

**PENGARUH FILTER UDARA BERBAHAN CAMPURAN
ZEOLIT-*FLY ASH* AKTIVASI FISIK DENGAN VARIASI
KOMPOSISI DAN VARIASI MASSA TERHADAP PRESTASI
MESIN DIESEL 4-LANGKAH**

(Skripsi)

Oleh

ANDIKA SOFYAN AMARULLAH

1215021015



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2017

ABSTRAK

PENGARUH FILTER UDARA BERBAHAN CAMPURAN ZEOLIT-*FLY ASH* AKTIVASI FISIK DENGAN VARIASI KOMPOSISI DAN VARIASI MASSA TERHADAP PRESTASI MESIN DIESEL 4-LANGKAH

Oleh
Andika sofyam Amarullah

Dalam suatu proses pembakaran, oksigen merupakan gas yang paling dibutuhkan pada proses tersebut. Semakin tinggi kadar oksigen dalam udara, maka proses pembakaran akan lebih optimal. Salah satu pemanfaatan zeolit alam dan *fly ash* batu bara adalah sebagai adsorben udara pembakaran karena mampu menyerap N_2 dan H_2O . Dengan kemampuan kedua bahan tersebut sebagai adsorben udara pembakaran, maka diharapkan mampu mengalirkan udara kaya oksigen ke ruang bakar untuk meningkatkan proses pembakaran dan prestasi mesin.

Dalam penelitian ini, filter dibuat dengan menggunakan campuran zeolit dan *fly ash* batu bara yang diaktivasi secara fisik atau pemanasan pada suhu $225^{\circ}C$ selama 1 jam, dengan variasi komposisi Z0F100; Z25F75; Z50F50; Z75F25; dan Z100F0 dan variasi massa 50 gram; 75 gram; dan 100 gram. Pengujian filter zeolit-*fly ash* pada penelitian ini menggunakan mesin diesel 4-langkah 1 silinder yang ada di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Lampung.

Berdasarkan dari hasil pengujian, diperoleh bahwa dengan menggunakan campuran zeolit dan *fly ash* yang diaktivasi secara fisik mampu meningkatkan prestasi mesin. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan daya engkol rata-rata terbaik terjadi pada penggunaan filter komposisi Z50F50 dengan massa 100 gram yaitu sebesar 2,825 %, diikuti dengan penggunaan zeolit Z100F0 dengan massa 75 gram yaitu sebesar 2,155 %. Dan penurunan konsumsi bahan bakar spesifik engkol rata-rata terbaik terjadi pada penggunaan komposisi Z25F75 dengan massa 100 gram yaitu sebesar 7,805 %. Hasil uji emisi menunjukkan bahwa komposisi Z25F75 adalah yang komposisi terbaik dengan hasil kepekatan asap 38,65 % atau 386.500 ppm.

Kata kunci : perlakuan udara, aktivasi fisik, adsorben zeolit-*fly ash*, prestasi mesin.

**PENGARUH FILTER UDARA BERBAHAN CAMPURAN ZEOLIT-*FLY*
ASH AKTIVASI FISIK DENGAN VARIASI KOMPOSISI DAN VARIASI
MASSA TERHADAP PRESTASI MESIN DIESEL 4-LANGKAH**

Oleh

Andika Sofyan A.

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik
Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2017

Judul Skripsi

**: PENGARUH FILTER UDARA BERBAHAN
CAMPURAN ZEOLIT-FLY ASH AKTIVASI
FISIK DENGAN VARIASI KOMPOSISI DAN
VARIASI MASSA TERHADAP PRESTASI
MESIN DIESEL 4-LANGKAH**

Nama Mahasiswa

: Andika Sofyan A.

Nomor Pokok Mahasiswa : 1215021015

Jurusan

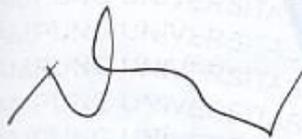
: Teknik Mesin

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

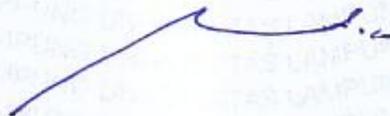


Ir. Herry Wardono, M.Sc.
NIP 19660822 199512 1 001



A. Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng.
NIP 19760715 200812 1 002

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin

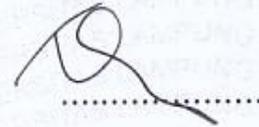


Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP 19740816 200012 1 001

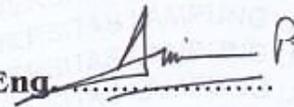
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

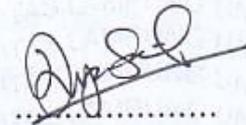
Ketua : **Ir. Herry Wardono, M.Sc.**



Anggota Penguji : **A. Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng.**



Penguji Utama : **M. Dyan Susila, S.T., M.Eng.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Dr. Suharno, M.Sc., Ph.D.
NIP 19620717 198703 1 002 //

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **6 April 2017**

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Andika Sofyan A.
NPM : 1215021015
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang telah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi dan sepengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebut dalam daftar pustaka. Hal tersebut berdasarkan dalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor No. 3187/H26/DT/2010.

Apabila dikemudian hari pernyataan ini tidak benar saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai aturan yang berlaku.

Bandar Lampung, 21 April 2017

Yang Menyatakan



The image shows a green 6000 Rupiah stamp from Lampung. The stamp features the text 'MATERAI LAMPUNG' at the top, a serial number '24E36AEF512986551', and the value '6000' in large numbers. Below the value, it says 'RUPIAH'. The stamp is partially obscured by a handwritten signature in black ink.

Andika Sofyan A.
NPM. 1215021015

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Andika Sofyan A.

NPM : 1215021015

Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang telah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi dan sepengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebut dalam daftar pustaka. Hal tersebut berdasarkan dalam pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor No. 3187/H26/DT/2010.

Apabila dikemudian hari pernyataan ini tidak benar saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai aturan yang berlaku.

Bandar Lampung, 21 April 2017

Yang Menyatakan

Andika Sofyan A.
NPM. 1215021015

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Desa Gaya Baru, Kabupaten Lampung Tengah pada tanggal 1 Maret 1994. Penulis merupakan anak kedua dari empat bersaudara pasangan Bapak Wanuri S.Pd. dan Ibu Ngatiyem S.Pd. Penulis menyelesaikan pendidikan taman kanak-kanak di TK Aisyiyah Bustanul Athfal Muhammadiyah, Seputih Surabaya Lampung Tengah pada tahun 2000. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN 1 Gaya Baru VII Seputih Surabaya Lampung Tengah pada tahun 2006, pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Seputih Surabaya Lampung Tengah pada tahun 2009, dan pendidikan menengah atas di SMA Al Kautsar Bandar Lampung pada tahun 2012. Penulis melanjutkan pendidikan di Universitas Lampung pada tahun 2012 melalui tes tertulis pada jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah aktif di organisasi kemahasiswaan diantaranya, Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) di bidang Advokasi sebagai anggota dan *English Society* Unila (ESo) di bidang *Creativity and Financial Support* sebagai kepala bidang. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata Tematik (KKN-Tematik) pada tahun 2016 di desa Pancawarna, Kecamatan Way Serdang, Kabupaten Mesuji. Penulis juga telah melaksanakan Program Kerja Praktik (KP) di P.T. Perkebunan Nusantara VII Natar Lampung Selatan pada tahun 2015. Penulis melakukan penelitian dengan judul “*Pengaruh Filter Udara Berbahan Campuran Zeolite-Fly Ash Aktivasi dengan Variasi Komposisi dan Variasi Massa terhadap Prestasi Mesin Diesel 4-Langkah*” di bawah bimbingan Bapak Ir. Herry Wardono M.Sc. Dan A. Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng.

Motto

*Learn from Yesterday
Live for Today
Plan for Tomorrow
Life Roll's On*

Kebuksesan adalah kemampuan untuk melewati dan mengatasi dari satu kegagalan ke kegagalan lain tanpa kehilangan semangat.

Kegagalan juga kadang menyenangkan, hidup dengan kepercayaan bahwa cobaan itu berguna untuk menempa diri sendiri.

Tepat di saat hari buruk menyerang, ada banyak hari baik yang menunggu giliran.

Semenjak ada detektor metal, mencari jarum di tumpukan jerami jadi masuk akal.

Lempar dan buanglah hal buruk dan serahkan sisanya kepada gravitasi

Persembahan



*Segala Puji Bagi Allah SWT, Dzat Yang Maha Sempurna
Sholawat serta Salam Selalu Tercurah Kepada Uswatun Hasanah Muhammad Rasulullah
SAW.*

Kupersembahkan karya kecil ini sebagai tanda cinta & kasih sayangku kepada:

*Ibu dan Bapak, serta saudara-saudaraku yang telah memberikan kasih sayang, semangat,
dukungan, dan doanya kepadaku.*

*Para pendidik yang telah mengajar dengan penuh kesabaran, semoga ilmu yang telah
diberikan menjadi jariah yang mengalir deras.*

*Semua Sahabat yang begitu tulus menyayangiku dengan segala kekuranganku, dari
kalian aku belajar memahami arti teman.*

Almamater Universitas Lampung tercinta

SANWACANA

Alhamdulillah puji syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan. Sholawat serta salam semoga selalu tercurah atas manusia panutan yang akhlaknya paling mulia, yang telah membawa perubahan luar biasa, menjadi uswatun khasanah di muka bumi ini, Muhammad Rasulullah SAW.

Skripsi yang berjudul “*Pengaruh Filter Udara Berbahan Campuran Zeolit-Fly Ash Aktivasi Fisik Dengan Variasi Komposisi Dan Variasi Massa Terhadap Prestasi Mesin Diesel 4-Langkah*” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik pada Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa terselesaikannya penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Suharno, M.Sc., selaku Dekan Teknik Universitas Lampung beserta staff dan jajarannya yang telah memberikan bantuan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Ahmad Suudi, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah memberikan kemudahan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

3. Bapak Ir. Herry Wardono, M. Sc., selaku Dosen Pembimbing I yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk membimbing, memberikan perhatian, dan memotivasi selama penyusunan skripsi sehingga skripsi ini menjadi lebih baik.
4. Bapak Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing II dan yang telah bersedia meluangkan waktu untuk membimbing, memberikan sumbangan pemikiran, kritik, dan saran kepada penulis demi terselesaikannya skripsi ini serta memberikan kesempatan bagi penulis untuk membantu beliau sebagai asisten dosen.
5. Bapak M. Dyan Susila, S.T., M.Eng., selaku pembahas yang telah memberikan masukan baik kritik maupun saran yang sangat bermanfaat untuk penulis.
6. Bapak dan Ibu dosen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan kepada penulis.
7. Kedua orang tuaku, Bapak (Wanuri, S.Pd.) dan Ibu (Ngatiyem, S.Pd.) terima kasih atas perhatian dan kasih sayang yang telah diberikan serta doa yang terus dilantunkan.
8. Mbakku dan Mas iparku, Anita Sofyan N., S.Pd. dan dr. Hajriyansah, terima kasih atas bantuan dukungan serta doanya untuk menyelesaikan skripsi ini.
9. Elok Waspadany teman yang selalu meluangkan waktu dan mendengarkan keluh kesah, serta menghibur dan memberikan semangat.
10. Sahabat-sahabat saya Budi, Lutfi, Nopi dan Ibnu yang selalu memberikan hiburan disaat lelah, yang selalu mendoakan kebaikan, yang selalu memotivasi

agar tidak putus asa, yang selalu meluangkan waktu mendengar keluh kesah dan yang menjadi semangat saya untuk menyelesaikan skripsi.

11. Teman-teman seluruh angkatan 2012 di Teknik Mesin: Ajito, Wakhid, Chamami, Iqbal, Zaenal, Kiki Eko, Deo, Doni, Nopal, Dedi, Bagus, Dika, Dara, Anggun, Joel, Rifai, Alef, Rafael, Wahyu, Fahmi, Intan, Alex, dan teman-teman yang lainnya atas kebersamaannya selama ini dan semua bantuan yang telah diberikan. Semoga kebersamaan kita selalu menjadi memori positif.
12. Kakak-kakak tingkat Teknik Mesin angkatan 2010, dan 2011 serta adik-adik tingkatku angkatan 2013, 2014, dan 2015 terima kasih atas kebersamaan dan doanya.
13. Teman-teman di English Society (ESo) Unila, Taufik, Rian, Aris, Tanjung, Fajar, yang menjadi salah satu penyemangat.
14. Mas Agus, Mas Dadang, Mas Nanang dan Mas Marta, terima kasih atas bantuannya selama ini, terima kasih banyak.
15. Almamater tercinta yang telah mendewasakanku.
16. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.

Semoga dengan kebaikan, bantuan, dan dukungan yang telah diberikan pada penulis mendapat balasan pahala yang setimpal dari Allah SWT dan semoga skripsi ini bermanfaat.

Bandar Lampung, 19 April 2017
Penulis

Andika Sofyan A.

DAFTAR ISI

	Halaman
SANWACANA	i
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR NOTASI	xii
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan Penelitian	6
C. Batasan Masalah	7
D. Sistematika Penulisan	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	9
A. Motor Bakar	9
1. Motor Bensin	10
2. Motor Diesel	10
B. Proses Pembakaran.....	16
C. Parameter Prestasi Mesin Motor Bakar 4-Langkah	21
D. Saringan Udara (<i>Filter</i>)	23
E. Adsorpsi	24
F. Zeolit	26

G. <i>Fly Ash</i>	32
H. Campuran zeolit- <i>fly ash</i>	40
III. METODOLOGI PENELITIAN	41
A. Alat dan Bahan Penelitian.....	41
1. Alat Penelitian	41
2. Bahan Penelitian	48
B. Persiapan Penelitian	49
C. Prosedur Pengujian.....	55
D. Analisa Data	58
E. Diagram Alir Pengambilan Data dan Analisis Data.....	59
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	60
A. Hasil Penelitian	60
B. Pembahasan	65
V. SIMPULAN DAN SARAN	97
A. Simpulan	97
B. Saran	98
DAFTAR PUSTAKA	99
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi dan Klasifikasi <i>Fly Ash</i>	37
2. Komposisi campuran zeolit dan <i>fly ash</i> jika berat total 200 gram ..	51
3. Data hasil pengujian motor diesel 4-langkah	57
4. Data hasil pengujian pelet zeolit- <i>fly ash</i> aktivasi fisik komposisi Z25F75 pada putaran mesin 1500 rpm.....	61
5. Data hasil pengujian pelet zeolit- <i>fly ash</i> aktivasi fisik komposisi Z25F75 pada putaran mesin 2000 rpm.....	62
6. Data hasil pengujian pelet zeolit- <i>fly ash</i> aktivasi fisik komposisi Z25F75 pada putaran mesin 2500 rpm.....	62
7. Data hasil perhitungan prestasi mesin diesel 4-langkah menggunakan komposisi Z25F75 aktivasi pada putaran mesin 1500 rpm	63
8. Data hasil perhitungan prestasi mesin diesel 4-langkah menggunakan komposisi Z25F75 aktivasi pada putaran mesin 2000 rpm	64
9. Data hasil perhitungan prestasi mesin diesel 4-langkah menggunakan komposisi Z25F75 aktivasi pada putaran mesin 2500 rpm	64
10. Konversi PPM ke Persentase (%) <i>opacity</i> (kepekatan)	90
11. Data hasil pengujian emisi mesin diesel 4 langkah menggunakan alat StarGas 898 <i>smokemeter</i>	91

12. Rata-rata data hasil pengujian emisi mesin diesel 4 langkah menggunakan alat StarGas 898 <i>smokemeter</i>	92
13. Komparasi komposisi hasil pengujian terbaik menggunakan filter pelet zeolit- <i>fly ash</i> berdasarkan <i>bP</i> , <i>bsfc</i> , dan hasil uji emisi.	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Langkah hisap mesin diesel 4-langkah	12
2. Langkah kompresi mesin diesel 4-langkah	12
3. Langkah usaha mesin diesel 4-langkah	13
4. Langkah buang mesin diesel 4-langkah	14
5. Diagram P - v dari siklus ideal motor diesel 4-langkah	15
6. Konstruksi empat kerangka zeolit	29
7. <i>Fly ash</i> batu bara	34
8. Robin-Fuji DY23D	41
9. Unit instrumentasi TD 114	41
10. <i>Tachometer digital</i>	42
11. <i>Stopwatch</i>	42
12. Penumbuk butiran kasar zeolit	43
13. Termometer Air Raksa	43
14. Cetakan pelet zeolit- <i>fly ash</i>	44
15. <i>Oven</i>	44
16. Timbangan Digital	45
17. Kompor Listrik	45
18. Kawat strimin sebagai kemasan pelet zeolit- <i>fly ash</i>	46
19. Ayakan 100 <i>Mesh</i>	46
20. Ampia	47

21. Zeolit clinoptilolite CV. Minatama	47
22. Zeolit dan <i>fly ash</i>	48
23. Campuran zeolit dan <i>fly ash</i> yang telah kalis.....	49
24. Pelet zeolit- <i>fly ash</i> yang baru dicetak.....	50
25. Pelet zeolit- <i>fly ash</i> yang dikemas dalam plastik kedap udara.....	52
26. Filter zeolit- <i>fly ash</i>	53
27. Diagram alir penelitian.....	58
28. Pengaruh aktivasi fisik Z0F100 dengan variasi massa terhadap daya engkol berdasarkan putaran mesin.....	66
29. Persentase rata-rata secara umum pengaruh <i>pelet</i> Z0F100 aktivasi fisik dengan variasi massa terhadap daya engkol.....	67
30. Pengaruh aktivasi fisik Z25F75 dengan variasi massa terhadap daya engkol berdasarkan putaran mesin.	68
31. Persentase rata-rata secara umum pengaruh <i>pelet</i> Z25F75 aktivasi fisik dengan variasi massa terhadap daya engkol.....	69
32. Pengaruh aktivasi fisik Z50F50 dengan variasi massa terhadap daya engkol berdasarkan putaran mesin.....	70
33. Persentase rata-rata secara umum pengaruh <i>pelet</i> Z50F50 aktivasi fisik dengan variasi massa terhadap daya engkol.....	71
34. Pengaruh aktivasi fisik Z75F25 dengan variasi massa terhadap daya engkol berdasarkan putaran mesin.....	72
35. Persentase rata-rata secara umum pengaruh <i>pelet</i> Z75F25 aktivasi fisik dengan variasi massa terhadap daya engkol.....	73
36. Pengaruh aktivasi fisik Z100F0 dengan variasi massa terhadap daya engkol berdasarkan putaran mesin.....	74
37. Persentase rata-rata secara umum pengaruh <i>pelet</i> Z100F0 aktivasi fisik dengan variasi massa terhadap daya engkol.....	75

38. Grafik peningkatan daya engkol pada pemanfaatan <i>pelet zeolit-fly ash</i> aktivasi fisik semua variasi komposisi.....	76
39. Pengaruh aktivasi fisik Z0F100 dengan variasi massa terhadap penurunan konsumsi bahan bakar spesifik berdasarkan putaran mesin.....	78
40. Persentase rata-rata pengaruh penggunaan pelet <i>fly ash</i> aktivasi fisik (Z0F100) dengan variasi massa terhadap konsumsi bahan bakar spesifik engkol.....	79
41. Pengaruh aktivasi fisik Z25F75 dengan variasi massa terhadap penurunan konsumsi bahan bakar spesifik berdasarkan putaran mesin.	80
42. Persentase rata-rata pengaruh penggunaan pelet zeolit- <i>fly ash</i> aktivasi fisik komposisi Z25F75 dengan variasi massa terhadap konsumsi bahan bakar spesifik.....	81
43. Pengaruh aktivasi fisik Z50F50 dengan variasi massa terhadap penurunan konsumsi bahan bakar spesifik berdasarkan putaran mesin.....	82
44. Persentase rata-rata pengaruh penggunaan pelet zeolit- <i>fly ash</i> aktivasi fisik komposisi Z50F50 dengan variasi massa terhadap konsumsi bahan bakar spesifik.....	83
45. Pengaruh aktivasi fisik Z75F25 dengan variasi massa terhadap penurunan konsumsi bahan bakar spesifik berdasarkan putaran mesin.....	84
46. Persentase rata-rata pengaruh penggunaan pelet zeolit- <i>fly ash</i> aktivasi fisik komposisi Z75F25 dengan variasi massa terhadap konsumsi bahan bakar spesifik.....	85
47. Pengaruh aktivasi fisik zeolit dengan variasi massa terhadap penurunan konsumsi bahan bakar spesifik berdasarkan putaran mesin.....	86
48. Persentase rata-rata pengaruh penggunaan pelet zeolit aktivasi fisik komposisi (Z100F0) dengan variasi massa terhadap konsumsi bahan bakar spesifik.....	87

49. Grafik penurunan konsumsi bahan bakar spesifik engkol (*bsfc*) pada pemanfaatan pelet zeolit-*fly ash* aktivasi fisik komposisi Z0F100; Z25F75; Z50F50; Z75F25 dan Z100F0.89
50. Grafik hasil uji emisi mesin diesel dengan filter zeolit-*fly ash* variasi komposisi menggunakan alat ukur *StarGas 898 smokemeter*..... 92

DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan	Satuan
bP	Daya Engkol	kW
bP_0	Daya Engkol tanpa Zeolit	kW
bP_1	Daya Engkol dengan Zeolit	kW
\overline{bP}	Peningkatan Daya Engkol rata-rata	kW
$bsfc$	Konsumsi Bahan Bakar Spesifik	kg/kWh
c_0	Konsumsi Bahan Bakar Spesifik tanpa zeolit	kg/kWh
c_1	Konsumsi Bahan Bakar Spesifik dengan zeolit	kg/kWh
\overline{c}	Konsumsi Bahan Bakar Spesifik rata-rata	kg/kWh
m	Massa Beban	kg
m_{act}	Laju Pemakaian Udara Aktual	kg/h
$m_{a, th}$	Laju Pemakaian Udara Teoritis	kg/h
m_f	Laju Pemakaian Bahan Bakar	kg/h
N	Putaran Mesin	rpm
P	Beban yang diterapkan	kg
sgf	<i>Specific gravity</i>	kg/m^3
t	Waktu Pemakaian Bahan Bakar	<i>detik</i>
T_a	Temperatur Udara Masuk	$^{\circ}C$
T_{AP}	Torsi Aktual	Nm
T_{RD}	Torsi Hasil Pembacaan	Nm
A/F	Perbandingan Udara-Bahan bakar	-

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pada perkembangan Indonesia saat ini bahan bakar sangat diperlukan terutama bahan bakar cair seperti bensin dan solar yang berguna untuk keperluan masyarakat kalangan menengah ke bawah. Menurut menteri energi dan sumber daya mineral (ESDM) 2014, Sudirman Said berkata “Indonesia akan bergantung pada impor minyak dunia bila dibiarkan terus tidak mengeksplorasi minyak secara maksimal, hal ini menyebabkan *Replacement rate* terhadap deposit menjadi tidak sampai 60 persen. Kondisi aktual ini bisa berujung pada *nett importing energy* yang berbahaya. Produksi puncak minyak Indonesia terjadi pada tahun 1997, mencapai 1,5 juta barrel per hari. Namun terus menurun hingga sekarang hanya 800.000 barrel per hari. Berdasarkan hal tersebut, maka rakyat Indonesia harus menghemat bahan bakar minyak” (Kompas.com, 2014).

Krisis bahan bakar minyak ini merupakan masalah yang dihadapi rakyat Indonesia untuk kedepannya, karena bahan bakar minyak merupakan jantung dari aktivitas perekonomian, jika bahan bakar minyak langka maka hampir dapat dipastikan perekonomian Indonesia akan lumpuh. Oleh karena itu, dibutuhkan solusi yang dapat memecahkan permasalahan tersebut. Salah satunya adalah dengan meneliti cara apa saja yang dapat digunakan untuk menghemat penggunaan bahan bakar minyak yaitu dengan pemanfaatan zeolit alam dan *fly ash* batu bara sebagai

adsorben udara pembakaran. Zeolit alam memiliki sifat fisik dan kimia yang unik, sehingga dalam dasawarsa ini zeolit digunakan dan dimanfaatkan sebagai mineral serba guna. Sifat-sifat unik tersebut meliputi dehidrasi, adsorben, penyaring molekul, katalisator dan penukar ion. Sedangkan *fly ash* atau abu terbang batu bara merupakan senyawa alumina silikat yang secara fisik dan kimia juga mempunyai kemampuan sebagai penyerap (*adsorbent*). *Fly ash* merupakan limbah dari bahan bakar batu bara yang terus meningkat jumlahnya seiring banyaknya jumlah sektor pembangkit listrik di Indonesia.

Banyak upaya yang telah dilakukan untuk menghemat bahan bakar minyak, salah satunya adalah sebagai solusi untuk mengurangi krisis energi, ada yang mengkonversi dari bahan bakar minyak ke bahan bakar gas, membuat bahan bakar alternatif sebagai pengganti minyak bumi, mengembangkan teknologi mesin dengan sistem injeksi untuk jenis kendaraan baru, dan masih banyak lagi upaya-upaya yang dilakukan pada saat ini. Sebagai salah satu dari sekian banyak hal yang dilakukan untuk menghemat bahan bakar sekarang ini adalah dengan memaksimalkan udara yang digunakan dalam proses pembakaran. Kinerja dari motor bakar ditentukan oleh beberapa faktor seperti putaran mesin, beban operasi, perbandingan udara bahan bakar (AFR), dan komposisi udara pembakaran (Wardono, 2004).

Disamping hal tersebut, hasil dari pembakaran dalam mesin kendaraan menghasilkan sisa-sisa pembakaran seperti gas CO, HC, dan CO₂, serta NO. Gas-gas tersebut berbahaya bagi kesehatan manusia jika dihirup secara terus menerus dalam jangka waktu yang lama. Untuk itu perlu dilakukan upaya-upaya

meminimalisir sisa gas buang pembakaran tersebut salah satunya adalah dengan mereduksi emisi gas buang menggunakan adsorben zeolit-*fly ash* pada udara pembakaran. Dengan harapan di masa yang akan datang polusi dari gas buang kendaraan ini dapat dikendalikan supaya lingkungan menjadi bersih dan sehat. Berkaitan dengan hal tersebut, salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah dengan memaksimalkan udara yang akan digunakan untuk proses pembakaran. Komponen utama yang diperlukan dalam proses pembakaran adalah udara, panas, dan bahan bakar. Udara lingkungan yang dihisap masuk untuk proses pembakaran terdiri atas bermacam-macam gas, seperti nitrogen, oksigen, uap air, karbon monoksida, karbon dioksida, dan gas-gas lain. Sementara gas yang dibutuhkan pada proses pembakaran adalah oksigen untuk membakar bahan bakar yang mengandung molekul karbon dan hidrogen (Wardono, 2004).

Faktor-faktor yang berperan pada kinerja motor bakar mempengaruhi proses pembakaran yang terjadi pada motor bakar. Di dalam proses pembakaran dibutuhkan dua komponen utama yaitu bahan bakar dan udara, dimana kualitas campuran udara dan bahan bakar menentukan baik atau tidaknya proses pembakaran tersebut. Peningkatan kualitas proses pembakaran dapat dilakukan dengan beberapa cara, salah satunya dengan memperbaiki komposisi udara yang digunakan dalam proses pembakaran dengan cara menyaring udara yang akan digunakan dalam proses pembakaran. Adapun kandungan udara dimana komponen udara mengandung 78% nitrogen, 21% oksigen, dan 1% gas-gas lain seperti uap air, karbon dioksida, dan lain-lain. Gas-gas lain selain oksigen tersebut dapat mengganggu proses pembakaran karena nitrogen dan uap air akan mengambil panas di ruang bakar. Oleh sebab itu, diperlukan saringan udara yang

dapat menyaring gas nitrogen, uap air, dan gas-gas lainnya agar udara yang akan digunakan dalam proses pembakaran kaya akan oksigen, sehingga jika di dalam proses pembakaran terdapat komposisi udara yang baik, maka proses pembakaran akan menjadi lebih sempurna (Wardono, 2004 dalam Yandra, 2006). Dalam hal tersebut, zeolit alam dan *fly ash* batu bara dapat dimanfaatkan sebagai penyaring udara (*filter*) yang dapat mengoptimalkan proses pembakaran. Zeolit dan *fly ash* memiliki kemampuan sebagai adsorben udara pembakaran, zeolit dapat menyerap nitrogen dan uap air, sedangkan *fly ash* dapat menyerap uap air. Pada penelitian ini, zeolit dan *fly ash* dicampurkan pada komposisi tertentu sebagai filter pelet campuran zeolit-*fly ash*, yang diharapkan dapat memaksimalkan sifat adsorpsi dari campuran pelet zeolit-*fly ash*.

Penelitian ini hampir sama dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Wasis (2015) dan Munanadar (2013), namun beberapa hal yang membedakan penelitian ini dengan penelitian mereka adalah, pelet yang digunakan pada penelitian ini merupakan pelet campuran zeolit dan *fly ash* pada komposisi tertentu yang diaktivasi secara fisik, dan penelitian ini juga dilakukan uji emisi untuk mengetahui seberapa besar pelet campuran zeolit-*fly ash* ini dapat mereduksi emisi gas buang mesin diesel 4-langkah.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Setia Wasis (2015), penggunaan pelet *fly ash* sebagai filter untuk adsorben udara pembakaran pada mesin diesel 4 langkah yang diaktivasi secara fisik dapat menurunkan konsumsi bahan bakar sebesar 4,4404 % untuk massa 50 gram bahan uji, bahan yang digunakan hanya *fly ash* yang diaktivasi secara fisik pada suhu 150 °C selama 1 jam.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Dimas Rilham Purnawanta (2012), pembuatan dan pengujian zeolit pelet teraktivasi fisik dengan variasi massa yang berbeda yaitu 55, 45, dan 35 gram pada motor bensin 4 langkah. Secara umum pelet aktivasi fisik dengan massa 45 gram mampu mereduksi emisi gas buang lebih baik. *Fly ash* pelet aktivasi fisik dengan massa 45 gram juga dapat meningkatkan kadar CO₂ paling baik. Penghematan konsumsi bahan bakar pada pelet *fly ash* yaitu untuk massa 45 gram sebesar 22,23 gram dan pada pengujian stasioner dapat menghemat konsumsi bahan bakar hingga sebesar 21,23%. Pada akselerasi (0-80 Km/jam peningkatan prestasi mesin yang terbaik terjadi pada *fly ash* dengan massa 45 gram yaitu sebesar 2,4 detik atau mengalami penurunan sebesar 20,34%. Penurunan kadar CO pada *fly ash* pelet aktivasi fisik terbesar terjadi pada massa 45 gram sebesar 86,23% serta meningkatkan kadar CO₂ sebesar 10,63%. Berdasarkan pada penelitian yang dilakukan Rilham (2012) tersebut, pengujian menggunakan *fly ash* bentuk pelet pada sepeda motor 4-langkah, diperoleh penghematan konsumsi bahan bakar sebesar 22,34 % pada *road test* dan 19,56 % pada uji stasioner putaran 5000 rpm.

Adapun berdasarkan penelitian Efendri (2013) menggunakan *fly ash* bentuk pelet dengan menggunakan variasi jenis air dan kondisi aktivasi fisik yaitu pada temperatur 150° C, dan waktu aktivasi 1 jam serta air hasil perendaman zeolit, dengan ini diperoleh penghematan bahan bakar pada *road test* sebesar 12,69 % dan pada pengujian stasioner hingga 22,65 % serta mempercepat akselerasi (0-80 km/jam) sebesar 6,86 %. Pada penelitian Rilham (2012) dan Efendri (2013) material yang digunakan hanya *fly ash* yang diaktivasi secara fisik dan penggunaan variasi air dengan menggunakan sepeda motor 4-langkah.

Oleh karena itu, mengacu pada penelitian sebelumnya maka pada penelitian kali ini penulis akan melakukan penggunaan kombinasi zeolit dan *fly ash* batu bara yang diaktivasi secara fisik sebagai adsorben udara pembakaran untuk meningkatkan prestasi mesin motor diesel 4-langkah menggunakan adsorben zeolit dan *fly ash* aktivasi fisik.

B. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan filter campuran zeolit-*fly ash* pelet terhadap prestasi mesin diesel 4 langkah yang ditinjau dari daya engkol, pemakaian bahan bakar spesifik engkol, dan emisi gas buang mesin, hal ini berdasarkan :

1. Variasi komposisi (Z0F100, Z25F75, Z50F50, Z75F25, Z100F0).
2. Variasi massa pelet (50 gram, 75 gram, 100 gram).
3. Variasi putaran mesin (1500 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm).

C. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini agar pembahasan dari hasil yang didapatkan lebih terarah, yaitu :

1. Mesin yang digunakan pada penelitian ini adalah motor diesel 4 langkah 1 silinder yang ada di Laboratorium Motor Bakar jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
2. Beban dinamometer yang digunakan pada mesin motor diesel adalah seberat 2,5 kg.

3. Zeolit dan *fly ash* yang digunakan berbentuk pelet dan hanya diaktivasi secara pemanasan fisik.
4. Alat yang digunakan untuk membuat campuran zeolit-*fly ash* pelet adalah alat sederhana yang masih menggunakan cetakan. Oleh karena itu besar tekanan pada saat pembuatan diabaikan.
5. Penilaian prestasi mesin hanya berdasarkan pada daya engkol, konsumsi bahan bakar spesifik engkol, dan emisi gas buang mesin.

D. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada laporan penelitian ini yaitu sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Terdiri dari latar belakang, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan tentang landasan teori yang mendukung penelitian ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan materi alat dan bahan pengujian, beberapa tahapan persiapan sebelum pengujian, prosedur pengujian dan diagram alir pengujian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi pembahasan berdasarkan data-data yang diperoleh dari pengujian motor diesel 4-langkah.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

Berisikan hal-hal yang dapat disimpulkan dan saran-saran yang ingin disampaikan dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Motor Bakar

Motor bakar merupakan salah satu bagian dari mesin kalor yang berfungsi untuk mengkonversi energi termal hasil pembakaran bahan bakar menjadi energi mekanik. Berdasarkan siklus operasinya motor bakar dibedakan menjadi dua yaitu motor bakar siklus volume konstan (motor bakar siklus *otto* atau motor bakar bensin) dan motor bakar siklus tekanan konstan (motor bakar siklus *diesel* atau motor bakar *diesel*) (Wardono, 2004).

Motor bakar adalah salah satu contoh penerapan dari mesin pembakaran dalam (motor bakar torak). Selain motor bakar contoh penerapan dari mesin pembakaran dalam ini adalah sistem turbin gas propulsi pancar gas. Secara umum motor bakar dibedakan menjadi dua bagian, yaitu motor bakar 4 langkah dan motor bakar 2 langkah. Dimana untuk motor bakar 4 langkah di dalam setiap proses pembakarannya secara lengkap diperlukan empat langkah piston atau dua kali putaran poros engkol dalam satu siklus, sedangkan untuk motor bakar dua langkah hanya membutuhkan dua langkah piston atau satu kali putaran poros engkol (Ganesan, 1996 dalam Yandra, 2006). Adapun jenis motor bakar menurut siklusnya yaitu motor bensin dan motor diesel. Penelitian ini terfokus pada jenis motor diesel karena alat inilah yang akan digunakan sebagai alat uji.

1. Motor bensin

Pada motor bensin terdapat ciri utama, dimana proses pembakaran bahan bakar terjadi di dalam ruang silinder pada volume konstan. Proses pembakaran pada volume tetap ini disebabkan pada waktu terjadi kompresi, dimana campuran bahan bakar dan udara mengalami proses kompresi di dalam silinder, dengan adanya tekanan ini bahan bakar dan udara dalam keadaan siap (*combustable*) dan busi meloncatkan percikan bunga listrik (*spark-ignition*) sehingga terjadi pembakaran dalam waktu yang sangat cepat dan campuran tersebut terbakar habis seketika dan menimbulkan kenaikan suhu di dalam ruang bakar. Motor bakar bensin 4-langkah adalah salah satu jenis mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) yang beroperasi menggunakan udara bercampur dengan bahan bakar bensin. Untuk menyelesaikan satu siklus motor bensin diperlukan empat langkah piston.

2. Motor diesel

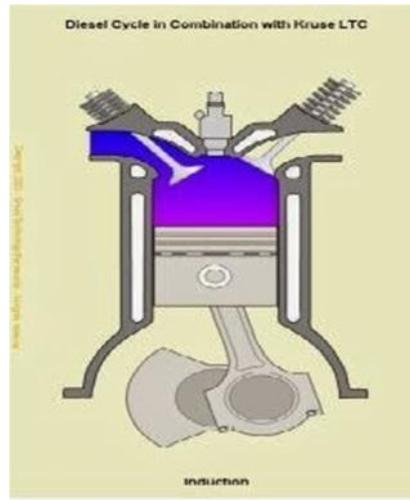
Motor diesel diciptakan oleh Rudolf Diesel asal Jerman pada tahun 1892. Rudolf Diesel berhasil menemukan sebuah motor yang bekerja berdasarkan bahan bakar yang disemprotkan atau dihamburkan ke dalam ruang bakar dari motor dengan memakai tekanan udara (Karyanto, 2000 dalam Yandra, 2006). Motor diesel juga merupakan motor pembakaran dalam (*internal combustion engine*) yang beroperasi dengan minyak berat dan solar sebagai bahan bakar, dengan suatu prinsip bahwa bahan bakar tersebut diinjeksikan ke dalam silinder yang di dalamnya sudah terdapat udara dengan tekanan dan suhu yang cukup tinggi, sehingga bahan bakar secara spontan terbakar (*auto-ignition*).

Motor diesel sering juga disebut dengan *compression ignition engine* atau mesin penyalan terkompresi yang membutuhkan tekanan konstan dan suhu yang tinggi. Agar dapat mencapai suhu dan tekanan saat pembakaran, tekanan kompresi pada mesin diesel diusahakan mampu mencapai $30\text{-}45 \text{ kg/cm}^2$ agar temperatur udara yang dikompresikan mencapai sekitar 500°C sehingga bahan bakar mampu terbakar dengan sendirinya tanpa dipicu oleh letikan bunga listrik dari busi. Untuk dapat mencapai tekanan dan temperatur yang demikian, pada motor diesel harus memiliki perbandingan kompresi yang lebih tinggi kira-kira mencapai 25:1 dan membutuhkan gaya yang lebih besar untuk memutarinya. Sehingga motor diesel memerlukan alat pemutar seperti motor *starter* atau engkol.

Motor diesel memiliki efisiensi panas yang sangat tinggi, hemat konsumsi bahan bakar, memiliki kecepatan lebih rendah dibanding mesin bensin, getarannya sangat besar dan bersuara keras, momen yang didapatkan lebih besar, sehingga motor ini umumnya digunakan pada kendaraan niaga, kendaraan penumpang dan sebagai motor penggerak lainnya. Prinsip kerja dari mesin diesel 4 langkah dibawah ini merupakan cara kerja mesin diesel yang menggunakan ruang bakar langsung (*direct injection*), berikut ini cara kerja mesin diesel 4 langkah :

a. Langkah hisap.

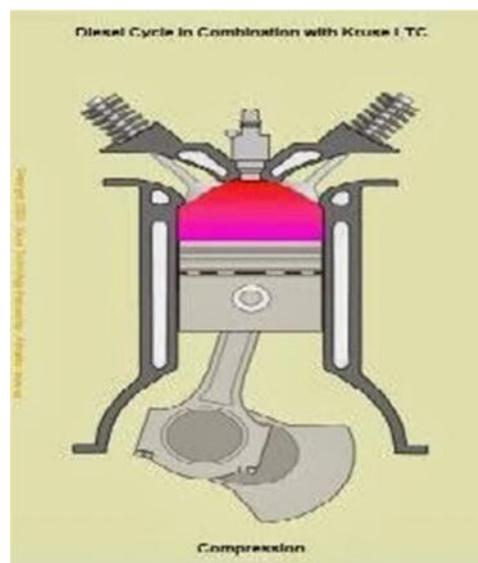
Selama langkah pertama, yaitu langkah hisap, piston bergerak ke bawah (dari TMA ke TMB) sehingga membuat kevakuman di dalam silinder, kevakuman ini membuat udara terhisap dan masuk ke dalam silinder. Pada saat ini katup hisap membuka dan katup buang menutup (gambar 1).



Gambar 1. Langkah hisap mesin diesel.

b. Langkah kompresi.

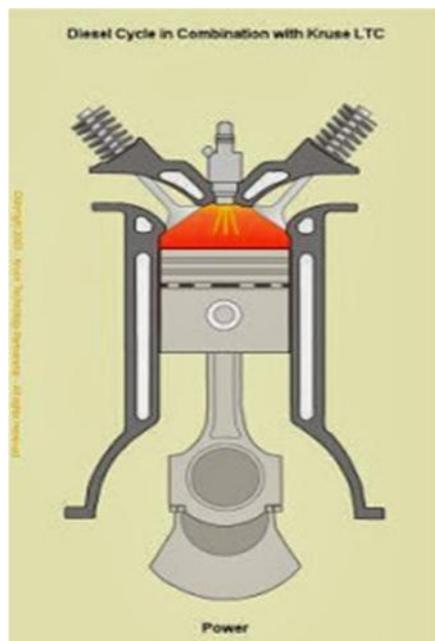
Pada langkah kedua ini disebut juga dengan langkah kompresi, udara yang sudah masuk ke dalam silinder akan ditekan oleh piston yang bergerak ke atas (TMA). Perbandingan kompresi pada motor diesel berkisar diantara 14 : 1 sampai 25 : 1. Akibat proses kompresi ini, udara menjadi panas dan temperaturnya bisa mencapai sekitar 900 °C. Pada langkah ini kedua katup dalam posisi tertutup (gambar 2).



Gambar 2. Langkah kompresi motor diesel.

c. Langkah pembakaran (usaha).

Pada akhir langkah kompresi, *injector nozzle* menyembrotkan bahan bakar dengan tekanan tinggi dalam bentuk kabut ke dalam ruang bakar dan selanjutnya bersama sama dengan udara terbakar oleh panas yang dihasilkan pada langkah kompresi tadi. Diikuti oleh pembakaran tertunda, pada awal langkah usaha akhirnya pembentukan atom bahan bakar akan terbakar sebagai hasil pembakaran langsung dan membakar hampir seluruh bahan bakar. Mengakibatkan panas silinder meningkat dan tekanan silinder yang bertambah besar. Tenaga yang dihasilkan oleh pembakaran diteruskan ke piston. Piston terdorong ke bawah (TMA) dan tenaga pembakaran dirubah menjadi tenaga mekanik. Pada saat ini kedua katup juga dalam posisi tertutup (gambar 3).

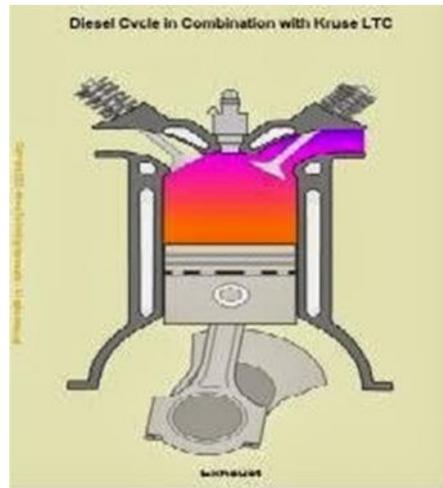


Gambar 3. Langkah usaha motor diesel.

d. Langkah buang

Dalam langkah ini piston akan bergerak dari TMB ke TMA dan mendorong sisa gas buang keluar melalui katup buang yang sudah terbuka, pada akhir

langkah buang udara segar masuk dan ikut mendorong sisa gas pembakaran keluar melalui katup buang menuju saluran buang ke knalpot. Pada langkah ini katup buang terbuka dan katup masuk tertutup (gambar 4).

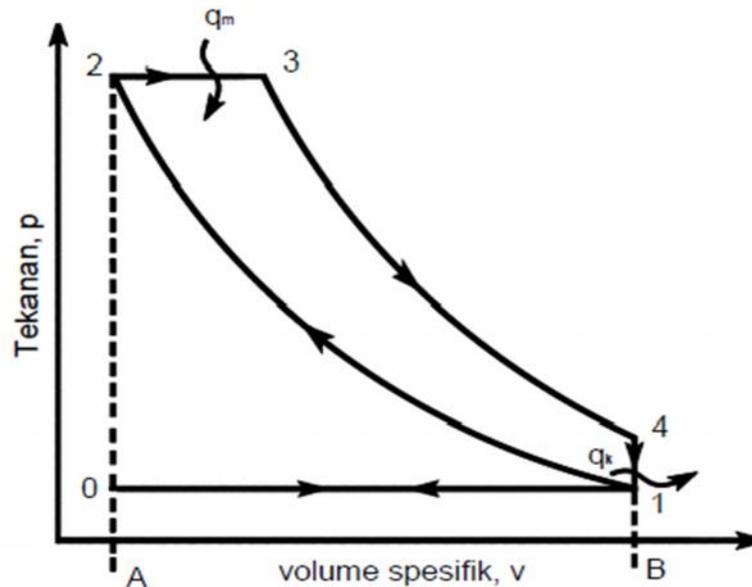


Gambar 4. Langkah buang motor diesel.

Adapun siklus ideal motor diesel 4 langkah atau diagram $P-v$ motor bakar torak, perlu beberapa idealis sehingga proses siklusnya dapat dipahami dengan lebih mudah. Proses yang sebenarnya berbeda dengan proses yang ideal tersebut, dimana perbedaan itu menjadi semakin besar jika idealisasi yang dipergunakan terlalu jauh menyimpang dari keadaan sebenarnya. Proses siklus yang ideal biasanya disebut siklus udara, dengan beberapa idealisasi sebagai berikut (Arismunandar, dan Tsuda, 1996 dalam Yandra, 2006) :

1. Fluida kerja di dalam silinder adalah udara dan dianggap sebagai gas ideal.
2. Proses kompresi dan ekspansi berlangsung secara isentropik.
3. Proses pembakaran dianggap sebagai proses pemanasan fluida kerja.
4. Pada akhir proses ekspansi atau saat torak mencapai titik mati bawah, fluida kerja didinginkan sehingga tekanan dan temperatur turun mencapai tekanan dan temperatur atmosfer.

Adapun diagram $P-v$ Siklus mesin diesel 4 langkah dengan penyalaan kompresi menurut suatu siklus diesel standard udara seperti pada gambar 5 berikut.



Gambar 5. Diagram $P-v$ dari siklus ideal motor diesel 4-langkah.

Adapun urutan proses dari siklus ideal tekanan konstan dari motor diesel 4 langkah yaitu sebagai berikut :

1. Langkah hisap (0-1) adalah proses penghisapan udara luar masuk ke dalam silinder (proses yang terjadi pada tekanan konstan).
2. Langkah kompresi (1-2) adalah proses dimana piston bergerak naik dari TMB menekan udara yang ada di ruang silinder (proses isentropik).
3. Langkah kerja (3-4) adalah proses kerja (ekspansi) yang terjadi akibat dari pemasukan kalor pada langkah pembakaran dalam silinder sehingga mendorong piston bergerak turun, udara mengembang dari volume silinder yang membesar dan meneruskan energi yang ditimbulkan untuk melakukan kerja (proses isentropik).
4. Langkah pembuangan (4-1) adalah proses pengeluaran kalor pada volume konstan.

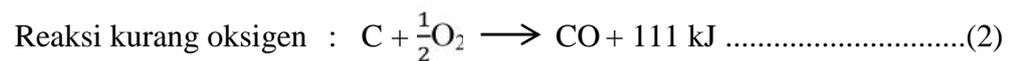
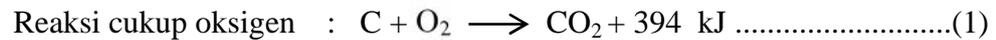
5. Langkah buang (1-0) adalah proses membuang hasil pembakaran yang tersisa, terjadi pada tekanan konstan, dimana pada keadaan ini piston bergerak ke atas (Yandra, 2006).

B. Proses Pembakaran

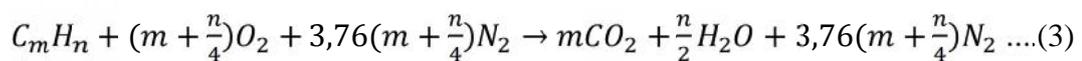
Secara umum, pembakaran dapat didefinisikan sebagai proses atau reaksi oksidasi yang sangat cepat antara bahan bakar (*fuel*) dan udara atau oksidator dengan panas yang cukup dan menimbulkan panas yang jauh lebih besar. Bahan bakar (*fuel*) merupakan segala substansi yang dapat melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum mendukung unsur karbon (C) dan hidrogen (H). Sementara oksidator adalah segala substansi yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan bahan bakar (*fuel*) apabila diberi panas yang cukup. Pada motor bakar biasanya bahan bakar terbakar dengan udara (oksigen), sedangkan nitrogen tidak ikut bereaksi. Oksigen adalah satu-satunya unsur di dalam udara yang dibutuhkan untuk membakar molekul-molekul bahan bakar (Wardono, 2004).

Elemen mampu bakar atau *combustable substance* yang utama adalah hidrogen, carbon, dan oksigen. Sementara itu, nitrogen adalah gas lembam yang tidak berpartisipasi dalam proses pembakaran. Selama proses pembakaran, butiran minyak bahan bakar menjadi elemen komponennya, yaitu hidrogen dan karbon akan bergabung dengan oksigen untuk membentuk air, dan karbon bergabung dengan oksigen menjadi karbon dioksida. Jika oksigen tidak cukup tersedia, maka sebagian dari karbon akan bergabung dengan oksigen menjadi karbon monoksida.

Akibat terbentuknya karbon monoksida, maka jumlah panas yang dihasilkan hanya 30 persen dari panas yang ditimbulkan oleh pembentukan karbon monoksida sebagaimana ditunjukkan oleh reaksi kimia berikut (Wardono, 2004).

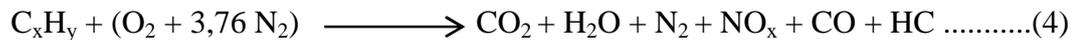


Persyaratan terjadinya pembakaran sempurna adalah apabila semua karbon (C) yang terdapat di dalam bahan bakar menjadi CO₂ pada produk, dan semua unsur hidrogen (H) yang terdapat pada bahan bakar menjadi H₂O pada produk. Dari penjelasan diatas terlihat bahwa unsur karbon maupun hidrogen yang terkandung dalam bahan bakar misalnya solar sangat menentukan kebutuhan udara pembakaran. Pembakaran menghasilkan panas sehingga disebut sebagai proses oksidasi eksotermis. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara kering, dimana udara kering terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen serta 1% gas-gas lain, maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon murni C_mH_n dapat ditulis dengan persamaan berikut :



Persamaan ini telah disederhanakan karena cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekuivalen yang tepat dari udara. Jika terjadi pembakaran tidak sempurna, maka hasil persamaan di atas CO₂ dan H₂O tidak akan terjadi, akan tetapi terbentuk hasil oksidasi parsial berupa CO, CO₂, dan H₂O dan juga sering terbentuk hidrokarbon tak jenuh, formal dehidra dan kadang-kadang terdapat juga karbon (Khairil, 2003).

Dari persamaan reaksi diatas dapat dilihat bahwa N_2 tidak ikut dalam reaksi pembakaran. Reaksi pembakaran di atas adalah reaksi pembakaran ideal, sedangkan reaksi pembakaran sebenarnya atau aktual adalah seperti di bawah ini :



Jika pembakaran berlangsung dalam kondisi kekurangan oksigen, maka sifat campuran udara-bahan bakarnya dikatakan gemuk, demikian pula sebaliknya, jika pembakarannya dalam kondisi kelebihan oksigen maka sifat campurannya dikatakan kurus. Campuran yang terlalu gemuk maupun terlalu kurus merupakan suatu kondisi yang menyebabkan proses pembakaran tidak sempurna, sehingga terdapat karbon monoksida (CO) serta hidrokarbon (HC) yang tak terbakar pada gas buangnya. Karbon monoksida dihasilkan jika karbon yang terdapat dalam solar ($C_{12}H_{26}$) tidak terbakar dengan sempurna karena kekurangan oksigen, sehingga campuran udara-bahan bakar lebih gemuk dari campuran stokiometri.

Jika rasio udara bahan bakar pada proses pembakaran tidak cukup oksigen untuk bereaksi dengan semua unsur hidrogen dan karbon, maka emisi CO maupun HC dapat meningkat. Emisi HC juga meningkat pada udara yang berlebih, karena akan terjadi pembakaran yang lemah atau kegagalan pembakaran. Emisi HC yang terdapat dalam gas buang berbentuk bensin ataupun solar yang tidak terbakar terjadi karena kekurangan oksigen pada udara pembakaran sehingga hidrokarbon hanya bereaksi sebagian (tidak terbakar sempurna) dan membentuk HC, hal ini juga terjadi karena campuran udara-bahan bakar di dekat dinding silinder antara torak dan silinder tidak terbakar sempurna. (Kristanto, 2001). Adapun zat-zat pencemar udara dari hasil pembakaran dalam gas buang antara lain :

1. Karbon monoksida (CO)

Asap kendaraan merupakan sumber utama bagi karbon monoksida di berbagai perkotaan. Data mengungkapkan bahwa 60% pencemaran udara di Jakarta disebabkan karena benda bergerak atau transportasi umum yang berbahan bakar solar terutama berasal dari Metromini. Formasi CO merupakan fungsi dari rasio kebutuhan udara dan bahan bakar dalam proses pembakaran di dalam ruang bakar mesin diesel. Percampuran yang baik antara udara dan bahan bakar terutama yang terjadi pada mesin-mesin yang menggunakan *Turbocharger* merupakan salah satu strategi untuk meminimalkan emisi CO. Karbon monoksida yang meningkat di berbagai perkotaan dapat mengakibatkan turunnya berat janin dan meningkatkan jumlah kematian bayi serta kerusakan otak. Karena itu strategi penurunan kadar karbon monoksida akan tergantung pada pengendalian emisi seperti penggunaan bahan katalis yang mengubah bahan karbon monoksida menjadi karbon dioksida dan penggunaan bahan bakar terbarukan yang rendah polusi bagi kendaraan bermotor. Emisi karbon monoksida (CO) dari motor pembakaran dalam dikendalikan terutama oleh rasio udara/bahan bakar. CO maksimum dihasilkan ketika motor beroperasi dengan campuran gemuk seperti ketika motor mulai dihidupkan pada kondisi dingin atau ketika melakukan akselerasi. (Kristanto, 2001).

2. Hidrokarbon (HC)

Bensin adalah senyawa hidrokarbon, jadi setiap HC yang didapat pada gas buang kendaraan menunjukkan adanya bensin atau solar yang tidak terbakar dan terbuang bersama sisa pembakaran. Apabila suatu senyawa hidrokarbon

terbakar sempurna (bereaksi dengan oksigen) maka hasil reaksi pembakaran tersebut adalah karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O), (Efendri 2013). Hidrokarbon (HC) merupakan gas yang tidak begitu merugikan manusia, akan tetapi merupakan penyebab terjadinya kabut campuran asap (*smoke*). Pancaran hidrokarbon yang terdapat pada gas buang berbentuk gasoline yang tidak terbakar. Hidrokarbon terdapat pada proses penguapan bahan bakar pada tangki, karburator, serta kebocoran gas yang melalui celah antara silinder dan torak yang masuk ke dalam poros engkol yang biasa disebut *blow by gases* (Kusuma, 2002). Pembentukan emisi hidrokarbon (HC) dipengaruhi oleh komponen asli bahan bakarnya dan geometri ruang bakar serta parameter operasi mesin. Jika emisi HC memasuki atmosfer, beberapa diantaranya bersifat karsinogen (*carcinogenic*) yang dapat menyebabkan penyakit kanker.

3. Karbondioksida (CO_2)

Konsentrasi CO_2 menunjukkan secara langsung status proses pembakaran di ruang bakar. Semakin tinggi maka semakin baik. Saat AFR berada di angka ideal, emisi CO_2 berkisar antara 12% sampai 15%. Apabila AFR terlalu kurus atau terlalu kaya, maka emisi CO_2 akan turun secara drastis. Apabila CO_2 berada dibawah 12%, maka dilihat emisi lainnya yang menunjukkan apakah AFR terlalu kaya atau terlalu kurus. Perlu diingat bahwa sumber dari CO_2 ini hanya ruang bakar. Apabila CO_2 terlalu rendah tapi CO dan HC normal, menunjukkan adanya kebocoran *exhaust pipe*. Semakin tinggi kadar CO_2 semakin sempurna pembakarannya dan semakin bagus akselerasinya. Semakin

rendah kadar CO_2 ini menandakan kerak di bagian blok mesin sudah pekat dan harus di *overhaul engine* (Efendri, 2013).

4. Oksida Nitrogen (NO_x)

Senyawa NO_x adalah ikatan kimia antara unsur x nitrogen dan oksigen. Dalam kondisi normal atmosphere, nitrogen adalah gas *inert* yang amat stabil yang tidak akan berikatan dengan unsur lain, tetapi dalam kondisi suhu tinggi dan tekanan tinggi dalam ruang bakar, nitrogen akan memecah ikatannya dan berikatan dengan oksigen. Senyawa NO_x ini sangat tidak stabil dan bila terlepas ke udara bebas, akan berikatan dengan oksigen untuk membentuk NO_2 . NO_2 inilah yang berbahaya karena senyawa ini beracun dan bila terkena air akan membentuk asam nitrat. Gas NO_x dapat menyebabkan sesak napas pada penderita asma, sering menimbulkan gejala sulit tidur, batuk-batuk dan dapat juga mengakibatkan kabut atau asap. NO_x adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak memiliki rasa. Gas ini dapat juga merusak jaringan paru-paru dan jika bersama H_2O akan membentuk *nitric acid* (HNO_3) yang pada gilirannya dapat menimbulkan hujan asam yang sangat berbahaya bagi lingkungan. Gas NO_x terbentuk akibat temperatur yang tinggi dari suatu pembakaran (Kusuma, 2002).

C. Parameter Prestasi Mesin Motor Bakar 4-Langkah

Prestasi mesin biasanya dinyatakan dengan efisiensi thermal (γ_{th}), karena pada motor bakar 4 langkah selalu berhubungan dengan pemanfaatan energi panas/kalor, maka efisiensi yang dikaji adalah efisiensi thermal. Efisiensi thermal

adalah perbandingan energi (kerja/daya) yang berguna dengan energi yang diberikan. Prestasi mesin dapat juga dinyatakan dengan daya *output* dan pemakaian bahan bakar spesifik engkol yang dihasilkan mesin. Daya *output* engkol menunjukkan daya *output* yang berguna untuk menggerakkan sesuatu atau beban. Sedangkan pemakaian bahan bakar spesifik engkol menunjukkan seberapa efisien suatu mesin menggunakan bahan bakar yang disuplai untuk menghasilkan kerja. Prestasi mesin sangat erat hubungannya dengan parameter operasi, besar kecilnya harga parameter operasi akan menentukan tinggi rendahnya prestasi mesin yang dihasilkan (Wardono, 2004).

Parameter prestasi yang cukup berperan adalah daya engkol yang merupakan kerja yang dihasilkan oleh motor bakar. Untuk mengetahui besarnya daya engkol dari motor bakar 4 langkah adalah menggunakan persamaan berikut :

$$bP = \frac{2\pi \cdot N \cdot T_{AP}}{60.000}, (\text{kW}) \dots\dots\dots(5)$$

$$T_{AP} = 1,001 \cdot T_{RD}, (\text{Nm}) \dots\dots\dots(6)$$

Laju pemakaian bahan bakar merupakan banyaknya bahan bakar yang dikonsumsi tiap satuan waktu. Laju pemakaian bahan bakar misalnya per 8 ml bahan bakar, *mf* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut (Wardono, H dkk.2004) :

$$mf = \frac{sgf \times 8.10^{-3} \times 3600}{t}, (\text{kg/h}) \dots\dots\dots(7)$$

Pemakaian bahan bakar spesifik (*specific fuel consumption*) menyatakan seberapa besar daya yang dihasilkan oleh suatu mesin setelah menghabiskan sejumlah

bahan bakar dalam selang waktu tertentu. Untuk pemakaian bahan bakar spesifik engkol, *bsfc* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (wardono, H. Dkk. 2004) :

$$bsfc = \frac{mf}{bP}, \text{ (kg/kW.h)(8)}$$

Laju pemakaian udara teoritis, $m_{a\ th}$ pada tekanan 1,013 bar dan temperatur 20° C ditentukan sebagai berikut :

$$m_{a\ th} = 1.0135M_{an} + 1,211 \text{ (kg/h)(9)}$$

Untuk kondisi tekanan dan temperatur ruang yang berbeda, kalikan $m_{a\ th}$ tersebut dengan faktor koreksi (F_c) berikut :

$$F_c = 3564,22 \times 10^{-5} P_a (T_a + 114) / (T_a)^{2,5}$$

Maka laju pemakaian udara aktual (m_{act}) adalah :

$$m_{act} = F_c \cdot m_{a\ th} \text{ (kg/h)(10)}$$

Sedangkan untuk perbandingan udara-bahan bakar aktual dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{act} = \frac{m_{act}}{m_f} \text{(11)}$$

D. Saringan Udara (*Filter*)

Air filter atau filter udara berfungsi untuk menyaring udara sebelum memasuki ruang bakar. Filter udara sangat diperlukan terlebih lagi dalam kondisi yang

udaranya banyak mengandung debu dan pasir, misalnya di tempat pekerjaan batu dan pertambangan atau di jalan raya yang padat lalu lintas. Udara perlu disaring agar bebas dari debu, kotoran, atau uap air yang berlebihan. Apabila udara yang masuk ruang bakar masih kotor maka akan terjadi pembakaran yang tidak sempurna dan akibatnya suara mesin terdengar kasar, knalpot akan mengeluarkan asap tebal, dan tenaga kendaraan menjadi kurang optimal. Selain itu, aliran udara yang memasuki ruang bakar akan mempengaruhi homogenitas pencampuran udara dan bahan bakar di dalam ruang bakar yang akan mempengaruhi kinerja pembakaran (Hartono, 2008). Dengan demikian saringan udara (*filter*) hanya berguna untuk menangkap partikel-partikel kasar seperti debu dan kotoran. Akan tetapi gas-gas yang terkandung di dalam udara seperti nitrogen, oksigen, uap air, dan gas-gas lainnya yang berukuran nanometer (10^{-9} m) masih dapat lolos dari filter tersebut, maka dari itu dibuatlah pada penelitian ini *filter* dari pelet zeolit dan *fly ash* untuk mengotimalkan hal tersebut.

E. Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses yang menggambarkan kecenderungan molekul fluida untuk menempel pada permukaan padatan. Adsorpsi termasuk salah satu sifat dasar benda, dimana benda mempunyai gaya tarik antar molekul. Adanya medan gaya menimbulkan daerah rendah energi disekitar permukaan padatan, sehingga densitas molekul didekat lapisan permukaan umumnya lebih besar dibandingkan di dalam fluida itu sendiri. Adsorpsi dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu adsorpsi kimia dan adsorpsi fisika. Pengelompokan adsorpsi ini didasarkan pada gaya permukaan yang terjadi selama proses adsorpsi tersebut. Pada adsorpsi fisika,

molekul fluida dapat tertarik ke permukaan padatan disebabkan oleh dua tipe gaya, yaitu gaya dispersitolak menolak (disebut juga gaya Van Der Waals) dan gaya elektrostatik yang dihasilkan oleh molekul atau permukaan yang mempunyai dipole listrik permanent atau momen kuadrupol. Gaya dispersi akan selalu ada pada moleku, dan bila tidak ada gaya lain yang lebih besar, maka gaya ini yang akan menentukan kesetimbangan adsorpsi. Tipe adsorpsi ini akan berlaku misalnya pada molekul yang tidak mempunyai momen dipole atau momen kuadrupol. Namun jika molekul bersifat polar maka gaya yang bekerja adalah gaya elektrostatik. Bidang listrik yang dihasilkan akan menginduksi momen dipol molekul dan meningkatkan proses adsorpsi. Untuk permukaan yang polar dan molekul yang mempunyai momen dipol permanen maka interaksi yang terjadi akan sangat kuat, seperti adsorpsi air pada adsorben yang hidrofilik seperti zeolit. Selain itu, molekul yang mempunyai momen kuadrupol permanen atau lebih besar akan tertarik lebih kuat dibandingkan dengan molekul yang mempunyai momen rendah. Contohnya nitrogen akan teradsorpsi lebih kuat pada zeolit dibandingkan dengan oksigen.

Sementara pada adsorpsi kimia, terdapat proses perpindahan elektron yang sama dengan pembentukan ikatan kimia antara permukaan padatan dengan zat terjerap. Adsorpsi kimia biasanya terjadi pada proses-proses katalitik heterogen. Sedangkan dalam proses-proses pemisahan atau pemurnian, adsorpsi yang umumnya terjadi adalah adsorpsi fisis. Adapun proses kebalikan dari adsorpsi yang disebut sebagai desorpsi. Sebagai adsorben (penjerap), umumnya digunakan bahan padat berpori. Agar bahan berpori mempunyai kapasitas adsorpsi yang besar, maka bahan tersebut harus mempunyai luas area spesifik yang besar, yang

menunjukkan struktur berpori dengan adanya mikropori. Beberapa bahan adsorben yang telah banyak digunakan diantaranya adalah silika gel, alumina, karbon dan karbon aktif serta zeolit. Silika gel, alumina dan karbon aktif termasuk dalam kelompok adsorben amorp (*amorphous adsorbent*), sementara zeolit merupakan adsorben kristal (*crystalline adsorbent*) dan merupakan bahan berpori.

Kapasitas bahan padat berpori untuk menjerap fluida dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut diantaranya adalah geometri sistem pori serta sifat-sifat kimia yang menggambarkan interaksi antara fluida dengan adsorben. Pada geometri sistem pori, termasuk didalamnya adalah luas total permukaan internal, distribusi ukuran pori serta bentuk dan sambungan pori. Khusus untuk zeolit, kemampuan adsorpsi zeolit juga sangat dipengaruhi oleh perbandingan Si/Al (Kamarudin dkk., 2004).

F. Zeolit

Kata “zeolit” berasal dari dua kata bahasa Yunani yaitu *zeo* yang berarti mendidih dan *litos* yang berarti batu. Zeolit merupakan kelompok mineral yang mempunyai sifat dapat menjerap air dan melepaskannya lagi tanpa mengalami perubahan struktur yang signifikan, sehingga zeolit masuk dalam kelompok zat *adsorbent*. Dalam kelompok *adsorbent*, zeolit termasuk *adsorbent* yang mempunyai ukuran pori mikro (mikropori), zeolit masuk ke dalam golongan tipe I. Zeolit merupakan katalis dan juga senyawa aluminosilikat yang terhidrasi, kandungan zeolit terdiri dari ikatan SiO_4 dan AlO_4 tetrahedra yang dihubungkan oleh atom oksigen untuk membentuk kerangka.

Setiap atom Al bersifat negatif pada kerangka zeolit dan akan dinetralkan oleh ikatan dengan kation yang mudah dipertukarkan. Kation yang mudah dipertukarkan yang ada pada kerangka zeolit ini berpengaruh pada proses adsorpsi dan sifat-sifat thermal zeolit (Ozkan dan Ulku, 2008). Selain sebagai jenis kation, kemampuan adsorpsi zeolit juga dipengaruhi oleh perbandingan Si/Al dan geometri pori-pori zeolit, termasuk luas permukaan dalam, distribusi ukuran pori dan bentuk pori (Ackley dkk., 2003; Gruszkiewicz dkk., 2005).

Jenis zeolit alam Indonesia termasuk jenis *mordenite* dan *clinoptilolite*. Zeolit jenis *mordenite* dapat digunakan untuk mengadsorpsi gas H₂O, CO, CO₂, dan CH₄, sedangkan jenis *clinoptilolite* dapat digunakan untuk mengadsorpsi gas CO, CO₂, N₂ dan NO. Mengingat struktur zeolit alam yang bervariasi serta besarnya kemungkinan impuritas yang ada, maka sebelum digunakan zeolit alam membutuhkan suatu perlakuan awal yang sering disebut sebagai proses aktivasi. Proses aktivasi ini diperlukan untuk meningkatkan sifat khusus zeolit sebagai adsorben dan menghilangkan unsur pengotor (Rosita, dkk., 2004). Proses aktivasi juga dapat merubah jenis kation, perbandingan Si/Al serta karakteristik zeolit agar sesuai dengan bahan yang akan dijerap.

Zeolit terdapat secara alami di permukaan tanah berupa batuan. Saat ini banyak jenis zeolit alam yang telah ditemukan dan dikelompokkan berdasarkan kesamaan strukturnya. Meskipun zeolit sintetis juga telah banyak diproduksi, namun zeolit alam tetap mempunyai peranan penting karena ketersediaannya yang melimpah di alam, khususnya di Indonesia (Senda dkk., 2006). Berbeda dengan zeolit sintetis yang strukturnya dapat diprediksi dari senyawa penyusunnya, zeolit alam

mempunyai struktur yang tidak selalu sama, tergantung pada kondisi pembentukannya di alam.

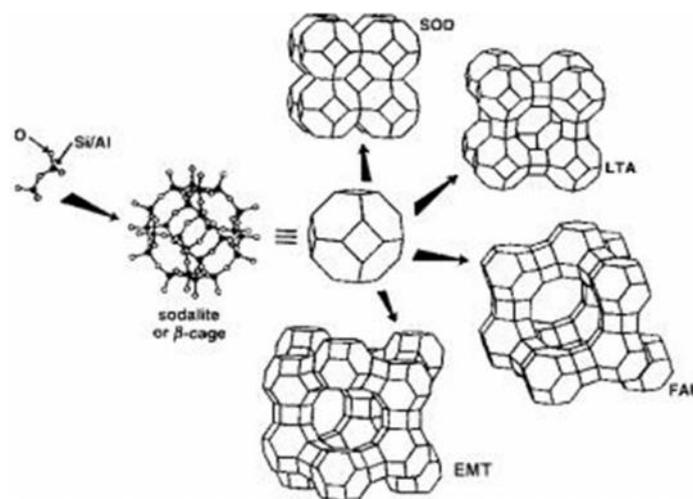
1. Struktur zeolit.

Struktur zeolit terdiri dari dua jenis bangunan, yaitu primer dan sekunder. Unit primer terdiri dari tetrahedron 4 ion oksigen yang mengelilingi ion pusat Si^{4+} atau Al^{3+} . Unit primer ini saling berhubungan membentuk kerangka tiga dimensi dengan satu atom oksigen yang dipakai bersama oleh dua tetrahedra. Untuk struktur yang murni silikous, susunan akan menjadi SiO_2 , yang merupakan padatan tidak bermuatan. Akan tetapi jika terdapat Al dalam susunan kerangka, muatan Al yang +3 akan menyebabkan kerangka bermuatan negatif.

Untuk mempertahankan kerangka dalam kondisi netral, maka dibutuhkan kation pada bagian ekstra *framework*. Kation pada bagian ekstra *framework* ini merupakan kation yang bisa dipertukarkan, sehingga komposisi zeolit dapat dijabarkan terdiri dari tiga komponen, yaitu *framework* (kerangka), ekstra *framework* dan bahan terjerap. Jumlah Al dalam kerangka zeolit dapat bervariasi, dengan perbandingan $\text{Si}/\text{Al} = 1$ sampai tak terhingga. Batas bawah perbandingan Si/Al zeolite menurut Lowenstein sama dengan 1. Hal ini disebabkan batas tetrahedra yang berupa AlO_4^- tidak disukai karena adanya gaya tolak menolak elektrostatik antar muatan-muatan negatif (Payra dan Dutta, 2003).

Unit sekunder struktur zeolit terbentuk dari ikatan-ikatan unit primer, dimana mereka terdiri dari satu atau dua cincin tetrahedral, membentuk struktur tiga dimensi pada zeolit. Unit sekunder ini dapat pula tersusun dengan berbagai cara sehingga akan dihasilkan pula berbagai tipe kerangka zeolit.

Menurut *Atlas of Zeolite Framework Type*, saat ini terdapat kurang lebih 133 struktur kerangka zeolit, baik zeolit alam maupun zeolit sintetis. Struktur ini, oleh *The Structure Commission of The International Zeolite Association* diidentifikasi dengan kode mnemonic yang terdiri dari tiga huruf. Contohnya, untuk kerangka faujasite mempunyai kode FAU, ERI untuk erionit dan MOR untuk mordenite. Contoh kerangka zeolit dapat dilihat pada gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Konstruksi empat kerangka zeolit yang berbeda dari sodalite atau *cage* (Payra dan Dutta, 2003).

2. Zeolit Alam.

Zeolit terdapat secara alami di bumi. Mineral zeolit alam yang pertama ditemukan adalah stilbite. Saat ini ada sekitar 40 zeolit alam yang sudah ditemukan (Butland, 2008). Sebagian besar zeolit alam mempunyai perbandingan Si/Al yang rendah, karena ketiadaan bahan organik yang berfungsi penting untuk pembentukan silika. Zeolit alam mempunyai sifat-sifat yang khusus tergantung pada struktur kristal serta bentuk dan ukuran pori. Diantara sifat-sifat khusus tersebut, yang berkaitan dengan fungsi zeolit sebagai adsorben adalah kapasitas tukar kation

(*cationexchange capacity*) serta kemampuan adsorpsinya. Adapun penjelasan dari sifat-sifat zeolit alam tersebut yaitu :

a. Kapasitas tukar kation (*Cation Exchange Capacity*)

Kapasitas tukar kation adalah jumlah pasangan ion yang tersedia tiap satuan berat atau volume zeolit dan menunjukkan jumlah kation yang tersedia untuk dipertukarkan. Kapasitas ini merupakan fungsi dari derajat substitusi Al terhadap Si dalam struktur kerangka zeolit. Semakin besar derajat substitusi, maka kekurangan muatan positif zeolit semakin besar, sehingga jumlah kation alkali atau alkali tanah yang diperlukan untuk netralisasi juga semakin banyak. Secara umum, kapasitas tukar kation pada zeolit tergantung pada tipe dan volume tempat adsorpsi, serta jenis, jari-jari ion dan muatan kation.

b. Kemampuan adsorpsi.

Struktur bagian dalam zeolit yang membentuk lubang dan sambungan dapat diisi dengan molekul-molekul lain, termasuk molekul air. Molekul yang dapat masuk ke dalam struktur zeolit hanyalah molekul yang memiliki ukuran yang sama atau lebih kecil dari ukuran lubang zeolit, sehingga molekul yang berukuran lebih besar dari ukuran lubang zeolit tidak dapat masuk. Karena hal inilah, maka zeolit sering juga disebut sebagai bahan yang memiliki sifat molekular *sieve*. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kemampuan adsorpsi zeolit. Faktor-faktor itu adalah perbandingan Si/Al zeolit, ukuran dan jumlah pori, tipe tempat adsorpsi serta ukuran dan bentuk lubang pada struktur zeolit. Zeolit mempunyai kapasitas yang tinggi sebagai penjerap (adsorben). Mekanisme adsorpsi yang mungkin terjadi adalah adsorpsi fisika yang melibatkan gaya Van Der Waals dan adsorpsi kimia yang melibatkan gaya elektrostatis serta ikatan

hidrogen dan pembentukan kompleks koordinasi. Molekul atau zat yang dijerap akan menempati posisi pori

3. Sifat dehidrasi zeolit

Zeolit alam mempunyai sifat dehidrasi yaitu melepaskan molekul H₂O apabila dipanaskan. Pada umumnya struktur kerangka zeolit akan menyusut, akan tetapi kerangka dasarnya tidak mengalami perubahan secara nyata. Molekul H₂O dapat dikeluarkan secara reversibel. Pada pori zeolit terdapat kation-kation dan molekul air. Bila kation-kation dan atau molekul air tersebut dikeluarkan dari pori dengan perlakuan tertentu maka zeolit akan meninggalkan pori yang kosong. Secara alami pori-pori zeolit yang belum diolah akan mengandung sejumlah molekul air dan alkali atau alkali tanah hidrat. Proses pemanasan (kalsinasi) pada temperatur 225-400 °C dapat menghilangkan kandungan air dan hidrat pada alkali atau alkali tanah hidrat. Zeolit yang sudah mengalami pemanasan ini disebut zeolit teraktivasi fisik, yang artinya zeolit sudah terdehidrasi atau kandungan air pada pori zeolit telah berkurang (Butland, 2008).

4. Aktivasi Zeolit Alam.

Sebelum digunakan sebagai adsorben, zeolit alam harus diaktifkan terlebih dahulu agar jumlah pori-pori yang terbuka lebih banyak sehingga luas permukaan pori-pori bertambah. Secara umum, ada dua proses aktivasi yang bisa dilakukan terhadap zeolit alam, yaitu aktivasi fisik dan aktivasi kimia. Aktivasi secara fisik dilakukan dengan pemanasan, aktivasi secara kimia dilakukan dengan larutan asam atau secara kimia dengan larutan basa. Proses aktivasi fisik dengan pemanasan dapat dilakukan pada suhu antara 150 - 400 °C selama beberapa jam

menggunkan oven. Sementara aktivasi dengan basa dapat dilakukan dengan larutan NaOH, dimana penurunan rasio Si/Al akan terjadi pada aktivasi dengan pH tinggi (Jozefaciuk dan Bowanko, 2002). Pengaktivasian zeolit alam secara fisik dilakukan dengan pemanasan. Proses pemanasan zeolit alam dilakukan pada suhu 150 - 400 °C dan waktu pemanasan dalam sistem vakum 1-3 jam, sedangkan jika diruang terbuka sekitar 5-6 jam (Suyartono dan Husaini,1992). Pemanasan ini bertujuan untuk menguapkan kandungan air yang terperangkap dalam pori-pori kristal zeolit sehingga jumlah pori dan luas permukaan spesifiknya bertambah. Proses pemanasan aktivasi fisik zeolit merupakan kalsinasi yang harus terkontrol, artinya temperatur dan waktu aktivasi harus benar-benar terjaga. Pemanasan yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan pada struktur zeolit.

G. *Fly ash*

Abu terbang atau *fly ash* merupakan limbah padat hasil dari proses pembakaran yang terjadi di dalam *furnace* atau ruang bakar pada PLTU yang kemudian terbawa keluar oleh sisa-sisa pembakaran serta ditangkap dengan menggunakan elektrostatis *precipitator*. *Fly ash* merupakan residu mineral dalam butir halus yang dihasilkan dari pembakaran batu bara yang dihaluskan pada suatu pusat pembangkit listrik. *Fly ash* terdiri dari bahan inorganik yang terdapat di dalam batu bara yang telah mengalami reaksi fusi selama proses pembakarana. Bahan ini memadat selama berada di dalam gas-gas buangan dan dikumpulkan menggunakan presipitator elektrostatis. Karena partikel-partikel ini memadat selama tersuspensi di dalam gas-gas buangan, partikel-partikel *fly ash* umumnya berbentuk bulat. Partikel-partikel *fly ash* yang terkumpul pada presipitator

elektrostatik biasanya berukuran silt (0.074 – 0.005 mm). Bahan ini terutama terdiri dari silikon dioksida (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3) dan besi oksida (Fe_2O_3).

Menurut laporan teknik P.T. PLN (Persero) (1997), di Indonesia produksi limbah abu terbang dan abu dasar dari PLTU diperkirakan akan mencapai 2 juta ton pada tahun 2006, dan meningkat menjadi hampir 3,3 juta ton pada tahun 2009. Khusus untuk PLTU Suralaya, sejak tahun 2000 hingga 2006 diperkirakan ada akumulasi jumlah abu sebanyak 219.000 ton per tahun. Produksi abu terbang batubara (*fly ash*) didunia pada tahun 2000 diperkirakan berjumlah 349 milyar ton. Produksi abu terbang dari pembangkit listrik di Indonesia ini terus meningkat, pada tahun 2000 yang jumlahnya mencapai 1,66 milyar ton dan diperkirakan mencapai 2 milyar ton pada tahun 2006. Jika limbah abu ini tidak ditangani akan menimbulkan masalah pencemaran lingkungan. Faktor-faktor utama yang mempengaruhi dalam kandungan mineral *fly ash* (abu terbang) dari batu bara adalah :

1. Komposisi kimia batu bara.
2. Proses pembakaran batu bara.
3. Bahan tambahan yang digunakan termasuk bahan tambahan minyak untuk stabilisasi nyala api dan bahan tambahan untuk pengendalian korosi.

Senyawa-senyawa penyusun abu terbang sebenarnya sangat ditentukan oleh mineral-mineral pengotor bawaan yang terdapat pada batu bara itu sendiri yang disebut dengan *inherent mineral matter*. Mineral pengotor yang terdapat dalam batu bara dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu :

1. *Syngenetic* atau disebut dengan mineral *matter*, pada dasarnya mineral-mineral ini terendapkan di tempat tersebut bersamaan dengan saat proses pembentukan gambut (*peat*).
2. *Epigenetica* juga disebut dengan *extraneous* mineral *matter*, pada prinsipnya mineral-mineral pengotor ini terakumulasi pada cekungan setelah proses pembentukan lapisan gambut (*peat*) tersebut selesai.

Dari sejumlah abu yang dihasilkan dalam proses pembakaran batubara, maka sebanyak 55% - 85 % berupa abu terbang (*fly ash*) dan sisanya berupa abu dasar (*Bottom Ash*). Sedangkan dari PLTU Suralaya dari sejumlah abu yang dihasilkan hampir 90 % berupa abu terbang (*fly ash*). Kedua jenis abu ini memiliki perbedaan karakteristik serta pemanfaatannya. Biasanya untuk *fly ash* banyak dimanfaatkan dalam perusahaan industri karena abu terbang ini mempunyai sifat pozolanik, sedangkan untuk abu dasar sangat sedikit pemanfaatannya dan biasanya digunakan sebagai material pengisi (Aziz1, 2006). Adapun gambar *fly ash* batubara yang dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. *Fly ash* batu bara. (image : www.brick-machine.net/what-kind-of-fly-ash-is-suitable-for-making-aac-block.html).

1. Proses Pembentukan *Fly Ash* (Abu Terbang).

Pembakaran batubara umumnya terbagi atas dua sistem yaitu sistem unggun terfluidakan (*fluidized bed system*) dan unggun tetap (*fixed bed system* atau *grate system*). Selain itu terdapat system ke-3 yaitu *spouted bed system* atau yang dikenal dengan unggun pancar. *Fluidized bed system* adalah sistem dimana udara ditiup dari bawah menggunakan *blower* sehingga benda padat di atasnya berkarakteristik seperti fluida. Teknik fluidisasi dalam pembakaran batubara adalah teknik yang paling efisien dalam menghasilkan energi. Pasir atau *corundum* yang berlaku sebagai medium pemanas dipanaskan terlebih dahulu. Pemanasan biasanya dilakukan dengan minyak bakar. Setelah temperatur pasir mencapai temperatur bakar batubara (300°C) maka diumpunkanlah batubara ke dalam ruang bakar tersebut. Sistem ini menghasilkan abu terbang dan abu yang turun di bawah alat (*bottom ash*). Abu-abu tersebut disebut dengan *fly ash* dan *bottom ash*.

Teknologi *fluidized bed* biasanya digunakan di PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap). Komposisi *fly ash* dan *bottom ash* yang terbentuk dalam perbandingan berat adalah : (80-90%) berbanding (10-20%). *Fixed bed system* atau *Grate system* adalah teknik pembakaran dimana batubara berada di atas *conveyor* yang berjalan atau *grate*. Sistem ini kurang efisien karena batubara yang terbakar kurang sempurna, dengan kata lain masih ada karbon yang tersisa. *Ash* atau abu yang terbentuk terutama *bottom ash* masih memiliki kandungan kalori sekitar 3000 kkal/kg. Di negara China, *bottom ash* digunakan sebagai bahan bakar untuk kerajinan besi (pandai besi). Teknologi *Fixed bed system* banyak digunakan pada industri tekstil sebagai pembangkit uap (*steam generator*). Komposisi *fly ash* dan

bottom ash yang terbentuk dalam perbandingan berat adalah (15-25%) berbanding (75-25%).

2. Sifat-sifat *fly ash*.

Fly ash batubara mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3) dan kalsium oksida (CaO), juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O dan K_2O), sulfur trioksida (SO_3), dan karbon.

Adapun rumus empiris abu terbang batubara yaitu sebagai berikut :



Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi sifat fisik, kimia dan teknis dari *fly ash* adalah tipe batubara, kemurnian batubara, tingkat penghancuran, tipe pemanasan dan operasi dan metode penyimpanan dan penimbunan. Secara fisik, *fly ash* dari PLTU merupakan partikel yang sangat halus berbentuk serbuk dengan komposisi terbesar silika dan bentuknya hampir bulat serta berwarna putih kecoklatan dengan densitas curah 800 kg/m³. Ukuran *fly ash* dari PLTU paling kecil adalah 11 – 25 μm dan yang kasar bervariasi antara 40 – 150 μm . Karakteristik *bottom ash* biasanya berwarna hitam abu-abu, mempunyai struktur permukaan *porous*, dengan bentuk tak beraturan (Soeswanto, 2011).

Fly ash memiliki pori-pori yang besar dari beberapa partikel dimana dapat menyerap air dan menghasilkan konsumsi air yang banyak pada beton. Disamping itu, *fly ash* dapat menyerap air yang digunakan dalam pencampuran beton, menciptakan campuran halus yang mengering dengan kekuatan lebih besar dari

beton normal. Dalam penelitian lainnya, *fly ash* dapat menyerap air dan beberapa unsur hara sehingga dapat meningkatkan kualitas dengan baik. Adapun komposisi kimia *fly ash* dan klasifikasinya seperti dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Komposisi dan Klasifikasi *Fly Ash*.

Komponen (%)	<i>Bituminous</i>	<i>Sub-bituminous</i>	<i>Lignite</i>
SiO ₂	20 - 60	40 - 60	15 - 45
Al ₂ O ₃	5 - 35	20 - 30	20 - 25
Fe ₂ O ₃	10 - 40	4 - 10	4 - 15
CaO	1 - 12	5 - 30	15 - 40
MgO	0 - 5	1 - 6	3 - 10
SO ₃	0 - 4	0 - 2	0 - 10
Na ₂ O	0 - 4	0 - 2	0 - 6
K ₂ O	0 - 3	0 - 4	0 - 4
<i>Loss on ignition</i>	0 - 15	0 - 3	0 - 5

Secara kimia abu terbang merupakan material oksida anorganik mengandung silika dan alumina aktif karena sudah melalui proses pembakaran pada suhu tinggi. Bersifat aktif yaitu dapat bereaksi dengan komponen lain dalam komposisinya untuk membentuk material baru (*mulite*) yang tahan suhu tinggi. Kandungan karbon dalam abu terbang diukur dengan menggunakan *Loss Of Ignition Method* (LOI), yaitu suatu keadaan hilangnya potensi nyala dari abu terbang batubara. Abu terbang batubara terdiri dari butiran halus yang umumnya berbentuk bola padat atau berongga. Ukuran partikel abu terbang hasil pembakaran batubara bituminous lebih kecil dari 0,075 mm. Kerapatan abu terbang berkisar antara 2100 sampai 3000 kg/m³ dan luas area spesifiknya (diukur

berdasarkan metode permeabilitas udara *Blaine*) antara 170 sampai 1000 m²/kg, sedangkan ukuran partikel rata-rata abu terbang batubara jenis sub-bituminous 0,01 mm – 0,015 mm, luas permukaannya 1-2 m²/g, massa jenis (*specific gravity*) 2,2 – 2,4 dan bentuk partikel *mostly spherical*, yaitu sebagian besar berbentuk seperti bola, sehingga menghasilkan kinerja (*work ability*) yang lebih baik (Antoni, 2007 dalam Efendri).

3. Pemanfaatan *Fly Ash* (Abu Terbang).

Berbagai penelitian mengenai pemanfaatan abu terbang batubara sedang dilakukan untuk meningkatkan nilai ekonomisnya serta mengurangi dampak buruknya terhadap lingkungan. Saat ini umumnya abu terbang batubara digunakan dalam pabrik semen sebagai salah satu bahan campuran pembuat beton selain itu, sebenarnya abu terbang batubara memiliki berbagai kegunaan yang amat beragam diantaranya adalah sebagai berikut :

- a. penyusun beton untuk jalan dan bendungan.
- b. penimbun lahan bekas pertambangan.
- c. *recovery* magnetik, *cenosphere* dan karbon.
- d. bahan baku keramik, gelas, batubata, dan refraktori.
- e. bahan penggosok (*polisher*).
- f. filler aspal, plastik, dan kertas.
- g. pengganti dan bahan baku semen.
- h. aditif dalam pengolahan limbah (*waste stabilization*).
- i. konversi menjadi zeolit dan *adsorbent*.

4. Aktivasi *Fly Ash* (Abu Terbang).

Proses aktivasi *fly ash* dapat dilakukan dengan dua cara yaitu sebagai berikut :

a. Aktivasi fisik.

Aktivasi fisik yaitu proses pemanasan *fly ash* yang dilakukan secara kontak langsung (dengan udara panas) maupun secara kontak tidak langsung (sistem vakum atau *exhauster*). Pengaktivasian *fly ash* secara fisik dilakukan dengan pemanasan. Aktivasi fisik dengan pemanasan *oven* mulai dari temperatur 150°C sampai 400°C selama 1 jam atau lebih. Pemanasan ini bertujuan untuk menguapkan air yang terperangkap dalam pori pelet *fly ash* (Mario, 2014).

b. Aktivasi kimia.

Aktivasi kimia adalah pengaktivasian dengan menggunakan bahan-bahan kimia, baik berupa asam ataupun basa. Fungsi asam atau basa adalah untuk mencuci kation-kation yang mengotori permukaan *fly ash*.

5. Adsorpsi *fly ash*

Fly ash batubara memiliki kemampuan dapat menyerap air (H₂O) dan beberapa unsur hara sehingga dapat meningkatkan kualitas adsorpsi dengan baik. Selain itu *fly ash* batubara juga dapat digunakan sebagai adsorben berbagai macam zat-zat polutan seperti SO_x, CO, dan partikulat debu termasuk timbal (Pb) (geology.com.cn, dalam Rilham, 2012). Dalam penelitian ini, *fly ash* diaktivasi secara fisik dengan pemanasan pada suhu 225° C. *Fly ash* batu bara ini akan dicampur dengan zeolit pada komposisi tertentu untuk dijadikan pelet *tablet* sebagai *filter zeolit-fly ash* teraktivasi fisik pada motor diesel 4-langkah di Laboratorium Motor Bakar Teknik Mesin Universitas Lampung.

6. Campuran zeolit-*fly ash*

Campuran zeolit dan *fly ash* pada penelitian ini diharapkan dapat mengoptimalkan proses pembakaran menjadi lebih sempurna. *Fly ash* berperan sebagai penyerap air atau H_2O , dimana air berkurang karena sifat *fly ash* menyerap air sehingga panas yang diambil O_2 lebih banyak yang mengakibatkan gas CO, HC maupun NO yang keluar dari knalpot gas buang mesin diesel semakin kecil. Gas CO merupakan karbon monoksida beracun yang dapat merusak pernapasan manusia, sedangkan HC adalah hidrokarbon yang tidak diinginkan pada keluaran gas buang karena dapat meningkatkan kepekatan kabut asap pada gas buang. Disisi lain, zeolit berperan sebagai adsorben N_2 dimana nitrogen adalah salah satu unsur yang dapat menyebabkan proses pembakaran tidak sempurna dan menghasilkan NO atau nitrogen oksida pada gas buang kendaraan. Gas-gas seperti HC, CO dan NO inilah beberapa faktor yang menyebabkan meningkatnya kepekatan asap gas buang mesin diesel 4-langkah akibat pembakaran yang tidak sempurna. Penelitian ini menggunakan campuran zeolit dan *fly ash* yang bertujuan untuk menyerap N_2 dan H_2O pada udara pembakaran agar proses pembakaran lebih sempurna dan dapat meningkatkan prestasi mesin diesel 4-langkah (Wardono, H. 2004).

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Alat dan Bahan Penelitian

1. Alat Penelitian

- a. Motor Diesel 4 langkah 1 silinder.

Dalam penelitian ini mesin yang digunakan untuk pengujian adalah motor diesel 4-langkah 1 silinder di Laboratorium Motor Bakar Universitas Lampung dengan spesifikasi mesin sebagai berikut :

Tipe mesin	: ROBIN – FUJI DY23D
Jenis	: Motor Diesel, 1 silinder
Posisi katup	: Di atas
<i>Valve rocker clearance</i>	: 0,10 mm (Dingin)
Volume langkah torak	: 230 cm ³
Diameter silinder	: 70 mm
Langkah piston	: 60 mm
Perbandingan kompresi	: 21
Daya engkol maksimum	: 3,5 kW pada 3600 revs/min
Torsi maksimum	: 10,5 Nm pada 2200 revs/min
Putaran maksimum	: 3600 revs/min
Waktu injeksi bahan bakar	: 23° BTDC
Berat	: 26 kg



Gambar 8. Robin-Fuji DY23D

b. Instrumen pengujian

Instrumen pengujian pada penelitian ini adalah sebuah dinamometer hidraulik yang digunakan untuk mengukur torsi dan unit instrumentasi TD 114 yang merupakan panel hasil pengukuran putaran mesin, torsi, temperatur gas buang, laju pemakaian bahan bakar dan laju pemakaian udara bahan pembakaran.



Gambar 9. Unit instrumentasi TD 114.

c. *Tachometer Digital*

Tachometer yang digunakan dalam penelitian ini digunakan untuk mengetahui putaran mesin dalam rpm (*rotation per minutes*).



Gambar 10. *Tachometer Digital*.

d. *Stopwatch*

Stopwatch digunakan untuk mengukur waktu pada saat pengujian



Gambar 11. *Stopwatch*.

e. Tumbukan

Tumbukan ini digunakan untuk menumbuk butiran zeolit yang masih kasar sehingga menjadi butiran yang lebih halus dan siap untuk perlakuan proses berikutnya yaitu diayak menggunakan ayakan.



Gambar 12. Penumbuk butiran batu zeolit.

f. Termometer air raksa

Termometer air raksa ini digunakan untuk mengetahui temperatur ruangan saat pengujian.



Gambar 13. Termometer Air Raksa.

g. Cetakan

Cetakan digunakan sebagai alat untuk mencetak hasil campuran zeolit dan *fly ash* serta aquades dan tapioka yang sebelumnya diaduk dan dibuat adonan kemudian dihaluskan permukaannya dengan ampia dengan diameter 1 cm (10 mm).



Gambar 14. Cetakan pelet zeolit-*fly ash*.

h. Oven

Oven pada penelitian ini digunakan untuk mengeringkan pelet zeolit-*fly ash* yang bertujuan untuk mengaktivasi fisik pada pelet tersebut.



Gambar 15. Oven.

i. Timbangan digital

Timbangan digital digunakan untuk mengukur berat zeolit dan *fly ash* sebelum dicampur dalam pembuatan pelet dan menimbang perekat serta air untuk campuran adonan pelet zeolit-*fly ash*.



Gambar 16. Timbangan Digital.

j. Kompor listrik

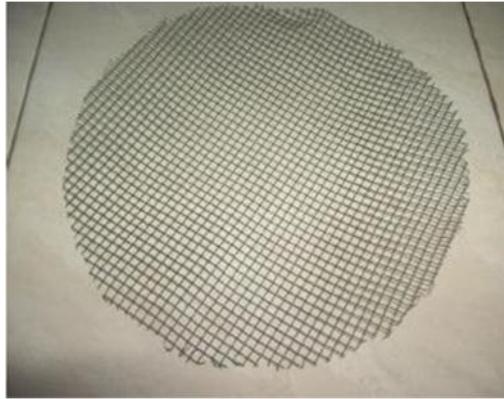
Digunakan untuk memasak atau memanaskan campuran tepung tapioka dan aquades.



Gambar 17. Kompor Listrik.

k. Kawat strimin.

Kawat strimin ini digunakan sebagai tempat meletakkan pelet yang akan digunakan sebagai penyaring udara (filter) pada mesin diesel. Berikut adalah gambar bentuk kawat strimin yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 18. Kawat strimin sebagai kemasan pelet zeolit-*Fly ash*.

l. Ayakan 100 Mesh

Ayakan digunakan untuk menyaring *fly ash* menjadi lebih halus dengan ukuran 100 mesh.



Gambar 19. Ayakan *Mesh* 100.

m. Ampia

Ampia digunakan untuk memperhalus permukaan dan memadatkan campuran zeolit-fly ash yang telah kalis dengan menggunakan ukuran tebal sekitar 3 mm.



Gambar 20. Ampia.

2. Bahan penelitian

a. Zeolit alam.

Zeolit alam yang digunakan untuk pengujian dalam penelitian ini adalah jenis klipnoptilolit, dengan komposisi kimia 64,37 % SiO_2 , 10,93 % Al_2O_3 , 1,29 % Fe_2O_3 , 0,16 % TiO_2 , 18,61 % L.O.I, 1,31 % CaO , 0,68 % MgO , 1,54 % K_2O , 0,75 % Na_2O (sumber: CV. MINA TAMA).



Gambar 21. Zeolit *clinoptilolite* CV. Minatama.

b. Fly ash.

Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari PLTU Tarahan yang mengandung komposisi kimia SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO dan Fe_2O_3 .

c. Air mineral.

Air mineral dalam pengujian ini dipakai untuk mencampur zeolit dan *fly ash* agar mudah dibentuk menjadi pelet.

d. Tepung Tapioka.

Tepung tapioka yang digunakan adalah tepung tapioka yang dijual di pasaran Bandar Lampung yang berfungsi sebagai bahan perekat.

B. Persiapan Penelitian

Adapun persiapan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Pengayakan zeolit dan *fly ash*.

Pertama-tama zeolit yang telah ditumbuk diayak dengan ayakan ukuran 100 mesh pada gambar 18 yang bertujuan untuk menyaring partikel yang lebih besar agar tidak tercampur dengan yang lebih kecil, karena semakin kecil ukuran partikel zeolit maka akan semakin kuat daya rekatnya (Rilham, 2012). Perlakuan yang hampir sama dilakukan pada *fly ash* namun tidak ditumbuk. Pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pelet campuran zeolit-*fly ash* dengan komposisi campuran. Berikut adalah gambar zeolit dan *fly ash* yang telah diayak.



Gambar 22. Zeolit (putih) dan *fly ash* (coklat) yang telah diayak.

2. Pembuatan pelet zeolit-*fly ash*.

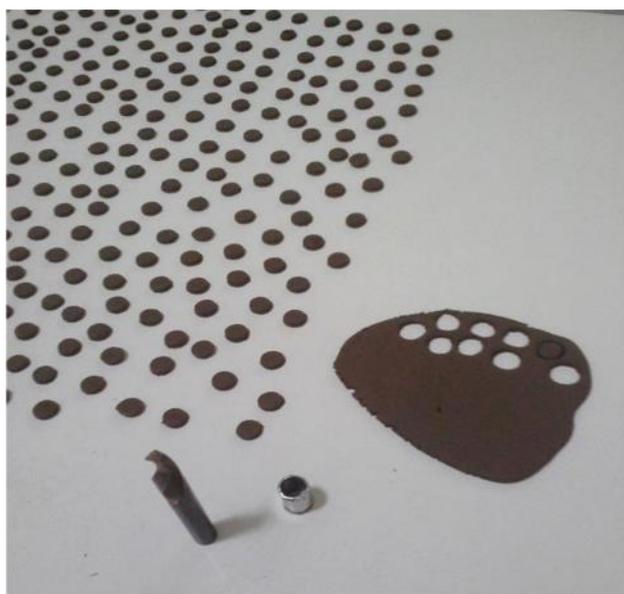
Pembuatan pelet zeolit-*fly ash* pada penelitian ini terdapat 5 jenis variasi komposisi yaitu Z0F100, Z25F75, Z50F50, Z75F25, dan Z100F0. Adapun prosedur pembuatan pelet Zeolit 50 % dan *fly ash* 50% (Z50F50), misalkan jika total berat air, perekat dan katalis adalah 200 gram, pertama-tama zeolit dan *fly ash* yang telah diayak ditimbang dengan timbangan digital masing-masing 52 gram zeolit dan 52 gram *fly ash*, kemudian tuangkan pada wadah lalu campurkan zeolit dan *fly ash* hingga merata sehingga total beratnya adalah 104 gram. Kemudian masak air aquadest dan tepung tapioka menggunakan kompor listrik kurang lebih 7 menit sampai menjadi seperti lem (perekat). Perbandingan komposisi air aquadest adalah 88 gram dan tepung tapioka 8 gram. Kemudian pindahkan campuran aquadest dan tapioka yang telah berbentuk seperti lem (perekat) tersebut ke wadah yang berisi campuran 104 gram zeolit dan *fly ash*, aduk hingga menjadi adonan yang merata dan kalis. Adapun gambar adonan pelet yang telah tercampur dan kalis dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 23. Campuran zeolit-*fly ash* yang telah kalis.

Dari campuran zeolit-*fly ash* seperti gambar 23 di atas, proses selanjutnya adalah proses pencetakan yaitu dengan memipihkan campuran tersebut menggunakan ampia hingga mendapatkan permukaan yang sama rata, sehingga dapat dicetak menggunakan cetakan berdiameter 10 mm dan tebal kira-kira 3 mm.

Proses pencetakan dilakukan secara manual dengan ukuran yang sama, oleh karena itu tekanan yang diberikan diabaikan. Hasil cetakan campuran zeolit-*fly ash* yang telah berbentuk pelet tersebut didiamkan pada temperatur ruangan (alami) selama sehari. Adapun gambar adonan yang baru dicetak menjadi pelet berbentuk tablet yang dapat dilihat pada gambar 24 berikut.



Gambar 24. Pelet zeolit-*fly ash* yang baru dicetak.

Selanjutnya adalah proses pembuatan pelet zeolit-*fly ash* dengan variasi komposisi yang lain, yaitu Z0F100, Z25F75, Z75F25 dan Z100F0 dengan cara yang hampir sama hanya saja komposisi katalis yang berbeda. Katalis disini merupakan zeolit dan *fly ash*. Untuk ketentuan variasi komposisi lebih jelasnya dapat dijelaskan pada tabel 2.

Prosedur pembuatan pelet yang telah dijelaskan di atas merupakan pembuatan pelet Z50%F50%, sehingga untuk pembuatan komposisi yang lain dapat dijelaskan pada tabel 2 berikut ini :

Tabel 2. Komposisi campuran zeolit dan *fly ash* jika berat total 200 gram.

Komposisi	Air	Perekat	Zeolite	Fly ash
Z0%F100%	88 gram	8 gram	0 gram	104 gram
Z25%F75%	88 gram	8 gram	26 gram	78 gram
Z50%F50%	88 gram	8 gram	52 gram	52 gram
Z75%F25%	88 gram	8 gram	78 gram	26 gram
Z100%F0%	88 gram	8 gram	104 gram	0 gram

Catatan : Z = Zeolit, F = *Fly ash*.

3. Aktivasi fisik pelet zeolit-*fly ash*.

Proses selanjutnya adalah melakukan aktivasi secara fisik pada pelet yang telah didiamkan selama sehari tersebut dengan menggunakan *oven* mulai pada temperatur 150° sampai 225° C selama 1 jam. Pemanasan ini bertujuan untuk menguapkan kandungan air yang terperangkap pada pori pelet tersebut. Adapun langkah dari proses pemanasan (aktivasi) pelet zeolit-*fly ash* yaitu pertama-tama panaskan oven dari temperatur ruangan sekitar 28° C sampai 110° C selama 10 menit. Saat temperatur sudah tercapai pada suhu yang diinginkan, selanjutnya tempatkan pelet pada wadah *oven* berbahan aluminium secara merata dan masukkan kedalam oven selama 1 jam pada variasi suhu tertentu. Setelah proses tersebut selesai, buka *oven* dan keluarkan pelet zeolit-*fly ash* kemudian letakkan pada temperatur ruangan selama beberapa saat (pendinginan secara alami). Kemudian pelet yang telah dingin tersebut dimasukkan ke dalam plastik kedap

udara agar tidak terkontaminasi udara luar. Proses aktivasi pemanasan tersebut juga dilakukan pada pemanasan dengan variasi suhu 150°C, 175°C, 200 °C dan 225 °C dengan cara yang sama selama 1 jam. Adapun gambar pelet zeolit-*fly ash* yang telah diaktivasi (perlakuan panas oven) yang dapat dilihat pada gambar 25.



Gambar 25. Pelet zeolit-*fly ash* yang dikemas dalam plastik kedap udara.

Setelah aktivasi fisik selesai, maka selanjutnya adalah membuat filter saringan udara dari kawat strimin yang berisi pelet-pelet tersebut dengan cara menimbang pelet zeolit-*fly ash* dengan menggunakan timbangan digital, kemudian letakkan kedalam kawat strimin untuk dibentuk sesuai dengan bentuk filter yang digunakan pada alat uji. Adapun variasi massa yang digunakan yaitu 50 gram, 75 gram, dan 100 gram. Selanjutnya, saringan udara berisi pelet zeolit-*fly ash* tersebut siap digunakan untuk proses pengujian pada motor diesel 4-langkah. Adapun bentuk saringan udara *filter zeolit-fly ash* yang siap digunakan untuk pengujian pada mesin diesel 4-langkah yang dapat dilihat pada gambar 26.



Gambar 26. *Filter zeolit-fly ash.*

4. Persiapan pengujian

Pengujian menggunakan filter zeolit-*fly ash* yang telah dimodifikasi sesuai dengan bentuk filter, pada filter kali ini berbentuk lingkaran. Penelitian ini menggunakan jenis aktivasi fisik (pemanasan) dengan 3 variasi massa pelet (100 gram, 75 gram, 50 gram). Berikut adalah persiapan dari penelitian ini yaitu :

- a. Mengukur bentuk dimensi *filter* menggunakan kawat strimin yang berisi pelet zeolit-*fly ash* dengan variasi massa pelet 100 gram, 75 gram, dan 50 gram.
- b. Memotong kawat strimin sesuai ukuran yang diperlukan. Fungsi dari kawat strimin yaitu sebagai rangka atau *frame* untuk wadah pelet zeolit-*fly ash*. Filter ini ditempatkan pada saringan udara motor diesel 4 langkah TD 114.
- c. Menata pelet zeolit-*fly ash* pada potongan kawat strimin yang berbentuk lingkaran secara teratur dan tidak menumpuk.
- d. Memastikan pelet di dalam kawat strimin tidak berantakan dengan cara merekatkan kawat strimin dengan rapi, hal ini bertujuan agar pelet tidak berantakan karena getaran mesin pada saat pengujian.

C. Prosedur Pengujian

Adapun prosedur pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Pengkalibrasian Torsimeter TD 114

Sebelum melakukan uji mesin, torsimeter harus pada posisi nol dan dikalibrasi terlebih dahulu. Adapun langkah-langkahnya yaitu sebagai berikut :

- a. Menghubungkan Unit Instrumentasi TD 114 dengan arus listrik, dan hidupkan Unit Instrumentasi TD 114.
- b. Memutar *span control* hingga posisi maksimum (searah jarum jam).
- c. Mengguncangkan dinamometer untuk mengatasi kekakuan *seal* bantalannya. Vibrasi terjadi secara otomatis bila mesin berputar.
- d. Memutar *zero control* hingga torsimeter terbaca nol.
- e. Mengguncangkan dinamometer lagi untuk memeriksa keakuratan posisi nol tersebut.
- f. Menggantungkan beban sebesar 3,5 kg pada lengan dinamometer tersebut.
- g. Memutar *span control* hingga torsimeter TD 114 menunjukkan *display* 8,6 Nm.
- h. Mengguncangkan dinamometer lagi hingga pembacaan torsimeter stabil.
- i. Menyingkirkan beban 3,5 kg tadi dan ulangi langkah 4 hingga langkah 8 sebanyak 3 kali agar penyetelan *zero* dan *span control* benar-benar akurat.

2. Pengambilan data

Setelah torsimeter TD 114 terkalibrasi dengan baik, selanjutnya mesin dihidupkan selama kurang lebih 10 menit untuk proses pemanasan mesin sampai keadaan stabil. Pengambilan data dimulai dengan meletakkan beban pada dinamometer, beban yang digunakan adalah sebesar 2,5 kg. Adapun variasi putaran mesin yang digunakan yaitu 1500 rpm, 2000 rpm, dan 2500 rpm. Zeolit-*fly ash* teraktivasi yang digunakan dalam pengujian ini adalah aktivasi fisik dengan suhu sebesar 225°C dengan variasi massa 50 gram, 75 gram, dan 100 gram dan variasi komposisi pelet campuran zeolit-*fly ash* Z0F100; Z25F75; Z50F50; Z75F25; dan Z100F0.

Proses pengambilan data dilakukan sebanyak dua tahap dalam putaran yang sama, tahap pertama adalah pengambilan data tanpa menggunakan zeolit-*fly ash*, tahap kedua adalah pengambilan data menggunakan zeolit-*fly ash* aktivasi suhu 100 °C (alami) dan pengambilan data menggunakan zeolit-*fly ash* yang diaktivasi secara fisik dimana zeolit-*fly ash* dipanaskan dengan oven pada suhu 225°C. Dalam pengujian ini dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali. Dalam hal ini filter atau saringan udara zeolit-*fly ash* diletakkan di saluran udara masuk sehingga udara yang masuk ke ruang bakar melewati filter zeolit-*fly ash* pelet dan mengalami proses adsorpsi yang dilakukan oleh zeolit-*fly ash*. Setelah torsi stabil, selanjutnya mencatat data-data yang ditunjukkan pada instrumentasi TD 114 dan pengambilan data dilakukan untuk setiap putaran mesin yang diberikan.

Adapun pengambilan data yang dilakukan yaitu pertama pada pengambilan data zeolit-*fly ash* pelet pada putaran 1500 rpm. Proses pengambilan data dapat

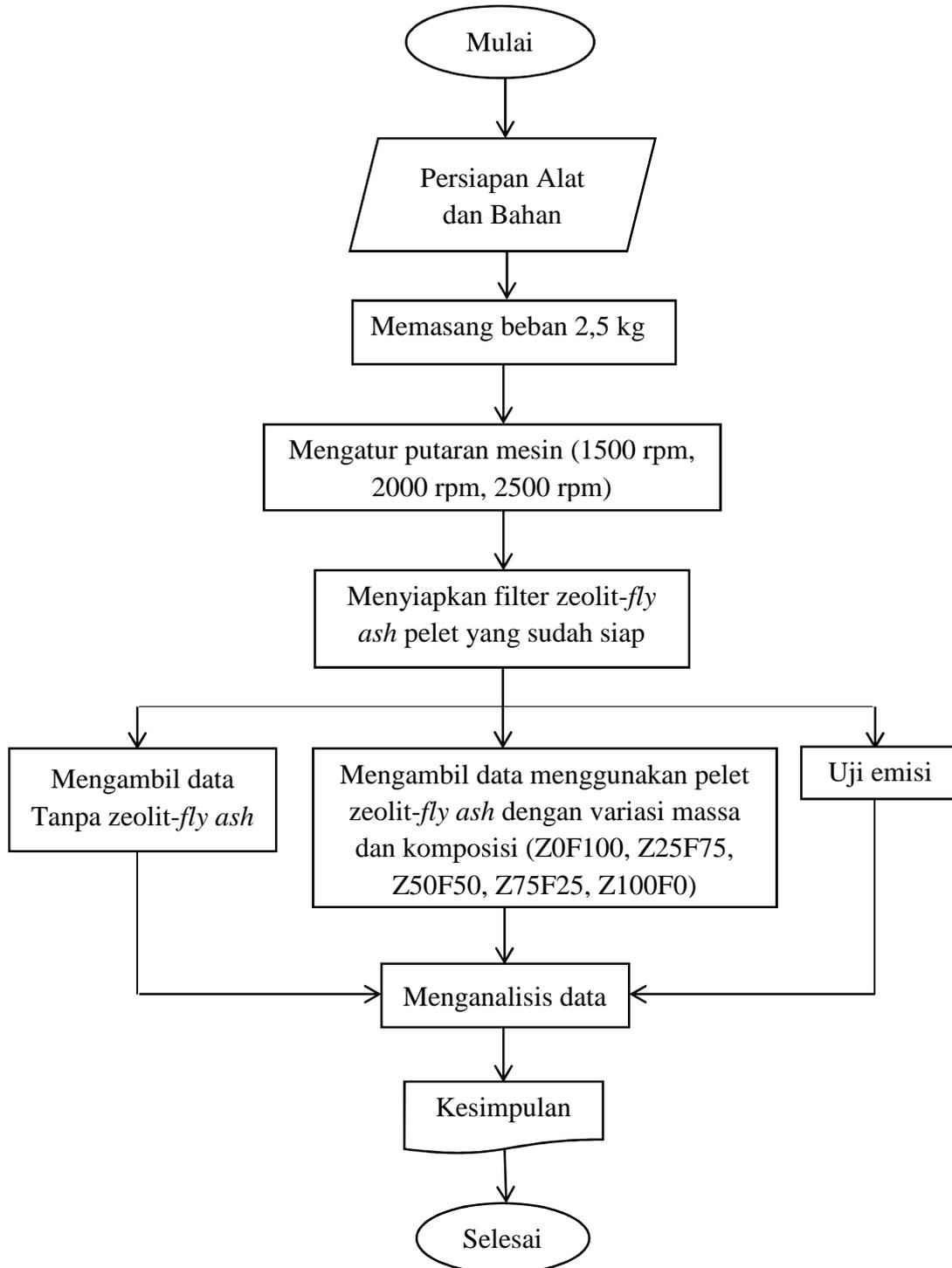
dijelaskan seperti berikut ini, setelah mesin dihidupkan selama kurang lebih 10 menit, beban digantungkan pada dinamometer seberat 2,5 kg kemudian tunggu hingga putaran dan torsi stabil. Pertama, data yang diambil adalah data pengujian tanpa menggunakan zeolit-*fly ash*, dan kedua adalah pengambilan data zeolit-*fly ash* teraktivasi fisik dengan suhu 225°C dengan massa pelet 50 gram, 75 gram, dan 100 gram yang diulang secara berbalik.

Data yang pertama kali dicatat adalah data variabel operasi mesin tanpa zeolit-*fly ash*, kemudian dilanjutkan pada data yang menggunakan zeolit-*fly ash* aktivasi secara fisik massa 50 gram, 75 gram, dan 100 gram. Tahap selanjutnya adalah mencatat data yang menggunakan zeolit-*fly ash* teraktivasi fisik dengan variasi suhu 225°C dengan massa 50 gram, 75 gram, dan 100 gram. Dilakukan juga hal yang sama pada komposisi lain dengan massa yang sama dan pengulangan yang sama pada putaran mesin tersebut. Tahap selanjutnya adalah melanjutkan pengambilan data pada putaran mesin 2000 rpm, 2500 rpm, dengan prosedur yang sama seperti pada putaran 1500 rpm.

Setelah data-data dengan variasi-variasi tersebut telah diperoleh semua, selanjutnya ambil satu massa yang terbaik untuk pengujian emisi tingkat lanjut yaitu dengan massa 100 gram dengan aktivasi suhu 225 °C untuk meningkatkan salah satu prestasi mesin motor diesel 4-langkah yang, maka selanjutnya melakukan pengujian dengan variasi massa 100 gram mulai dari Z0F100; Z25F75; Z50F50; Z75F25; dan Z100F0. Hal ini dilakukan dengan menggunakan mesin uji emisi StarGas 898 dengan menggunakan aksesoris *smokemeter* yang ada di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Lampung.

E. Diagram Alir Pengambilan Data dan Analisis Data

Prosedur pengambilan data dan analisis dapat dijelaskan menggunakan diagram alir yang ditunjukkan pada diagram gambar 27 berikut :



Gambar 27. Diagram alir persiapan dan pengujian pelet campuran zeolit-fly ash.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh setelah melakukan pengujian, pengambilan data, dan melakukan perhitungan dari data yang diperoleh berdasarkan prosedur pengujian yang telah dibuat, serta menggambarannya dalam bentuk grafik dan menganalisa grafik tersebut, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan daya engkol rata-rata terbaik pada penggunaan filter pelet zeolit-*fly ash* yang diaktivasi fisik pada suhu 225°C terjadi pada penggunaan pelet komposisi Z50F50 (zeolit 50% dan *fly ash* 50%) dengan variasi massa 100 gram, yaitu terjadi kenaikan daya engkol rata-rata sebesar 2,825 %, diikuti oleh komposisi Z25F75 (zeolit 25% dan *fly ash* 75%) massa 100 gram dengan kenaikan daya engkol rata-rata sebesar 2,573 %.
2. Penurunan konsumsi bahan bakar spesifik engkol terbaik terjadi pada penggunaan filter pelet zeolit-*fly ash* aktivasi fisik komposisi Z25F75 dengan variasi massa 100 gram, yaitu terjadi penurunan konsumsi bahan bakar spesifik engkol (*bsfc*) sebesar 7,805 % diikuti dengan penggunaan pelet zeolit-*fly ash* komposisi Z75F25 pada variasi massa 100 gram yaitu sebesar 5,587 %.
3. Hasil uji emisi terbaik menggunakan filter pelet zeolit-*fly ash* terjadi pada penggunaan pelet zeolit-*fly ash* aktivasi fisik komposisi Z25F75 dengan variasi massa 100 gram, yaitu terjadi penurunan kepekatan asap emisi gas

buang dari 87,35 % menjadi 38,65 % atau 386.500 ppm (*part per million*) dan diikuti oleh pelet zeolit-*fly ash* (Z25F75) aktivasi fisik alami dengan opasitas sebesar 40,4 % atau 404.000 ppm.

B. Saran

Adapun beberapa saran yang ingin penulis sampaikan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Untuk dapat memaksimalkan kemampuan adsorpsi dari pelet zeolit-*fly ash* perlu dilakukan pengujian dengan variasi ataupun dimensi pelet yang berbeda.
2. Untuk lebih mengoptimalkan pengadsorpsian pada zeolit-*fly ash* terhadap presatasi mesin maka perlu dilakukan pencampuran bahan lain yang sudah terbukti dapat mengadsorpsi uap air seperti arang sekam padi dan arang batok kelapa.
3. Perlu adanya uji coba variasi temperatur aktivasi fisik di atas 225°C pada pelet zeolit-*fly ash* untuk dapat mengetahui kemampuan adsorpsi terbaik zeolit-*fly ash*.

DAFTAR PUSTAKA

- Ackley, M.W., Rege, S.U., Saxena, H., 2003. *Application of Natural Zeolites in The Purification and Separation of Gases*. Journal Microporous and Mesoporous Materials 61, 25-42.
- Azizl, Muchtar Ngurah Ardha Dan Lili Tahli. 2006. *Karaterisasi Abu Terbang PLTU Suralaya Dan Evaluasi Untuk Refraktor Cor*.
- Butland, T.D., 2008. *Adsorption Removal of Tertiary Butyl Alcohol from Wastewater by Zeolite*. Thesis of Worcester Polytechnic Institute.
- Efendri, Denfi. 2013. *Pengaruh Variasi Komposisi, Jenis Air, Dan Kondisi Aktivasi Dari Adsorben Fly Ash Batu Bara Terhadap Prestasi Mesin Dan Emisi Gas Buang Sepeda Motor Karburator 4-Langkah*. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin - Universitas Lampung: Bandar Lampung.
- Ganesan V. 1996. *“Internal Combustion Engines”*. McGraw Hill. USA.
- Hartono, B. 2008. *Pengaruh Pemanfaatan Zeolit Alam Lampung Teraktivasi Basa-Fisik Terhadap Prestasi Motor Kijang Karburator 1500 cc*. Skripsi Program Sarjana Jurusan Teknik Mesin – Fakultas Teknik Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Heywood, J. B. 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill International. Singapore.
- Jozefaciuk, G., Bowanko, G., 2002. *Effect of Acid and Alkali Treatments on Surface Areas and Adsorption Energies of Selected Minerals*. Journal Clays and Clay Minerals, 50 No. 6, 771-783.

- Kamarudin, K.S.N., Hamdan, H., Mat, H., 2004. *Equilibrium Model of Gas Adsorption on Zeolite*. Paper of University of Technology Malaysia.
- Khairil, 2003. *Study on Combustion Characteristics of Bio-Briquete, Proceedings of the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion*, Bali: Indonesia.
- Lasryza, Ayu. 2012. *Pemanfaatan Fly Ash Batu Bara Sebagai Adsorben Emisi Gas CO Pada Kendaraan Bermotor*. Institut Negeri Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Munandar, Ahmad. 2013. *Studi Komparasi Pemanfaatan Zeolit Pelet Perekat Aktivasi NaOH Dan KOH Dengan Variasi Normalitas Terhadap Prestasi Mesin Motor Diesel 4 Langkah*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Ozkan, F.C., Ulku, S., 2005. *The Effect of HCl Treatment on Water Vapor Adsorption Characteristics of Clinoptilolite Rich Natural Zeolite*. Journal Microporous and Mesoporous Materials 77, 47-53.
- Ozkan, F.C., Ulku, S., 2008. *Diffusion Mechanism of Water Vapour in A Zeolitic Tuff Rich in Clinoptilolite*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 94, 699-702.
- Payra, P., Dutta, P.K., 2003. Zeolites : A Primer, in Auerbach, S.M., Carrado, K.A., Dutta, P.K.,(Ed.). *Handbook of Zeolite Science and Technology*. Marcel Dekker New York, pp 1-19.
- Purwanta, Dimas Rilham. 2012. *Pengaruh Aplikasi Fly Ash Bentuk Pelet Perekat yang Diaktivasi Fisik Terhadap Prestasi Mesin dan Emisi Gas Buang Sepeda Motor Bensin 4-Langkah*. Skripsi Sarjana Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Rosita, N., Erawati, T., Moegihardjo, M., 2004. *Pengaruh Perbedaan Metode Aktivasi Terhadap Efektivitas Zeolit sebagai Adsorben*. Majalah Farmasi Airlangga, 4 No. 1, 20-25.

- Senda, S.P., Saputra, H., Sholeh, A., Rosjidi, M., Mustafa, A., 2006. *Prospek Aplikasi Produk Berbasis Zeolit untuk Slow Release Substances (SRS) dan Membran*. Artikel Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi Indonesia, ISSN 1410-9891.
- Soeswanto, Bambang. 2011. *Pengaruh Parameter Proses Pada Pemungutan Kembali Silika Dari Abu Batu Bara*. Tesis. Universitas Diponegoro: Semarang.
- Sumin, L., Youguang, M.A., Chunying, Z., Shuhua, S., Qing, H.E., 2009. *The Effect of Hydrophobic Modification of Zeolites on CO₂ Absorption Enhancement*. Chinese Journal of Chemical Engineering, 17(1), 36-41.
- Wardono, H. 2004. *Modul Pembelajaran Motor Bakar 4-Langkah*. Bandar Lampung: Jurusan Teknik Mesin - Universitas Lampung.
- Wardono, H. dan Simparmin br ginting, 2005. *Pemanfaatan Zeolit Alam Lampung dalam meningkatkan Performansi Motor Diesel 4-Langkah*, Laporan Penelitian Dosen Muda (Dibiayai oleh Dirjen DIKTI melalui PDM T.A. 2005)
- Wasis, S. 2015. *Perbandingan Pemanfaatan Fly Ash Batubara yang diaktivasi Secara Fisik dan NaOH-Fisik Dengan Variasi Normalitas Terhadap Prestasi Mesin Motor Diesel 4-Langkah*. Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Yandra E, 2006. *Pengaruh Penggunaan Zeolit Lampung Yang Diaktivasi Secara Fisik Dan Kimia-NaOH Terhadap Prestasi Motor Diesel 4-Langkah*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.

<http://www.kompas.com>.

Diakses pada 8 Agustus 2016

<http://www.kitapunya.net/2013/12/prinsip-cara-kerja-mesin-diesel-4-langkah.html>

Diakses pada 31 Agustus 2016.

http://www.ehow.co.uk/list_7560171_negative-effects-fly-ash-concrete.html.

Diakses pada 7 September 2016.

<http://www.geology.com.cn/Geology-journal/article-35615.html>.

Diakses pada 7 September 2016.