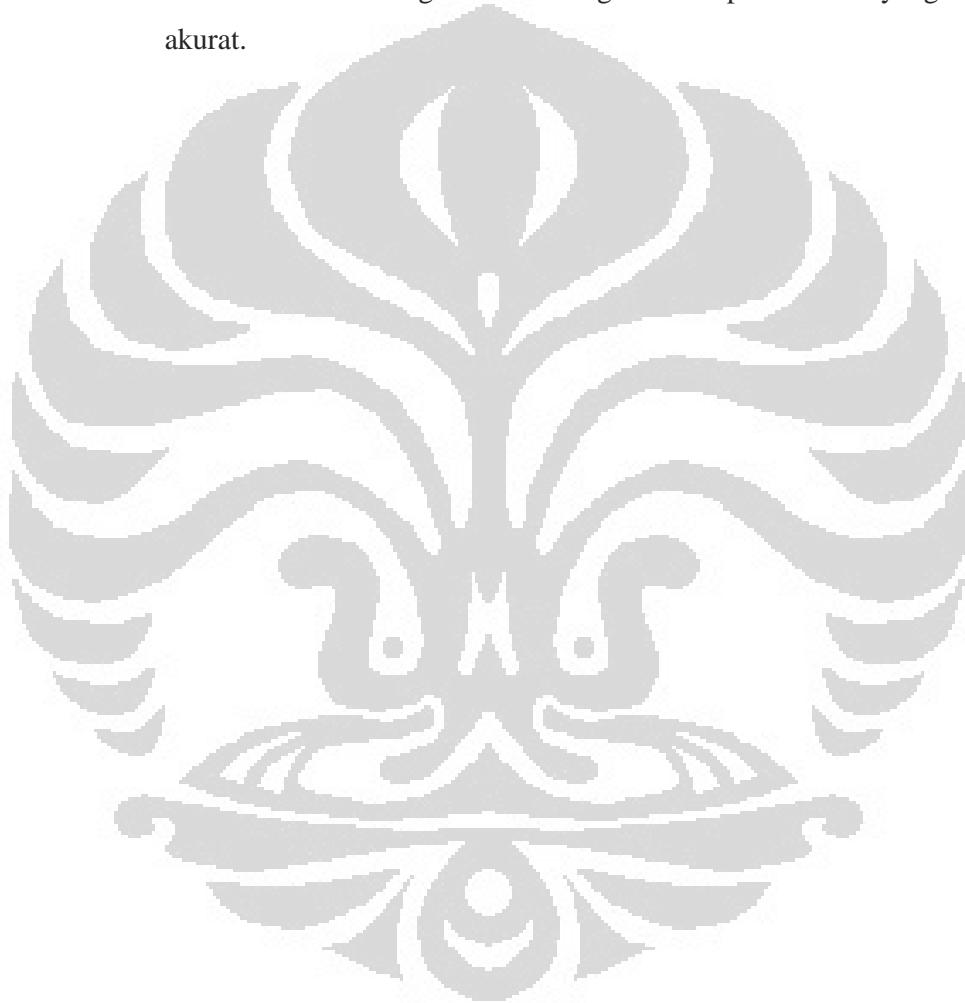
1. Tekanan *inlet* ruang bakar
2. Tekanan *outlet* ruang bakar
3. Temperatur *inlet* ruang bakar
4. Temperatur *outlet* ruang bakar
5. Debit aliran bahan bakar
6. Debit aliran udara
7. Putaran turbin

3.7 PROSES PENGUJIAN

Berikut ini adalah tahapan-tahapan dalam melakukan pengujian ruang bakar pada turbin gas :

1. Memberikan spritus ke dalam swirler
2. Memercik busi untuk membakar spritus sebagai proses awal pembakaran.
3. Tunggu hingga temperatur outlet ruang bakar mencapai $\pm 140^{\circ}\text{C}$ kemudian nyalakan blower dan pompa bahan bakar sehingga turbin dapat bekerja dengan kondisi belum suction

4. Atur katup bahan bakar hingga suhu turbin mencapai $\pm 450^{\circ}\text{C}$ dan putaran turbin diatas 17000 [rpm], sehingga kondisi dari *compressor* mencapai *suction* dan mengakibatkan turbin gas dapat bekerja secara maksimal
5. Setelah mencapai suction dan putaran stabil maka melakukan pencatatan temperature, pressure gauge, debit bahan bakar, putaran dan debit udara untuk segera di catet agar mendapatkan data yang cukup akurat.



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 DATA HASIL EKSPERIMEN

Data hasil eksperimen adalah data yang terkait dengan kontrol saat pengujian dan data-data yang diperlukan untuk melakukan perhitungan. N (frekuensi putar impeller) dan T3 (*turbine inlet temperatur*) digunakan sebagai kontrol saat melakukan pengujian.

Tabel 4.1 percobaan menggunakan minyak jarak 2.5%

No.	Fuel (t)	N	T1	P1	T2	P2	T3	P3	T4
	[s]	[rpm]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]
1	20.03	32500.8	55	112	59	95	430	90	367
2	19.98	33490.3	57	118	63	105	446	100	370
3	19.94	33153.8	55	112	60	103	439	100	369
4	19.8	33747.9	56	118	60	105	448	100	369
5	19.5	33867.7	56	112	61	105	447	100	375
6	19.48	34194.5	56	118	60	106	454	100	373
7	15.6	38220.3	67	140	75	135	502	125	427
8	15.59	38413	68	140	77	132	508	125	431
9	15.54	38248.8	67	140	75	130	503	125	427
10	15.21	38518	66	142	75	133	504	125	424

Tabel 4.2 percobaan menggunakan minyak jarak 5%

No.	Fuel (t)	N	T1	P1	T2	P2	T3	P3	T4
	[s]	[rpm]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]
1	20.59	32026.7	56	108	60	90	439	90	364
2	20.1	34272.7	58	110	61	100	450	98	373
3	20.04	34009.4	57	114	61	102	447	100	372
4	19.93	34631.9	59	118	62	105	459	100	377
5	19.56	33925.5	58	112	62	105	449	100	377
6	16.49	35896.6	63	128	68	115	475	110	394
7	16	36443.2	69	130	75	120	485	110	403
8	15.13	38507.1	72	138	79	130	512	120	438
9	15.09	38319.4	70	138	77	130	512	120	431
10	14.86	38510.2	74	142	81	132	514	125	442

Tabel 4.3 percobaan menggunakan minyak jarak 7.5%

No.	Fuel (t)	N [rpm]	T1 [C]	P1 [mbar]	T2 [C]	P2 [mbar]	T3 [C]	P3 [mbar]	T4 [C]
	[s]								
1	20.5	32907.9	57	110	64	95	430	90	372
2	19.74	34111.6	58	110	63	100	450	95	382
3	19.17	34859.4	60	118	65	110	468	100	392
4	18.72	36170.7	63	124	67	115	477	110	407
5	18.32	36261.1	64	126	70	115	481	110	419
6	17.56	36161.1	62	126	68	120	483	110	400
7	17.19	36173.6	61	128	66	120	481	110	392
8	16.34	37587.7	65	134	73	125	498	120	412
9	14.9	38702.8	72	142	81	135	516	128	442
10	14.8	38319.4	69	140	77	130	510	120	426

Tabel 4.4 percobaan menggunakan minyak jarak 10%

No.	Fuel (t)	N [rpm]	T1 [C]	P1 [mbar]	T2 [C]	P2 [mbar]	T3 [C]	P3 [mbar]	T4 [C]
	[s]								
1	20.2	33242	59	108	63	100	453	95	381
2	19.93	33637.3	58	114	62	100	452	95	382
3	19.55	34366.4	61	114	65	105	458	100	387
4	19.19	34687.4	62	120	68	105	456	100	395
5	18.8	34937.9	60	120	65	110	468	105	385
6	17.5	35094.4	60	126	65	115	457	110	387
7	16.94	37491.3	65	132	71	120	509	115	436
8	15.88	37489.3	65	136	71	130	504	120	422
9	14.9	38604.7	70	140	77	135	520	125	440
10	14.84	38795.2	71	140	78	135	520	125	443

Keterangan :

N = Putaran turbin

T1 = Temperatur outlet kompresor

T2 = Temperatur inlet ruang bakar

T3 = Temperature inlet turbin

T4 = Temperature outlet turbin

P1 = Pressure outlet kompresor

P2 = Pressure inlet ruang bakar

P3 = Pressure outlet ruang bakar

4.2 PENGOLAHAN DATA HASIL EKSPERIMEN

Variabel – variabel pada pengolahan data hasil eksperimen merupakan variabel – variabel yang perlu diketahui untuk memberi gambaran unjuk kerja dari

pembakaran pada ruang bakar turbin gas. AFR adalah variabel yang menunjukkan rasio udara: bahan bakar. AFR perlu didapatkan untuk mengetahui kemampuan kompresor mensuplai udara terhadap bahan bakar di ruang bakar. P1/P0 adalah rasio tekanan dari kompresor. P3/P1 adalah rasio tekanan *outlet* ruang bakar dengan tekanan *outlet* kompresor. P3/P2 adalah rasio tekanan *outlet* ruang bakar dengan tekanan *inlet* ruang bakar.

Persamaan untuk mendapatkan nilai mass flow bahan bakar adalah

$$\dot{m}_{fuel} = fuel\ flow\ rate \times massa\ jenis\ fuel \quad \left[\frac{g}{s} \right] \quad (4.1)$$

Nilai massa jenis fuel dari campuran minyak jarak 2.5% dengan diesel adalah 0.8344 g/ml. Massa jenis fuel dari campuran minyak jarak 5% dengan diesel adalah 0.8360 g/ml. Massa jenis fuel dari campuran minyak jarak 7.5% dengan diesel adalah 0.8461 g/ml. Massa jenis fuel dari campuran minyak jarak 10% dengan diesel adalah 0.8531 g/ml.

Persamaan untuk mendapatkan mass flow udara adalah

$$\dot{m}_{udara} = \frac{massa\ jenis\ udara \times laju\ massa\ udara}{60s} \quad \frac{kg}{s} \quad (4.2)$$

Nilai massa jenis udara pada temperatur udara masuk ruang bakar (T_2) berdasarkan [9] tabel A-17E dengan menggunakan interpolasi. Nilai mass flow udara dan bahan bakar kemudian digunakan untuk mengetahui AFR.

$$AFR = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{fuel}} \quad (4.3)$$

Persamaan untuk mendapatkan rasio tekanan adalah

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{(1\ bar + tekanan\ output\ kompresor)}{1\ bar} \quad (4.4)$$

Tabel 4.5 Pengolahan Data minyak jarak 2.5%

No.	\dot{m} (pxQ)	\dot{m} air	N	AFR	P3/P1	P3/P2	P1/P0
	[kg/s]	[kg/s]	[rpm]	(air/fuel)			
1	0.6665202	76.67	32500.8	121.340	0.803571	0.947368	1.112
2	0.6681882	78.33	33490.3	122.109	0.847458	0.952381	1.118
3	0.6695286	75	33153.8	117.799	0.892857	0.970874	1.112
4	0.6742626	76.67	33747.9	119.572	0.847458	0.952381	1.118
5	0.6846359	78.33	33867.7	119.931	0.892857	0.952381	1.112
6	0.6853388	78.33	34194.5	120.197	0.847458	0.943396	1.118

7	0.8557949	85	38220.3	99.492	0.892857	0.925926	1.14
8	0.8563438	85	38413	98.763	0.892857	0.94697	1.14
9	0.8590991	83.33	38248.8	97.166	0.892857	0.961538	1.14
10	0.8777383	85	38518	97.004	0.880282	0.93985	1.142

Tabel 4.6 Pengolahan Data minyak jarak 5%

No.	\dot{m} (pxQ)	\dot{m} air	N	AFR	P3/P1	P3/P2	P1/P0
	[kg/s]	[kg/s]	[rpm]	(air/fuel)			
1	0.6496	0.0806	32026.7	124.104	0.833333	1	1.108
2	0.6655	0.0821	34272.7	123.384	0.890909	0.98	1.11
3	0.6675	0.0821	34009.4	123.016	0.877193	0.980392	1.114
4	0.6711	0.0801	34631.9	119.361	0.847458	0.952381	1.118
5	0.6838	0.0801	33925.5	117.145	0.892857	0.952381	1.112
6	0.8112	0.0786	35896.6	96.878	0.859375	0.956522	1.128
7	0.836	0.0818	36443.2	97.853	0.846154	0.916667	1.13
8	0.8754	0.0840	38507.1	95.963	0.869565	0.923077	1.138
9	0.8864	0.0829	38319.4	93.542	0.869565	0.923077	1.138
10	0.9001	0.0867	38510.2	96.338	0.880282	0.94697	1.142

Tabel 4.7 Pengolahan Data minyak jarak 7.5%

No.	\dot{m} (pxQ)	\dot{m} air	N	AFR	P3/P1	P3/P2	P1/P0
	[kg/s]	[kg/s]	[rpm]	(air/fuel)			
1	0.6604	0.07960	32907.9	120.543	0.818182	0.947368	1.11
2	0.6858	0.08159	34111.6	118.974	0.863636	0.95	1.11
3	0.7062	0.08107	34859.4	114.796	0.847458	0.909091	1.118
4	0.7232	0.08569	36170.7	118.496	0.887097	0.956522	1.124
5	0.7390	0.08486	36261.1	114.836	0.873016	0.956522	1.126
6	0.7709	0.08200	36161.1	106.364	0.873016	0.916667	1.126
7	0.7875	0.08425	36173.6	106.977	0.859375	0.916667	1.128
8	0.8285	0.08403	37587.7	101.419	0.895522	0.96	1.134
9	0.9086	0.08344	38702.8	91.842	0.901408	0.948148	1.142
10	0.9147	0.08292	38319.4	90.649	0.857143	0.923077	1.14

Tabel 4.8 Pengolahan Data minyak jarak 10%

No.	\dot{m} (pxQ)	\dot{m} air	N	AFR	P3/P1	P3/P2	P1/P0
	[kg/s]	[kg/s]	[rpm]	(air/fuel)			
1	0.6757	0.081592	33242	120.748	0.87963	0.95	1.108
2	0.6849	0.078368	33637.3	114.426	0.833333	0.95	1.114
3	0.6982	0.081067	34366.4	116.111	0.877193	0.952381	1.114

4	0.7113	0.082	34687.4	115.284	0.833333	0.952381	1.12
5	0.7260	0.082792	34937.9	114.032	0.875	0.954545	1.12
6	0.7800	0.086242	35094.4	110.569	0.873016	0.956522	1.126
7	0.8058	0.082892	37491.3	102.874	0.871212	0.958333	1.132
8	0.8595	0.084583	37489.3	98.405	0.882353	0.923077	1.136
9	0.9161	0.086233	38604.7	94.133	0.892857	0.925926	1.14
10	0.9198	0.0876	38795.2	95.240	0.892857	0.925926	1.14

Dari hasil percobaan di atas di dapatkan rata-rata dari setiap percobaan. hasilnya adalah

Tabel 4.9 Pengolahan Data rata-rata minyak jarak 2.5%

N	T1	P1	T2	P2	T3	P3	T4
[rpm]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]
35435.5	60.3	125.2	66.5	112.6	468.1	106.8	393.2

Tabel 4.10 Pengolahan Data rata-rata minyak jarak 5%

N	T1	P1	T2	P2	T3	P3	T4
[rpm]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]
35654.2	63.6	123.8	68.6	112	474.2	106.2	397.1

Tabel 4.11 Pengolahan Data rata-rata minyak jarak 7.5%

N	T1	P1	T2	P2	T3	P3	T4
[rpm]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]
36125.5	63.1	125.8	69.4	114.7	479.4	108.1	404.4

Tabel 4.12 Pengolahan Data rata-rata minyak jarak 10%

N	T1	P1	T2	P2	T3	P3	T4
[rpm]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]	[mbar]	[C]
35834.6	63.1	125	68.5	114	479.7	107.5	405.8

Dari data rata-rata variabel data di atas dapat dihitung nilai pressure loss dengan menggunakan

$$\Delta P_{cc} = \frac{P_2 - P_3}{P_2} \times 100\% \quad (4.5)$$

- Campuran minyak jarak 2.5%
 $\Delta P_{cc} = \frac{112,6 - 106,8}{112,6} \times 100\% = 5.1 \%$
- Campuran minyak jarak 5%

$$\Delta P_{cc} = \frac{112-106,2}{112} \times 100\% = 5.1 \%$$

- Campuran minyak jarak 7.5%

$$\Delta P_{cc} = \frac{114,7-108,1}{114,7} \times 100\% = 5.7 \%$$

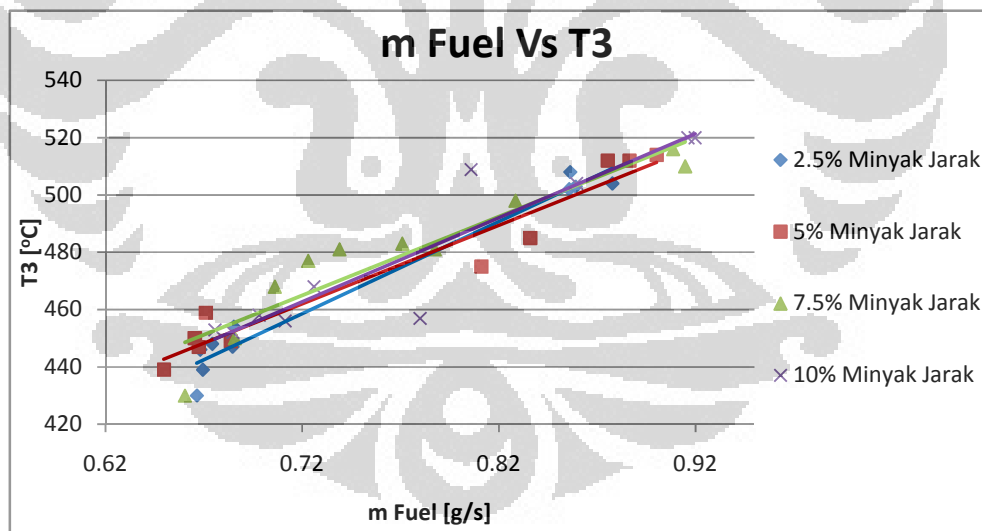
- Campuran minyak jarak 10%

$$\Delta P_{cc} = \frac{114-107,5}{114} \times 100\% = 5.7 \%$$

4.3 GRAFIK PENGOLAHAN DATA

Grafik selain digunakan untuk menunjukkan unjuk kerja dari ruang bakar pada turbin gas, juga digunakan untuk membandingkan data antara hasil percobaan dengan menggunakan campuran minyak jarak 2.5%, 5%, 7.5% dan 10% sehingga dapat diketahui hasil percobaan dari setiap campuran. Data yang digunakan untuk membuat grafik adalah data dari 10 percobaan yang telah dilakukan dari setiap campuran yang digabungkan ke dalam satu grafik.

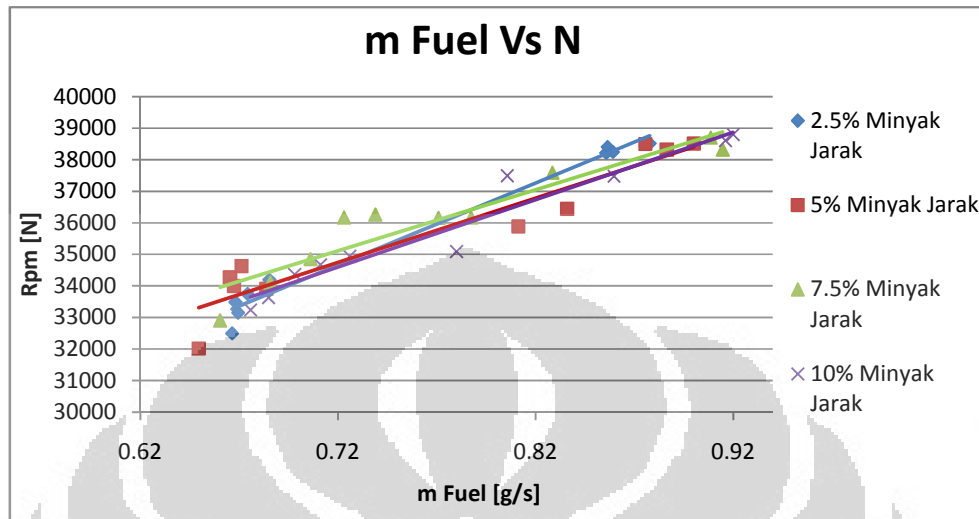
Grafik flow rate bahan bakar vs T3 digunakan untuk menunjukkan bahwa laju massa bahan bakar berbanding lurus dengan temperatur pada inlet turbine.



Gambar 4.1 Grafik Flow rate bahan bakar vs T3

Dari gambar 4.1 dapat di buktikan bahwa flow rate bahan bakar berbanding lurus dengan turbin inlet temperatur. Campuran minyak jarak 10% memiliki temperatur pada inlet turbin yang paling tinggi yaitu sebesar 520 °C. Dan campuran minyak jarak 2.5% memiliki temperatur pada inlet turbin yang paling kecil yaitu sekitar 504 °C.

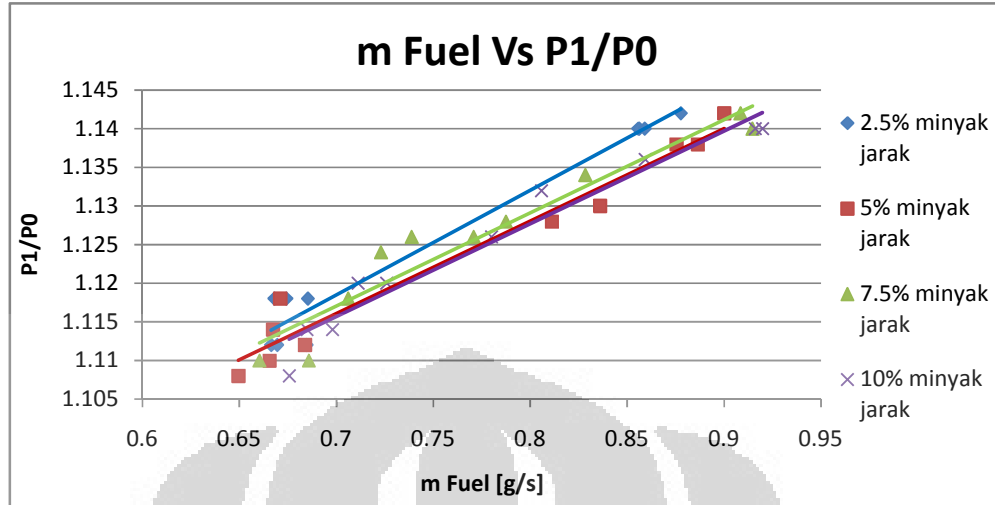
Grafik fuel mass flow vs Rpm digunakan untuk menunjukkan bahwa laju massa bahan bakar semakin besar maka putaran turbin akan semakin tinggi.



Gambar 4.2 Grafik Flow rate bahan bakar vs Rpm

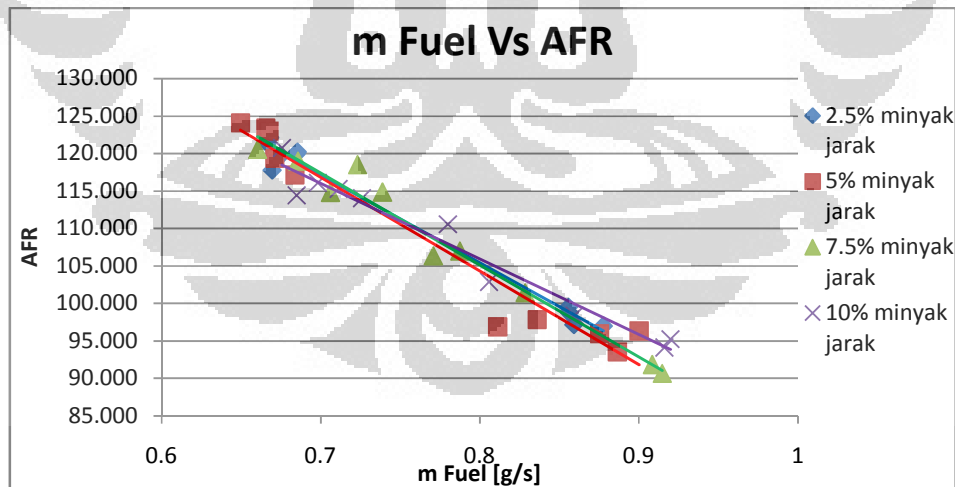
Gambar 4.2 menunjukkan laju massa bahan bakar semakin besar semakin tinggi maka putaran turbin akan semakin besar. Hal ini di tunjukkan pada campuran minyak jarak 10% di saat laju massa bahan bakar 0.9197 (g/s) menunjukkan putaran sebesar 38.795 rpm. Campuran minyak jarak 7.5% saat laju massa bahan bakar 0.9086 (g/s) menunjukkan putaran sebesar 38.702 rpm. Campuran minyak jarak 5% saat laju massa bahan bakar 0.9001 (g/s) menunjukkan putaran sebesar 38.510 rpm. Campuran minyak jarak 2.5% dengan laju massa bahan bakar 0.8777 (g/s) menunjukkan putaran sebesar 38.518 rpm.

Grafik fuel mass flow vs P1/P0 digunakan untuk menunjukkan perbandingan antara laju aliran bahan bakar dengan perbandingan ratio antara kompressor dengan lingkungan.



Gambar 4.3 Grafik Flow Rate Bahan Bakar vs rasio tekanan kompresor

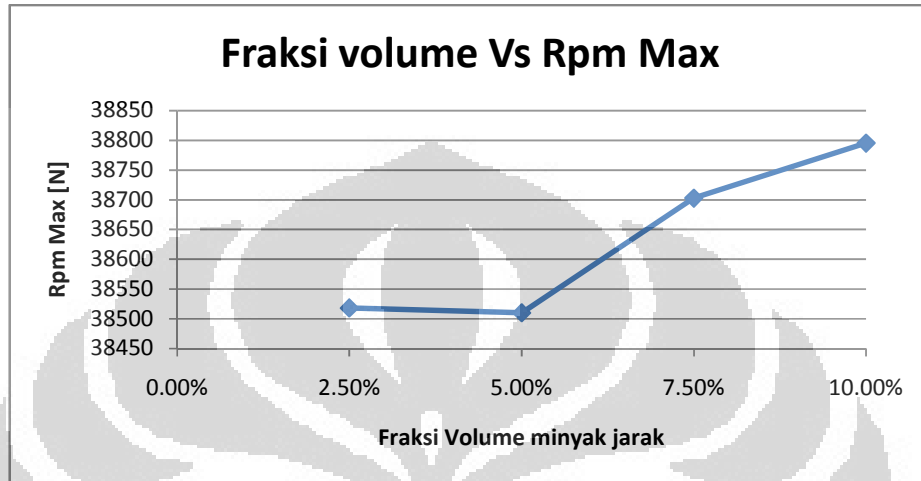
Gambar 4.3 menunjukkan *flow rate* bahan bakar dengan *ratio* tekanan kompresor dengan tekanan lingkungan di dapatkan bahwa semakin besar bahan bakar maka terjadi peningkatan *ratio* nya. Hal ini dapat ditunjukkan dengan hukum gas ideal yaitu $PV = mRT$ dimana didapatkan bahwa apabila tekanan meningkat maka berbanding lurus dengan peningkatan dari temperatur. Peningkatan temperatur terjadi karena meningkatnya aliran bahan bakar yang semakin meningkat.



Gambar 4.4 Grafik Flow Rate Bahan Bakar vs AFR

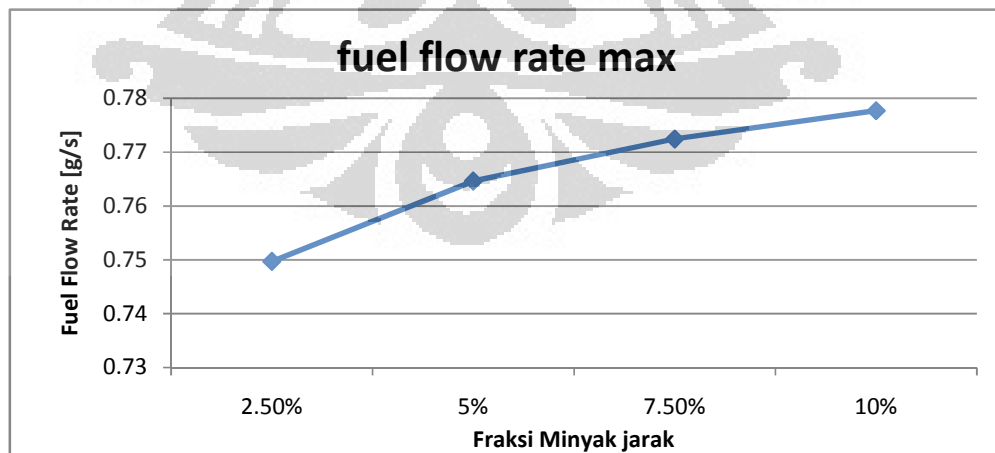
Gambar 4.4 menunjukkan bahwa laju massa bahan bakar berbanding terbalik dengan AFR. Hal ini disebabkan karena penambahan laju masa bahan bakar tidak terkompensasi dengan kenaikan laju massa udaranya sehingga terjadi

penurunan nilai AFR. Namun dengan menurunnya nilai AFR tersebut menunjukkan pembakaran yang terjadi semakin baik, hal ini dapat dilihat dari gambar 4.1 dimana terjadi peningkatan temperatur *outlet* ruang bakar akibat penambahan laju massa bahan bakar.



Gambar 4.5 Grafik Fraksi Volume minyak jarak dengan putaran maximum

Pada gambar di atas menunjukkan grafik perbandingan antara *fraksi* minyak jarak dengan putaran maksimum dari turbin. Dari grafik terlihat bahwa terjadi peningkatan putaran dengan adanya peningkatan *fraksi* volume dari minyak jarak. *Fraksi* minyak jarak sebesar 10% menghasilkan putaran sebesar 38795 rpm. Maka dapat disimpulkan bahwa *fraksi* volume minyak jarak mempengaruhi kinerja dari pembakaran yang di hasilkan.



Gambar 4.6 Grafik Fraksi Volume minyak jarak dengan average fuel flow rate

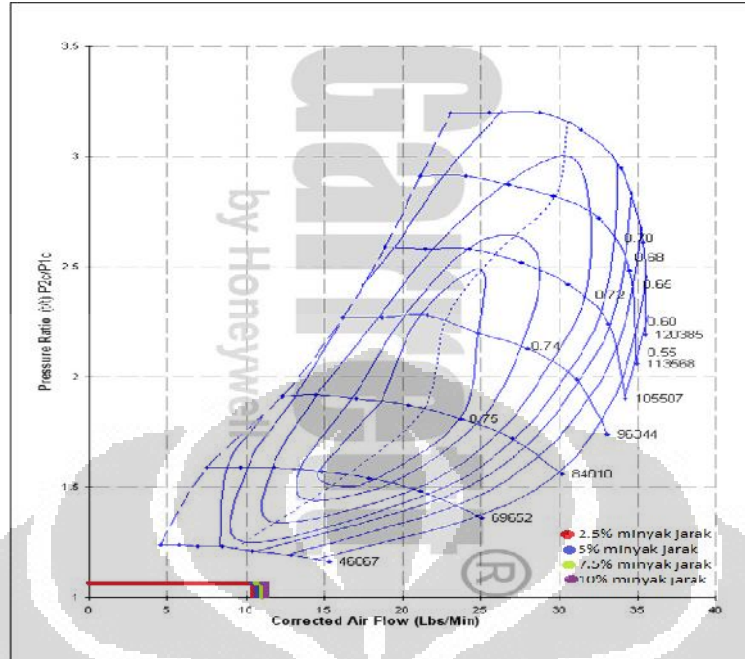
Gambar 4.5 perbandingan antara *fraksi* minyak jarak dengan *fuel flow rate* rata-rata. Dari grafik menunjukkan terjadinya peningkatan dari *fraksi* 2.5% menuju 10%. *Fraksi* minyak jarak 2.5% memiliki konsumsi bahan bakar yang sedikit. Sedangkan *fraksi* 10% memiliki konsumsi bahan bakar yang paling besar. Hal ini berarti semakin besar *fraksi* minyak jarak maka laju aliran bahan bakar semakin besar yang berarti bahwa konsumsi yang di butuhkan untuk gas turbin semakin besar.

4.4 COMPRESSOR PERFORMANCE MAP

Dengan menggunakan data laju aliran udara dengan tekanan rasio pada compressor putaran maksimum maka didapat :

1. 2.5% minyak jarak
 $N = 38518$ [rpm]
 \dot{m} udara = 85 [g/s] = 11.24 [lbs/m]
 $P1/P0 = 1.142$
2. 5% minyak jarak
 $N = 38520$ [rpm]
 \dot{m} udara = 86.72 [g/s] = 11.47 [lbs/m]
 $P1/P0 = 1.142$
3. 7.5% minyak jarak
 $N = 38702$ [rpm]
 \dot{m} udara = 87.92 [g/s] = 11.62 [lbs/m]
 $P1/P0 = 1.142$
4. 10% minyak jarak
 $N = 38795$ [rpm]
 \dot{m} udara = 87.6 [g/s] = 11.64 [lbs/m]
 $P1/P0 = 1.142$

Dengan menggunakan data diatas dapat diplot pada grafik performance kompressor map untuk kompressor dengan tipe Garret sebagai berikut :



Gambar 4.7 Compressor Performance Map

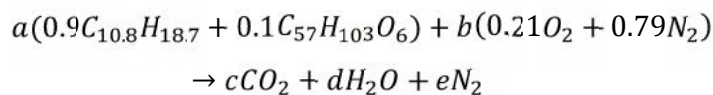
Hasil dari plot pada gambar 4.6 menunjukkan efisiensi dari percobaan dengan menggunakan campuran minyak jarak 2.5%, 5%, 7.5% dan 10% masih menunjukkan bahwa percobaan yang dilakukan masih berada diluar karakteristik dari kompresor, karena harusnya putaran minimal sebesar 46067 rpm. Sedangkan pada percobaan yang dilakukan putaran tertinggi hanya 38700 rpm.

Pada grafik unjuk kerja compressor fraksi minyak jarak 2.5%, 5%, 7.5% dan 10% memiliki rasio tekanan kompresor yang sama, tetapi memiliki laju udara yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa fraksi minyak jarak mempengaruhi kinerja dari kompresor. Semakin besar fraksi dari minyak jarak maka laju udara yang dihasilkan pun semakin besar.

4.5 PERHITUNGAN PEMBAKARAN

4.5.1 Perhitungan Pembakaran Minyak Jarak 10%

Reaksi pembakaran sempurna untuk minyak jarak 10% adalah:



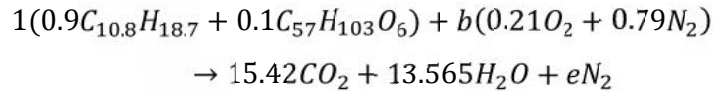
Berdasarkan jumlah atom C dan H maka nilai a, c dan d adalah:

$$a = 1$$

$$c = 0.9 \times 10.8 + 0.1 \times 57 = 15.42$$

$$d = (0.9 \times 18.7 + 0.1 \times 103) / 2 = 13.565$$

Sehingga:



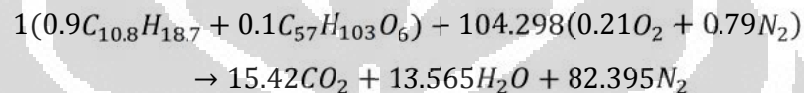
Berdasarkan jumlah atom O dan N maka nilai b dan e adalah:

$$0.21b \times 2 + 0.1 \times 6 = (15.42 \times 2 + 13.565)$$

$$b = \frac{44.405 - 0.6}{0.42} = 104.298$$

$$e = 104.298 \times 0.79 = 82.395$$

Maka persamaan reaksinya menjadi:



Perhitungan AFR Pembakaran

AFR molar teoritisnya adalah:

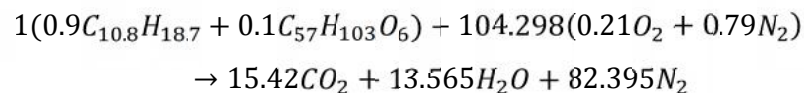
$$AFR_{molar\ teoritis} = \frac{mol\ udara}{mol\ bahan\ bakar} = \frac{104.298}{1} = 104.298$$

Sehingga AFR massa teoritisnya menjadi:

$$AFR_{massa\ teoritis} = \frac{molar \times massa\ molar\ udara}{molar \times massa\ molar\ bahan\ bakar} \\ = \frac{104.298(0.21 \times O_2 + 0.79 \times N_2)}{1(0.9C_{10.8}H_{18.7} + 0.1C_{57}H_{103}O_6)} \\ = \frac{104.298(0.21 \times 32 + 0.79 \times 28.013)}{1[0.9(10.8 \times 12.011 + 18.7 \times 1.008) + 0.1(57 \times 12.011 + 103 \times 1.008 + 6 \times 16)]} \\ = \frac{3009.025}{134.923 + 89.187} = \frac{3009.025}{224.11} = 13.427$$

Perhitungan Entalpi Pembakaran

Nilai h dapat dilihat pada table A-26 Yunus A. Cengel "Thermodynamic an Engineering Approach"



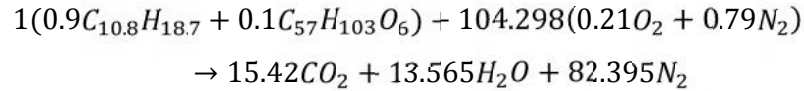
$$h_{O_2}(g) = 0$$

$$h_{N_2}(g) = 0$$

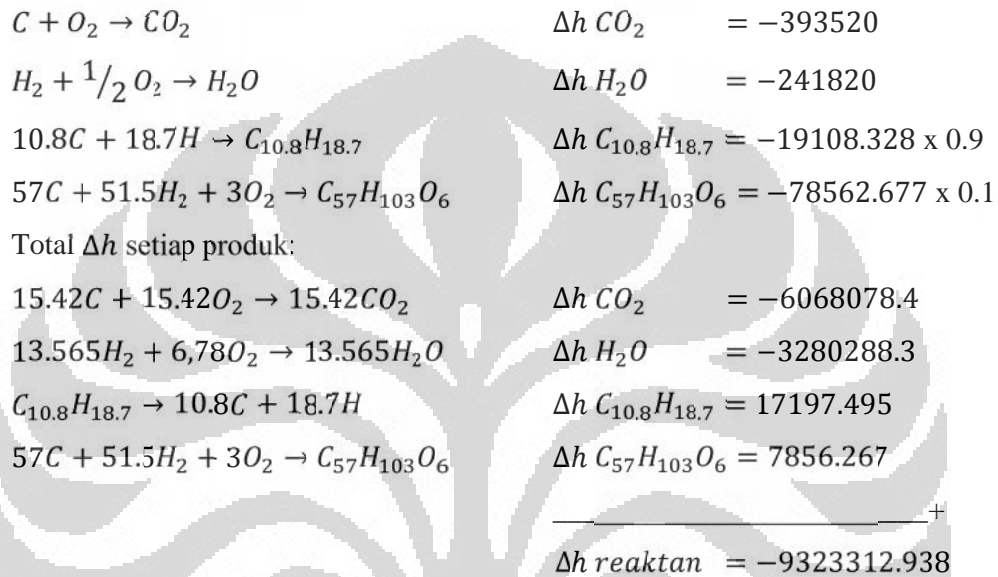
$$h_{CO_2}(g) = -393520 \text{ [kJ/kmol]} \times 15.42 = -6068078.4 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$h_{H_2O(g)} = -241820 \text{ [kJ/kmol]} \times 13.565 = -3280288.3 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$h_{\text{minyak jarak}} = -18764373 \text{ [kkal/mol]} = -78562.677 \text{ [kJ/kmol]} \quad [1]$$



Nilai Δh product dan reaktan:



$$\Delta h_{\text{reaktan}} = -9323312.938 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$\Delta h_{\text{reaktan}} = \frac{-9323312.938 \text{ [kJ/kmol]}}{224.11 \text{ [kg/kmol]}}$$

$$\Delta h_{\text{reaktan}} = -41601.50 \text{ [kJ/kg]}$$

Perhitungan Suhu Nyala Adiabatik

Iterasi 1 (T rata-rata = 752,7 K)

Nilai T_{C_p} adalah:

$$T_{C_p} = \frac{T_f + T_0}{2}$$

$$T_{C_p} = \frac{752,7 + 298}{2} = \frac{1050,7}{2} = 525,35K$$

Berikut adalah perhitungan untuk C_p Produk

Nilai C_p untuk CO_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 22.26 + (5.981 \times 10^{-2})525,35 + (-3.501 \times 10^{-5})525,35^2$$

$$+ 7.469 \times 10^{-9}525,35^3$$

$$C_{pk} = 1.025 [kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk H_2O adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 32.24 + (0.192 \times 10^{-2})525,35 + 1.055 \times 10^{-5}525,35^2$$

$$+ (-3.595 \times 10^{-9})525,35^3$$

$$C_{pk} = 1.978 [kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk N_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 28.90 - 0.157 \times 10^{-2} \times 525,35 + 0.808 \times 10^{-5}525,35^2$$

$$+ (-2.873 \times 10^{-9})525,35^3$$

$$C_{pk} = 1.0669 [kJ/kg \cdot K]$$

Persamaan reaksi berbasis massa (table A-1):

- $0.9C_{10.8}H_{18.7} + 0.1C_{57}H_{103}O_6 + 104.298(0.21O_2 + 0.79N_2) \rightarrow 15.42CO_2 + 13.565H_2O + 82.395N_2$
- $0.9(148.568)C_{10.8}H_{18.7} + 0.1(891.87)C_{57}H_{103}O_6 + 21.9(31.999)O_2 + 82.4(28.013)N_2 \rightarrow 15.42(44.01)CO_2 + 13.565(18.015)H_2O + 82.4(28.013)N_2$
- $133.37C_{10.8}H_{18.7} + 89.187C_{57}H_{103}O_6 + 700.778O_2 + 2308.271N_2 \rightarrow 678.634CO_2 + 244.373H_2O + 2308.271N_2$
- $1C_{10.8}H_{18.7} + 0.669C_{57}H_{103}O_6 + 5.254O_2 + 17.307N_2 \rightarrow 5.088CO_2 + 1.832H_2O + 17.307N_2$

Maka nilai T_f adalah:

$$-\Delta h_{reaktan} = \sum_k^{\text{all product}} m_k C_{pk} (T_2 - T_0)$$

$$41601.50 [kJ/kg]$$

$$= [5.088 (1.025) + 1.832(1.978) + 17.307(1.0669)][T_2 - 298]$$

$$41601.50 [kJ/kg] = [27.3036][T_f - 298]$$

$$\frac{41601.50 [kJ/kg]}{27.3036 [kJ/kg \cdot K]} = [T_f - 298]$$

$$T_f = 1821.45 K$$

Iterasi 2

$$T_{f \text{ baru}} = T_{f \text{ awal}} + \frac{T_{f \text{ akhir}} - T_{f \text{ awal}}}{2}$$

$$T_{f \text{ baru}} = 752,7 + \frac{1821,45 - 752,7}{2} = 1287,079$$

$$T_{C_p} = \frac{T_f + T_0}{2}$$

$$T_{C_p} = \frac{1287,079 + 298}{2} = 792,539 K$$

Berikut adalah perhitungan untuk C_p Produk

Nilai C_p untuk CO_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 22.26 + (5.981 \times 10^{-2})792,539 + (-3.501 \times 10^{-5})792,539^2$$

$$+ 7.469 \times 10^{-9}792,539^3$$

$$C_{pk} = 1.169 [kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk H_2O adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 32.24 + (0.192 \times 10^{-2})792,539 + 1.055 \times 10^{-5}792,539^2$$

$$+ (-3.595 \times 10^{-9})792,539^3$$

$$C_{pk} = 2,142 [kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk N_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 28.90 - 0.157 \times 10^{-2} \times 792,539 + 0.808 \times 10^{-5}792,539^2$$

$$+ (-2.873 \times 10^{-9})792,539^3$$

$$C_{pk} = 1.117 [kJ/kg \cdot K]$$

Persamaan reaksi berbasis massa (table A-1):

- $0.9C_{10.8}H_{18.7} + 0.1C_{57}H_{103}O_6 + 104.298(0.21O_2 + 0.79N_2) \rightarrow 15.42CO_2 + 13.565H_2O + 82.395N_2$
- $0.9(148.568)C_{10.8}H_{18.7} + 0.1(891.87)C_{57}H_{103}O_6 + 21.9(31.999)O_2 + 82.4(28.013)N_2 \rightarrow 15.42(44.01)CO_2 + 13.565(18.015)H_2O + 82.4(28.013)N_2$
- $133.37C_{10.8}H_{18.7} + 89.187C_{57}H_{103}O_6 + 700.778O_2 + 2308.271N_2 \rightarrow 678.634CO_2 + 244.373H_2O + 2308.271N_2$
- $1C_{10.8}H_{18.7} + 0.669C_{57}H_{103}O_6 + 5.254O_2 + 17.307N_2 \rightarrow 5.088CO_2 + 1.832H_2O + 17.307N_2$

Maka nilai T_f adalah:

$$-\Delta h_{reaktan} = \sum_k^{all\ product} m_k C_{pk} (T_2 - T_0)$$

$$41601.50 [kJ/kg]$$

$$= [5.088 (1.169) + 1.832(2,142) + 17.307(1.117)][T_2 - 298]$$

$$41601.50 [kJ/kg] = [29,203][T_f - 298]$$

$$\frac{41601.50 [kJ/kg]}{29,203 [kJ/kg \cdot K]} = [T_f - 298]$$

$$T_f = 1721,98 K$$

Iterasi berikutnya menggunakan cara yang sama hingga masuk nilai toleransi 0.001, berikut adalah table iterasinya:

Tabel 4.13 Iterasi suhu nyala adiabatik

Tf awal	Tcp	mCp CO2	mCp H2O	mCp N2	Tf baru	Beda
752.7	525.35	1.025397	1.978304	1.066957	1821.457508	1068.758
1287.079	792.5394	1.169713	2.142587	1.117364	1721.980658	434.9019
1504.53	901.2649	1.211689	2.215273	1.140362	1686.581871	182.0522
1595.556	946.7779	1.226898	2.246112	1.150113	1672.695355	77.13957
1634.126	966.0628	1.23296	2.259209	1.154245	1666.980199	32.85463
1650.553	974.2764	1.235475	2.264789	1.156002	1664.576773	14.02389
1657.565	977.7824	1.236537	2.267171	1.156752	1663.556484	5.991654
1660.561	979.2803	1.236988	2.268189	1.157073	1663.121592	2.560936
1661.841	979.9206	1.237181	2.268624	1.15721	1662.935899	1.094775
1662.389	980.1943	1.237263	2.26881	1.157268	1662.856551	0.46804
1662.623	980.3113	1.237298	2.26889	1.157293	1662.822634	0.200103
1662.723	980.3613	1.237313	2.268924	1.157304	1662.808135	0.085552
1662.765	980.3827	1.23732	2.268938	1.157308	1662.801936	0.036577

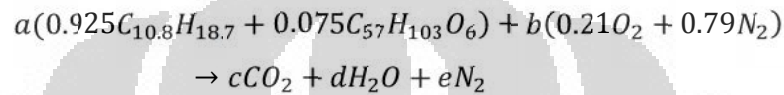
1662.784	980.3918	1.237322	2.268944	1.15731	1662.799286	0.015638
1662.791	980.3957	1.237323	2.268947	1.157311	1662.798153	0.006686
1662.795	980.3974	1.237324	2.268948	1.157312	1662.797668	0.002859
1662.796	980.3981	1.237324	2.268949	1.157312	1662.797461	0.001222

Maka suhu nyala adiabatic:

$$T_f = 1662.79 \text{ K} = 1389,79 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.5.2 Perhitungan Pembakaran Minyak Jarak 7.5%

Reaksi pembakaran sempurna untuk minyak jarak 7.5% adalah:



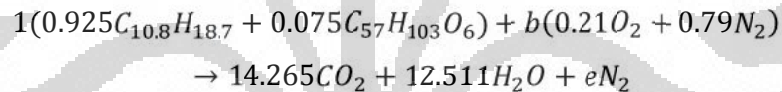
Berdasarkan jumlah atom C dan H maka nilai a, c dan d adalah:

$$a = 1$$

$$c = 0.925 \times 10.8 + 0.075 \times 57 = 14.265$$

$$d = (0.925 \times 18.7 + 0.075 \times 103) / 2 = 12.511$$

Sehingga:



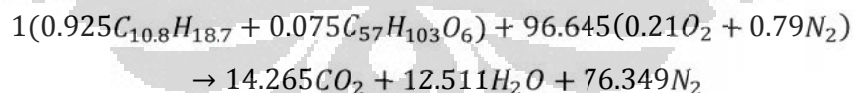
Berdasarkan jumlah atom O dan N maka nilai b dan e adalah:

$$0.21b \times 2 + 0.075 \times 6 = (14.265 \times 2 + 12.511)$$

$$b = \frac{41.041 - 0.45}{0.42} = 96.645$$

$$e = 96.645 \times 0.79 = 76.349$$

Maka persamaan reaksinya menjadi:



Perhitungan AFR Pembakaran

AFR molar teoritisnya adalah:

$$AFR_{molar \text{ teoritis}} = \frac{\text{mol udara}}{\text{mol bahan bakar}} = \frac{96.645}{1} = 96.645$$

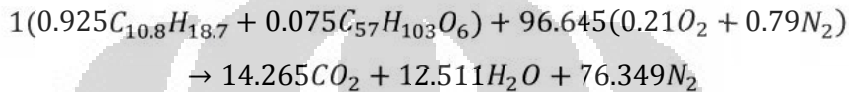
Sehingga AFR massa teoritisnya menjadi:

$$AFR_{massa \text{ teoritis}} = \frac{\text{molar} \times \text{massa molar udara}}{\text{molar} \times \text{massa molar bahan bakar}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{96.645(0.21O_2 + 0.79N_2)}{1(0.925C_{10.8}H_{18.7} + 0.075C_{57}H_{103}O_6)} \\
 &= \frac{96.645(0.21 \times 32 + 0.79 \times 28.013)}{1[0.925(10.8 \times 12.011 + 18.7 \times 1.008) + 0.075(57 \times 12.011 + 103 \times 1.008 + 6 \times 16)]} \\
 &= \frac{2788.2}{137.43 + 66.33} = \frac{2788.2}{203.76} = 13.684
 \end{aligned}$$

Perhitungan Entalpi Pembakaran

Nilai h dapat dilihat pada table A-26 Yunus A. Cengel "Thermodynamic an Engineering Approach"



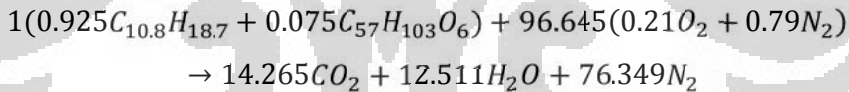
$$h_{O_2} (g) = 0$$

$$h_{N_2} (g) = 0$$

$$h_{CO_2} (g) = -393520 \text{ [kJ/kmol]} \times 14.265 = -5613562.8 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$h_{H_2O} (g) = -241820 \text{ [kJ/kmol]} \times 12.511 = -3025410.02 \text{ [kJ/kmol]}$$

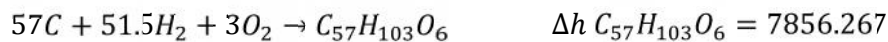
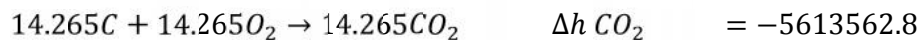
$$h_{\text{minyak jarak}} = -18764373 \text{ [kkal/mol]} = -78562.677 \text{ [kJ/kmol]} [1]$$



Nilai Δh product dan reaktan :



Total Δh setiap produk:



$$\begin{aligned}
 &\text{-----}+ \\
 \Delta h_{\text{reaktan}} &= -8613919.058
 \end{aligned}$$

$$\Delta h_{reaktan} = -8613919.058 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$\Delta h_{reaktan} = \frac{-8613919.058 \text{ [kJ/kmol]}}{203.76 \text{ [kg/kmol]}}$$

$$\Delta h_{reaktan} = -42274.82 \text{ [kJ/kg]}$$

Perhitungan Suhu Nyala Adiabatik

Iterasi 1 (T rata-rata = 752.4 K)

Nilai T_{C_p} adalah:

$$T_{C_p} = \frac{T_f + T_0}{2}$$

$$T_{C_p} = \frac{752.4 + 298}{2} = \frac{1050.4}{2} = 525.2 \text{ K}$$

Berikut adalah perhitungan untuk C_p Produk

Nilai C_p untuk CO_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 22.26 + (5.981 \times 10^{-2})525.2 + (-3.501 \times 10^{-5})525.2^2$$

$$+ 7.469 \times 10^{-9}525.2^3$$

$$C_{pk} = 1.025 \text{ [kJ/kg.K]}$$

Nilai C_p untuk H_2O adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 32.24 + (0.192 \times 10^{-2})528.15 + 1.055 \times 10^{-5}528.15^2$$

$$+ (-3.595 \times 10^{-9})528.15^3$$

$$C_{pk} = 1.978 \text{ [kJ/kg.K]}$$

Nilai C_p untuk N_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 28.90 - 0.157 \times 10^{-2} \times 528.15 + 0.808 \times 10^{-5}528.15^2$$

$$+ (-2.873 \times 10^{-9})528.15^3$$

$$C_{pk} = 1.066 \text{ [kJ/kg.K]}$$

Persamaan reaksi berbasis massa (table A-1):

- $0.925C_{10.8}H_{18.7} + 0.075C_{57}H_{103}O_6 + 96.645(0.21O_2 + 0.79N_2) \rightarrow 14.265CO_2 + 12.511H_2O + 76.349N_2$
- $0.925(148.568)C_{10.8}H_{18.7} + 0.075(891.87)C_{57}H_{103}O_6 + 20.3(31.999)O_2 + 76.3(28.013)N_2 \rightarrow 14.265(44.01)CO_2 + 12.511(18.015)H_2O + 76.349(28.013)N_2$
- $137.42kg C_{10.8}H_{18.7} + 66.89kg C_{57}H_{103}O_6 + 649.57kg O_2 + 2137.39kg N_2 \rightarrow 627.802kg CO_2 + 225.385kg H_2O + 2138.76kg N_2$
- $1C_{10.8}H_{18.7} + 0.486C_{57}H_{103}O_6 + 4,726O_2 + 15,553N_2 \rightarrow 4,568CO_2 + 1.64H_2O + 15.563N_2$

Maka nilai T_f adalah:

$$-\Delta h_{reaktan} = \sum_k^{all\ product} m_k C_{pk} (T_2 - T_0)$$

$$42274.82 [kJ/kg]$$

$$= [4,568 (1,025) + 1,64(1,978) + 15,563(1,066)][T_2 - 298]$$

$$42274,82 [kJ/kg] = [24,516][T_f - 298]$$

$$\frac{42274,82 [kJ/kg]}{24,516[kJ/kg \cdot K]} = [T_f - 298]$$

$$T_f = 2021,22$$

Iterasi 2

$$T_{f\ baru} = T_{f\ awal} + \frac{T_{f\ akhir} - T_{f\ awal}}{2}$$

$$T_{f\ baru} = 752,4 + \frac{2021,22 - 752,4}{2} = 1386,81$$

$$T_{C_p} = \frac{T_f + T_0}{2}$$

$$T_{C_p} = \frac{1386,81 + 298}{2}$$

$$T_{C_p} = 842,405$$

Nilai C_p untuk CO_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 22.26 + (5.981 \times 10^{-2})842,405 + (-3.501 \times 10^{-5})842,405^2$$

$$+ 7.469 \times 10^{-9}842,405^3$$

$$C_{pk} = 1.19[kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk H_2O adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 32.24 + (0.192 \times 10^{-2}) 842,405 + 1.055 \times 10^{-5} 842,405^2$$

$$+ (-3.595 \times 10^{-9}) 842,405^3$$

$$C_{pk} = 2,175[kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk N_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 28.90 - 0.157 \times 10^{-2} \times 842,405 + 0.808 \times 10^{-5} 842,405^2$$

$$+ (-2.873 \times 10^{-9}) 842,405^3$$

$$C_{pk} = 1,127[kJ/kg \cdot K]$$

Persamaan reaksi berbasis massa (table A-1):

- $0.925C_{10.8}H_{18.7} + 0.075C_{57}H_{103}O_6 + 96.645(0.21O_2 + 0.79N_2) \rightarrow 14.265CO_2 + 12.511H_2O + 76.349N_2$
- $0.925(148.568)C_{10.8}H_{18.7} + 0.075(891.87)C_{57}H_{103}O_6 + 20.3(31.999)O_2 + 76.3(28.013)N_2 \rightarrow 14.265(44.01)CO_2 + 12.511(18.015)H_2O + 76.349(28.013)N_2$
- $137.42kg C_{10.8}H_{18.7} + 66.89kg C_{57}H_{103}O_6 + 649.57kg O_2 + 2137.39kg N_2 \rightarrow 627.802kg CO_2 + 225.385kg H_2O + 2138.76kg N_2$
- $1C_{10.8}H_{18.7} + 0.486C_{57}H_{103}O_6 + 4,726O_2 + 15,553N_2 \rightarrow 4,568CO_2 + 1.64H_2O + 15.563N_2$

Maka nilai T_f adalah:

$$-\Delta h_{reaktan} = \sum_k^{all\ product} m_k C_{pk} (T_2 - T_0)$$

$$42274.82 [kJ/kg]$$

$$= [4,568 (1,19) + 1,64(2,175) + 15,563(1,127)][T_2 - 298]$$

$$42274,82 [kJ/kg] = [26,542][T_f - 298]$$

$$\frac{42274,82 [kJ/kg]}{26,542[kJ/kg \cdot K]} = [T_f - 298]$$

$$T_f = 1889,88$$

Iterasi berikutnya menggunakan cara yang sama hingga masuk nilai toleransi 0.001, berikut adalah table iterasinya:

Tabel 4.14 Iterasi suhu nyala adiabatik

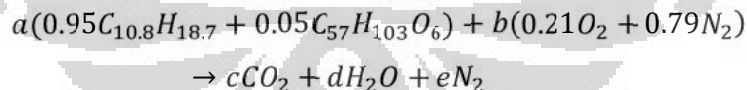
Tf awal	Tcp	mCp CO2	mCp H2O	mCp N2	Tf baru	Beda
752.4	525.2	1.025297	1.97822	1.066932	2021.22	1268.816473
1386.81	842.4041	1.190006	2.17569	1.127828	1889.88	503.07581
1638.35	968.1731	1.23361	2.260643	1.154696	1845.78	207.4381714
1742.07	1020.033	1.248793	2.295863	1.165758	1829.01	86.94377749
1785.54	1041.769	1.254727	2.310595	1.170358	1822.23	36.68973244
1803.88	1050.941	1.257158	2.316801	1.172291	1819.41	15.5272258
1811.65	1054.823	1.258175	2.319426	1.173107	1818.22	6.579131106
1814.94	1056.468	1.258604	2.320538	1.173453	1817.72	2.789110122
1816.33	1057.165	1.258785	2.321009	1.173599	1817.51	1.18265224
1816.92	1057.461	1.258862	2.321209	1.173661	1817.42	0.501520196
1817.17	1057.586	1.258894	2.321293	1.173688	1817.38	0.212684942
1817.28	1057.639	1.258908	2.321329	1.173699	1817.37	0.090197032
1817.32	1057.662	1.258914	2.321344	1.173703	1817.36	0.038251705
1817.34	1057.671	1.258916	2.321351	1.173705	1817.36	0.016222233
1817.35	1057.675	1.258917	2.321354	1.173706	1817.36	0.006879724
1817.35	1057.677	1.258918	2.321355	1.173707	1817.36	0.00291764
1817.36	1057.678	1.258918	2.321355	1.173707	1817.36	0.00123735

Maka suhu nyala adiabatik:

$$T_f = 1817.36 \text{ K} = 1544,36 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.5.3 Perhitungan Reaksi Pembakaran Minyak Jarak 5 %

Reaksi pembakaran sempurna untuk minyak jarak 5% adalah:



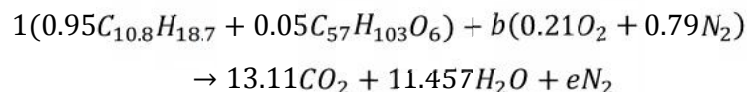
Berdasarkan jumlah atom C dan H maka nilai a, c dan d adalah:

$$a = 1$$

$$c = 0.95 \times 10.8 + 0.05 \times 57 = 13.11$$

$$d = (0.95 \times 18.7 + 0.05 \times 103) / 2 = 11.457$$

Sehingga:



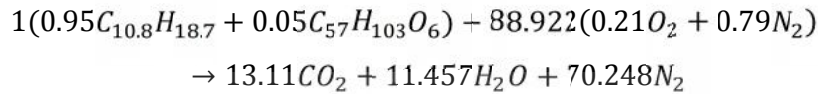
Berdasarkan jumlah atom O dan N maka nilai b dan e adalah:

$$0.21b \times 2 + 0.05 \times 6 = (13.11 \times 2 + 11.457)$$

$$b = \frac{37.677 - 0.3}{0.42} = 88.922$$

$$e = 88.922 \times 0.79 = 70.248$$

Maka persamaan reaksinya menjadi:



Perhitungan AFR Pembakaran

AFR molar teoritisnya adalah:

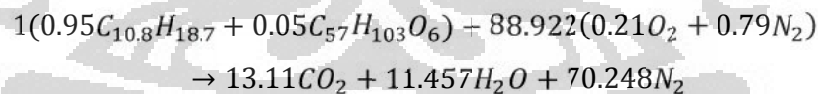
$$AFR_{molar\ teoritis} = \frac{mol\ udara}{mol\ bahan\ bakar} = \frac{88.922}{1} = 88.922$$

Sehingga AFR massa teoritisnya menjadi:

$$AFR_{massa\ teoritis} = \frac{molar \times massa\ molar\ udara}{molar \times massa\ molar\ bahan\ bakar} \\ = \frac{88.922(0.21O_2 + 0.79N_2)}{1(0.95C_{10.8}H_{18.7} + 0.05C_{57}H_{103}O_6)} \\ = \frac{88.922(0.21 \times 32 + 0.79 \times 28.013)}{1[0.95(10.8 \times 12.011 + 18.7 \times 1.008) + 0.05(57 \times 12.011 + 103 \times 1.008 + 6 \times 16)]} \\ = \frac{2565.34}{141.138 + 44.222} = \frac{2565.34}{185.36} = 13.839$$

Perhitungan Entalpi Pembakaran

Nilai h dapat dilihat pada table A-26 Yurus A. Cengel "Thermodynamic an Engineering Approach"



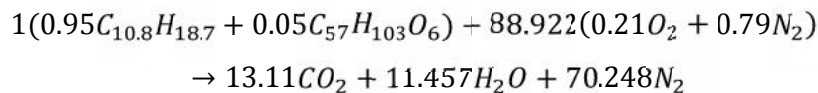
$$h_{O_2(g)} = 0$$

$$h_{N_2(g)} = 0$$

$$h_{CO_2(g)} = -393520 \text{ [kJ/kmol]} \times 13.11 = -5159047.2 \text{ [kJ/kmol]}$$

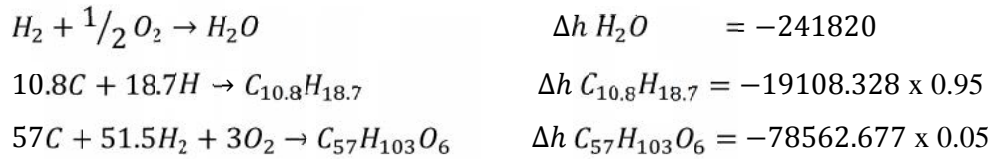
$$h_{H_2O(g)} = -241820 \text{ [kJ/kmol]} \times 11.457 = -2770531.74 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$h_{\text{minyak jarak}} = -18764373 \text{ [kkal/mol]} = -78562.677 \text{ [kJ/kmol]} [1]$$

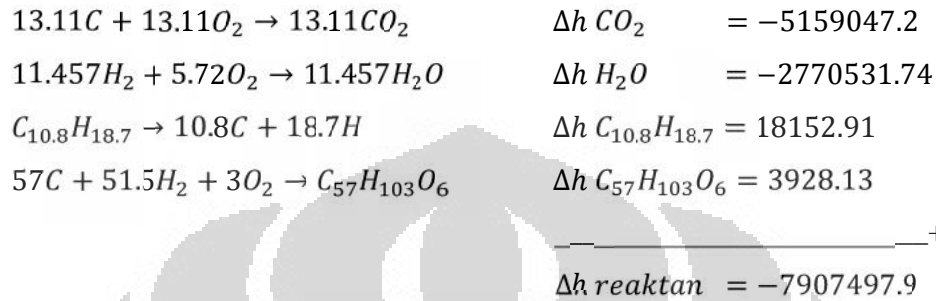


Nilai Δh product dan reaktan :

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \qquad \Delta h_{CO_2} = -393520$$



Total Δh setiap produk:



$$\Delta h_{reaktan} = -7907497.9 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$\Delta h_{reaktan} = \frac{-7907497.9 \text{ [kJ/kmol]}}{185.36 \text{ [kg/kmol]}}$$

$$\Delta h_{reaktan} = -42660.217 \text{ [kJ/kg]}$$

Perhitungan Suhu Nyala Adiabatik

Iterasi 1 (T rata-rata = 747.2 K)

Nilai T_{C_p} adalah:

$$\begin{aligned}
 T_{C_p} &= \frac{T_f + T_0}{2} \\
 T_{C_p} &= \frac{747.2 + 298}{2} = \frac{1045.2}{2} = 522.6 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Berikut adalah perhitungan untuk C_p Produk

Nilai C_p untuk CO_2 adalah:

$$\begin{aligned}
 C_{pk} &= a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3 \\
 C_{pk} &= 22.26 + (5.981 \times 10^{-2})522.6 + (-3.501 \times 10^{-5})522.6^2 \\
 &\quad + 7.469 \times 10^{-9}522.6^3 \\
 C_{pk} &= 1.0235 \text{ [kJ/kg.K]}
 \end{aligned}$$

Nilai C_p untuk H_2O adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 32.24 + (0.192 \times 10^{-2})522.6 + 1.055 \times 10^{-5}522.6^2$$

$$+ (-3.595 \times 10^{-9})522.6^3$$

$$C_{pk} = 1.976 [kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk N_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 28.90 - 0.157 \times 10^{-2} \times 522.6 + 0.808 \times 10^{-5} 522.6^2$$

$$+ (-2.873 \times 10^{-9})522.6^3$$

$$C_{pk} = 1.0665 [kJ/kg \cdot K]$$

Persamaan reaksi berbasis massa (table A-1):

- $0.95C_{10.8}H_{18.7} + 0.05C_{57}H_{103}O_6 + 88.922(0.21O_2 + 0.79N_2) \rightarrow$
 $13.11CO_2 + 11.457H_2O + 70.248N_2$
- $0.95(148.568)C_{10.8}H_{18.7} + 0.05(891.87)C_{57}H_{103}O_6 +$
 $18.67(31.999)O_2 + 70.248(28.013)N_2 \rightarrow 13.11(44.01)CO_2 +$
 $11.457(18.015)H_2O + 70.248(28.013)N_2$
- $141.139kg C_{10.8}H_{18.7} + 44.59kg C_{57}H_{103}O_6 + 597.42kg O_2 +$
 $1967.85kg N_2 \rightarrow 576.971kg CO_2 + 206.39kg H_2O + 1967.85kg N_2$
- $1C_{10.8}H_{18.7} + 0.316C_{57}H_{103}O_6 + 4.233O_2 + 13.942N_2 \rightarrow 4,087CO_2 +$
 $1.462H_2O + 13.942N_2$

Maka nilai T_f adalah:

$$-\Delta h_{reaktan} = \sum_k^{all\ product} m_k C_{pk} (T_2 - T_0)$$

$$42660.217 [kJ/kg] = [4,087 (1,0235) + 1,462(1,976) + 13,942(1,0665)][T_2 - 298]$$

$$42660,217 [kJ/kg] = [21,941][T_f - 298]$$

$$\frac{42660,217 [kJ/kg]}{21,941 [kJ/kg \cdot K]} = [T_f - 298]$$

$$T_f = 2242.17$$

Iterasi 2

$$T_f\ baru = T_f\ awal + \frac{T_f\ akhir - T_f\ awal}{2}$$

$$T_f\ baru = 747.2 + \frac{2242,17 - 747.2}{2} = 1494.685$$

$$T_{C_p} = \frac{T_f + T_0}{2}$$

$$T_{C_p} = \frac{1494.685 + 298}{2}$$

$$T_{C_p} = 896.342$$

Nilai C_p untuk CO_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 22.26 + (5.981 \times 10^{-2})896.342 + (-3.501 \times 10^{-5})896.342^2$$

$$+ 7.469 \times 10^{-9}896.342^3$$

$$C_{pk} = 1.2099 [kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk H_2O adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 32.24 + (0.192 \times 10^{-2})896.342 + 1.055 \times 10^{-5}896.342^2$$

$$+ (-3.595 \times 10^{-9})896.342^3$$

$$C_{pk} = 2,212 [kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk N_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 28.90 - 0.157 \times 10^{-2} \times 896.342 + 0.808 \times 10^{-5}896.342^2$$

$$+ (-2.873 \times 10^{-9})896.342^3$$

$$C_{pk} = 1,139 [kJ/kg \cdot K]$$

Persamaan reaksi berbasis massa (table A-1):

- $0.95C_{10.8}H_{18.7} + 0.05C_{57}H_{103}O_6 + 88.922(0.21O_2 + 0.79N_2) \rightarrow$
 $13.11CO_2 + 11.457H_2O + 70.248N_2$
- $0.95(148.568)C_{10.8}H_{18.7} + 0.05(891.87)C_{57}H_{103}O_6 +$
 $18.67(31.999)O_2 + 70.248(28.013)N_2 \rightarrow 13.11(44.01)CO_2 +$
 $11.457(18.015)H_2O + 70.248(28.013)N_2$
- $141.139kg C_{10.8}H_{18.7} + 44.59kg C_{57}H_{103}O_6 + 597.42kg O_2 +$
 $1967.85kg N_2 \rightarrow 576.971kg CO_2 + 206.39kg H_2O + 1967.85kg N_2$
- $1C_{10.8}H_{18.7} + 0.316C_{57}H_{103}O_6 + 4.233O_2 + 13.942N_2 \rightarrow 4,087CO_2 +$
 $1.462H_2O + 13.942N_2$

Maka nilai T_f adalah:

$$-\Delta h_{reaktan} = \sum_k^{all\ product} m_k C_{pk} (T_2 - T_0)$$

$$42660.217 \text{ [kJ/kg]}$$

$$= [4,087 (1,2099) + 1,462(2.212) + 13,942(1.139)][T_2 - 298]$$

$$42660,217 \text{ [kJ/kg]} = [24.058][T_f - 298]$$

$$\frac{42660,217 \text{ [kJ/kg]}}{24.058 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]}} = [T_f - 298]$$

$$T_f = 2070.84$$

Iterasi berikutnya menggunakan cara yang sama hingga masuk nilai toleransi 0.001, berikut adalah table iterasinya:

Tabel 4.15 Iterasi suhu nyala adiabatik

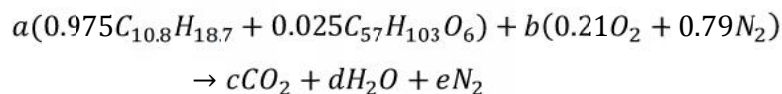
Tf awal	Tcp	mCp CO2	mCp H2O	mCp N2	Tf baru	Beda
747.2	522.6	1.023559	1.976775	1.066512	2242.17	1494.97
1494.685	896.3425	1.209965	2.211947	1.139309	2070.84	576.1523
1782.761	1040.381	1.254355	2.309655	1.170065	2017.04	234.2779
1899.9	1098.95	1.269226	2.349146	1.1823	1997.24	97.34434
1948.572	1123.286	1.274944	2.365423	1.18729	1989.38	40.80712
1968.976	1133.488	1.277266	2.372217	1.189363	1986.15	17.16971
1977.561	1137.78	1.27823	2.37507	1.190231	1984.80	7.235396
1981.178	1139.589	1.278634	2.376271	1.190596	1984.23	3.051016
1982.704	1140.352	1.278804	2.376777	1.19075	1983.99	1.286903
1983.347	1140.674	1.278876	2.37699	1.190815	1983.89	0.542872
1983.619	1140.809	1.278906	2.377081	1.190842	1983.85	0.229019
1983.733	1140.867	1.278919	2.377119	1.190854	1983.83	0.096617
1983.782	1140.891	1.278924	2.377135	1.190859	1983.82	0.04076
1983.802	1140.901	1.278927	2.377141	1.190861	1983.82	0.017196
1983.811	1140.905	1.278928	2.377144	1.190862	1983.82	0.007255
1983.814	1140.907	1.278928	2.377145	1.190862	1983.82	0.003061
1983.816	1140.908	1.278928	2.377146	1.190862	1983.82	0.001291

Maka suhu nyala adiabatik:

$$T_f = 1983.82 \text{ K} = 1710,82 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.5.4 Perhitungan Reaksi Pembakaran Minyak Jarak 2.5%

Reaksi pembakaran sempurna untuk minyak jarak 10% adalah:



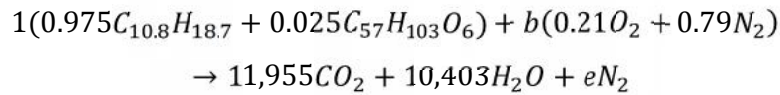
Berdasarkan jumlah atom C dan H maka nilai a, c dan d adalah:

$$a = 1$$

$$c = 0.975 \times 10.8 + 0.025 \times 57 = 11,955$$

$$d = (0.975 \times 18.7 + 0.025 \times 103) / 2 = 10,403$$

Sehingga:



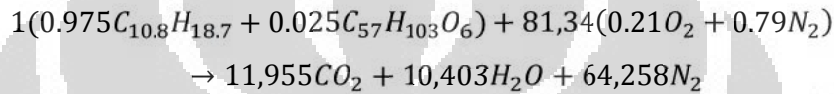
Berdasarkan jumlah atom O dan N maka nilai b dan e adalah:

$$0.21b \times 2 + 0.025 \times 6 = (11,955 \times 2 + 10,403)$$

$$b = \frac{34,313 - 0.15}{0.42} = 81,34$$

$$e = 81,34 \times 0.79 = 64,258$$

Maka persamaan reaksinya menjadi:



Perhitungan AFR Pembakaran

AFR molar teoritisnya adalah:

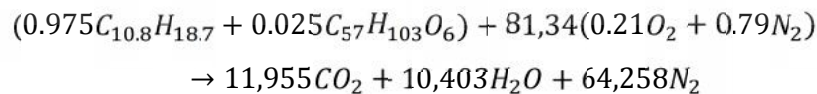
$$AFR_{molar\ teoritis} = \frac{mol\ udara}{mol\ bahan\ bakar} = \frac{81,34}{1} = 81,34$$

Sehingga AFR massa teoritisnya menjadi:

$$AFR_{massa\ teoritis} = \frac{molar \times massa\ molar\ udara}{molar \times massa\ molar\ bahan\ bakar} \\ = \frac{81,34(0.21 \times O_2 + 0.79 \times N_2)}{1(0.975C_{10.8}H_{18.7} + 0.025C_{57}H_{103}O_6)} \\ = \frac{81,34(0.21 \times 32 + 0.79 \times 28.013)}{1[0.975(10.8 \times 12.011 + 18.7 \times 1.008) + 0.025(57 \times 12.011 + 103 \times 1.008 + 6 \times 16)]} \\ = \frac{2346,68}{144,854 + 22,111} = \frac{2346,68}{166,965} = 14,055$$

Perhitungan Entalpi Pembakaran

Nilai h dapat dilihat pada table A-26 Yunus A. Cengel "Thermodynamic an Engineering Approach"



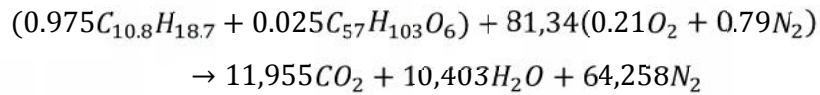
$$h_{O_2} (g) = 0$$

$$h_{N_2} (g) = 0$$

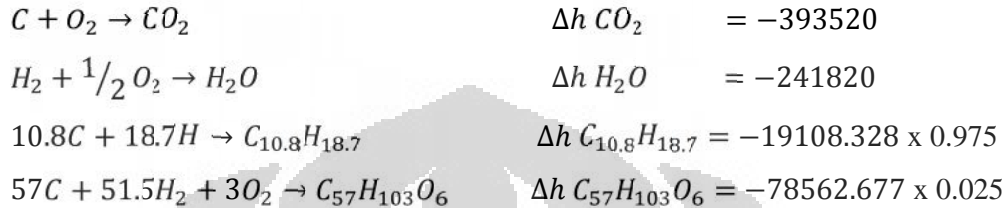
$$h_{CO_2} (g) = - 393520 [kJ/kmol] \times 11,955 = - 4704531,6 [kJ/kmol]$$

$$h_{H_2O} (g) = - 241820 [kJ/kmol] \times 10,403 = - 2515653,46 [kJ/kmol]$$

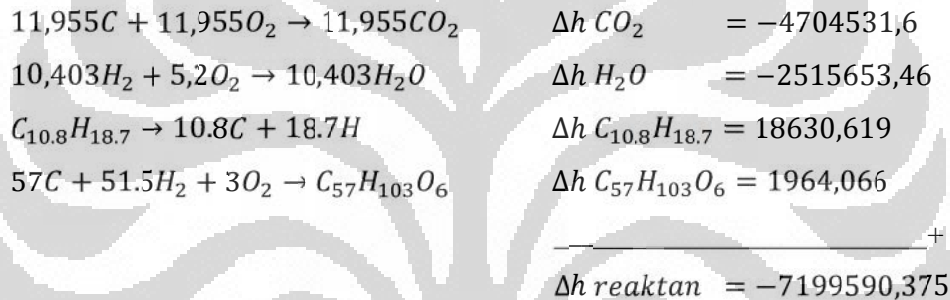
$$h \text{ minyak jarak} = -18764373 \text{ [kkal/mol]} = -78562.677 \text{ [kJ/kmol]} [1]$$



Nilai Δh product dan reaktan:



Total Δh setiap produk:



$$\Delta h \text{ reaktan} = -7199590,375 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$\Delta h \text{ reaktan} = \frac{-7199590,375 \text{ [kJ/kmol]}}{166,965 \text{ [kg/kmol]}}$$

$$\Delta h \text{ reaktan} = -43120,36 \text{ [kJ/kg]}$$

Perhitungan Suhu Nyala Adiabatik

Iterasi 1 (T rata-rata = 741,1 K)

Nilai T_{C_p} adalah:

$$T_{C_p} = \frac{T_f + T_0}{2}$$

$$T_{C_p} = \frac{741,1 + 298}{2} = \frac{1039,1}{2} = 519,55 \text{ K}$$

Berikut adalah perhitungan untuk C_p Produk

Nilai C_p untuk CO_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 22.26 + (5.981 \times 10^{-2})519,55 + (-3.501 \times 10^{-5})519,55^2 \\ + 7.469 \times 10^{-9}519,55^3 \\ C_{pk} = 1.0215 [kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk H_2O adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3 \\ C_{pk} = 32.24 + (0.192 \times 10^{-2})519,55 + 1.055 \times 10^{-5}519,55^2 \\ + (-3.595 \times 10^{-9})519,55^3 \\ C_{pk} = 1.975 [kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk N_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3 \\ C_{pk} = 28.90 - 0.157 \times 10^{-2} \times 519,55 + 0.808 \times 10^{-5}519,55^2 \\ + (-2.873 \times 10^{-9})519,55^3 \\ C_{pk} = 1.0660 [kJ/kg \cdot K]$$

Persamaan reaksi berbasis massa (table A-1):

- $0.975C_{10,8}H_{18,7} + 0.025C_{5,7}H_{10,3}O_6 + 81,34(0.21O_2 + 0.79N_2) \rightarrow 11,955CO_2 + 10,403H_2O + 64,258N_2$
- $0.975(148.568)C_{10,8}H_{18,7} + 0.025(891.87)C_{5,7}H_{10,3}O_6 + 17,08(31.999)O_2 + 64,25(28.013)N_2 \rightarrow 11,955(44.01)CO_2 + 10,403(18.015)H_2O + 64,258(28.013)N_2$
- $144,853C_{10,8}H_{18,7} + 22,296C_{5,7}H_{10,3}O_6 + 546,542O_2 + 1799,835N_2 \rightarrow 526,139CO_2 + 187,41H_2O + 1799,835N_2$
- $1C_{10,8}H_{18,7} + 0.154C_{5,7}H_{10,3}O_6 + 3,773O_2 + 12,425N_2 \rightarrow 3,632CO_2 + 1,293H_2O + 12,425N_2$

Maka nilai T_f adalah:

$$-\Delta h_{reaktan} = \sum_k^{\text{all product}} m_k C_{pk} (T_2 - T_0) \\ 43120,36 [kJ/kg] \\ = [3,632 (1.0215) + 1,293(1.975) + 12,425(1.0660)][T_2 - 298] \\ 43120,36 [kJ/kg] = [19,508][T_f - 298]$$

$$\frac{43120,36 [kJ/kg]}{19,508 [kJ/kg \cdot K]} = [T_f - 298]$$

$$T_f = 2508,26 K$$

Iterasi 2

$$T_{f \text{ baru}} = T_{f \text{ awal}} + \frac{T_{f \text{ akhir}} - T_{f \text{ awal}}}{2}$$

$$T_{f \text{ baru}} = 741,1 + \frac{2508,26 - 741,1}{2} = 1624,68$$

$$T_{C_p} = \frac{T_f + T_0}{2}$$

$$T_{C_p} = \frac{1624,68 + 298}{2} = 961,34 K$$

Berikut adalah perhitungan untuk C_p Produk

Nilai C_p untuk CO_2 adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 22.26 + (5.981 \times 10^{-2})961,34 + (-3.501 \times 10^{-5})961,34^2$$

$$+ 7.469 \times 10^{-9}961,34^3$$

$$C_{pk} = 1.231 [kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk H_2O adalah:

$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 32.24 + (0.192 \times 10^{-2})961,34 + 1.055 \times 10^{-5}961,34^2$$

$$+ (-3.595 \times 10^{-9})961,34^3$$

$$C_{pk} = 2,255 [kJ/kg \cdot K]$$

Nilai C_p untuk N_2 adalah:

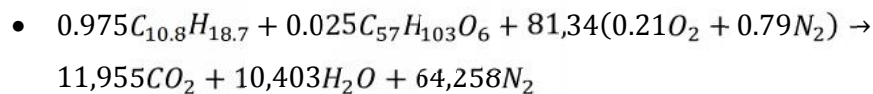
$$C_{pk} = a + bT_{C_p} + cT_{C_p}^2 + dT_{C_p}^3$$

$$C_{pk} = 28.90 - 0.157 \times 10^{-2} \times 961,34 + 0.808 \times 10^{-5}961,34^2$$

$$+ (-2.873 \times 10^{-9})961,34^3$$

$$C_{pk} = 1.153 [kJ/kg \cdot K]$$

Persamaan reaksi berbasis massa (table A-1):



- $0.975(148.568)C_{10.8}H_{18.7} + 0.025(891.87)C_{57}H_{103}O_6 + 17,08(31.999)O_2 + 64,25(28.013)N_2 \rightarrow 11,955(44.01)CO_2 + 10,403(18.015)H_2O + 64,258(28.013)N_2$
- $144,853C_{10.8}H_{18.7} + 22,296C_{57}H_{103}O_6 + 546,542O_2 + 1799,835N_2 \rightarrow 526,139CO_2 + 187,41H_2O + 1799,835N_2$
- $1C_{10.8}H_{18.7} + 0.154C_{57}H_{103}O_6 + 3,773O_2 + 12,425N_2 \rightarrow 3,632CO_2 + 1,293H_2O + 12,425N_2$

Maka nilai T_f adalah:

$$-\Delta h_{reaktan} = \sum_k^{all\ product} m_k C_{pk} (T_2 - T_0)$$

$$43120,36 [kJ/kg]$$

$$= [3,632 (1.231) + 1,293(2,255) + 12,425(1.153)][T_2 - 298]$$

$$43120,36 [kJ/kg] = [21,712][T_f - 298]$$

$$\frac{43120,36 [kJ/kg]}{21,712 [kJ/kg \cdot K]} = [T_f - 298]$$

$$T_f = 2283,4 K$$

Iterasi berikutnya menggunakan cara yang sama hingga masuk nilai toleransi 0.001, berikut adalah table iterasinya:

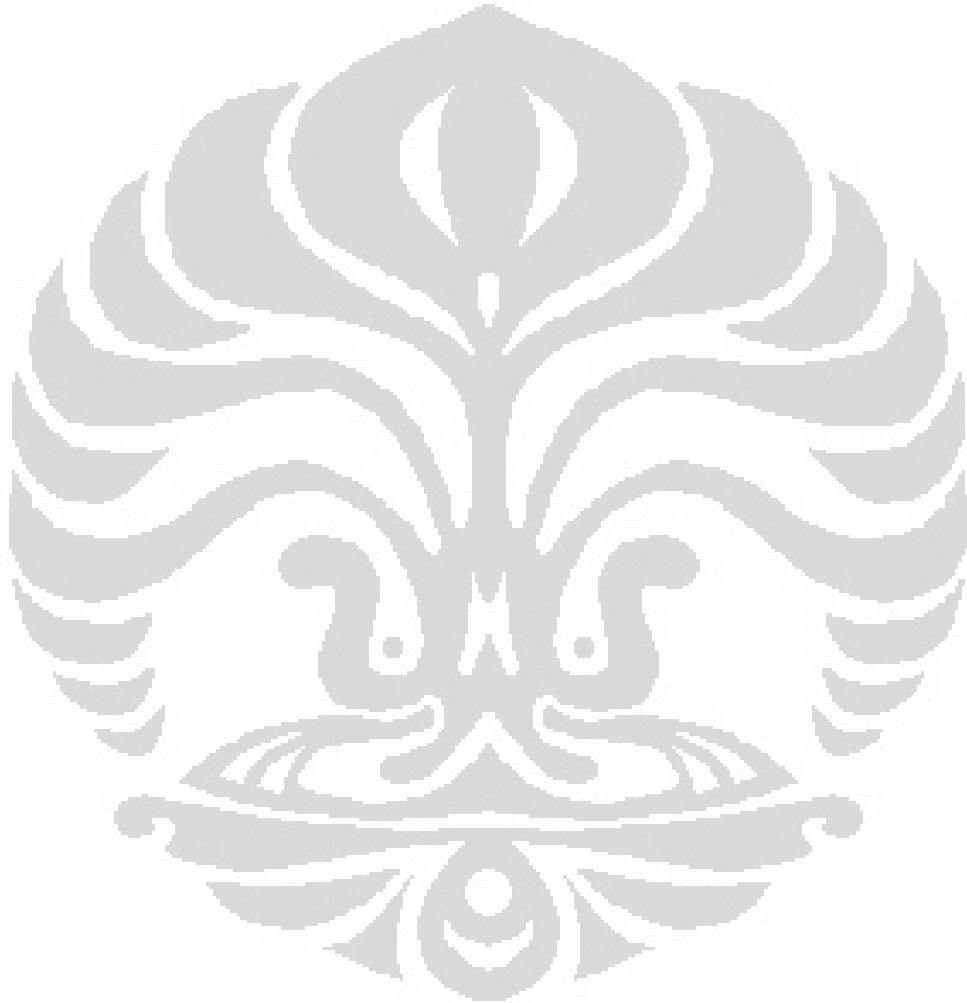
Tabel 4.16 Iterasi suhu nyala adiabatik

Tf awal	Tcp	mCp CO2	mCp H2O	mCp N2	Tf baru	Beda
741.1	519.55	1.021511	1.975084439	1.06602	2508.26	1767.156
1624.678	961.3389	1.231495	2.255999888	1.15323	2283.40	658.723
1954.039	1126.02	1.27557	2.367245282	1.18785	2218.50	264.457
2086.268	1192.134	1.289824	2.410856787	1.20101	2195.53	109.2632
2140.899	1219.45	1.295252	2.428568251	1.20626	2186.57	45.66916
2163.734	1230.867	1.297449	2.435908716	1.20842	2182.91	19.18024
2173.324	1235.662	1.298359	2.438979926	1.20932	2181.40	8.071535
2177.36	1237.68	1.298741	2.440270258	1.20969	2180.76	3.39957
2179.06	1238.53	1.298901	2.440813342	1.20985	2180.49	1.432339
2179.776	1238.888	1.298968	2.441042092	1.20992	2180.38	0.603577
2180.078	1239.039	1.298997	2.441138474	1.20995	2180.33	0.254359
2180.205	1239.102	1.299008	2.441179089	1.20996	2180.31	0.107194
2180.258	1239.129	1.299014	2.441196205	1.20996	2180.30	0.045175
2180.281	1239.141	1.299016	2.441203418	1.20997	2180.30	0.019039
2180.291	1239.145	1.299017	2.441206458	1.20997	2180.30	0.008024
2180.295	1239.147	1.299017	2.441207739	1.20997	2180.30	0.003381

2180.296	1239.148	1.299017	2.441208279	1.20997	2180.30	0.001425
----------	----------	----------	-------------	---------	---------	----------

Maka suhu nyala adiabetic:

$$T_f = 2180,3 \text{ K} = 1907,3 \text{ }^\circ\text{C}$$



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah

- a. Campuran minyak jarak 10% memiliki hasil yang paling maksimal di antara yang lain. Memiliki putaran turbin sebesar 38.795 rpm dengan temperatur inlet turbin sebesar 520 °C.
- b. Campuran minyak jarak 2.5% memiliki hasil yang kurang maksimal. Karena putaran turbin yang di dapat sebesar 38.313 rpm dengan temperatur inlet turbin sebesar 499 °C.
- c. Setelah melakukan perhitungan *pressure drop*. Dari ke empat campuran yang paling kecil *pressure drop* nya adalah campuran dengan minyak jarak 2.5% dan 5%
- d. *Pressure drop* yang paling besar adalah campuran minyak jarak 7.5% dan 10%.
- e. Perubahan yang terjadi antara campuran minyak jarak 2,5% - 10% perbedaannya tidak terlalu signifikan. Hal ini mungkin dikarenakan kandungan yang terdapat dalam campuran tersebut hasilnya hampir sama atau tidak terdapat perbedaan.
- f. Dari perhitungan suhu adiabatik, fraksi volume 10% menghasilkan suhu adiabatik sebesar 1662,797 K. fraksi volume 7,5% menghasilkan suhu adiabatik sebesar 1817,36 K. fraksi volume 5% menghasilkan suhu adiabatik sebesar 1983,82 K. fraksi volume 2,5% menghasilkan suhu adiabatik sebesar 2180,3 K.
- g. Semakin besar fraksi volume dari minyak jarak maka suhu adiabatik nya semakin menurun.

5.2 SARAN

Saran dari penelitian ini adalah

- a. Pada saat menyampurkan bahan bakar solar dengan minyak jarak agar menggunakan gelas ukur agar di dapatkan ukuran yang sangat presisi.

- b. Sebaiknya untuk penelitian selanjutnya kandungan dari minyak jarak agar di tingkatkan.
- c. Dalam mengoperasikan alat sebaiknya berhati-hati karena sering terjadi ledakan-ledakan kecil pada saat menyalakan percikan untuk starting awal.
- d. Proses pengambilan data dibutuhkan ketelitian dan kecepatan sehingga data yang di ambil akan akurat.
- e. Untuk penelitian selanjutnya untuk mempertimbangkan tentang kualitas proses pembakaran dari nozzle serta bagaimana droplet yang dihasilkan oleh nozzle.



DAFTAR PUSTAKA

- [1]. W. P. J Visser, S. A Shakariyants, M. Oostveen. (2011). *Development of a 3 kW Microturbine for CHP Applications*. ASME. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. April 2011, Vol. 133 / 042301;
- [2]. Dong J.C. et. al., *Analysis of the combustion instability of a model gas turbine combustor by the transfer matrix method*, Journal of Mechanical Science and Technology 23 (2009) 1602~1612, Springer-Verlag 2009;
- [3]. Schausberger P., Peter B. Friedl A., *Modeling and simulation of coupled ethanol and biogas production*, Clean Techn Environ Policy (2010) 12:163–170, Springer-Verlag 2009;
- [4]. Lysenko D. A., Solomatnikov A. A., *Numerical modeling of turbulen heat exchanger in the combustion chambers*, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 76, No. 4, 2003;
- [5]. Cohen H., at. al., *Gas Turbine Theory*, 4th Edition, Longman Group Limited, London 1996, ISBN 0-582-23622-0;
- [6]. Rudrapatna N. S., at. al., *An Experimental System for Assessing Combustor Durability*, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, April 2011, Vol. 133 / 042103-1;
- [7]. Jong Joon Lee, jae Eun Yoon, Tong Seop Kim, Jeong L. Sohm. (2007) *Performance Test and Component Characteristic Evaluation of a Micro Gas Turbine*. Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 21, No.1, pp. 141-152.
- [8]. Cengel, Y. A., Michael A. B., *Thermodynamic An Engineering Approach*, Mc Graw Hill, New York, 2002;
- [9]. Manurung, Effendi. (2011). *Tesis simulasi pembakaran pada ruang bakar Turbin Gas Mikro Proto X – I*. Depok
- [10]. *Manual Book GT85-2 Two Shaft gas Turbine*. TQ Internation

Lampiran 1

Tabel B.2 Turn “An Introduction to Combustion”

Table B.2 Curvefit coefficients for fuel specific heat and enthalpy^a for reference state of zero enthalpy of the elements at 298.15 K, 1 atm

$$c_p \text{ (kJ/kmol-K)} = 4.184(a_1 + a_2\theta + a_3\theta^2 + a_4\theta^3 + a_5\theta^{-2}),$$

$$h^\circ \text{ (kJ/kmol)} = 4184(a_1\theta + a_2\theta^2/2 + a_3\theta^3/3 + a_4\theta^4/4 - a_5\theta^{-1} + a_6),$$

where $\theta = T \text{ (K)}/1000$

Formula	Fuel	MW	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₆ ^b
CH ₄	Methane	16.043	-0.29149	26.327	-10.610	1.5656	0.16573	-18.331	4.300
C ₃ H ₈	Propane	44.096	-1.4867	74.339	-39.065	8.0543	0.01219	-27.313	8.852
C ₆ H ₁₄	Hexane	86.177	-20.777	210.48	-164.125	52.832	0.56635	-39.836	15.611
C ₈ H ₁₈	Isooctane	114.230	-0.55313	181.62	-97.787	20.402	-0.03095	-60.751	20.232
CH ₃ OH	Methanol	32.040	-2.7059	44.168	-27.501	7.2193	0.20299	-48.288	5.3375
C ₂ H ₅ OH	Ethanol	46.07	6.990	39.741	-11.926	0	0	-60.214	7.6135
C ₈ 26H _{15.5}	Gasoline	114.8	-24.078	256.63	-201.68	64.750	0.5808	-27.562	17.792
C _{7.76} H _{13.1}	Gasoline	106.4	-22.501	227.59	-177.26	56.048	0.4845	-17.578	15.232
C _{10.8} H _{18.7}	Diesel	148.6	-9.1063	246.97	-143.74	32.329	0.0518	-50.128	23.514

^aSOURCE: From Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, 1988, by permission of McGraw-Hill, Inc.

^bTo obtain 0 K reference state for enthalpy, add a₆ to a₆.

Lampiran 2

Tabel C.1 Turn “An Introduction to Combustion”

APPENDIX

C

SELECTED PROPERTIES OF AIR, NITROGEN, AND OXYGEN

Table C.1 Selected properties of air at 1 atm^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg-K)	$\mu \cdot 10^7$ (N-s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m-K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1,000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1,100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1,200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1,300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1,400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1,500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1,600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688

Lampiran 3

Tabel A.1 Cengel “*Thermodynamics an Engineering Approach*”

834
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-1
Molar mass, gas constant, and critical-point properties

Substance	Formula	Molar mass, <i>M</i> kg/kmol	Gas constant, <i>R</i> * /kg·K*	Critical-point properties		
				Temperature, K	Pressure, MPa	Volume, m ³ /kmol
Air	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Ammonia	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benzene	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromine	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2542
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Carbon monoxide	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Carbon tetrachloride	CCl ₄	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Chlorine	Cl ₂	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Chloroform	CHCl ₃	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2402
Dichlorodifluoromethane (R-12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Dichlorofluoromethane (R-21)	CHCl ₂ F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Ethane	C ₂ H ₆	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1675
Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helium	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hydrogen (normal)	H ₂	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Krypton	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Methane	CH ₄	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0992
Methyl alcohol	CH ₃ OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1169
Methyl chloride	CH ₂ Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Neon	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrogen	N ₂	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0879
Nitrous oxide	N ₂ O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxygen	O ₂	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0786
Propane	C ₃ H ₈	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propylene	C ₃ H ₆	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Sulfur dioxide	SO ₂	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Tetrafluoroethane (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102.03	0.08149	374.2	4.059	0.1993
Trichlorofluoromethane (R-11)	CCl ₃ F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Water	H ₂ O	18.015	0.4615	647.1	22.06	0.0560
Xenon	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186

*The unit kJ/kg·K is equivalent to mPa·m³/kg·K. The gas constant is calculated from $R = R_u/M$, where $R_u = 8.31447$ kJ/kmol·K and M is the molar mass.

Source: K. A. Kobe and R. E. Lynn, Jr., *Chemical Review* 52 (1953), pp. 117–236; and ASHRAE, *Handbook of Fundamentals* (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), pp. 16.4 and 36.1.

Lampiran 4

Tabel A.2 Cengel "Thermodynamics an Engineering Approach"

907
APPENDIX

TABLE A-2
Ideal-gas specific heats of various common gases (Concluded)
(c) As a function of temperature

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

(T in K, c_p in kJ/kmol·K)

Substance	Formula	a	b	c	d	Temperature range, K	% error	
							Max.	Avg.
Nitrogen	N ₂	28.90	-0.1571 × 10 ⁻²	6.8081 × 10 ⁻⁶	-2.873 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.59	0.34
Oxygen	O ₂	25.48	1.520 × 10 ⁻²	-0.7196 × 10 ⁻⁵	1.312 × 10 ⁻⁹	273-1800	1.19	0.28
Air	—	28.11	0.1967 × 10 ⁻²	0.4802 × 10 ⁻⁵	-1.966 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.72	0.33
Hydrogen	H ₂	29.11	-0.1916 × 10 ⁻²	0.4003 × 10 ⁻⁵	-0.8704 × 10 ⁻⁹	273-1800	1.01	0.26
Carbon monoxide	CO	28.16	0.1675 × 10 ⁻²	0.5372 × 10 ⁻⁵	-2.222 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.89	0.37
Carbon dioxide	CO ₂	22.26	5.981 × 10 ⁻³	-3.501 × 10 ⁻⁶	7.449 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.67	0.22
Water vapor	H ₂ O	32.24	-0.1923 × 10 ⁻²	1.054 × 10 ⁻⁵	-3.595 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.63	0.21
Nitric oxide	NO	29.34	-0.09395 × 10 ⁻²	0.3747 × 10 ⁻⁵	-4.187 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.97	0.36
Nitrous oxide	N ₂ O	24.11	5.8632 × 10 ⁻³	-3.962 × 10 ⁻⁶	10.58 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.59	0.26
Nitrogen dioxide	NO ₂	22.9	5.715 × 10 ⁻³	-3.52 × 10 ⁻⁶	7.87 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.46	0.18
Ammonia	NH ₃	27.568	2.5630 × 10 ⁻²	0.99072 × 10 ⁻⁵	-6.6909 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.91	0.36
Sulfur	S ₂	27.21	2.218 × 10 ⁻²	-1.628 × 10 ⁻⁵	3.986 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.99	0.38
Sulfur dioxide	SO ₂	25.78	5.795 × 10 ⁻²	-3.832 × 10 ⁻⁶	8.612 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.45	0.24
Sulfur trioxide	SO ₃	16.40	14.58 × 10 ⁻²	-11.20 × 10 ⁻⁶	32.42 × 10 ⁻⁹	273-1300	0.29	0.13
Acetylene	C ₂ H ₂	21.88	9.2143 × 10 ⁻²	-6.527 × 10 ⁻⁶	18.21 × 10 ⁻⁹	273-1500	1.46	0.59
Benzene	C ₆ H ₆	-36.22	48.475 × 10 ⁻²	-31.57 × 10 ⁻⁶	77.62 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.34	0.20
Methanol	CH ₃ O	19.0	9.152 × 10 ⁻²	-1.22 × 10 ⁻⁵	-8.039 × 10 ⁻⁹	273-1000	0.18	0.08
Ethanol	C ₂ H ₅ O	19.9	20.96 × 10 ⁻²	-10.38 × 10 ⁻⁶	20.05 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.40	0.22
Hydrogen chloride	HCl	30.33	-0.7620 × 10 ⁻²	1.327 × 10 ⁻⁵	-4.338 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.22	0.08
Methane	CH ₄	19.89	5.024 × 10 ⁻²	1.269 × 10 ⁻⁵	-11.01 × 10 ⁻⁹	273-1500	1.33	0.67
Ethane	C ₂ H ₆	6.900	17.27 × 10 ⁻²	-6.406 × 10 ⁻⁶	7.085 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.83	0.28
Propane	C ₃ H ₈	-4.04	30.48 × 10 ⁻²	-15.72 × 10 ⁻⁶	31.74 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.40	0.12
n-Butane	C ₄ H ₁₀	3.96	37.15 × 10 ⁻²	-18.34 × 10 ⁻⁶	35.00 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.54	0.24
i-Butane	C ₄ H ₁₀	-7.913	41.60 × 10 ⁻²	-23.01 × 10 ⁻⁶	49.91 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.25	0.13
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	6.774	45.43 × 10 ⁻²	-22.46 × 10 ⁻⁶	42.29 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.56	0.21
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	6.938	55.22 × 10 ⁻²	-26.65 × 10 ⁻⁶	57.69 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.72	0.20
Ethylene	C ₂ H ₄	3.95	15.64 × 10 ⁻²	-8.344 × 10 ⁻⁶	17.67 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.54	0.13
Propylene	C ₃ H ₆	3.15	23.83 × 10 ⁻²	-12.18 × 10 ⁻⁶	24.62 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.73	0.17

Source: B. G. Kyle, Chemical and Process Thermodynamics (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984). Used with permission.

Lampiran 5

Tabel A.26 Cengel “*Thermodynamics an Engineering Approach*”

944
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-25
Enthalpy of formation, Gibbs function of formation, and absolute entropy at 25°C, 1 atm

Substance	Formula	\bar{h}_f° kJ/kmol	\bar{g}_f° kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol·K
Carbon	C(s)	0	0	5.74
Hydrogen	H ₂ (g)	0	0	130.68
Nitrogen	N ₂ (g)	0	0	191.61
Oxygen	O ₂ (g)	0	0	205.04
Carbon monoxide	CO(g)	-110,530	-137,150	197.65
Carbon dioxide	CO ₂ (g)	-393,520	-394,360	213.80
Water vapor	H ₂ O(g)	-241,820	-228,590	188.83
Water	H ₂ O(l)	-285,830	-237,180	69.92
Hydrogen peroxide	H ₂ O ₂ (g)	-136,310	-105,600	232.63
Ammonia	NH ₃ (g)	-46,190	-16,590	192.33
Methane	CH ₄ (g)	-74,850	-50,790	186.16
Acetylene	C ₂ H ₂ (g)	+226,730	+209,170	200.85
Ethylene	C ₂ H ₄ (g)	+52,280	+68,120	219.83
Ethane	C ₂ H ₆ (g)	-84,680	-32,890	229.49
Propylene	C ₃ H ₆ (g)	+20,410	+62,720	266.94
Propane	C ₃ H ₈ (g)	-103,850	-23,490	269.91
n-Butane	C ₄ H ₁₀ (g)	-126,150	-15,710	310.12
n-Octane	C ₈ H ₁₈ (g)	-208,450	+15,530	466.73
n-Octane	C ₈ H ₁₈ (l)	-249,950	+6,510	360.79
n-Dodecane	C ₁₂ H ₂₆ (g)	-291,010	+50,150	622.83
Benzene	C ₆ H ₆ (g)	+82,930	+129,660	269.20
Methyl alcohol	CH ₃ OH(g)	-200,670	-162,000	239.70
Methyl alcohol	CH ₃ OH(l)	-238,660	-166,360	126.80
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH(g)	-235,310	-168,570	282.59
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH(l)	-277,690	-174,890	160.70
Oxygen	O(g)	+249,190	+231,770	161.06
Hydrogen	H(g)	+218,000	+203,290	114.72
Nitrogen	N(g)	+472,650	+455,510	153.30
Hydroxyl	OH(g)	+39,460	+34,280	183.70

Source: From JANAF, *Thermochemical Tables* (Midland, MI: Dow Chemical Co., 1971); Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties, NBS Technical Note 270-3, 1968, and APT Research Project 44 (Garcia Press, 1953).

Lampiran 6

Tabel A.27 Cengel “*Thermodynamics an Engineering Approach*”

945
APPENDIX

TABLE A-27
Properties of some common fuels and hydrocarbons

Fuel (phase)	Formula	Molar mass, kg/kmol	Density, ¹ kg/L	Enthalpy of vaporization, ² kJ/kg	Specific heat, ³ c_p , kJ/kg·K	Higher heating value, ³ kJ/kg	Lower heating value, ³ kJ/kg
Carbon (s)	C	12.011	2	—	0.708	32,800	32,800
Hydrogen (g)	H ₂	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Carbon monoxide (g)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Methane (g)	CH ₄	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Methanol (l)	CH ₃ O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Acetylene (g)	C ₂ H ₂	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Ethane (g)	C ₂ H ₆	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Ethanol (l)	C ₂ H ₅ O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Propane (l)	C ₃ H ₈	44.097	0.500	395	2.77	50,330	46,340
Butane (l)	C ₄ H ₁₀	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
1-Pentene (l)	C ₅ H ₁₀	70.134	0.641	363	2.20	47,260	44,630
Isopentane (l)	C ₅ H ₁₂	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Benzene (l)	C ₆ H ₆	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Hexene (l)	C ₆ H ₁₂	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexane (l)	C ₆ H ₁₄	86.177	0.660	366	2.27	48,910	44,740
Toluene (l)	C ₇ H ₈	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500
Heptane (l)	C ₇ H ₁₆	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Octane (l)	C ₈ H ₁₈	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
Decane (l)	C ₁₀ H ₂₂	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Gasoline (l)	C ₈ H _{17.871}	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Light diesel (l)	C ₈ H _{17.87}	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Heavy diesel (l)	C ₈ H _{17.79}	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Natural gas (g)	C ₃ H ₈ N _{0.14}	18	—	—	2	50,000	45,000

¹At 1 atm and 20°C.

²At 25°C for liquid fuels, and 1 atm and normal boiling temperature for gaseous fuels.

³At 25°C. Multiply by molar mass to obtain heating values in kJ/kmol.