



TUGAS AKHIR - TM091585

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI KECEPATAN *SWIRLER AIR* TERHADAP PANJANG NYALA PADA PEMBAKARAN BAHAN BAKAR BATUBARA

BAMBANG NUR CAHYO
NRP. 2111 106 009

Dosen Pembimbing
Ir. Eddy Harmadi Tjokrowisastro, ME.

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



TUGAS AKHIR - TM091585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI
KECEPATAN *SWIRLER AIR* TERHADAP PANJANG
NYALA PADA PEMBAKARAN BAHAN BAKAR
BATUBARA**

**BAMBANG NUR CAHYO
NRP. 2111 106 009**

**Dosen Pembimbing
Ir. Eddy Harmadi Tjokrowisastro, ME.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**



FINAL PROJECT - TM091585

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF VARIATION SPEED ON *SWIRLER* AIR FLAME LENGTH IN COAL BURNING

BAMBANG NUR CAHYO
NRP. 2111 106 009

Academic Supervisor
Ir. Eddy Harmadi Tjokrowisastro, ME.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TM091585

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
VARIATION SPEED ON *SWIRLER AIR* FLAME
LENGTH IN COAL BURNING**

**BAMBANG NUR CAHYO
NRP. 2111 106 009**

**Academic Supervisor
Ir. Eddy Harmadi Tjokrowisastro, ME.**

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

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI KECEPATAN *SWIRLER AIR* TERHADAP PANJANG NYALA PADA PEMBAKARAN BAHAN BAKAR BATUBARA

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Konversi Energi
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

BAMBANG NUR CAHYO
Nrp. 2111 106 009

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir.Eddy Harmadi Tjokrowisastro, ME.....(Pembimbing I)
(NIP. 19500314 197803 1 001)
2. Ir. Witantyo „M Eng.,Sc.....(Penguji I)
(NIP. 19630314 198803 1 002)
3. Bambang Arif D. ST.,M Eng.,PhD.....(Penguji II)
(NIP. 19780401 200212 1 001)
4. Dr.Bambang Sudarmanta ST.,MT.....(Penguji III)
(NIP. 19730116 199702 1 001)

SURABAYA
Januari, 2015

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI
KECEPATAN SWIRLER AIR TERHADAP PANJANG
NYALA PADA PEMBAKARAN BAHAN BAKAR
BATUBARA**

Nama Mahasiswa : Bambang Nur Cahyo
NRP : 2111106009
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Eddy H.Tjokrowisastro, ME.

Abstrak

Seiring berjalannya tahun harga bahan bakar minyak semakin melambung. Oleh karena itu orang-orang berupaya untuk menekan penggunaan bahan bakar minyak dengan yang lain, salah satunya dengan menggunakan bahan bakar batubara. Coal oil burner adalah bentuk burner yang menggunakan solar dan batubara sebagai bahan bakar utamanya. Dimana bahan bakar solar dan batubara akan dibakar pada saat start up. Akan tetapi bahan bakar solar hanya digunakan untuk membantu penyalaan awal guna mendapatkan nyala api yang diperlukan. Ini dilakukan sebagai upaya untuk meningkatkan efisiensi pada burner tersebut.

Pada Tugas Akhir ini, dirancang sebuah model sistem burner yang digunakan pada saat start up boiler. Dalam percobaan ini dilakukan variasi kecepatan swirler air pada kecepatan carrying air yang konstan. Variasi kecepatan swirler air sebesar 21,92 m/s, 17,39 m/s, dan 13,34 m/s sedangkan kecepatan carrying air sebesar 17,2 m/s. Setelah itu dilakukan pengukuran panjang nyala pada tiap tingkat kecepatan swirler air. Panjang nyala dimulai saat batubara mulai terbakar pada oil burner sampai pada panjang nyala api terakhir. Panjang nyala diukur dengan menggunakan meteran. Selain itu dalam dalam

percobaan juga diambil data tentang waktu habisnya bahan bakar batubara dengan massa 2 kg, serta laju pembakaran per satuan panjang dengan variasi pada kecepatan swirler air.

Dari perancangan dan pengujian didapatkan bahwa secara keseluruhan sistem yang dirancang telah berjalan dengan cukup baik. Dan dapat diketahui bahwa pada kecepatan 21,92 m/s dari swirler air mempunyai panjang nyala terendah dibandingkan pada kecepatan yang lain yaitu sebesar 3,18 m. Akan tetapi mempunyai laju pembakaran per satuan panjang tertinggi yaitu sebesar 94,536 kg/hr.m.

Kata Kunci : Coal, Coal Oil Burner, Solar, Start Up

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF VARIATION SPEED ON SWIRLER AIR FLAME LENGTH IN COAL BURNING

Name of Student : Bambang Nur Cahyo
NRP : 2111106009
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Adviser Lecturer : Ir. Eddy H.Tjokrowisastro, ME.

Abstract

Over the year the price of fuel is getting bounced. Hence the attempt to suppress the use of fuel oil with the other, one using coal fuel. Coal oil burner is a burner that uses a form of diesel and coal as its primary fuel. Where diesel fuel and coal will be burned at start up. However, diesel fuel is only used to help startup in order to obtain the required flame. This was done in an effort to improve the efficiency of the burner.

In this final project, we designed a system model burner used at start-up boiler. In this experiment to variation of the swirler air speed at a constant speed of carrying air. Variations in swirler air speed is 21.92 m / s, 17.39 m / s, 13.34 m / s while carrying air speed in 17.2 m / s. After the flame length measured at each level of the swirler air speed. The length of the flame begins when coal began to burn the oil burner flame until at long last. Flame length was measured by using a ruler. In addition, in the experiment also taken time data about runs out of coal with a mass of 2 kg, and the burning rate per unit length with variation in the speed of the swirler air.

From designing and testing it was found that the overall system is designed has been running pretty well. And it is known that the speed of 21.92 m / s of swirler air has the lowest flame

length as compared to the speed of the other speed is 3.18 m. But has the highest burning rate per unit length that is 94.536 kg / hr.m.

Keywords: Coal, Coal Oil Burner, Fuel, Start Up

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas ke hadirat ALLAH SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir ini yang berjudul:

“ STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI KECEPATAN *SWIRLER AIR* TERHADAP PANJANG NYALA PADA PEMBAKARAN BAHAN BAKAR BATUBARA “

Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Ir. Eddy H. Tjokrowisastro, ME., selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang selalu mengarahkan dan memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis.
2. Bapak Arif Wahyudi, ST., MT., Ph.D, selaku koordinator tugas akhir Jurusan Sarjana Teknik Mesin FTI-ITS.
3. Bapak Ir. Sudjud Darsopuspito, MT., selaku dosen wali.
4. Orang tua tercinta beserta keluarga yang selama ini mendukung penulis dalam proses belajar baik dukungan moril, materil dan spiritual.
5. Bapak Ir. Witantyo., M.Eng. Sc, Bapak Bambang Arif D . ST.,M.Eng.,PhD, dan Bapak Dr.Bambang Sudarmanta ST.,MT selaku dosen tim penguji yang memberikan saran dan masukan serta kritik yang menunjang kesempurnaan Tugas Akhir ini.
6. Rekan satu tim tugas akhir penulis yaitu Aldo, Adit, Tyo, dan Toni yang selalu memberikan dukungan dan kerja sama dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Teman-teman LJ 2011/2012 genap, terima kasih atas bantuan dan dukungannya selama ini.
8. Seluruh dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS.

9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	1
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Batasan Masalah	2
1.5. Manfaat Penelitian	3
1.6. Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Tinjauan Terdahulu	5
2.1.1. Menurut Zhengqi Li (2009) dkk	5
2.2. Pembakaran	6
2.2.1. Reaksi Pembakaran	7
2.3. Definisi	8
2.3.1. Definisi Bahan Bakar (<i>Fuel</i>)	8
2.3.1.1 Klasifikasi Bahan Bakar (<i>Fuel</i>)	9
2.3.2. Definisi Energi	10
2.3.2.1. Definisi Panas (<i>heat</i>)	10
2.4. Batubara	11
2.4.1. Klasifikasi Batubara	11
2.5. Bahan Bakar Solar	14
2.6. Udara Pembakaran	17
2.7. <i>Flame Stability</i>	21
2.8. Burner	21
2.8.1. Burner untuk Bahan Bakar Padat	22
2.9. Blower	23

2.9.1. Blower Sentrifugal	23
2.10. <i>Secondary Air</i>	24
2.11. Tekanan Statis, Stagnasi, dan Dinamis	25
2.12. Laju Pembakaran	27
2.13. <i>Swirl</i>	28
2.14. Indikator <i>performance burner</i>	28
2.15 <i>Excess Air</i>	30
BAB III METODE PENELITIAN.....	33
3.1. Peralatan Penelitian	33
3.2. Peralatan dan Bahan	34
3.3. Tata Cara Pengujian	43
3.3.1. Tahap Persiapan	43
3.3.2 Tahap Pengambilan Data	45
3.3.3. Tahap Analisa Perhitungan	51
3.4. Rancangan Eksperimen	52
3.4.1. Skema Percobaan	52
3.4.2 Parameter	53
3.5. Metodologi Peneitian	56
3.5.1. <i>Flowchart</i> Percobaan	56
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	57
4.1. Perhitungan	57
4.1.1. Perhitungan <i>Excess Air Solar Burner</i>	58
4.2. Data Awal Perencanaan	59
4.2.1. Menghitung Volume, Massa Batubara dan <i>Coal bin</i>	60
4.2.2 Menghitung laju aliran massa batubara, carrying air, dan swirler air	63
4.3. Hasil dan Analisa Percobaan	67
4.3.1. Analisa <i>Air-Fuel Ratio</i>	67
4.3.2. Kebutuhan Udara Stokiometri	69
4.3.3. Analisa laju pembakaran per panjang nyala	69
4.3.4. Analisa Hasil Panjang Nyala Api dengan Variasi Kecepatan <i>Swirler Air</i>	71
4.3.5. Analisa Pembentukan Lidah Api	83
BAB V PENUTUP	85

5.1. Kesimpulan.....	85
5.2. Saran.....	85

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

RIWAYAT PENULIS

halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Experimental set-up tiny oil ignition burner</i>	5
Gambar 2.2 Klasifikasi Batubara	14
Gambar 2.3 <i>Pulverized Coal Burner</i>	23
Gambar 2.4 Blower Sentrifugal.....	24
Gambar 2.5 <i>Secondary Air Fan</i>	24
Gambar 2.6 Pengukuran tekanan statis.....	25
Gambar 2.7 Pengukuran serempak tekanan statis dan stagnasi.....	26
Gambar 2.8 Tabung Pitot	26
Gambar 2.9 Zona resirkulasi pada <i>non premixed swirl burner</i> ..	28
Gambar 2.10 Karakteristik Nyala Api.....	30
Gambar 3.1 <i>Coal Oil Burner</i>	33
Gambar 3.2 Batubara sub bituminous	34
Gambar 3.3 <i>Light oil burner</i>	35
Gambar 3.4 <i>Carrying Air Blower</i>	36
Gambar 3.5 <i>Coal bin</i>	37
Gambar 3.6. Tangki bahan bakar solar.....	37

Gambar 3.7 penyangga <i>coal-oil burner</i>	38
Gambar 3.8 <i>Anemometer manual</i>	38
Gambar 3.9 <i>Swirler air blower</i>	39
Gambar 3.10 Tabung Pitot.....	40
Gambar 3.11 Meteran.....	40
Gambar 3.12 Stopwatch.....	41
Gambar 3.13 Pipa penyambung <i>swirler air</i>	42
Gambar 3.14 Timbangan batubara.....	42
Gambar 3.15 Letak venturi.....	43
Gambar 3.16 Massa 2 kg batubara.....	44
Gambar 3.17 <i>Carrying air blower</i> terbuka penuh.....	44
Gambar 3.18 <i>Swirler air blower</i> terbuka penuh.....	45
Gambar 3.19 Pengukuran kecepatan <i>carrying air blower</i>	47
Gambar 3.20 Pengukuran kecepatan <i>swirler air blower</i>	48
Gambar 3.21 <i>Cara Pengukuran</i>	50
Gambar 3.22 <i>Rancangan Eksperimen</i>	52
Gambar 3.23 <i>Bentuk fin</i>	54
Gambar 3.24 <i>Swirler air</i> tampak samping.....	55

Gambar 3.25 <i>Swirler air</i> tampak atas.....	55
Gambar 3.26 <i>Flowchart</i> Percobaan.....	56
Gambar 4.1 Bentuk <i>Coal Bin</i>	61
Gambar 4.2 Bentuk <i>Coal Bin</i> pengukuran.....	64
Gambar 4.3 <i>Carrying air</i> buka <i>full</i> dan <i>swirler air</i> buka <i>full</i>	72
Gambar 4.4 <i>Carrying air</i> buka <i>full</i> dan <i>swirler air</i> tutup setengah	76
Gambar 4.5 <i>Carrying air</i> buka <i>full</i> dan <i>swirler air</i> tutup tigaperempat	80
Gambar 4.6 Gambar panjang nyala berdasarkan <i>swirl</i>	82
Gambar 4.7 Lidah api pada ujung <i>burner</i>	84

halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Bentuk Reaksi Kimia Bahan Bakar.....	8
Table 2.2 Tabel Komposisi Udara di Atmosfer.....	18
Tabel 3.1 Komposisi batubara.....	51
Tabel 3.2 Parameter Pengukuran.....	53
Tabel 4.1 Komposisi Batubara	57
Tabel 4.2 Laju aliran massa batubara	64
Tabel 4.3 Laju aliran massa <i>carrying air</i>	64
Tabel 4.4 Hasil perbedaan ketinggian tabung pitot menurut bukaan <i>swirler air</i>	66
Tabel 4.5 Laju aliran massa <i>swirler air</i> menurut kecepatan.....	67
Tabel 4.6 AFR sebelum diberi m <i>excess air oil burner</i> dan m <i>swirler air</i>	67
Tabel 4.7 AFR setelah diberi m <i>excess air oil burner</i> dan m <i>swirler air</i>	68
Tabel 4.8 Kebutuhan udara stokiometri	69
Tabel 4.9 Laju Pembakaran per panjang nyala.....	70

halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT PENULIS



Penulis merupakan anak pertama dari 3 bersaudara, dilahirkan di kota Surabaya pada tanggal 09 Mei 1990. Pendidikan formal yang pernah ditempuh meliputi TK Al-Amin Surabaya, SDN Babat Jerawat I/118 Surabaya, SLTPN 26 Surabaya, SMAN 11 Surabaya. Setelah itu penulis meneruskan pendidikan di Program Studi di D3 Teknik Mesin ITS dan mengambil bidang studi Konversi Energi. Dan kemudian penulis melanjutkan kuliah S1 dengan mengikuti program lintas jalur di

jurusan Teknik Mesin ITS dan mengambil bidang studi Konversi Energi.

Selama di bangku perkuliahan penulis aktif di beberapa kegiatan seminar, pelatihan, dan organisasi kemahasiswaan. Penulis sangat senang dengan dunia keilmiah. Penulis pernah melakukan kerja praktek di PT.Petrokimia Gresik. Bagi pembaca yang ingin lebih mengenal penulis dan ingin berdiskusi lebih luas lagi dapat menghubungi *E-mail : bambang.nurchahyo@yahoo.com*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini perkembangan industri semakin pesat, setiap orang berlomba-lomba untuk mendapatkan suatu sistem terbaru yang berguna untuk menambah efisiensinya. Disini untuk menambah satu efisiensi system digunakan perubahan bentuk *burner* yang biasa menjadi *coal oil burner*. Dengan mengerti suatu karakteristik pembakarannya sehingga kita dapat meningkatkan efisiensi sistemnya.

Pemakaian *burner* kebanyakan pada saat ini adalah menggunakan bahan bakar cair dan sebagian besar memakai solar sebagai bahan bakar utamanya. Sebagaimana yang kita tahu harga solar semakin mahal. Oleh karena itu diupayakan untuk menggunakan bahan bakar solar sedikit mungkin. Salah satu penghematan biaya produksi yang dilakukan agar adalah dengan membuat sistem *burner* yang disebut *coal oil burner*.

Coal oil burner adalah bentuk *burner* yang menggunakan solar dan batubara sebagai bahan bakar utamanya. Dimana bahan bakar batubara dan solar akan digunakan bersama pada saat *start up*. Ini dilakukan sebagai upaya untuk meningkatkan efisiensi pada *burner* tersebut. Disini dilakukan design suatu *burner* yang disebut *coal oil burner*. Dan dilakukan proses analisa secara percobaan terhadap panjang nyala pada bahan bakar batubara terhadap variasi kecepatan pada *swirler air*.

1.2 Permasalahan

Pembakaran batubara dengan metode konvensional sangat mahal sehingga tidak menguntungkan dalam segi ekonomis, oleh karena itu dibuatlah sistem *burner* yang bernama *coal oil burner* yang sistem kerjanya sedikit berbeda dengan sistem *burner* yang konvensional dimana saat *start up* udara masuk yang bercampur dengan bahan bakar batubara akan dibakar dengan solar menggunakan *burner*. Ini dilakukan sebagai

upaya untuk meningkatkan efisiensi proses pembakaran tersebut. Karena pada metode konvensional dibutuhkan jumlah solar yang banyak dan waktu pemanasannya lama. Saat start up metode konvensional ini biasanya dibutuhkan bahan bakar solar sebanyak 140 kl atau setara Rp 980 juta pada saat *cold start* (*shutdown* lebih dari 72 jam) dan sebanyak 60 kl atau setara Rp 414 juta pada saat *hot start* (*shutdown* kurang dari 10 jam) dan *start up* membutuhkan waktu 6-8 jam saat *cold start* dan 1,5-2 jam pada saat *hot start*. Tapi dengan menggunakan *coal oil burner*, hal itu dapat segera diatasi karena dapat melakukan penghematan konsumsi solar yang digunakan pada saat *start up*. Ini dikarenakan dengan menggunakan *coal oil burner* yang mana dilakukan pembakaran batubara lebih cepat daripada sebelumnya. Dengan menggunakan *coal oil burner* ini maka pemakaian solar turun dari 140 kl menjadi 30 kl sehingga biaya pada saat start up turun dari 980 juta menjadi 207 juta. Pemakaian rata-rata BBM per proses start up saat hot start secara overall pemakaian BBM turun dari 142 kl menjadi 30 kl atau efisiensi hingga 79 %. Biaya start up turun dari Rp 980 juta menjadi Rp 207 juta.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan pengaruh variasi kecepatan *swirler air* terhadap panjang nyala.
2. Menemukan *design* rancang bangun *coal oil burner*.
3. Mengetahui laju pembakaran per panjang nyala api saat proses pembakaran.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini ada beberapa batasan masalah yang ditetapkan sehingga bahasan yang dilakukan tidak menyimpang dari tujuan utama. Batasan masalah tersebut meliputi:

1. Bahan bakar yang dipakai batubara dan minyak.
2. Proses terjadi dalam keadaan udara standar.

3. Variasi yang digunakan adalah kecepatan aliran *swirler air* yang disuplai dari *blower*.
4. Analisa yang dilakukan adalah analisa laju pembakaran batubara.
5. Fluida kerja adalah udara yang bersifat *steady, incompressible, fully develop* dan *uniform*.
6. Udara yang digunakan pada suhu kamar, tidak ada pemanasan awal.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu :

1. Mengurangi biaya pengeluaran pada saat *start-up boiler*.
2. Mengurangi penggunaan konsumsi bahan bakar solar pada saat *start up boiler* dengan pembakaran batubara lebih awal dari sebelumnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB I

PENDAHULUAN

Pengantar bagi pembaca untuk secara singkat mengetahui latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dibahas mengenai beberapa teori penunjang yang mendukung dalam pemecahan masalah.

BAB III

METODE PENELITIAN

Bab ini berisi tentang peralatan penelitian, peralatan dan bahan, tata cara pengujian, rancangan eksperimen, dan metode penelitian.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang perhitungan dan analisa hasil percobaan panjang nyala pada *coal oil burner* terhadap variasi kecepatan pada *swirler air*.

BAB V

PENUTUP

Bab ini adalah jawaban dari pertanyaan yang terkandung pada tujuan penelitian.

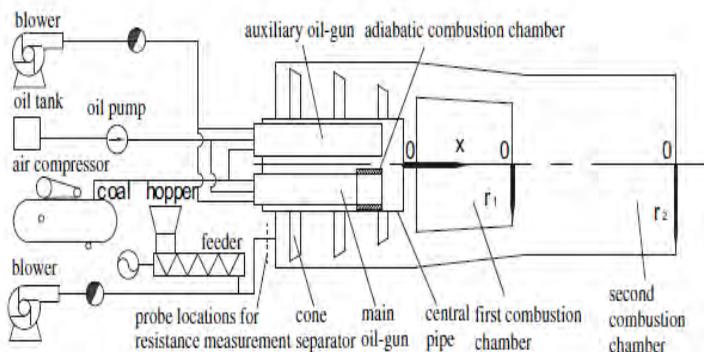
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Terdahulu

2.1.1 Menurut Zhengqi Li (2009) dkk

Sebuah tiny-oil ignition burner telah dikemukakan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar minyak selama proses *firing-up* dan operasi beban-parsial. Untuk mengetahui pengaruh tingkat umpan yang berbeda pada pengapian batubara bituminous dalam *tiny-oil ignition burner*, skala lengkap percobaan reaksi aliran dilakukan pada setup eksperimental. Pengapian *burner* biasanya digunakan dalam utilitas boiler 800-MW. Distribusi temperatur gas didalam burner diperoleh dengan nilai dari pengisian batu bara 2, 3, 4, dan 5 ton / jam.

Dengan melakukan penelitian pada *tiny oil burner* mengenai *excess air* dengan variasi ratio 0.56, 0.75, 0.98 dan 1.14 dan kecepatan pada primary air 17, 23, 30, dan 35 m/s terhadap distribusi temperatur dari *flue gas*, didapatkan suatu penghematan 90% dari minyak yang biasanya dikonsumsi dalam proses *firing-up*, temperatur disepanjang garis tengah *burner* secara bertahap meningkat sepanjang arah aliran udara yang dialiri oleh batu bara. Model dari *burner* yang digunakan adalah sebagai berikut :



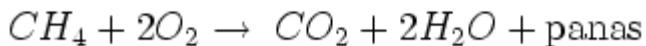
Gambar 2.1 *experimental set-up tiny oil ignition burner*

2.2 Pembakaran

Pembakaran adalah suatu runutan reaksi kimia antara suatu bahan bakar dan suatu oksidan, disertai dengan produksi panas yang disertai cahaya dalam bentuk pendar atau api.

Dalam suatu reaksi pembakaran lengkap, suatu senyawa bereaksi dengan zat pengoksidasi, dan produknya adalah senyawa dari tiap elemen dalam bahan bakar dengan zat pengoksidasi.

Contoh:



Tipe pembakaran ada 2 yaitu :

- Pembakaran sempurna

Pada pembakaran sempurna, reaktan terbakar dengan oksigen menghasilkan beberapa produk. Ketika hidrokarbon terbakar dengan oksigen, maka reaksi utama akan menghasilkan karbon dioksida dan air. Ketika elemen dibakar, maka produk yang dihasilkan biasanya juga berupa oksida. Karbon dibakar menghasilkan karbon dioksida, sulfur dibakar menghasilkan sulfur dioksida, dan besi dibakar menghasilkan besi (III) oksida. Nitrogen tidak dianggap sebagai komponen yang bisa terbakar jika oksigen dipakai sebagai agen pengoksidasi, namun nitrogen oksida NO_x dalam jumlah kecil biasanya akan terbentuk.

Jumlah udara yang diperlukan untuk pembakaran sempurna disebut udara teoritis. Namun, pada prakteknya digunakan jumlah 2-3 kali jumlah udara teoritis.

- Pembakaran tidak sempurna

Pembakaran tak sempurna dihasilkan bila tidak ada oksigen yang cukup untuk membakar bahan bakar sepenuhnya menjadi karbon dioksida dan air.

Pada banyak bahan bakar, seperti minyak diesel, batu bara, dan kayu, pirolisis muncul sebelum pembakaran. Pada

pembakaran tak sempurna, produk pirolisis tidak terbakar dan mengkontaminasi asap dengan partikulat berbahaya, misalnya oksidasi sebagian etanol menghasilkan asetaldehida yang berbahaya, begitu juga dengan oksidasi sebagian karbon yang menghasilkan karbon monoksida yang beracun.

Kualitas pembakaran dapat ditingkatkan dengan desain alat pembakaran, seperti pembakar minyak dan mesin pembakaran dalam. Perbaikan lebih lanjut mencakup alat katalitik pasca pembakaran (seperti konverter katalitik). Beberapa alat-alat ini biasanya dibutuhkan oleh banyak mobil / kendaraan di berbagai negara untuk memenuhi aturan lingkungan negaranya mengenai standar emisi. Derajat pembakaran dapat diukur dan dianalisis dengan peralatan uji. Kontraktor HVAC dan insinyur menggunakan analiser pembakaran untuk menguji efisiensi pembakar selama proses pembakaran.

2.2.1 Reaksi Pembakaran

Reaksi pembakaran dari bahan bakar, dapat terjadi jika syarat-syarat kimia berikut tercapai:

- Terjadi kombinasi yang sempurna antara dua atau lebih reaktan berdasarkan rasio stoikiometrik.
- Massa elemen reaktan harus sama dengan massa hasil reaksi (hukum kekekalan massa)
- Senyawa kimia terbentuk dari elemen-elemen kombinasi dengan hubungan massa yang tetap.
- Formasi dari senyawa yang menghasilkan panas (reaksi eksotermik) ataupun yang membutuhkan panas (reaksi endotermik), berdasarkan atas perubahan energi bebas dari reaksi.

Tabel berikut menjelaskan bentuk reaksi kimia pada berbagai jenis bahan bakar.

Tabel 2.1. Bentuk reaksi kimia bahan bakar

Combustible	Molecular Weight	Reaction	Heat Release (Btu/lb)
Carbon	12	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	14,100
Hydrogen	2	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	61,000
Sulfur	32	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	4,000
Hydrogen sulfide	34	$H_2S + 1.5O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$	7,100
Methane	16	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	23,900
Ethane	30	$C_2H_6 + 3.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	22,300
Propane	44	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	21,500
Butane	58	$C_4H_{10} + 6.5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$	21,300
Pentane	72	$C_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O$	22,000

Source: *Combustion*, edited by Joseph G. Singer, © 1991. Used by permission from Combustion Engineering, Inc.

2.3 Definisi

2.3.1 Bahan Bakar (*Fuel*)

Bahan bakar singkatnya adalah zat yang mudah terbakar. Di dalam hal ini penekanan akan diberikan kepada bahan bakar hidrokarbon, yang mengandung hydrogen dan karbon. Sulfur dan zat-zat kimia lainnya juga mungkin ada. Bahan bakar hidrokarbon dapat memiliki bentuk cair, gas, dan padat.

Bahan bakar hidrokarbon cair umumnya dihasilkan dari minyak mentah melalui proses destilasi dan cracking. Sebagai contoh adalah bensin, solar, minyak tanah, dan berbagai jenis bahan bakar minyak lainnya. Kebanyakan bahan bakar cair merupakan campuran dari hidrokarbon dengan komposisi yang biasanya diberikan di dalam bentuk fraksi massa. Untuk memudahkan perhitungan-perhitungan pembakaran, bensin seringkali dimodelkan sebagai oktan C_8H_{18} , dan solar sebagai dodekan, $C_{12}H_{26}$.

Bahan bakar hidrokarbon berbentuk gas diperoleh dari sumur-sumur gas alam atau diproduksi melalui proses kimia tertentu. Gas alam biasanya terdiri dari beberapa hidrokarbon yang berbeda, yang terutama diantaranya adalah metan, CH_4 . Komposisi dari bahan bakar gas biasanya diberikan didalam

bentuk fraksi mol. Bahan bakar hidrokarbon dalam bentuk cair maupun gas dapat disintesis dari batubara, oil shale, atau pasir ter.

Batubara merupakan bahan bakar padat yang sudah dikenal. Komposisinya cukup bervariasi tergantung dari lokasi penambangannya. Untuk perhitungan-perhitungan pembakaran, komposisi batubara biasanya diekspresikan sebagai analisis pokok. Analisis pokok memberikan komposisi berbasis massa dalam bentuk jumlah relative elemen-elemen kimia (karbon, sulfur, hydrogen, nitrogen, oksigen) dan abu.

Bahan bakar (fuel) merupakan suatu bahan (material) yang dikonsumsi untuk menghasilkan energi. Bertolak dari gagasan di atas, maka terdapat sejumlah bahan yang memenuhi batasan di atas dan dapat dibagi dalam tiga kelompok, yaitu :

1. Bahan yang dikonsumsi dalam proses pembakaran reaksi kimia.
2. Bahan yang digunakan pada reaktor nuklir reaksi inti.
3. Bahan yang dikonsumsi oleh makhluk hidup metabolisme.

2.3.1.1 Klasifikasi Bahan Bakar (Fuel)

Bahan bakar diklasifikasikan menurut kondisi fisiknya:

1. Padat : Batubara, kokas, kayu, arang dan ampas (*bagasse*)
2. Cair : A. Minyak bumi (*petroleum product*)
 - Bensin (*Gasoline*)
 - Solar (*Diesel oil*)
 - Minyak Tanah (*Kerosene*)
 - Minyak Residu (*Residual Oil*)

2.3.2 Definisi Energi

Energi adalah suatu kerja yang ada dalam berbagai bentuk dimana energi tersebut bisa dikonversikan dari suatu bentuk ke bentuk lainnya. Dalam suatu sistem fisik energi dapat berubah dari bentuk ke suatu bentuk tertentu.

2.3.2.1 Definisi Panas (heat)

Panas merupakan energi yang bergerak dari suatu sistem ke sistem lainnya semata mata karena perbedaan suhu antara kedua sistem. Mekanisme perpindahan panas tersebut dapat berupa radiasi, konduksi maupun konveksi.

Telah disebutkan di atas bahwa bahan bakar (fuel) adalah bahan yang dikonsumsi untuk menghasilkan sejumlah energi panas. Didalam proses pembakaran bahan bakar diperoleh suhu yang tinggi dari hasil proses tersebut, dan karena perbedaan suhu antara titik dimana proses pembakaran terjadi dan lingkungannya maka terjadilah perpindahan energi yang berupa panas. Jumlah energi panas maksimum yang dibebaskan oleh suatu bahan bakar melalui reaksi pembakaran sempurna persatuan massa atau volume bahan bakar tersebut didefinisikan sebagai nilai kalor bahan bakar. Dengan demikian, satuan nilai kalor bahan bakar adalah KJ/kg, KJ/m³, Kkal/kg, Kkal/m³, Btu/lb, dan Btu/ft³.

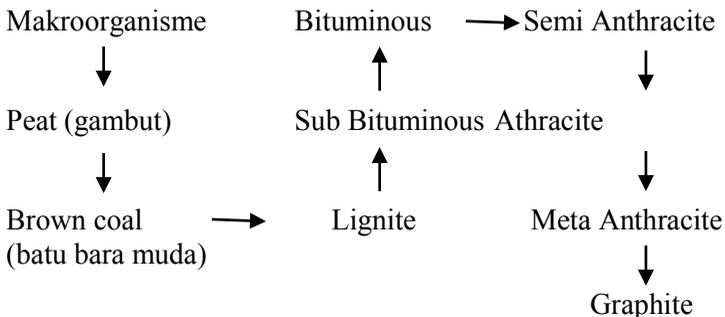
Ditinjau dari fase H₂O yang merupakan salah satu produk proses pembakaran, nilai kalor bahan bakar dibedakan atas :

- b. Nilai kalor atas (NKA) bila H₂O produk pembakaran dalam fase cair (jenuh), dan
- c. Nilai kalor bawah (NKB) bila H₂O produk pembakaran dalam fase gas (jenuh).

Dengan demikian selisih antara NKA dan NKB merupakan panas laten penguapan total massa air yang dihasilkan oleh proses pembakaran satu satuan massa atau volume suatu bahan bakar.

2.4 Batubara

Berbagai penelitian yang telah dilakukan pada batu bara bermuara pada suatu simpulan bahwa batu bara merupakan bahan bakar padat yang berasal dari makroorganisme terutama tersusun atas lignin dan selulosa yang mengalami perubahan komposisi susunan atau struktur karena proses biokimia (metamorfosa) pada tekanan dan suhu tertentu dalam rentang waktu yang sangat panjang. Selama proses metamorfosa unsur – unsur O_2 , N_2 , H_2 dan S secara berangsur keluar dalam bentuk gas sehingga tertinggal unsur – unsur C dalam prosentase terbesar kemudian berturut – turut O_2 , N_2 , H_2 dan S serta beberapa unsur lainnya. Secara skematis derajat metamorfosa yang menggambarkan tingkat batu bara tersusun sebagai berikut:



Secara teknis dan ekonomis “peat”, brown coal dan graphite tidak dianggap sebagai batu bara. Dengan demikian yang disebut sebagai batu bara mewakili derajat metamorfosa Lignite, Sub Bituminous, Bituminous, Semi Anthracite dan Meta Anthracite.

2.4.1 Klasifikasi Batubara

Batubara dapat diklasifikasikan berdasarkan derajat metamorfosa, nilai komersial dan berdasarkan kegunaan batu bara. Klasifikasi yang disebutkan pertama yang banyak dipergunakan sebagai acuan utama.

➤ **Klasifikasi menurut tingkatannya**

Klasifikasi ini adalah yang terpenting dalam mengklasifikasikan batubara. Batu bara diklasifikasikan menurut derajat metamorfosennya dalam bentuk alamiah. Klasifikasi yang di ambil dari ASTM adalah berdasarkan atas prosentase karbon tetap (fixed carbon) dan panas pembakaran (heating value) pada kondisi batu bara bebas bahan mineral (mineral matter free). Untuk batu bara dengan tingkatan yang lebih tinggi diklasifikasikan menurut karbon tetapnya pada keadaan kering, sementara untuk tingkatan yang lebih rendah, didasarkan pada nilai kalor dimana batu bara masih mengandung kebasahan (moisture).

- **Meta Anthracite** : adalah batu bara dengan kadar karbon tinggi yang mempunyai sifat mendekati graphite dalam struktur dan komposisinya. Biasanya sukar untuk dinyalakan dan dibakar.
- **Anthracite** : juga disebut sebagai batu bara keras, karena kekerasannya, padat dan hitam mengkilat. Agak sukar untuk dinyalakan dan terbakar dengan nyala api pendek, tanpa asap, dan berwarna biru. Anthracite terutama digunakan untuk pemanas ruangan dan sebagian bahan dari karbon. Pada industri besi dan baja digunakan dengan dicampur bituminous untuk pembuatan coke, sebagai pelapis cetakan, pemanas dan sebagai campuran coke pada proses pengecoran. Selain daripada itu juga digunakan pada berbagai macam tujuan dimana nyala api yang bersih dan steady diperlukan.
- **Semi Anthracite** : padat tapi agak lemah dibanding anthracite, terbakar dengan nyala api pendek, bersih dan kebiru – biruan. Penggunaannya hampir sama dengan anthracite.
- **Low Volatile Bituminous Coal** : berwarna hitam keabu – abuan, mempunyai struktur yang bulat – bulat dan mudah pecah dalam pengangkutan. Terbakar dengan nyala api yang pendek dan tidak berasap. Digunakan sebagai campuran higher volatile bituminous coal dalam pembuatan coke, pemanasan ruangan.

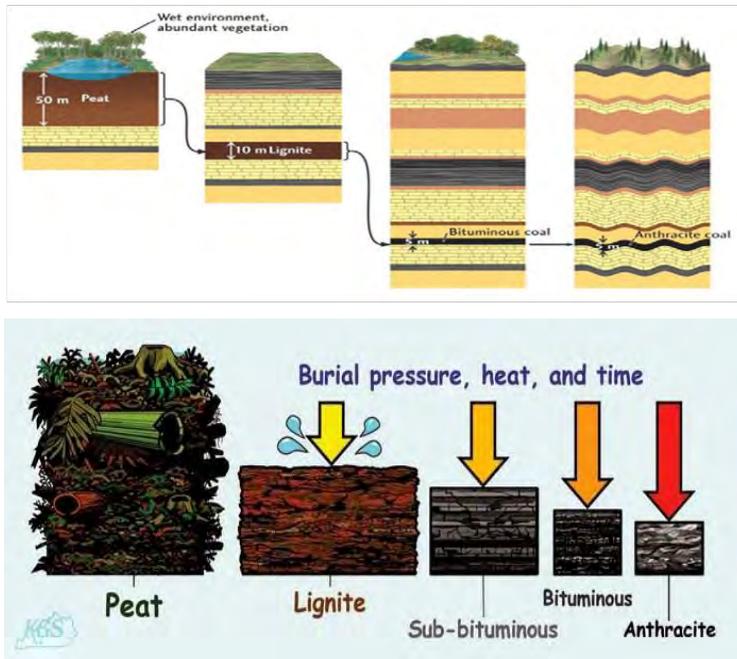
Low volatile bituminous coal tidak boleh dikarbonasikan sendiri pada oven yang berbentuk selokan karena dapat berkembang dan merusak dinding oven.

- **Medium Volatile Bituminous Coal** : merupakan batu bara yang mempunyai sifat antara low dan high volatile bituminous coal sehingga karakteristik berada antara keduanya. Sebagian mempunyai sifat agak lunak dan mudah pecah, sebagian lainnya mempunyai sifat keras dan tidak pecah dalam pengangkutan. Berasap apabila dibakar dengan cara yang kurang baik. Coke yang dibuat dari batu bara ini mempunyai kekuatan yang baik sekali.

- **High Volatile Bituminous Coal** : mempunyai struktur yang homogen dengan garis – garis mengkilat, bersifat keras dan tidak mudah pecah dalam pengangkutan. Berasap apabila tidak dibakar dengan baik. Mempunyai kadar moisture dan oksigen yang cukup tinggi. Digunakan dalam pembuatan coke dengan dicampur batu bara dengan mutu yang lebih baik.

- **Sub Bituminous Coal** : mempunyai struktur yang homogen, kandungan moisturenya tinggi, dan mudah pecah apabila ditempatkan di udara terbuka karena penyusutan sebagai akibat dari penguapan moisturenya. Penggunaannya terutama untuk pemanas (bahan bakar ketel uap).

- **Lignite** : berwarna coklat kehitaman, mempunyai kadar moisture 30 – 40 % dan panas pembakaran yang rendah. Seperti sub bituminous mempunyai kecenderungan untuk pecah selama pengeringan dengan udara. Lignite digunakan untuk bahan bakar ketel uap dan dapat dibakar dengan menggunakan tungku bakar maupun dari bentuk lembut (pulverized form).



Gambar 2.2. Klasifikasi Batubara

2.5 Bahan Bakar Solar

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bahan bakar solar yaitu sebagai

berikut :

1. Sifat utama dari bahan bakar solar

Bahan bakar diesel biasa juga disebut light oil atau solar, adalah suatu campuran dari hydrocarbon yang telah di distilasi setelah bensin dan minyak tanah dari minyak mentah pada temperatur 200 sampai 340. Sebagian besar solar digunakan untuk menggerakkan mesin diesel. Bahan bakar diesel mempunyai sifat utama sebagai berikut.

- Tidak berwarna atau sedikit kekuning-kuningan dan berbau.

- Encer dan tidak menguap dibawah temperatur normal.
- Mempunyai titik nyala tinggi (40 C-100 C).
- Terbakar spontan pada 350 C, sedikit dibawah temperatur bensin yang terbakar sendiri sekitar 500 C.
- Mempunyai berat jenis 0,82-0,86.
- Menimbulkan panas yang besar (sekitar 10.500 kcal/kg).
- Mempunyai kandungan sulfur lebih besar dibanding bensin.

2. Syarat-syarat solar

Kualitas solar yang diperlukan sebagai berikut :

a. Mudah terbakar

Waktu tertundanya pembakaran harus pendek / singkat sehingga engine mudah dihidupkan. Solar harus dapat memungkinkan engine bekerja lembut dengan sedikit knocking.

b. Tetap encer pada suhu dingin (tidak mudah membeku)

Solar harus tetap cair pada temperatur rendah sehingga engine akan mudah dihidupkan dan berputar lembut.

c. Daya Pelumasan

Solar juga berfungsi sebagai pelumas untuk pompa injeksi dan nosel. Oleh karena itu harus mempunyai sifat daya pelumas yang baik.

d. Kekentalan

Solar harus mempunyai kekentalan yang memadai sehingga dapat disemprotkan oleh injektor.

e. Kandungan Sulfur

Sulfur merusak pemakaian komponen engine, dan kandungan sulfur solar harus sekecil mungkin.

f. Stabil

Tidak berubah alam kualitas, tidak mudah larut selama disimpan.

3. Nomor Cetane (Cetane Number)

Nomor cetane atau tingkatan dari solar adalah satu cara untuk mengontrol bahan bakar solar dalam kemampuan untuk mencegah terjadinya knocking. Tingkatan yang lebih besar

memiliki kemampuan yang lebih baik. Ada dua skala indek untuk mengontrol kemampuan solar untuk mencegah knocking dan mudah terbakar yaitu cetane index dan diesel index. Minimal tingkatan cetane yang dapat diterima untuk bahan bakar yang digunakan untuk engine diesel kecepatan tinggi umumnya 40-45.

Oleh karena, itu engine diesel perbandingan kompresinya (15:1-22:1) lebih tinggi daripada engine bensin(6:1-12:1) dan juga engine diesel dibuat dengan kontruksi yang jauh lebih kuat dari pada engine bensin. Dibandingkan dengan engine bensin pada engine diesel mempunyai keuntungan dan kerugian sebagai berikut:

➤ **Keuntungan :**

- Engine diesel mempunyai efisiensi panas yang lebih besar. Hal ini berarti bahwa penggunaan bahan bakarnya lebih ekonomis dari pada engine bensin.
- Mesin diesel bisa lebih lama dan tidak memerlukan electric igniter. Hal ini berarti bahwa kemungkinan kesulitan lebih kecil daripada engine bensin.
- Momen pada engine diesel tidak berubah pada jenjang tingkat kecepatan yang luas. Hal ini berarti bahwa engine diesel lebih fleksibel dan lebih mudah dioperasikan dari pada engine bensin. Hal inilah sebabnya engine diesel digunakan pada kendaraan-kendaraan yang besar.

➤ **Kerugian :**

- Tekanan pembakaran maksimum hampir dua engine bensin. Hal ini berarti bahwa suara dan getaran engine diesel lebih besar.
- Tekanan pembakarannya yang lebih tinggi, maka engine diesel harus dibuat dari bahan yang tahan tekanan tinggi dan harus mempunyai struktur yang sangat. Hal ini berarti bahwa untuk daya kuda yang sama, engine diesel jauh lebih berat dari pada engine bensin dan biaya pembuatannya pun menjadi lebih mahal.
- Engine diesel memerlukan sistem injeksi bahan bakar yang presisi. Dan ini berarti bahwa harganya lebih mahal dan

memerlukan pemeliharaan yang lebih cermat dibanding dengan engine bensin.

- Engine diesel mempunyai perbandingan kompresi yang lebih tinggi dan membutuhkan gaya yang lebih besar untuk memutarinya. Oleh karena itu engine diesel memerlukan alat pemutar seperti motor stater dan baterai yang berkapasitas lebih besar.

Pada sistem bahan bakar engine diesel, feed pump menghisap bahan bakar dari tangki bahan bakar. Bahan bakar disaring oleh fuel filter dan kandungan air yang terdapat pada bahan bakar dipisahkan oleh fuel sender sebelum dialirkan ke pompa injeksi bahan bakar. Rakitan pompa injeksi terdiri dari pompa injeksi, governor, timer dan feed pump. Ada dua tipe pompa injeksi : tipe distributor dan tipe in-line. Dengan digerakkan oleh engine, pompa injeksi menekan bahan bakar dan mengalirkannya melalui *delivery line* ke *injection nozzle*, dan selanjutnya diinjeksikan ke dalam silinder menurut urutan pengapian.

2.6 Udara Pembakaran

Menurut Moran, Michael J., Shapiro, Howard N dalam *Fundamentals of Engineering Thermodynamics Fifth Edition* (1). Dalam proses pembakaran selalu diperlukan oksigen. Oksigen ini dapat diperoleh dari udara atmosfer. Beberapa definisi mengenai udara dapat dinyatakan sebagai berikut :

- Udara kering adalah udara tanpa kandungan air (dry air)
- Udara basah (wet air) adalah udara dengan kandungan air yang masih terikat
- Udara standard (standard air) adalah udara dengan kandungan 0,013 kg air per kg udara kering (sesuai dengan RH = 60% pada 25°C)

Komposisi udara dan data lain sebagai berikut :

Tabel 2.2. Tabel komposisi Udara di Atmosfer

Unsur	% Volume	% Berat
Oksigen (O ₂)	20,99	23,15
Nitrogen (N ₂)	78,03	76,85
Gas lain	0,98	

- Berat molekul ekuivalen dari udara = 29
- Mole udara / mole oksigen = 100/10,99
= 4,76
- Mole N₂ / mole oksigen = 78,04/20,99
= 3,76
- Kg udara kering / kg O₂ = 100/23,15
= 4,32
- Kg N₂ / kg O₂ = 76,85/23,15
= 3,32

Jumlah minimum udara yang memberikan oksigen yang cukup untuk pembakaran tuntas terhadap semua karbon, hydrogen, dan sulfur yang terkandung didalam bahan bakar disebut jumlah udara teoritis. Untuk pembakaran tuntas dengan jumlah udara teoritis, produk yang dihasilkan terdiri dari karbondioksida, air, sulfur dioksida, nitrogen yang menyertai oksigen di dalam air, dan setiap nitrogen yang terkandung di dalam bahan bakar. Oksigen bebas tidak akan muncul sebagai salah satu produk pembakaran.

Sebagai contoh :

Tentukan jumlah udara teoritis untuk pembakaran tuntas terhadap metan. Untuk reaksi ini, produk yang dihasilkan menghasilkan hanya karbondioksida, air, dan nitrogen.



Dimana a, b, c dan d mempresentasikan jumlah mol dari oksigen, karbondioksida, air dan nitrogen.

Didalam menuliskan sisi sebelah kiri dari persamaan diatas, 3.76 mol nitrogen dianggap menyertai setiap mol oksigen. Dengan menerapkan prinsip konservasi massaterhadap karbon,

hydrogen, oksigen, dan nitrogen, secara berturut turut akan diperoleh empat persamaan diantara empat variable yang tidak diketahui

$$\begin{array}{rcl} \text{C :} & b & = 1 \\ \text{H :} & 2c & = 4 \\ \text{O :} & 2b+c & = 2a \\ \text{N :} & d & = 3,76a \end{array}$$

Dengan menyelesaikan persamaan-persamaan tersebut, persamaan kimia yang setimbang adalah



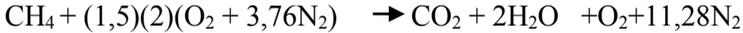
Koefisien 2 di depan suku ($\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2$) pada persamaan itu adalah jumlah mol oksigen di dalam udara pembakaran, per mol bahan bakar dan bukan jumlah udara. Jumlah udara pembakaran adalah 2 mol oksigen plus $2 \times 3,76$ mol nitrogen, sehingga memberikan total 9,52 mol udara per mol bahan bakar. Jadi, untuk untuk reaksi yang diberikan melalui persamaan itu rasio udara bahan bakar dengan basis molar adalah 9,52. Untuk menghitung rasio udara bahan bakar dengan basis massa, gunakan persamaan untuk menuliskan

$$\begin{aligned} \overline{AF} &= \left(\frac{\text{Mudara}}{\text{Mbahan bakar}} \right) \\ &= 9,52 \left(\frac{28,97}{16,04} \right) \\ &= 17,19 \end{aligned}$$

Jumlah udara yang disuplai biasanya lebih besar atau lebih kecil dari jumlah teoritis. Jumlah air actual yang disuplai biasanya dinyatakan dalam bentuk presentase udara teoritis. Sebagai contoh, udara teoritis 150% berarti udara actual yang disuplai adalah 1,5 kali jumlah udara teoritis. Jumlah udara yang suplai dapat juga dinyatakan sebagai persentase kelebihan atau persentase kekurangan udara. Jadi udara teoritis 150% adalah

sebanding dengan kelebihan udara 50 %, udara teoritis 80%, adalah sebanding dengan kekurangan udara 20%.

Contoh :



Didalam persamaan ini, jumlah udara per mol bahan bakar adalah 1,5 kali dari jumlah teoritis yang ditentukan melalui persamaan diatas. Oleh sebab itu, rasio udara bahan bakar adalah 1,5 kali jumlah rasio udara bahan bakar yang ditentukan oleh persamaan diatas. Karena diasumsikan pembakaran tuntas produk yang dihasilkan mengandung hanya karbondioksida, air, nitrogen, dan oksigen. Kelebihan udara yang disuplai muncul di dalam produk pembakaran sebagai oksigen bebas dan jumlah nitrogen yang lebih besar daripada di dalam persamaan itu berdasarkan pada jumlah udara teoritis.

Rasio ekivalensi adalah rasio actual bahan bakar udara terhadap rasio bahan bakar udara untuk pembakaran dengan jumlah udara teoritis. Jika rasio ekuivalensi lebih kecil daripada satu, reaktan reaktan membentuk apa yang disebut campuran encer (lean). Jika rasio tersebut lebih besar daripada satu, reaktan-reaktan membentuk apa yang disebut campuran kental (rich).

Dua parameter yang sering dipakai untuk memberikan kuantifikasi jumlah bahan bakar dan udara di dalam sebuah proses pembakaran tertentu adalah rasio udara- bahan bakar dan kebalikannya, rasio bahan bakar-udara. Rasio udara- bahan bakar singkatnya adalah rasio jumlah udara didalam sebuah reaksi terhadap jumlah bahan bakar. Rasio ini dapat dituliskan dengan basis molar (mol udara dibagi dengan mol bahan bakar) atau dengan basis massa (massa udara dibagi dengan massa bahan bakar). Konversi diantara kedua ini dilakukan menggunakan berat molekuler dari udara, M_{udara} , dan bahan bakar, $M_{\text{bahan bakar}}$.

$$\frac{\text{Massa udara}}{\text{Massa bahan bakar}} = \frac{\text{mol udara} \times M_{\text{udara}}}{\text{mol bahan bakar} \times M_{\text{bahan bakar}}}$$

$$= \frac{\text{mol udara}}{\text{mol bahan bakar}} \left(\frac{M \text{ udara}}{M \text{ bahan bakar}} \right)$$

Atau

$$AF = \overline{AF} \left(\frac{M \text{ udara}}{M \text{ bahan bakar}} \right)$$

Dimana \overline{AF} adalah rasio udara-bahan bakar dengan basis molar dan AF adalah rasio dengan basis massa.

2.7 Flame Stability

Pada proses pembakaran dengan bahan bakar yang terpenting adalah menjaga nyalanya. Nyala api dikatakan stabil apabila dapat menyala dengan baik secara terus menerus tanpa adanya gangguan yang mempengaruhinya, dan tidak terjadi *flash back* dan *blow out*. Hal ini diperlukan untuk menjaga temperatur dalam proses pembakaran. Kestabilan nyala api yang terjadi sangat tergantung dari tipe burner, laju alir udara dan campuran bahan bakar.

- *Flash back*, dimana kecepatan campuran relatif rendah dibandingkan dengan kecepatan nyala api yang terjadi, sehingga nyala api masuk merambat ke saluran bahan bakar. Hal ini sangat membahayakan dan harus dihindari.
- *Attached*, dimana kecepatan campuran sama dengan kecepatan nyala api sehingga dasar nyala api didekat outlet burner.
- *Lifted*, dimana kecepatan campuran lebih tinggi dari pada kecepatan nyala api sehingga dasar nyala api terangkat menjauhi outlet burner.
- *Blow out*, dimana kecepatan campuran sangat tinggi dibandingkan dengan kecepatan nyala api, sehingga nyala api akan mati. Hal ini sangat dihindari karena tidak menghasilkan nyala api.

2.8 Burner

Sumber energi kalor atau panas diperoleh dari proses pembakaran. Proses pembakaran pada mesin tenaga uap terjadi

pada *furnace*. Pada *furnace* terdapat *burner*. *Furnace* ditempatkan menyatu dengan boiler dan terpisah dengan fluida kerja air yang mengalir pada pipa-pipa boiler. Berdasarkan dari jenis bahan bakar yang digunakan, burner diklasifikasikan menjadi tiga yaitu:

1. *Burner* untuk bahan- bakar cair
2. *Burner* untuk bakar bakar gas
3. *Burner* untuk bahan bakar padat

Berbagai macam teknologi telah dikembangkan untuk menaikkan efisiensi dari proses pembakaran. Efisiensi proses pembakaran yang tinggi akan menaikkan efisiensi total dari *furnace* dan jumlah panas yang ditransfer ke boiler menjadi semakin besar. *Furnace* harus mudah dikendalikan untuk merespon jumlah uap dengan temperatur dan tekanan tertentu.

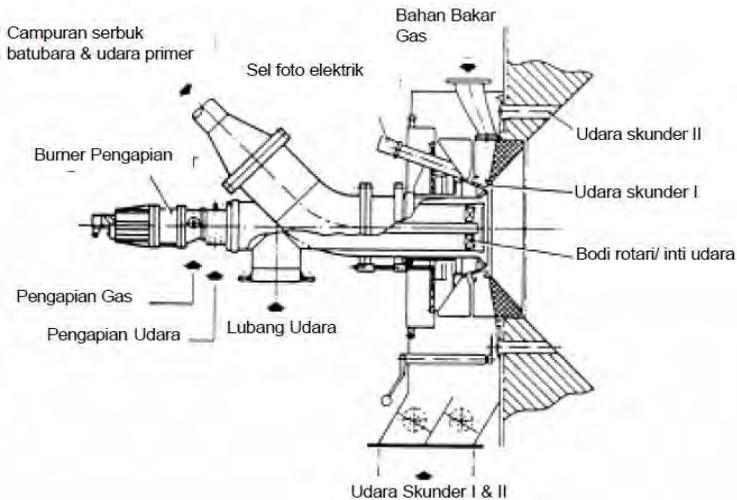
2.8.1 *Burner* untuk Bahan Bakar Padat

Bahan bakar padat merupakan bahan bakar yang sangat belimpah di alam. Bahan bakar ini harus melalui proses yang lebih rumit daripada jenis bahan-bakar lainnya untuk terbakar. Bahan bakar padat mengandung air, zat terbang, arang karbon dan abu. Air dan gas terbang yang mudah terbakar harus diuapkan dulu melalui proses pemanasan sebelum arang karbon terbakar. Bahan bakar padat banyak dipakai sebagai sumber energi pada mesin tenaga uap. Bahan bakar tersebut dibakar di *furnace* dengan stoker atau dengan burner. Ada beberapa tipe burner atau stoker yang dipasang di *furnace* seperti berikut ini :

➤ ***Pulverizer Fuel Burner***

Bahan-bakar padat akan dihancurkan lebih dahulu dengan alat *pulverizer* sampai ukuran tertentu sebelum dicampur dengan udara. Selanjutnya campuran serbuk batu bara dan udara diberi tekanan kemudian disemprotkan menggunakan difuser. Proses pembakaran dibantu dengan penyalaan dengan bahan bakar gas atau cair untuk menguapkan air dan zat terbang. Udara tambahan

diperlukan untuk membantu proses pembakaran sehingga lebih efisien.



Gambar 2.3 *Pulverizer coal burner*

2.9 *Blower*

Blower adalah alat penyuplai udara. *Blower* sering digunakan karena tekanan antarannya yang tinggi yang diperlukan untuk mengatasi turun tekan dalam sistem ventilasi. Sebagian besar blower berbentuk sentrifugal. *Blower* juga dapat digunakan untuk memasok udara *draft* ke *boiler* dan tungku.

2.9.1 *Blower Sentrifugal*

Blower sentrifugal mengolah udara atau gas yang masuk dalam arah aksial dan keluar dalam arah radial. Tipe *blower* ini mempunyai 3 bilah: bilah radial atau lurus, bilah bengkol maju (*forward curved blade*), dan bilah bengkol mundur (*backward curved blade*). *Blower* bilah radial biasanya digunakan dalam aplikasi yang mempunyai temperatur tinggi dan diameter yang besar. Bilah yang dalam arah radial mempunyai tegangan (stress) yang sangat rendah dibandingkan dengan bilah bengkol maju ataupun mundur. Rotor mempunyai 4-12 bilah dan biasanya

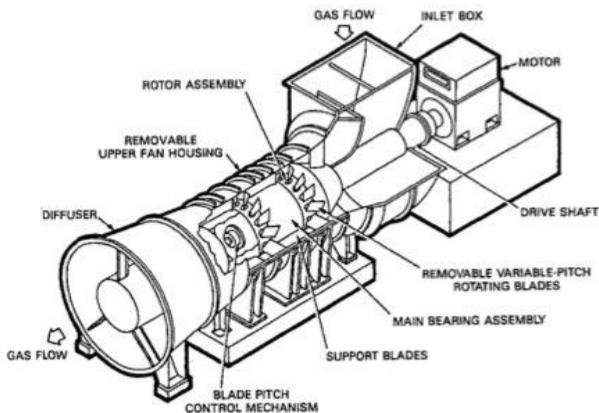
beroperasi pada kecepatan rendah. Blower ini digunakan dalam kerja buangan (exhaust work), khususnya untuk gas-gas pada temperatur tinggi dan dengan suspensi dalam alirannya.



Gambar 2.4. *Blower* Sentrifugal

2.10 *Secondary Air*

Secondary air adalah udara pembakaran yang dimanfaatkan oleh burner untuk meningkatkan kelengkapan pembakaran agar pembakaran menjadi lebih sempurna. Udara yang dimasukkan ke dalam tungku (selain udara utama) yang masuk baik sebagai campuran dengan bahan bakar atau di sekitar api untuk membantu pembakaran. Udara yang juga digunakan sebagai udara pendingin, berbeda dengan *primary air*.



Gambar 2.5. *Secondary air fan*

Kipas inilah yang menjadi penyupply utama udara ke dalam *furnace boiler* untuk memenuhi kebutuhan proses pembakaran. Berbeda dengan *primary air* yang menitik beratkan kepada tekanan kerjanya, *secondary air* lebih diutamakan kontrol terhadap debit volume-nya. Oleh karena itulah *secondary air* umumnya menggunakan kipas dengan tipe aksial yang dapat menghasilkan volume debit aliran yang tinggi.

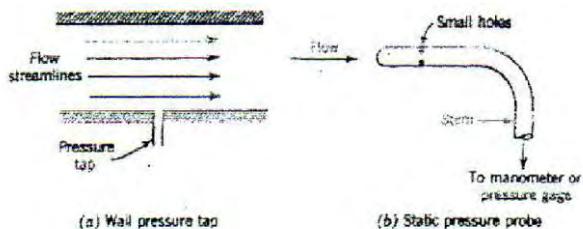
Untuk mengatur jumlah udara yang di-supply ke boiler, sudu-sudu pada *secondary air fan* dapat bergerak-gerak fleksibel membuka dan menutup. Semakin besar bukaan sudu maka akan semakin banyak pula udara yang dialirkan oleh kipas ini ke boiler untuk mencukupi kebutuhan proses pembakaran.

2.11 Tekanan Statis, Stagnasi, dan Dinamis

Menurut Fox, R.W., Mc Donald A.T., and Pritchard P.J dalam *Introduction to Fluid Mechanics Eighth Edition (2)*.

A. Tekanan statis

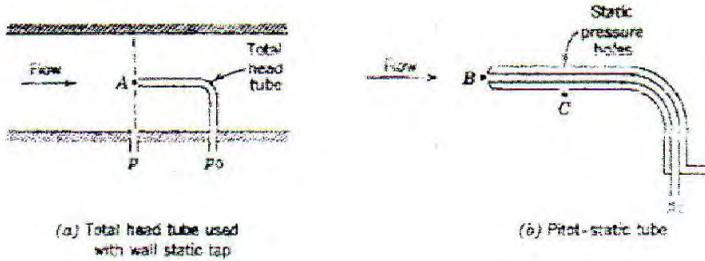
Tekanan statis adalah tekanan yang diukur oleh alat ukur yang bergerak bersama – sama aliran dengan kecepatan yang sama. Tekanan statis dapat diukur melalui *wall pressure tap* dan *static pressure probe*.



Gambar 2.6 Pengukuran tekanan statis

B. Tekanan Stagnasi

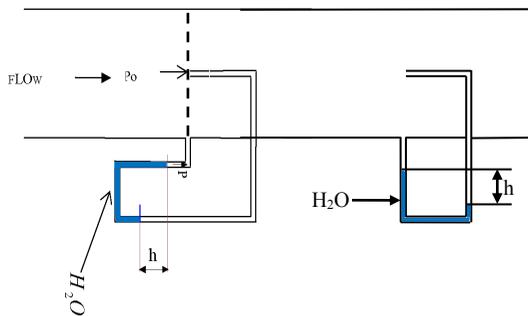
Tekanan stagnasi adalah tekanan yang dapat diukur bila aliran diperlambat sampai kecepatannya sama dengan nol.



Gambar 2.7 Pengukuran serempak tekanan statis dan stagnasi

C. Tekanan Dinamis

Tekanan dinamis adalah perbedaan tekanan antara tekanan stagnasi dan tekanan statis. Jadi berdasarkan perbedaan antara tekanan stagnasi P_0 dan tekanan statis P , kecepatan aliran dapat dihitung/diukur. Cara inilah yang digunakan tabung pitot untuk mengukur kapasitas aliran. Berikut ini gambar tabung pitot pada suatu aliran untuk mendapatkan kecepatan aliran.



Gambar 2.8 Tabung Pitot

Berdasarkan persamaan Bernoulli:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \frac{P_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2}$$

$$V_0 = 0 \text{ (tekanan stagnasi)}$$

$$P_o = P + \frac{1}{2} \rho V^2, \text{ sehingga :}$$

$$\frac{1}{2} \rho V^2 = P_o - P \text{ (tekanan dinamis)}$$

$$V^2 = \frac{2(P_o - P)}{\rho}, \text{ dari gambar terlihat bahwa:}$$

$$P_o - P = \rho_{H_2O} g h - \rho_{udara} g h$$

Jadi:

$$V = \sqrt{\frac{2\rho_{H_2O} g h}{\rho_{ud}}} \dots\dots\dots(2.27)$$

Dimana:

- V = kecepatan aliran, (m/s)
- ρ_{H_2O} = massa jenis air, (kg/m³)
- ρ_{ud} = massa jenis udara, (kg/m³)
- g = percepatan gravitasi, (m/s²)
- h = beda ketinggian fluida pada tabung pitot (m)
- P = tekanan statis, (Pa)
- P_o = tekanan stagnasi, (Pa)

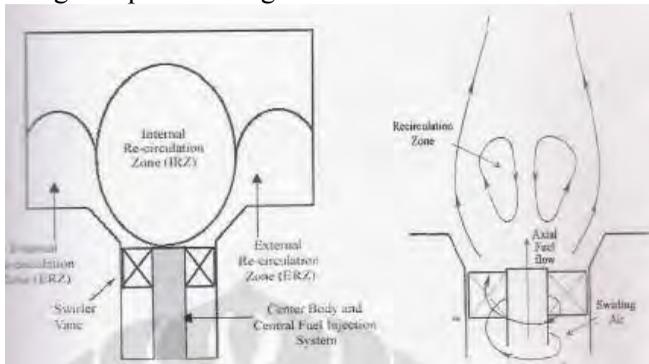
2.12 Laju Pembakaran

Laju Pembakaran atau konsumsi bahan bakar batubara per panjang nyala yaitu berapa besar pembakaran terjadi. Jadi jika nilai konsumsi bahan bakar per panjang nyalanya semakin besar maka laju aliran massa yang dibakar dalam setiap panjangnya juga semakin banyak sehingga pembakaran akan semakin lebih cepat. Dan dengan semakin besar konsumsi bahan bakar per panjang nyala diharapkan dapat mengurangi gas buang seperti smoke, karbon yang tidak terbakar dan karbon yang terbakar sebagian. Konsumsi bahan bakar batubara per panjang nyala dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\text{Laju pembakaran (kg/h.m)} = \frac{\text{laju aliran massa batubara } \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)}{\text{panjang nyala (m)}}$$

2.13 *Swirl*

Swirl ditimbulkan dari pengaplikasian sebuah pergerakan spiral dari sebuah aliran. Pergerakan spiral ini diperoleh dengan menambahkan aliran tangensial kepada aliran aksial. Fungsi dari *swirl* ini untuk menciptakan zona resirkulasi internal. Pada pembakaran non premixed berguna dalam penyempurnaan pencampuran udara dan bahan bakar agar pembakaran dapat berjalan sempurna, serta untuk menstabilkan beberapa hasil fraksi pembakaran agar terbakar kembali sehingga kadar partikel padat pada exhaust gas dapat dikurangi.



Gambar 2. 9. Zona resirkulasi pada *non-premixed swirl burner*

2.14 *Indikator performance burner*

Performance suatu *burner* dapat dikatakan baik atau tidak bisa dilihat dari beberapa indikator sebagai berikut :

1. Gas buang

Batubara identik sebagai bahan bakar yang kotor dan tidak ramah lingkungan karena komposisinya yang terdiri dari C, H, O, N, S dan abu. Sehingga gas buang hasil pembakaran menghasilkan polutan gas SO_x dan NO_x menyebabkan terjadinya hujan asam yang dapat merusak hutan dan lahan pertanian, CO₂

yang berperan dalam proses pemanasan global yaitu kenaikan suhu dipermukaan bumi, dan merkuri (Hg) yang berbahaya bagi makhluk hidup.

Berdasarkan definisi limbah B3 BAPEDAL (1995) adalah setiap bahan sisa (limbah) suatu kegiatan proses produksi yang mengandung bahan berbahaya dan beracun (B3) karena sifat (toxicity, flammability, reactivity) serta konsentrasi atau jumlah yang baik secara langsung maupun tak langsung dapat merusak, mencemarkan lingkungan atau membahayakan kesehatan manusia. Serta mengacu pada PP No. 85 tahun 1999 tentang pengelolaan limbah B3 maka polutan gas buangan proses pembakaran merupakan limbah B3. Jadi diharapkan hasil pembakaran batubara hanya berupa CO_2 , H_2O , dan panas dengan kandungan SO_x , NO_x nya seminimal mungkin.

2. Distribusi temperatur

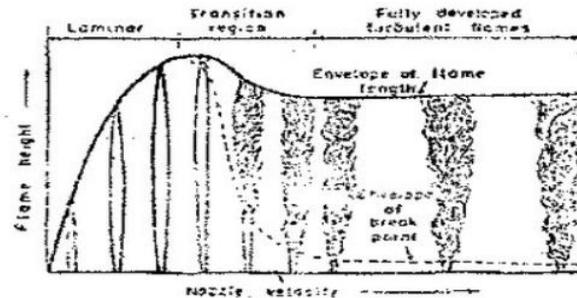
Distribusi temperatur pada pembakaran batubara adalah semakin meningkat seiring dengan banyaknya batubara yang dibakar. Ini dikarenakan karbon pada batubara terbakar pada temperatur 1200 celcius dan bisa meningkat temperturnya karena akumulatif dari gulungan nyala api dari batubara tersebut. Jadi semakin menjauhi *outlet burner* maka temperatur juga akan semakin meningkat. Dan temperatur juga semakin meningkat pada pembakaran batubara pada daerah tengah daripada di sisi pinggir. Ini dikarenakan di daerah tengah karbon pada batubara lebih cepat terbakar habis daripada di daerah pinggir nyala api.

3. Turbulent Diffusion Flame

Turbulent Diffusion Flame merupakan suatu fenomena nyala api yang komplek, struktur nyala terbentuk dipengaruhi oleh banyak hal seperti laju alir massa udara pembakaran, diameter pipa penghantar aliran bahan bakar, AFR dsb.

Pada kecepatan rendah nyala api terdifusi tergolong laminer dan dimensi dari panjang nyala api akan bertambah seiring dengan bertambahnya kecepatan aliran bahan bakar. Sehingga pada titik tertentu apabila kita terus menaikkan kecepatan alir maka nyala api terdifusi akan berubah menjadi

nyala api yang turbulent pada titik tertentu pada burner port. Apabila kita naikkan lagi kecepatan alir maka seluruh dari nyala api akan menjadi turbulen terdifusi (TDF) dan lapisan break point akan mendekati *burner rim* dan panjang dari nyala api terdifusi akan berkurang. Sampai akhirnya *fully turbulent region* akan terbentuk dan nyala api terdifusi akan bersifat independen terhadap perubahan angka reynold dan angka frounde dari aliran yan keluar burner port.



Gambar 2.10 Karakteristik Nyala Api

4.AFR

Pengaruh *AFR* sangat berpengaruh terhadap panjang nyala api. Panjang nyala api berkebalikan dengan *AFR* yakni *AFR* meningkat maka panjang nyala api menurun. Hal ini juga sesuai dengan persamaan panjang nyala api yang diusulkan oleh Rokke. Persamaan Rokke menunjukkan korelasi antara panjang nyala yang sebanding dengan fraksi massa bahan bakar. Semakin turun nilai *AFR* berarti fraksi massa bahan bakar semakin tinggi sehingga panjang nyala api juga meningkat dan bahan bakar semakin banyak yang tidak terbakar.

2.15 *Excess Air*

Pembakaran stoikiometrik adalah pembakaran ideal secara teoritis. Dalam praktek pembakaran dengan kondisi stokiometrik jarang atau tak mungkin ditemukan untuk pembakaran normal. Untuk mendapatkan pembakaran sempurna dimana bahan bakar semuanya habis terbakar, maka udara

pembakaran yang dipasok ke ruang bakar lebih dari kebutuhan teoritis. Kelebihan udara tersebut disebut *excess air*. Besarnya *excess air* dapat dihitung berdasarkan data pengukuran CO₂ dan O₂ dalam gas buang.

Excess air dihitung dengan formula berikut :

$$\text{Excess air (E)} = \{378 / \{100 - (\alpha + \omega)\} / \omega\} - 3.78$$

Keterangan :

E adalah *excess air* (%)

α adalah konsentrasi CO₂ pada gas buang (%)

ω adalah konsentrasi O₂ pada gas buang (%)

Excess air dapat juga dihitung dengan formula berikut :

$$\text{Excess air (E)} = \{(\text{CO}_2 \text{ stokiometrik} / \text{CO}_2 \text{ aktual}) - 1\} \times 100 \%$$

Dengan CO₂ stokiometrik adalah volume CO₂ stokiometrik (α) dalam flue gas kering

- Natural gas and producer gas; CO₂ stokiometrik: $11 < \alpha < 12$ %.
- *Commercial* butane and propane; CO₂ stokiometrik: $\alpha = 14$ %.
- *Fuels*; CO₂ stokiometrik: $15 < \alpha < 16$ %.
- *Marketed coal*; CO₂ stokiometrik: $18 < \alpha < 20$ %.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai metode penelitian yang akan digunakan dalam penelitian meliputi : peralatan penelitian, peralatan dan bahan, tata cara pengujian, metode penelitian. Penelitian pada *Coal Oil Burner* ini dilakukan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar minyak yang berlebihan sehingga dapat meminimalisir nilai ekonomi pada suatu sistem pembangkit. Penelitian yang dilakukan ini mengenai pengaruh kecepatan udara pada *swirler air blower* untuk menyuplai udara tambahan yang nantinya digunakan saat pembakaran pada *Coal Oil Burner*.

3.1 Peralatan Penelitian

Peralatan yang dipakai seperti gambar dibawah ini :



Gambar 3.1. *Coal Oil Burner*

3.2 Peralatan dan Bahan

Peralatan dan bahan penelitian yang digunakan seperti gambar dibawah ini :

1. Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian adalah batubara sub bituminus yang berukuran 200 mesh dan solar jenis dex.



Gambar 3.2. Batubara sub bituminus

2. Light Oil Burner

<i>Output-Thermal Power</i>	: 2,3-5 kg/h – 27-60 kW
<i>Fuel</i> at 20 °C	: <i>Light Oil</i> , Viscosity 4-6 mm ² /s
<i>Electrical supply</i>	: <i>Single Phase</i> 230V ± 10 % - 50Hz
<i>Motor</i>	: <i>Run current</i> 0,75 A – 2750rpm – 289 rad/s
<i>Ignition transformer</i>	: <i>Secondary</i> 8 kV – 16mA

Pump : 8 – 15 bar – *min output* 22 kg/h
Absorbed electrical Power : 0,17 kW



Gambar 3.3. *Light Oil burner*

3. *Carrying Air Blower*

Jenis : Sentrifugal
 Sumber arus : 3 fase
 Type : BCF4
 Ukuran : 16 inchi
 Kapasitas : 2100 CMH
 Tekanan : 450 mm H₂O
 Daya : 5,5 HP
 Kecepatan : 2900 rpm
 Tegangan : 380

Carrying Air Blower adalah blower yang digunakan untuk menaikkan tekanan dari tekanan atmosfer ke tekanan tertentu. Fungsi *blower* ini untuk mengalirkan udara yang digunakan sebagai pembawa batubara yang pada akhirnya udara dan batubara tersebut akan bercampur.



Gambar 3.4. *Carrying Air Blower*

4. *Coal Bin*

Tempat penampungan batubara sebelum masuk ke ruang bakar, *coal bin* bisa berbentuk kotak bagian atau tabung dengan krucut pada bagian bawah.



Gambar 3.5 Coal Bin

5. Tangki bahan bakar solar

Digunakan untuk menyimpan bahan bakar solar.



Gambar 3.6 Tangki bahan bakar solar

6. Penyangga *coal oil burner*

Digunakan untuk menyangga pipa *coal oil burner*.



Gambar 3.7 Penyangga *coal oil burner*

7. Anemometer manual

Digunakan untuk mengukur kecepatan udara pada *carrying air blower*.



Gambar 3.8 Anemometer manual

8. Swirler Air Blower

Model : YYF7112

Volume : 720 m³/h

Speed : 2800 rpm

Voltage : 220 V

Pressure(T) : 1880 pa

Power : 0,37 kW

Blower ini digunakan sebagai udara tambahan agar proses pembakaran menjadi lebih sempurna dan juga digunakan sebagai pendingin pada *coal oil burner*.



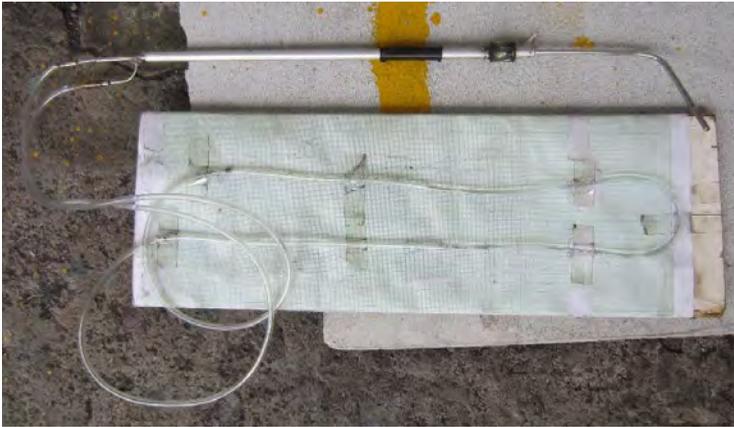
Gambar 3.9 Swirler air blower

9. Triplek

Alat ini digunakan untuk mengatur bukaan pada *swirler air blower* yang berguna untuk memvariasikan kecepatan.

10. Tabung Pitot

Alat ini digunakan untuk mengetahui kecepatan udara pada *swirler air*.



Gambar 3.10 Tabung Pitot

11. Meteran

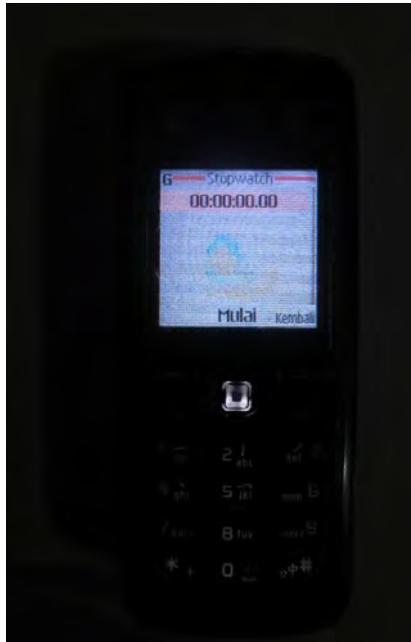
Alat ini digunakan untuk mengukur panjang nyala api dari pembakaran batubara.



Gambar 3.11 Meteran

12. *Stopwatch*

HP ini digunakan sebagai *stopwatch* pada saat pengukuran, baik pada saat pengukuran waktu batubara habis ataupun pada saat pengukuran kecepatan *carrying air blower* dengan menggunakan anemometer.



Gambar 3.12 *Stopwatch*

13. Pipa penyambung pada *swirler air*

Pipa ini digunakan sebagai tempat untuk mengukur kecepatan pada *swirler air blower* dengan menggunakan tabung pitot.



Gambar 3.13 Pipa penyambung pada *swirler air*

14. Timbangan batubara

Alat ini digunakan sebagai timbangan batubara. Di percobaan ini ditetapkan massa batubara sebesar 2 kg.



Gambar 3.14 Timbangan batubara

3.3 Tata Cara Pengujian

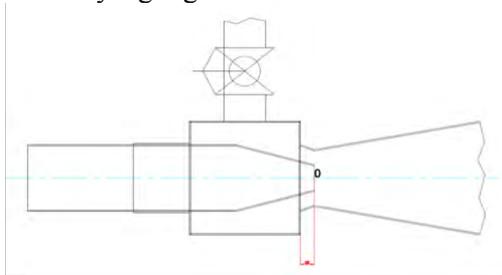
Tata cara pengujian pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.3.1 Tahap Persiapan

Prosedur yang digunakan dalam percobaan sebagai berikut :

Pada tahap ini akan dilakukan :

- a. Persiapkan alat percobaan, seperti : tangki bahan bakar minyak solar, *light oil burner*, *swirler air blower*, *carrying air blower*.
- b. Memasang alat yang diperlukan untuk percobaan beserta alat ukur sesuai dengan skema percobaan.
- c. Lakukan pengesetan venturi meter, disini venturi yang digunakan di titik 0.



Gambar 3.15. Letak venturi

- d. Menyiapkan bahan bakar yang diperlukan yaitu batubara dan minyak solar untuk proses pembakaran.
- e. Menimbang bahan bakar batubara sampai mencapai massa yang ditentukan yaitu 2 kg.



Gambar 3.16. Massa 2 kg batubara

- f. Mengatur kecepatan pada *carrying air blower* dengan dibuka penuh.



Gambar 3.17. *Carrying air blower* dibuka penuh

- g. Mengatur kecepatan pada *swirler air blower* dengan divariasikan menggunakan tabung pitot. Disini diambil contoh pada saat *swirler air blower* terbuka penuh.



Gambar 3.18. *Swirler air blower* terbuka penuh

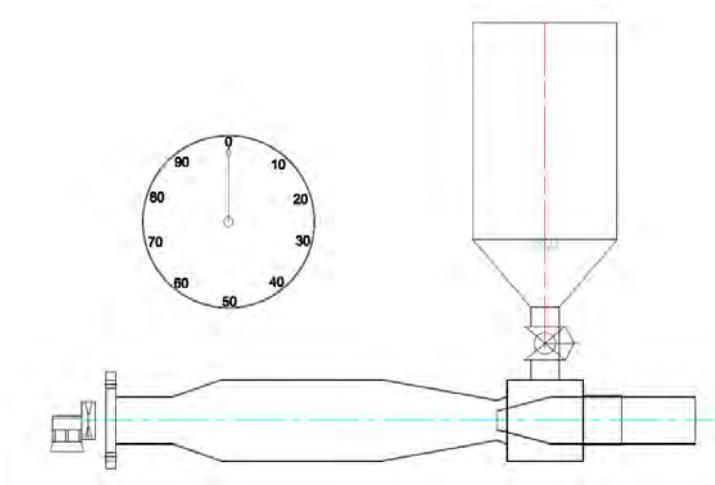
- h. Nyalakan *burner*
i. Setelah semua dinyalakan maka catat habisnya bahan bakar batubara dengan menggunakan *stopwatch* dan lihat panjang nyala yang terjadi.

3.3.2 Tahap Pengambilan Data

Prosedur pengambilan data sebagai berikut :

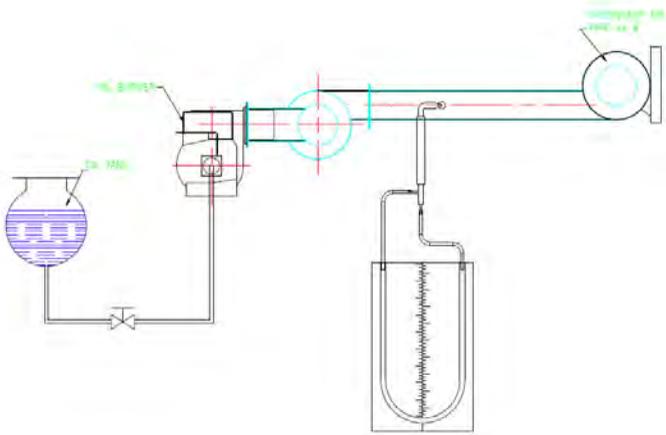
Pada tahap ini akan dilakukan pengambilan beberapa data dengan memvariasikan kecepatan pada *swirler air*. Dan yang perlu dicatat dalam percobaan ini adalah :

- a. Kecepatan *carrying air* saat venturi di titik 0.
- b. Waktu yang digunakan saat batubara habis pada saat *carrying air* dibuka penuh dan saat venturi di titik 0.
- c. Panjang nyala api dengan *swirler air* divariasikan sedangkan *carrying air* dibuka penuh dan pada saat venturi di titik 0.
- d. Lakukan 3 kali pengulangan pengambilan data dengan variasi kecepatan pada *swirler air* yaitu pada saat kecepatan 21,92 m/s, 17,39 m/s, 13,34 m/s yang diukur dengan menggunakan *pitot tube*.
- e. Contoh pengukuran serta rumus dari *carrying air* ataupun *swirler air* dapat dilihat pada gambar dibawah ini.





Gambar 3.19. Pengukuran kecepatan *carrying air blower*



Gambar 3.20. Pengukuran kecepatan *swirler air blower*

Pengukuran kecepatan pada *carrying air*

Setelah *carrying air blower* dinyalakan maka letakkan anemometer di depan pipa seperti gambar diatas dan siapkan *stopwatch* agar pada saat anemometer berputar maka *stopwatch* juga dinyalakan. Disini kita lakukan pengujian dengan mengambil 300 putaran pada anemometer. Setelah mencapai putaran 300 maka kita matikan *stopwatch* yang kita gunakan. Nanti hasil dari 300 putaran akan dibagikan dengan waktu sampai anemometer mencapai 300 putaran. Maka kecepatan dari *carrying air* akan didapat disini.

Pengukuran kecepatan pada *swirler air*

Setelah *swirler air blower* dinyalakan, pasang pitot tube dan lihat ketinggian (Δh) yang ada di dalam pitot tube. Sehingga kecepatan aliran pada *swirler air blower* dapat diketahui dengan rumus :

$$V = \sqrt{\frac{2(\rho_{air}gh)}{\rho_{udara}}}$$

Dimana :

V = Kecepatan aliran (m/s)

ρ_{air} = Massa jenis air (kg/m^3) = 1000 kg/m^3

g = Percepatan gravitasi (m/s^2) = 9,81 m/s^2

h = Beda ketinggian fluida pada pitot tube (m)

ρ_{udara} = Massa jenis udara (kg/m^3) = 1,028 kg/m^3

f. Catat panjang nyala yang terjadi

Pengukuran panjang nyala pada percobaan ini dimulai pada saat batubara mulai terbakar sampai pada ujung nyala api. Jarak dari *oil burner* ke ujung pipa *burner* yaitu sebesar 0,74 m. Jarak panjang nyala dari *oil burner* sampai ujung pipa *burner* dapat dilihat pada gambar (a). Sedangkan jarak dari *oil burner* sampai pada panjang nyala api dapat dilihat pada gambar (b). Yang mana dalam pengukuran panjang nyala api dalam percobaan ini digunakan pengukuran panjang nyala pada gambar (b).



(a)



(b)

Gambar 3.21. Cara pengukuran

3.3.3 Tahap Analisa Perhitungan

Tahap analisa perhitungannya sebagai berikut :

Prosedur yang digunakan dalam analisa perhitungan adalah :

1. Menghitung kebutuhan oksigen dalam kmol dengan menggunakan gravimetri yang didapat dari data yang ada di PT. PJB Unit Pembangkit Paiton :

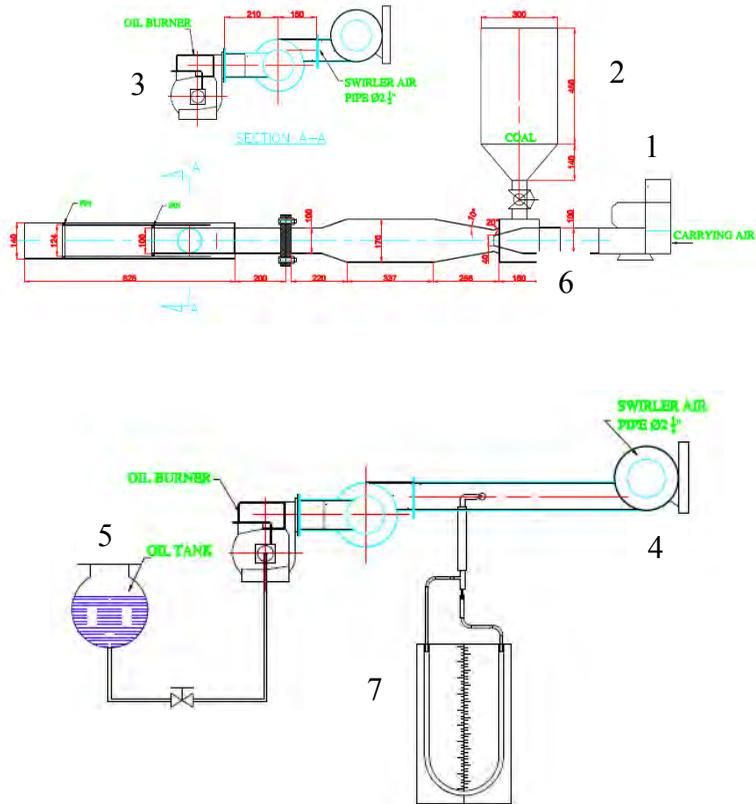
Tabel 3.1. Komposisi batubara

Parameters	Unit	Results			Standard Methods
		As Received Basis	Air Dried Basis	Dry Basis	
Total Moisture	%	26.37	-	-	ASTM D3302M-10
Moisture in The Analysis Sample	%	-	13.22	-	ASTM D3173-11
Ash Content	%	4.31	5.08	5.85	ASTM D3174-11
Carbon	%	51.12	60.25	69.43	ASTM-D5373-2008
Hydrogen	%	3.12	3.68	4.24	ASTM-D5373-2008
Nitrogen	%	0.98	1.16	1.34	ASTM-D5373-2008
Total Sulphur	%	0.31	0.37	0.43	ASTM D4239-11
Oxygen by difference	%	13.78	16.24	18.71*	ASTM D3176-09

2. Menghitung p batubara dan volume *coal bin* untuk mendapatkan massa batubara dalam *coal bin* dan perhitungan dari *excess air oil burner*.

3.4 Rancangan Eksperimen

3.4.1 Skema percobaan



Gambar 3.22 Rancangan Eksperimen

Keterangan :

1. Carrying air blower
2. Coal bin
3. Burner
4. Swirler air blower
5. Tangki bahan bakar

6.Venturi

7.Tabung Pitot

3.4.2 Parameter

Variasi tetap yang digunakan dalam percobaan ini adalah jumlah fin, sudut fin, diameter dari tempat masuknya *swirler air*, kecepatan aliran pada *carrying air*.

Variasi yang berubah dalam percobaan ini adalah kecepatan dari *swirler air*.

Dengan variasi pada kecepatan *swirler air* sebesar 21,92 m/s, 17,34 m/s, 13,34 m/s.

Ini semua dilakukan untuk mengetahui berapa besar panjang nyala yang didapatkan dalam percobaan ini.

Tabel 3.2. Parameter Pengukuran

No	Data yang divariasikan	Data yang diukur	Data yang dihitung	Data yang tetap
1	Kecepatan aliran pada <i>swirler air</i>	Panjang nyala	Laju aliran massa batubara	Kecepatan aliran pada <i>carrying air</i>
		Waktu batubara habis	Laju aliran massa <i>carrying air</i>	
			Laju aliran massa <i>swirler air</i>	

Swirler air adalah udara yang digunakan untuk membuat pembakaran jauh lebih sempurna, ini dilakukan dengan cara memberikan tambahan pasokan udara melalui *swirler air blower*. *Swirler air* ini juga digunakan sebagai pendingin pada *coal oil burner*.

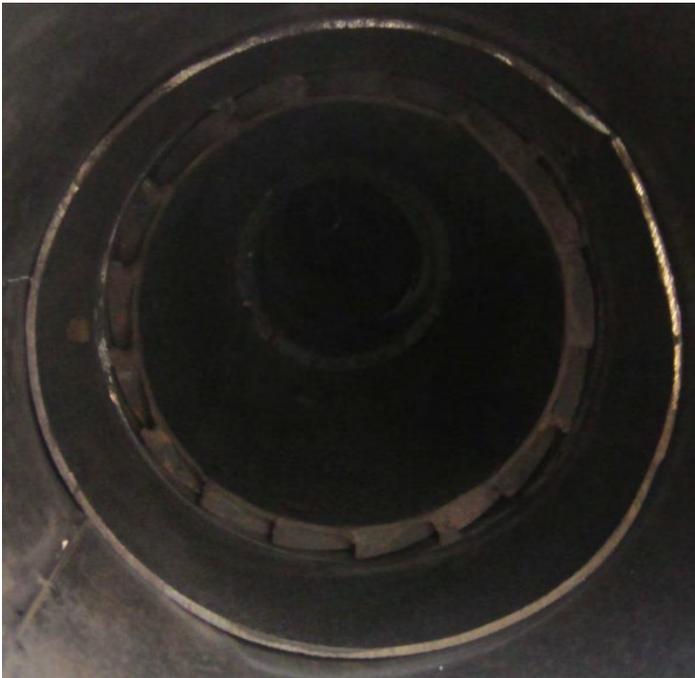
Diameter masuk dari *swirler air* adalah 2,5 inci.

Sedangkan *inlet* diameter dari *swirler air* adalah sebesar 120 mm dan 160 mm.

Jumlah *fin* yang ada di dalam pipa *swirler air* ada 15 dan 17 buah. *Fin* akan berpengaruh dalam membuat olakan udara di dalam pembakaran tersebut.

Ukuran *fin* pada *inlet* diameter *swirler* 120 mm adalah 10 mm x 20 mm dengan sudut $\pm 60^\circ$.

Ukuran *fin* pada *inlet* diameter *swirler* 140 mm adalah 10 mm x 20 mm dengan sudut $\pm 60^\circ$.



Gambar 3.23. Bentuk *fin*



Gambar 3.24 *Swirler air* tampak samping

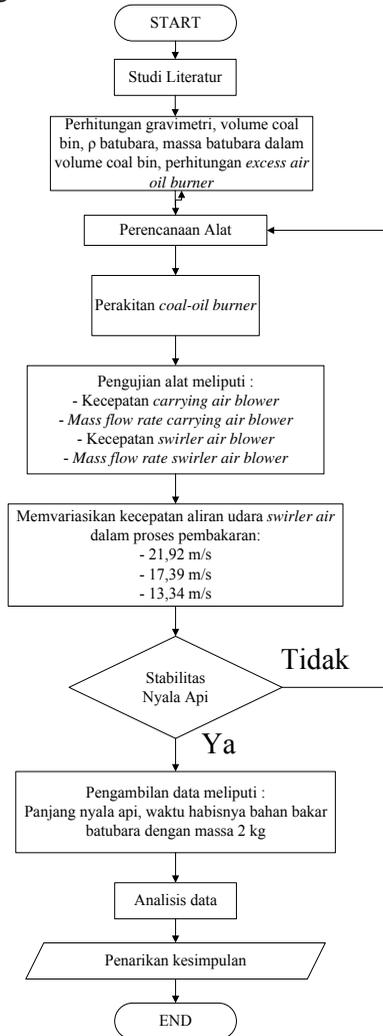


Gambar 3.25. *Swirler air* tampak atas

3.5 Metode Penelitian

3.5.1 *Flowchart* percobaan

Pada penelitian tugas akhir ini akan mengikuti *flowchart* percobaan sebagai berikut :



Gambar 3.26 *Flowchart* percobaan

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai perhitungan dan analisa hasil percobaan yang didapat melalui variasi kecepatan pada *swirler air blower*. Dan permasalahan yang akan dibahas antara lain analisa kecepatan *swirler air blower*, *air fuel ratio*, laju pembakaran, panjang nyala.

4.1 Perhitungan

Pada penelitian ini digunakan bahan bakar batubara seperti pada gambar berikut :

Tabel 4.1 Komposisi batubara

Parameters	Unit	Results			Standard Methods
		As Received Basis	Air Dried Basis	Dry Basis	
Total Moisture	%	26.37	-	-	ASTM D3302M-10
Moisture in The Analysis Sample	%	-	13.22	-	ASTM D3173-11
Ash Content	%	4.31	5.08	5.85	ASTM D3174-11
Carbon	%	51.12	60.25	69.43	ASTM-D5373-2008
Hydrogen	%	3.12	3.68	4.24	ASTM-D5373-2008
Nitrogen	%	0.98	1.16	1.34	ASTM-D5373-2008
Total Sulphur	%	0.31	0.37	0.43	ASTM D4239-11
Oxygen by difference	%	13.78	16.24	18.71	A&TM D3176-09

Reaksi pembakaran yang terjadi adalah sebagai berikut :

$$C = 51,12 \%$$

$$H_2 = 3,12 \%$$

$$N_2 = 0,98 \%$$

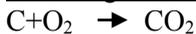
$$S = 0,31 \%$$

$$O_2 = 13,78 \%$$

$$\text{Abu} = 4,31 \%$$

Asumsi : RH= 60 %, T= 25 C (0,013 kg air/kg udara kering)

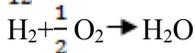
Metode gravimetri



$$12 + 32 \rightarrow 44 \text{ (Kg)}$$

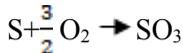
1 kg C dibutuhkan 32/12 kg O₂

$$\frac{32}{12} \times 0,5112 = 1,3632 \text{ kg/kg BB}$$



$$2 + \frac{32}{2} \rightarrow 18 \text{ Kg}$$

$$\frac{32}{4} \times 0,0312 = 0,2496 \text{ kg/kg BB}$$



$$32 + \frac{3}{2} \times 32 \rightarrow 80$$

$$\frac{48}{32} \times 0,0031 = 0,00465$$

Total kebutuhan O₂ = 1,61745 kg/kgBB

$$\begin{aligned} \text{O}_2 \text{ diambil dari udara} &= x - 0,1378 \\ &= 1,61745 - 0,1378 \\ &= 1,47965 \text{ kg/kgBB} \end{aligned}$$

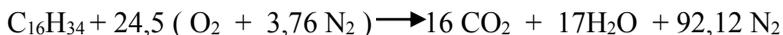
$$\text{Udara kering yang dibutuhkan} = \frac{1,47965}{0,23} = 6,433 \text{ kg/kgBB}$$

$$\text{Udara standar yang dibutuhkan} = \frac{6,43}{0,987} = 6,518 \text{ kg/kgBB}$$

Maka AFR pada kondisi stokiometri (kebutuhan udara teoritis) adalah 6,518

4.1.1 Perhitungan *Excess Air Oil Burner*

Pada percobaan ini, digunakan *Light Oil Burner* (tipe 722T), untuk menyuplai bahan bakar minyak solar saat proses pembakaran. Dari hasil percobaan didapat bahwa *light oil burner* mempunyai \dot{m}_{burner} sebesar 5 kg/h, sehingga untuk mengetahui udara yang dibutuhkan dalam 1kg bahan bakar solar digunakan metoda stokiometri seperti berikut :



Rasio udara bahan bakar dengan basis molar adalah

$$AF = \frac{24,5 + 24,5(3,76)}{1} = 116,62 \frac{\text{kmol}(\text{udara})}{\text{kmol}(\text{bahan bakar})}$$

Rasio udara bahan bakar dengan basis massa adalah

$$AF = \left[116,62 \frac{\text{kmol (udara)}}{\text{kmol (bahan bakar)}} \right] \left[\frac{28,97 \frac{\text{kg (udara)}}{\text{kmol (udara)}}}{226 \frac{\text{kg (bahan bakar)}}{\text{kmol (bahan bakar)}}} \right]$$

$$= 14,9 \frac{\text{kg (udara)}}{\text{kg (bahan bakar)}}$$

1 kg $C_{16}H_{34}$ dibutuhkan 14,9 kg udara/kg bahan bakar 1 : 14,9 untuk mendapatkan \dot{m}_{udara} stokiometri solar, dilakukan pengambilan data pada percobaan didapat,

$$Q_{\text{solar}} = 4 \text{ liter/h}$$

$$= 0,004 \text{ m}^3/\text{h} \text{ dengan } \rho_{\text{solar}} = 850 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{maka, } \dot{m}_{\text{udara}} \text{ stokiometri solar} &= Q \times \rho_{\text{solar}} \\ &= 0,004 \text{ m}^3/\text{h} \times 850 \text{ kg/m}^3 \\ &= 3,4 \text{ kg/h} \times 14,9 \text{ kg udara} \\ &= 50,8 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

Jika *excess air oil burner* diasumsikan 5%, maka :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{oilburner}} &= 5\% \times \dot{m}_{\text{udara}} \text{ stokiometri solar} \\ &= 5\% \times 50,8 \text{ kg/h} \\ &= 2,54 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

4.2 Data Awal Perencanaan

- Jenis batubara yang digunakan merupakan batubara sub-bituminus C
- Jenis solar yang digunakan adalah dex
- Kecepatan pada *carrying air* adalah konstan yaitu 17,2 m/s
- Jarak saat venturi pada titik 0
- Kecepatan *swirler air* divariasikan
- Titik pengukuran untuk alat ukur tabung pitot diasumsikan *fully develop flow*
- Temperatur udara sekitar pada percobaan adalah suhu kamar, tidak ada pemanasan awal
- Lama pengambilan data berlangsung dari pukul 10.00 – 17.00 WIB

4.2.1 Menghitung volume, massa batubara dalam *coal bin*

Laju aliran massa batubara dihitung dengan menggunakan perumusan,

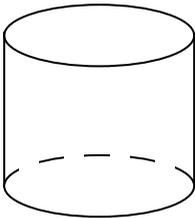
$$\rho_{\text{batubara}} = \frac{m}{V} ; \text{dimana :}$$

- ρ_{batubara} = densitas batubara [kg/m^3]
- m = massa batubara [kg]
- V = volume hopper [m^3]

Densitas batubara diperoleh dengan cara menimbang berat bubuk batubara dengan volume tertentu, yaitu :

$$D = 6,3 \text{ cm} ; t = 4,6 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume tabung} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times (6,3 \text{ cm})^2 \times 4,6 \text{ cm} \\ &= 143,39 \text{ cm}^3 = 0,000143 \text{ m}^3 \end{aligned}$$



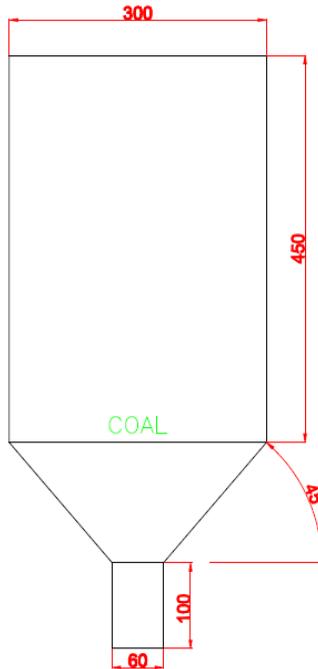
Massa bubuk batubara dalam volume tertentu didapat dari :

- Berat kaleng = 10,30 g
- Berat penuh = $\frac{106,66 \text{ g}}{96,36 \text{ g}} = 0,09636 \text{ kg}$

Sehingga,

$$\rho_{\text{batubara}} = \frac{m}{V} = \frac{0,09636 \text{ kg}}{0,000143 \text{ m}^3} = 674 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Volume *coal bin* pada rancangan burner hanya diambil pada luasan seperti gambar berikut :



Gambar 4.1 Bentuk *coal bin*

Pada luasan tersebut terdapat luasan kerucut dan luasan tabung.

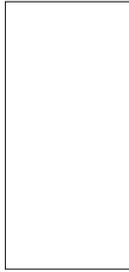
- Volume tabung = $\frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t$
- Volume kerucut = $\frac{1}{3} \times \text{alas} \times \text{tinggi}$
= $\frac{1}{3} \times \pi \times r^2 \times t$

Dimana, volume diatas diperoleh dengan data – data sebagai berikut :

- ID tabung besar = 300 mm
- Tinggi tabung besar = 450 mm
- ID tabung kecil = 60 mm
- Tinggi tabung kecil = 100 mm
- ID kerucut = 300 mm
- Tinggi kerucut = 150 mm

Sehingga,

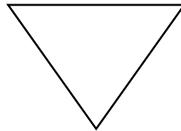
$$\begin{aligned} \text{Volume tabung besar} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t, \text{ untuk tabung besar} \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times (0,3 \text{ m})^2 \times 0,45 \text{ m} \\ &= 0,032 \text{ m}^3 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{Volume tabung kecil} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t, \text{ untuk tabung kecil} \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times (0,06 \text{ m})^2 \times 0,1 \text{ m} \\ &= 2,83 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{Volume kerucut} &= \frac{1}{3} \times \pi \times r^2 \times t, \text{ untuk kerucut besar} \\ &= \frac{1}{3} \times \pi \times (0,15 \text{ m})^2 \times 0,15 \text{ m} \\ &= 3,534 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{Volume kerucut} &= \frac{1}{3} \times \pi \times r^2 \times t, \text{ untuk kerucut kecil} \\ &= \frac{1}{3} \times \pi \times (0,022 \text{ m})^2 \times 0,022 \text{ m} \\ &= 1,115 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \text{Volume kerucut} &= V.\text{kerucut besar} - V.\text{kerucut kecil} \\
 &= 3,534 \times 10^{-3} - 1,115 \times 10^{-5} \\
 &= 3,52285 \times 10^{-3} \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Maka, volume *coal bin* batubara adalah

$$\begin{aligned}
 &V \text{ tabung besar} + V \text{ tabung kecil} + V \text{ kerucut} \\
 &= 0,032 \text{ m}^3 + 2,83 \times 10^{-4} \text{ m}^3 + 3,52285 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \\
 &= 0,0358 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

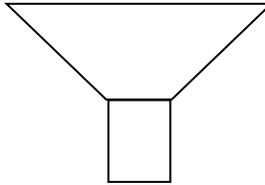
Sehingga, berat massa dari bubuk batubara dengan volume *coal bin* seperti diatas adalah

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{batubara}} &= \frac{m}{V} \\
 m &= \rho_{\text{batubara}} \times V \\
 &= 674 \text{ kg/m}^3 \times 0,0358 \text{ m}^3 \\
 &= 24,1292 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

4.2.2 Perhitungan laju aliran massa batubara, *carrying air*, dan *swirler air*

Menghitung Laju aliran massa batubara

Untuk mengetahui laju aliran massa batubara dilakukan percobaan dengan menghitung berapa jumlah batubara yang habis persatuan waktu. Batubara diisi dengan batubara sebesar 2 kg dengan *valve coal bin* dibuka penuh dan dihitung waktunya sampai pada detik keberapa batubara tersebut habis dengan menggunakan *stopwatch*. Dalam percobaan tersebut didapat bahwa batubara habis pada 23,95 detik yang diukur pada venturi di titik 0. Dan *coal bin* yang digunakan saat pengukuran seperti gambar dibawah ini.

Gambar 4.2. Bentuk *coal bin* pengukuran

Dalam percobaan diatas dapat diketahui nilai laju aliran massa batubara :

Tabel 4.2. Laju aliran massa batubara

Laju aliran massa Batubara	
\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/h)
0.084	300.626

Hasil tersebut didapat dari perhitungan dibawah ini :

$$\dot{m} = \frac{m \text{ [kg]}}{t \text{ [s]}} = \frac{2 \text{ kg}}{23,95 \text{ s}} = 0,084 \text{ kg/s} = 300,626 \text{ kg/h}$$

Menghitung Laju aliran massa *carrying air*

Untuk pengukuran laju aliran massa pada *carrying air* dilakukan dengan menggunakan anemometer dan dihasilkan kecepatan sebesar 17,2 m/s pada venturi di titik 0. Sehingga didapatkan :

Tabel 4.3. Laju aliran massa *carrying air*

$V \text{ carrying air}$ (m/s)	Q (m ³ /s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/h)
17.2	0.135	0.149	536.040

Nilai diatas dihitung dari :

$$A = \pi \times r^2, \text{ dengan ID pipa } \textit{carrying air} = 100 \text{ mm}$$

$$A = \pi \times (0,05 \text{ m})^2$$

$$= 0.00785 \text{ m}^2$$

Maka,

$$Q = V \times A$$

$$Q = 17,2 \text{ m/s} \times 0.00785 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.135 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sehingga, laju aliran massa udara (saat bukaan penuh aliran udara) *carrying air blower* :

$$\dot{m} = Q \times \rho$$

$$= 0,135 \text{ m}^3/\text{s} \times 1,1028 \text{ kg/m}^3$$

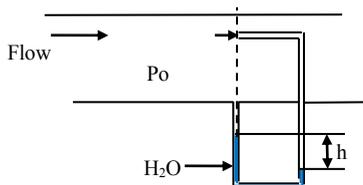
$$= 0,149 \text{ kg/s} = 536,040 \text{ kg/h}$$

Menghitung Laju aliran massa *swirler air*

Laju aliran massa udara diperoleh dengan melakukan percobaan untuk mengetahui kecepatan aliran udara dari *swirler air blower* dengan cara menggunakan tabung pitot :

$$\rho_{\text{udara}} = 1.1028 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{air}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



Tabel 4.4. Hasil perbedaan ketinggian tabung pitot menurut bukaan *swirler air*

Swirler air blower	h (mm)	h (m)
Terbuka penuh	27	0.027
Tutup setengah	17	0.017
Tutup tigaperempat	10	0.01

Contoh perhitungan :

Dalam perhitungan disini diambil contoh untuk mengetahui kecepatan aliran pada pipa dilakukan bukaan penuh pada *swirler air blower* dan diukur dengan tabung pitot seperti pada gambar diatas sehingga diperoleh :

$h = 27 \text{ mm}$, sehingga

$$V = \sqrt{\frac{2(P_o - P)}{\rho_{udara}}}$$

$$P_o - P = \rho_{air}gh$$

$$V = \sqrt{\frac{2(\rho_{air}gh)}{\rho_{udara}}}$$

$$V = \sqrt{\frac{2\left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0.027\text{m}\right)}{1.1028 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$V = 21,92 \text{ m/s}$$

Dari kecepatan yang diperoleh, didapat debit aliran dengan perumusan :

$$A = \pi \times r^2, \text{ dengan ID} = 63,5 \text{ mm}$$

$$A = \pi \times (0,03175 \text{ m})^2$$

$$= 0.003165 \text{ m}^2$$

Maka,

$$Q = V \times A$$

$$Q = 21,92 \text{ m/s} \times 0.003165 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.069 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sehingga, laju aliran massa udara (saat bukaan penuh aliran udara) *swirler air blower* :

$$\dot{m} = Q \times \rho$$

$$= 0,069 \text{ m}^3/\text{s} \times 1,1028 \text{ kg/m}^3$$

$$= 0,077 \text{ kg/s} = 275,431 \text{ kg/h}$$

Dan didapatkan tabel sebagai berikut :

Tabel 4.5. Laju aliran massa *swirler air* menurut kecepatan

Kecepatan <i>Swirler Air</i>	Debit aliran <i>Swirler Air</i>	Laju aliran massa <i>Swirler Air</i>	
V(m/s)	Q (m ³ /s)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/h)
21.92	0.069	0.077	275.431
17.39	0.055	0.061	218.511
13.34	0.042	0.047	167.621

4.3 Hasil dan Analisa Percobaan

4.3.1 Analisa *Air Fuel Ratio*

Dengan mengacu pada kecepatan *carrying air* sebesar 17,2 m/s maka didapatkanlah *Air-Fuel Ratio* nya, *Air-Fuel Ratio* dibawah ini sebelum diberi \dot{m} *excess air oil burner* dan \dot{m} *swirler air*.

Tabel 4.6. AFR sebelum diberi \dot{m} *excess air oil burner* dan \dot{m} *swirler air*

Laju aliran massa <i>Carrying Air</i>		Laju aliran massa Batubara		AFR (udara / BB) Sebelum + \dot{m} <i>Swirler Air</i>
\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/h)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/h)	
0.149	536.040	0.084	300.626	1.783

Hasil AFR diatas didapat dari pembagian antara laju aliran massa *carrying air* dengan laju aliran massa batubara yaitu

$$\frac{536,040 \text{ kg/h}}{300,626 \text{ kg/h}} = 1,783$$

Setelah mendapat tambahan udara dari *swirler air blower* dan *excess air oil burner* maka *Air Fuel Ratio* nya menjadi sebagai berikut :

Tabel 4.7. AFR setelah diberi \dot{m} *excess air oil burner* dan \dot{m} *swirler air*

Laju aliran massa Swirler Air		Laju aliran massa Carrying Air		Laju aliran massa Batubara	
\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/h)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/h)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/h)
0.077	275.431	0.149	536.040	0.084	300.626
0.061	218.511				
0.047	167.621				

Kecepatan Swirler Air	5% excess air oil burner	Total \dot{m}_{udara}	AFR (udara / BB)
V(m/s)	\dot{m} (kg/h)	\dot{m} (kg/h)	Setelah + 5% excess air oil burner + \dot{m} Swirler Air
21.92	2.54	814.011	2.708
17.39		757.091	2.518
13.34		706.201	2.349

Dari tabel diatas maka dapat disimpulkan dengan semakin tingginya kecepatan maka total \dot{m} udara dan jumlah AFR nya juga semakin tinggi, hal ini disebabkan dengan semakin tingginya kecepatan dan laju aliran massa batubara yang tetap maka udara yang masuk akan semakin besar sehingga pembagian

laju aliran massa udara dan bahan bakarnya pun juga semakin tinggi. Akan tetapi didalam percobaan jumlah AFR nya tidak mencapai angka stokiometri menurut perhitungan yaitu sebesar 6.518.

4.3.2 Kebutuhan Udara Stokiometri

Kebutuhan udara stokiometri didapat dengan mengalikan antara laju aliran massa batubara dengan kebutuhan udara standar yang diperlukan dari proses pembakaran.

$$\text{Kebutuhan udara stokiometri} = 300,626 \text{ kg/h} \times 6,518 \text{ kg/kgBB} = 1959,480 \text{ kg/h.}$$

Kebutuhan udara stokiometri adalah kebutuhan udara yang dibutuhkan untuk membakar bahan bakar dengan sempurna.

Tabel 4.8. Kebutuhan udara stokiometri

Kebutuhan udara stokiometri	Laju aliran massa Batubara	Kebutuhan udara standar	
		\dot{m} (kg/h)	kg/kgBB
1959.480	0.084	300.626	6.518

4.3.3 Analisa Laju Pembakaran per panjang nyala

Laju pembakaran atau konsumsi bahan bakar batubara per panjang nyala yaitu berapa besar pembakaran terjadi. Jadi jika nilai laju pembakaran per panjang nyalanya semakin besar maka semakin banyak laju aliran massa yang dibakar dalam setiap panjangnya sehingga pembakaran akan semakin lebih cepat. Dan dengan semakin besar laju pembakaran per panjang nyala ini diharapkan dapat mengurangi gas buang seperti smoke, karbon yang tidak terbakar dan karbon yang terbakar sebagian. Disini konsumsi bahan bakar batubara per panjang nyala yang paling besar terjadi pada kecepatan *swirler air* sebesar 21,92 m/s. Laju

pembakaran per panjang nyala dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\text{Laju pembakaran} = \frac{\text{laju aliran massa batubara}}{\text{panjang nyala}}$$

Sebagai contoh disini menggunakan kecepatan *swirler air* sebesar 21,92 m/s maka :

Laju pembakaran per panjang nyala

$$= \frac{\text{laju aliran massa batubara}}{\text{panjang nyala}}$$

$$= \frac{300,626 \text{ kg/h}}{3,18 \text{ m}}$$

$$= 94,536 \text{ kg/hr.m}$$

Tabel 4.9. Laju Pembakaran per panjang nyala

Kecepatan <i>swirler air</i>	Panjang Nyala	Laju pembakaran per Panjang nyala api (kg/hr.m)
V <i>swirler air</i> (m/s)	L (m)	
21.92	3.18	94.536
17.39	3.48	86.387
13.34	3.64	82.590

4.3.4 Analisa Hasil Panjang Nyala Api dengan Variasi Kecepatan *Swirler Air*

Carrying air buka full dan swirler air buka full



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.3. *Carrying air* buka *full* dan *swirler air* buka *full*

Diatas terlihat 3 gambar akan tetapi dibawah ini akan diambil contoh salah satu yaitu gambar (a) yang dijelaskan. Dari gambar diatas dapat dijelaskan bahwa dengan adanya *swirler air blower* yang dibuka *full*, gambar (a), maka panjang nyala api didapatkan sebesar 0,74 m (jarak *oil burner* sampai ujung pipa *burner*) + 2,44 m = 3,18 m.

Panjang nyala yang terjadi disini sesuai teori bahwa dengan semakin bertambahnya kecepatan pada *swirler air blower* maka panjang nyalanya makin pendek. Akan tetapi dari percobaan dilihat bahwa nyala api yang terjadi tidak beraturan, hal ini dikarenakan karena di dalam percobaan *open chamber* ini udara sekitar (*ambient air*) juga mempengaruhi, jadi jika udara sekitarnya tidak konstan maka nyala api juga tidak dapat konstan dan lurus secara horizontal.

Panjang nyala pada percobaan ini paling pendek yaitu sebesar 3,18 m, ini dikarenakan pada kecepatan *swirler air* 21,92 m/s alirannya menjadi turbulen sehingga oksigen yang masuk juga lebih cepat sehingga akan lebih cepat udara yang bercampur dengan bahan bakar yang akan mengakibatkan panjang nyalanya

semakin pendek. Dan juga pada kecepatan 21,92 m/s laju aliran massanya juga akan semakin tinggi yang mana jumlah konsentrasi O_2 nya juga semakin tinggi sehingga dengan adanya konsentrasi O_2 yang besar maka lebih banyak udara yang bercampur dengan bahan bakar yang akan mengakibatkan panjang nyalanya semakin pendek. Pada kecepatan *swirler air* 21,92 m/s laju pembakaran atau konsumsi bahan bakar batubara per panjang nyalanya juga yang terbesar yaitu sebesar 94,536 kg/hr.m. Ini membuktikan bahwa pada kecepatan 21,92 m/s laju pembakaran atau konsumsi bahan bakar batubara per panjang nyalanya terbesar daripada variasi kecepatan yang lain.

Pada kecepatan tertinggi *swirler air* yaitu sebesar 21,92 m/s terlihat apinya pendek dan banyak bahan bakar yang tidak terbakar ini dikarenakan pada kecepatan tinggi kecepatan nyalanya lebih besar daripada kecepatan perambatan nyalanya dan juga dikarenakan pada kecepatan tinggi menggeser area resirkulasi zone ke dekat *outlet burner* sehingga nyala api dimulai pada ujung pipa burner dan karena ini pula aliran udara menjadi lebih turbulen sehingga bahan bakar banyak yang tidak terbakar karena terlempar dari *outlet burner*. Bahan bakar batubara yang tidak terbakar dapat terlihat pada gambar diatas yaitu ada sesuatu yang berwarna hitam di daerah pinggir nyala api. Pembakaran disini tidak dianggap paling baik walaupun mempunyai AFR tertinggi dikarenakan masih banyaknya bahan bakar yang belum terbakar.

Indikator *performance burner* dipengaruhi oleh beberapa hal, seperti : AFR, turbulensi aliran, gas buang, temperatur. Akan tetapi karena keterbatasan alat maka gas buang dan temperatur tidak dilakukan pengujian. Jadi dengan semakin meningkatnya kecepatan pada *swirler air* maka turbulensi akan semakin meningkat sehingga laju pembakaran atau konsumsi bahan bakar per panjang nyala juga akan semakin besar dan juga membuat nilai AFR juga semakin besar. Akan tetapi itu semua tidak dapat dipastikan bahwa pembakaran berlangsung secara sempurna karena tidak dilakukannya pengukuran temperatur ataupun gas

buang. Kalau dilakukan pengukuran temperatur akan diketahui berapa temperatur yang sebenarnya terjadi disana, jadi bisa lebih mengetahui temperatur yang paling bagus yang mana. Di dalam gambar (a), (b), (c) dapat dilihat bahwa banyak bahan bakar yang tidak terbakar ini dikarenakan pada kecepatan tinggi kecepatan nyalanya lebih besar daripada kecepatan perambatan nyalanya. Disana juga terlihat nyala api yang ditengah itu berwarna putih, ini mengindikasikan temperatur pada tengah lidah api itu semakin besar daripada bagian pinggir, ini dikarenakan karbon dari batubara terbakar seutuhnya pada bagian tengah.

Carrying air buka full dan swirler air tutup setengah



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.4. *Carrying air* buka *full* dan *swirler air* tutup setengah

Diatas terlihat 3 gambar akan tetapi dibawah ini akan diambil contoh salah satu yaitu gambar (a) yang dijelaskan. Dari gambar diatas (a) dapat dijelaskan bahwa dengan adanya *swirler air blower* yang ditutup setengah maka panjang nyala api didapatkan sebesar 0,74 m (jarak *oil burner* sampai ujung pipa *burner*) + 2,74 m = 3,48 m.

Panjang nyala yang terjadi disini cukup panjang dan sesuai teori karena kecepatan *swirler air blower* nya berkurang dari 21,92 m/s menjadi 17,39 m/s, maka dengan semakin berkurangnya kecepatan *swirler air* maka panjang nyalanya makin panjang jika dibandingkan dengan *swirler air* pada kecepatan 21,92 m/s. Akan tetapi dari percobaan dapat dilihat bahwa nyala api yang terjadi tidak beraturan, hal ini dikarenakan karena di dalam percobaan *open chamber* ini udara sekitar (*ambient air*) juga mempengaruhi, jadi jika udara sekitarnya tidak konstan maka nyala api juga tidak dapat konstan dan lurus secara horizontal.

Panjang nyala pada percobaan ini lebih besar dibandingkan dengan *swirler air* pada kecepatan 21,92 m/s. Hal ini dikarenakan ini dikarenakan pada kecepatan *swirler air* 17,39 m/s alirannya tidak begitu turbulen jika dibandingkan pada

kecepatan 21,92 m/s. Hal ini menyebabkan jumlah oksigen yang masuk tidak secepat *swirler air* pada kecepatan 21,92 m/s sehingga akan lebih lambat udara yang bercampur dengan bahan bakar yang akan mengakibatkan panjang nyalanya lebih panjang jika dibandingkan *swirler air* pada kecepatan 21,92 m/s. Dan juga pada kecepatan *swirler air* 17,39 m/s laju aliran massanya sedikit lebih rendah maka jumlah konsentrasi O_2 nya juga semakin rendah sehingga dengan adanya konsentrasi O_2 yang rendah maka lebih sedikit udara yang bercampur dengan bahan bakar yang akan mengakibatkan panjang nyalanya sedikit lebih panjang. Pada kecepatan *swirler air* 17,39 m/s laju pembakaran per panjang nyalanya sedikit lebih rendah yaitu sebesar 86,387 kg/hr.m. Ini membuktikan bahwa pada kecepatan 17,39 m/s laju pembakaran per panjang nyalanya tidak secepat *swirler air* pada kecepatan 21,92 m/s yang sebesar 94,536 kg/hr.m.

Pada kecepatan ini terlihat apinya agak panjang dan banyak bahan bakar yang tidak terbakar ini ini dikarenakan pada kecepatan ini kecepatan nyalanya lebih besar daripada kecepatan perambatan nyalanya dan juga dikarenakan pada kecepatan agak rendah ini menggeser area resirkulasi zone agak menjauh dari *outlet burner*. Karena kecepatan ini pula aliran udara menjadi lebih sedikit turbulen sehingga bahan bakar banyak yang tidak terbakar karena terlempar dari *outlet burner* dan bahan bakar yang tidak terbakar terlihat pada luar *outlet burner*. Bahan bakar batubara yang tidak terbakar dapat terlihat pada gambar diatas yaitu ada sesuatu yang berwarna hitam di daerah pinggir nyala api. Pembakaran disini juga tidak dianggap paling baik walaupun mempunyai AFR cukup tinggi dikarenakan masih banyaknya bahan bakar yang belum terbakar.

Indikator *performance burner* dipengaruhi oleh beberapa hal, seperti : AFR, turbulensi aliran, gas buang, temperature. Akan tetapi karena keterbatasan alat maka gas buang dan temperature tidak dilakukan pengujian. Jadi dengan semakin menurunnya kecepatan pada *swirler air* maka turbulensi akan semakin sedikit sehingga laju pembakaran atau konsumsi bahan

bakar per panjang nyala juga akan semakin sedikit dan juga membuat nilai AFR juga semakin kecil. Akan tetapi itu semua tidak dapat dipastikan bahwa pembakaran berlangsung secara sempurna karena tidak dilakukannya pengukuran temperatur atau gas buang. Kalau dilakukan pengukuran temperatur akan diketahui berapa temperatur yang sebenarnya terjadi disana, jadi bisa lebih mengetahui temperatur yang paling bagus yang mana. Di dalam gambar (a), (b), (c) dapat dilihat bahwa banyak bahan bakar yang tidak terbakar ini dikarenakan pada kecepatan ini kecepatan nyalanya lebih besar daripada kecepatan perambatan nyalanya. Disana juga terlihat nyala api yang ditengah itu berwarna putih, ini mengindikasikan temperatur pada tengah lidah api itu semakin besar daripada bagian pinggir, ini dikarenakan karbon dari batubara terbakar seutuhnya pada bagian tengah.

Carrying air buka full dan swirler air tutup tiga perempat



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.5. *Carrying air* buka *full* dan *swirler air* tutup tiga perempat

Diatas terlihat 3 gambar akan tetapi dibawah ini akan diambil contoh salah satu yaitu gambar (a) yang dijelaskan. Dari gambar diatas (a) dapat dijelaskan bahwa dengan adanya *swirler air blower* yang ditutup tiga perempat maka panjang nyala api didapatkan sebesar sebesar $0,74 \text{ m}$ (jarak *oil burner* sampai ujung pipa *burner*) + $2,9 \text{ m} = 3,64 \text{ m}$.

Panjang nyala yang terjadi disini sesuai teori bahwa dengan semakin berkurangnya kecepatan pada *swirler air blower* maka panjang nyalanya makin panjang. Akan tetapi dari percobaan dapat dilihat bahwa nyala api yang terjadi tidak beraturan bahkan cenderung naik, hal ini dikarenakan karena di dalam percobaan *open chamber* udara sekitar (*ambient air*) juga mempengaruhi, jadi jika udara sekitarnya tidak konstan maka nyala api juga tidak dapat konstan dan lurus secara horizontal.

Panjang nyala pada percobaan ini paling panjang yaitu sebesar $3,64 \text{ m}$, ini dikarenakan pada kecepatan *swirler air* $13,34 \text{ m/s}$ alirannya sedikit turbulen sehingga oksigen yang masuk juga

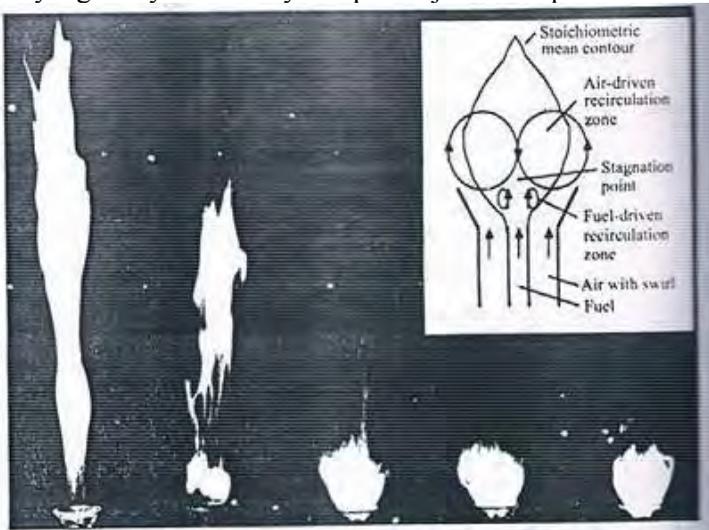
lebih lambat maka akan lebih lambat udara yang bercampur dengan bahan bakar yang akan mengakibatkan panjang nyalanya semakin panjang. Dan juga pada kecepatan *swirler air* 13,34 m/s laju aliran massanya paling kecil. Jika kecepatan semakin rendah maka laju aliran massanya juga akan semakin rendah yang mana jumlah konsentrasi O_2 nya juga semakin rendah sehingga dengan adanya konsentrasi O_2 yang rendah maka lebih sedikit udara yang bercampur dengan bahan bakar yang akan mengakibatkan panjang nyalanya semakin panjang. Pada kecepatan *swirler air* 13,34 m/s laju pembakaran atau konsumsi bahan bakar batubara per panjang nyalanya juga yang terendah yaitu sebesar 82,590 kg/hr.m. Ini membuktikan bahwa pada kecepatan 13,34 m/s laju pembakaran atau konsumsi bahan bakar batubara per panjang nyalanya tidak secepat pada variasi kecepatan yang lain.

Pada kecepatan terendah *swirler air* yaitu sebesar 13,34 m/s terlihat nyala apinya panjang dan terlihat bahan bakar yang tidak terbakar sangat sedikit ini dikarenakan pada kecepatan rendah kecepatan nyalanya lebih kecil daripada kecepatan perambatan nyalanya dan disana juga terlihat pada kecepatan rendah menggeser area resirkulasi zone menjauh dari *outlet burner* sehingga nyala api agak jauh dari ujung pipa *burner*. Pada kecepatan terendah ini aliran udara menjadi sedikit turbulen sehingga bahan bakar lebih banyak yang terbakar. Pembakaran disini juga tidak dianggap paling baik walaupun mempunyai AFR rendah dan lebih banyak bahan bakar yang terbakar.

Indikator *performance burner* dipengaruhi oleh beberapa hal, seperti : AFR, turbulensi aliran, gas buang, temperature. Akan tetapi karena keterbatasan alat maka gas buang dan temperatur tidak dilakukan pengujian. Jadi seperti dilihat pada gambar diatas dengan semakin menurunnya kecepatan pada *swirler air* maka tingkat turbulensi akan semakin kecil sehingga laju pembakaran atau konsumsi bahan bakar per panjang nyala juga akan semakin kecil dan juga membuat nilai AFR semakin mengecil. Akan tetapi itu semua tidak dapat dipastikan bahwa pembakaran berlangsung secara sempurna karena tidak

dilakukannya pengukuran temperatur atau gas buang. Kalau dilakukan pengukuran temperatur akan diketahui berapa temperatur yang sebenarnya terjadi disana, jadi bisa lebih mengetahui temperatur yang paling bagus yang mana. Di dalam gambar (a), (b), (c) dapat dilihat bahan bakar terbakar dengan baik, ini dikarenakan pada kecepatan rendah kecepatan nyalanya lebih kecil daripada kecepatan perambatan nyalanya. Disana juga terlihat nyala api yang ditengah itu berwarna putih, ini mengindikasikan temperatur pada tengah lidah api itu semakin besar daripada bagian pinggir, ini dikarenakan karbon dari batubara terbakar seutuhnya pada bagian tengah.

Selain dipengaruhi oleh kecepatan, laju pembakaran juga dipengaruhi oleh *swirl*. Menurut teori dari Stephen R. Turns pada an introduction to combustion [3]. Dengan semakin meningkatnya *swirl* maka pencampuran udara dan bahan bakar juga semakin besar yang menyebabkan nyala api menjadi lebih pendek.



Gambar 4.6. Gambar panjang nyala berdasarkan *swirl*

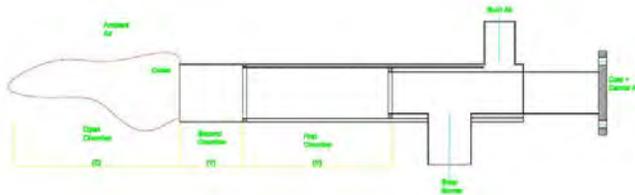
Dapat dilihat pada gambar diatas maka pengaruh *swirl* dapat terlihat. *Swirl* sangat mempengaruhi panjang nyala. Disini kita dapat melihat bahwa dengan adanya *swirl* maka akan mengurangi panjang nyala. Di dalam gambar tersebut ditampilkan lima perbandingan pada panjang nyala dengan tidak adanya *swirl* (paling kiri) sampai pada *swirl* yang tertinggi (paling kanan).

Pada gambar juga terlihat bahwa tidak adanya suatu *swirl* dalam pembakaran maka panjang nyala yang terjadi semakin panjang (paling kiri). Dan seiring bertambahnya *swirl* (dari kiri ke kanan) maka panjang nyala yang terjadi juga semakin pendek. Hal ini dikarenakan fungsi dari *swirl* adalah untuk menciptakan zona resirkulasi internal yang dapat menstabilkan nyala api, dan membuat olakan aliran udara menjadi lebih besar sehingga pada pembakaran yang mempunyai *swirl* lebih tinggi maka alirannya lebih turbulen sehingga peningkatan pemasukan oksigen atau udara luar membuat nyala lebih meningkat yang menyebabkan panjang nyalanya jadi semakin pendek. Dan ini berbeda jika *swirl* dalam pembakaran semakin kecil maka alirannya lebih sedikit terjadi turbulen sehingga pencampuran bahan bakar dan udaranya semakin sedikit dan menyebabkan panjang nyalanya jadi semakin besar.

4.3.5 Analisa Pembentukan Lidah Api

Pembakaran dimulai pada saat *oil burner* mulai membakar solar sehingga temperatur pada sekitar *oil burner* menjadi 900° celcius, sehingga volatile matter dari batubara kering keluar menjadi karbondioksida, karbon bebas, dan abu. Setelah melewati *first chamber* yang dibantu dengan adanya *swirler air* yang pertama maka temperatur naik menjadi sekitar 1500° celcius karena pembakaran beberapa karbon bebas dari batubara yang akan menjadi abu dan karbondioksida. Setelah itu batubara akan melewati *second chamber*, dengan bantuan *swirler air* yang kedua maka karbon bebas dan beberapa batubara yang tidak terbakar pada proses sebelumnya akan terbakar. Dan karena adanya *swirler air* maka akan terjadi turbulensi udara sehingga

pembakaran batubara akan lebih cepat terjadi. Ini disebabkan dengan adanya aliran turbulensi maka olakan udara juga semakin besar sehingga menyebabkan recirculation zone lebih banyak terjadi. Dengan adanya turbulensi dan recirculation zone maka oksigen akan lebih cepat masuk sehingga pembakaran akan terjadi lebih cepat. Dan setelah itu lidah api akan keluar melalui *outlet burner* seperti ditunjukkan pada gambar 4.7. Jadi dengan adanya *carrying air*, *swirler air*, *ambient air* akan mempengaruhi lidah api apakah menjadi lebih panjang atau lebih pendek itu tergantung dari pasokan udara yang masuk dalam proses pembakaran.



Gambar 4.7. Lidah api pada ujung *burner*

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil percobaan yang telah dilakukan yaitu dengan variasi tingkat kecepatan pada *swirler air* pada kecepatan 21,92 m/s , 17,39 m/s, 13,34 m/s maka didapatkan hasil sebagai berikut :

1. Dengan semakin bertambahnya kecepatan pada *swirler air* maka panjang nyala yang terjadi akan semakin pendek ini karena dengan adanya *swirl* akan menciptakan zona resirkulasi internal yang dapat menstabilkan nyala api, dan membuat olakan aliran udara menjadi lebih besar sehingga pada pembakaran yang mempunyai *swirl* lebih tinggi alirannya lebih turbulen sehingga peningkatan pemasukan oksigen atau udara luar membuat pembakaran lebih meningkat yang menyebabkan panjang nyalanya jadi semakin pendek. Panjang nyala terbesar pada kecepatan 13,34 m/s sebesar 3,64 m. Kemudian diikuti pada kecepatan 17,39 m/s yang mempunyai panjang nyala sebesar 3,48 m dan yang mempunyai panjang nyala terkecil adalah pada kecepatan 21,92 m/s yaitu sebesar 3,18 m.
2. Laju pembakaran per panjang nyalanya akan semakin mengecil seiring berkurangnya kecepatan pada *swirler air*. Laju pembakaran per panjang nyalanya pada kecepatan *swirler air* 21,92 m/s tertinggi yaitu sebesar 94,536 kg/hr.m. Diikuti pada kecepatan 17,39 m/s sebesar 86,387 kg/hr.m dan terkecil pada kecepatan *swirler air* 13,34 m/s sebesar 82,590 kg/hr.m.

5.2 Saran

1. Karena keterbatasan alat ukur maka diharapkan pada penelitian selanjutnya dengan melakukan pengukuran temperatur dengan menggunakan termokopel tipe B ataupun

alat ukur lainnya yang dapat mendeteksi pada temperatur tinggi.

2. Sebaiknya dilakukan juga analisa gas buang agar bisa jadi indikator dari pembakaran batubara dapat berlangsung baik atau tidak.

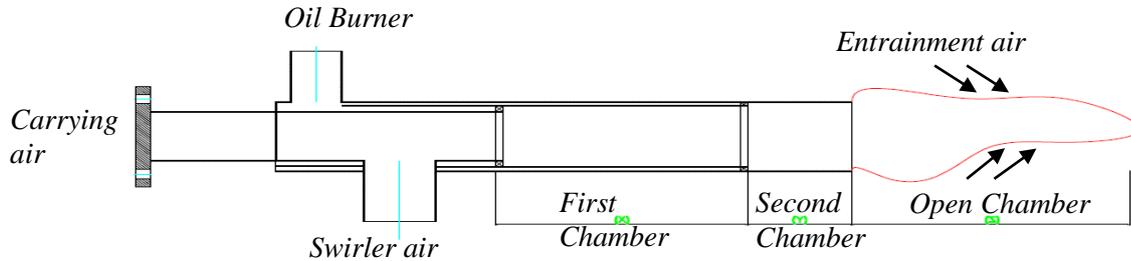
LAMPIRAN

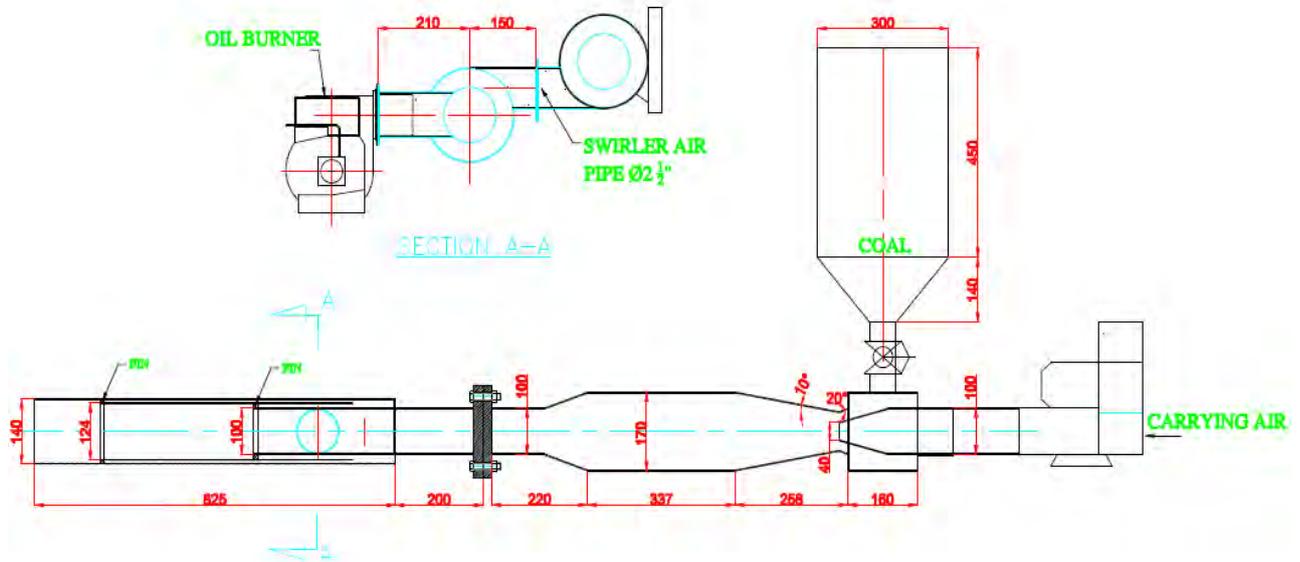
Tabel 1. Total Laju Aliran Massa Udara

Kecepatan Swirler Air	Debit aliran Swirler Air	Laju aliran massa Swirler Air		Laju aliran massa Carrying Air		5% excess air oil burner	Total udara	Kebutuhan udara Stoikiometri
		\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/h)	\dot{m} (kg/s)	\dot{m} (kg/h)	\dot{m} (kg/h)	\dot{m} (kg/h)	\dot{m} (kg/h)
21,92	0.069	0.077	275.431	0.149	536.040	2.540	814.011	1959.480
17,39	0.055	0.061	218.511				757.091	1959.480
13.34	0.042	0.047	167.621				706.201	1959.480

Tabel 2. Konsumsi Bahan Bakar Batubara

Kecepatan Swirler Air <i>V(m/s)</i>	Laju aliran massa Batubara		Waktu habis Batubara <i>s(dtk)</i>	AFR (Sebelum + in Swirler Air + 5% excess air oil burner)	AFR (Setelah + in Swirler Air + 5% excess air oil burner)	Panjang Nyala	Laju Pembakaran per panjang nyala (kg/h.m)
	$\dot{m}(kg/s)$	$\dot{m}(kg/h)$				L (m)	
21.92	0.084	300.626	23.95	1.783	2.708	3.18	94.536
17.39	0.084	300.626	23.95	1.783	2.518	3.48	86.387
13.34	0.084	300.626	23.95	1.783	2.349	3.64	82.590





Gambar 1. Desain Rancangan *Coal-Oil Burner*

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Moran, Michael J., Shapiro, Howard N. 2006. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics Fifth Edition**. The Ohio State University. Jhon Willey & Sons. England
- [2] Fox, R.W., Mc Donald A.T., and Pritchard P.J. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics Eighth Edition**. Purdue University. Jhon Willey & Sons. United States of America
- [3] Sumarsono, Erwan. 2010. **Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Arah Double Axial Swirler Searah dan Berlawanan Arah pada Pola Aliran Kecepatan Udara Pembakaran Gas Flame Burner**. FTI - ITS, Jurusan Teknik Mesin.
- [4] Syaifurrahman, Muhammad. 2010. **Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Arah Double Axial Swirler Searah dan Berlawanan Arah pada Distribusi Temperatur Nyala Api Gas Flame Burner**. FTI - ITS, Jurusan Teknik Mesin.
- [5] Herlambang, Awan Yudi. 2010. **Studi Eksperimental Pengaruh Arah Double Axial Swirler pada Gas Flame Burner pada Pembentukan Soot**. FTI – ITS, Jurusan Teknik Mesin.
- [6] Liu Chunlong, Li Zhengqi, Kong Weiguang, Zhao Yang, Chen Zhichao. 2010. **Bituminous Coal Combustion in a Full-scale Start-Up Ignition Burner : Influence of The Excess Air Ratio**. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology. China