

# SKRIPSI

**ANALISIS EFEK PENGGUNAAN *CRUDE PALM OIL* (CPO) DAN B35  
TERHADAP LAJU KEAUSAN, UNJUK KERJA, DAN EMISI GAS BUANG  
MESIN DIESEL DALAM JANGKA PANJANG**

***ANALYSIS OF THE EFFECTS OF USING CRUDE PALM OIL (CPO) AND  
B35 ON WEAR RATE, PERFORMANCE, AND EXHAUST GAS EMISSIONS  
IN DIESEL ENGINES IN THE LONG TERM***



Oleh:

**NAMA : FAWWAZ AQILAH NURMANSYAH**  
**NPM : 20036010012**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN" JAWA TIMUR  
2024**

**SKRIPSI**

**ANALISIS EFEK PENGGUNAAN *CRUDE PALM OIL* (CPO) DAN B35  
TERHADAP LAJU KEAUSAN, UNJUK KERJA, DAN EMISI GAS BUANG  
MESIN DIESEL DALAM JANGKA PANJANG**

***ANALYSIS OF THE EFFECTS OF USING CRUDE PALM OIL (CPO) AND  
B35 ON WEAR RATE, PERFORMANCE, AND EXHAUST GAS EMISSIONS  
IN DIESEL ENGINES IN THE LONG TERM***



Oleh:

**NAMA : FAWWAZ AQILAH NURMANSYAH**

**NPM : 20036010012**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN" JAWA TIMUR**

**2024**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**"ANALISIS EFEK PENGGUNAAN CRUDE PALM OIL (CPO) DAN B35  
TERHADAP LAJU KEAUSAN, UNJUK KERJA, DAN EMISI GAS BUANG  
MESIN DIESEL DALAM JANGKA PANJANG"**

Skripsi Ini Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Menyelesaikan Studi Strata Satu  
Dan Memperoleh Gelar Sarjana di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan  
Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur.

Oleh:

Nama : Fawwaz Aqilah Nurmansyah

NPM : 20036010012

Konsentrasi : Konversi Energi

Telah Diuji Dalam Ujian Komprehensif Skripsi

Hari/Tanggal: Kamis / 04 Juli 2024

Telah Disahkan Oleh:

Tim Penguji:

Dosen Pembimbing

Dr. Wahyu Dwi Lestari, S.Pd., M.T.  
NPT. 20219910114203

Williandi Saputro, S.T., M.Eng.  
NPT. 21119940726300

2.

Koordinator Program Studi Teknik Mesin

Ahmad Khairul Faizin, S.T., M.Sc.  
NPT. 21119930120299

Dr. Ir. Luluk Edahwati, M.T.  
NIP. 196406111992032001

Mengetahui,  
Dekan Fakultas Teknik dan Sains  
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur

Prof. Dr. Dra. Jarayah, M.P.  
NIP. 196504031991032001



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI  
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN" JAWA TIMUR  
FAKULTAS TEKNIK

**KETERANGAN REVISI**

Mahasiswa di bawah ini:

Nama : Fawwaz Aqilah Nurmansyah

NPM : 20036010012



Program Studi : Teknik Mesin

Telah mengerjakan revisi / ~~tidak ada revisi~~ \*) SKRIPSI / TUGAS AKHIR Ujian Lisan

Periode. II, TA . 2023/2024

Dengan judul: **ANALISIS EFEK PENGGUNAAN CRUDE PALM OIL (CPO) DAN B35  
TERHADAP LAJU KEAUSAN, UNJUK KERJA, DAN EMISI GAS  
BUANG MESIN DIESEL DALAM JANGKA PANJANG**

Dosen Penguji yang memerintahkan revisi

1. Dr. Wahyu Dwi Lestari, S.Pd.,MT. (  )
2. Ahmad Khairul Faizin, S.T., M.Sc. (  )

Surabaya, 18 Juli 2024

Menyetujui,  
Dosen Pembimbing



Wiliandi Saputro, S.T., M.Eng.

Catatan: \*) coret yang tidak perlu

## SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Fawwaz Aqilah Nurmansyah

NPM : 20036010012

Fakultas/Program Studi : Teknik dan Sains/Teknik Mesin

Judul Skripsi/Tugas Akhir/Tesis/Desertasi/Ujian Lisan: Analisis Efek Penggunaan *Crude Palm Oil* (CPO) Dan B35 Terhadap Laju Keausan, Unjuk Kerja, Dan Emisi Gas Buang Mesin Diesel Dalam Jangka Panjang

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Hasil karya yang saya serahkan ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik baik di UPN "Veteran" Jawa Timur maupun di institusi pendidikan lainnya.
2. Hasil karya saya ini merupakan gagasan, rumusan dan hasil pelaksanaan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan pembimbing akademik.
3. Hasil karya saya ini merupakan hasil revisi terakhir setelah diujikan yang telah diketahui dan disetujui oleh pembimbing.
4. Dalam karya saya ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali yang digunakan sebagai acuan dalam naskah dengan menyebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.

Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya. Apabila dikemudian hari terbukti ada penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini maka saya bersedia menerima konsekuensi apapun, sesuai dengan ketentuan yang berlaku di UPN "Veteran" Jawa Timur.

Surabaya, 15 Juli 2024

Yang Menyatakan,



(Fawwaz Aqilah Nurmansyah)

## PRAKATA

Segala puji kami panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang diberikan, sehingga proposal skripsi ini bisa terselesaikan dengan baik. Dalam penyusunan proposal skripsi ini, kami mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu terselesaikannya proposal skripsi ini. Adapun pihak-pihak tersebut antara lain:

1. Orang tua yang sangat penulis cintai, yang selalu mendukung, mendoakan, dan memberi kasih sayang kepada penulis.
2. Ibu Prof. Dr. Dra. Jariyah, M.P., selaku Dekan Fakultas Teknik dan Sains UPN "Veteran" Jawa Timur.
3. Ibu Dr. Ir. Luluk Edahwati, M.T., selaku Koordinator Program Studi Teknik Mesin UPN "Veteran" Jawa Timur.
4. Bapak Wiliandi Saputro, S.T., M. Eng., sebagai Dosen Pembimbing yang selalu memberi ilmu, arahan, saran, nasihat, dan semangat kepada penulis.
5. Bapak Erwan Adi Saputro, S.T., M.T., Ph.D., sebagai Dosen Pembimbing riset yang selalu memberi arahan dan ilmu kepada penulis.
6. Ibu Dr. Wahyu Dwi Lestari, S.Pd., M.T. sebagai Dosen Penguji I atas masukan dan saran perbaikannya.
7. Bapak Ahmad Khairul Faizin, S.T., M.Sc., sebagai Dosen Penguji II atas masukan dan saran perbaikannya.
8. Keluarga besar Ma'roef dan Nurman yang sangat penulis sayang, yang selalu mendukung, mendoakan, dan memberi semangat kepada penulis.
9. Teman – teman Teknik Mesin UPN "Veteran" Jawa Timur

Penulis menyadari bahwa proposal skripsi ini belumlah dikatakan sempurna. Untuk itu, penulis dengan sangat terbuka menerima kritik dan saran dari pembaca sekalian. Semoga proposal skripsi ini bermanfaat untuk kita semua.

Surabaya, 5 Juni 2024



Penulis

## INTISARI

Meningkatnya jumlah kendaraan di Indonesia dapat meningkatkan konsumsi minyak bumi. Perlunya mencari bahan bakar alternatif, salah satunya adalah *biodiesel*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan bahan bakar *Crude Palm Oil (CPO) off grade* yang tidak terpakai dalam industri minyak sawit dan B35 terhadap performa mesin, emisi gas buang, dan keausan komponen mesin diesel dalam jangka panjang. Mesin diesel yang digunakan dalam penelitian ini adalah Kubota RD 65 DI-NB dengan diatur putaran 2000 RPM secara konstan, yang dihubungkan dengan alternator Denyo FA-5 yang diberi beban 4000 W. Metode penelitian melibatkan penggunaan CPO yang telah mengalami *heat treatment* pada temperatur 100 °C untuk mengurangi viskositas kinematik dan densitas, sehingga lebih mudah untuk penginjeksian bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan CPO mempunyai *Brake Thermal Efficiency* yang lebih rendah 27,54% dibandingkan B35 dan emisi gas buang CO, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> dan *Particulate Matter* yang lebih tinggi dibandingkan dengan B35. Selain itu, CPO mempunyai menghasilkan keausan yang signifikan seiring dengan lama waktu operasi. Keausan ini diukur untuk mengetahui kehilangan dimensi dan kehilangan massa komponen, serta visualisasi komponen setelah penggunaan bahan bakar dalam jangka panjang. CPO *off grade* perlu diteliti lebih lanjut dengan penambahan *nanoparticle* atau zat aditif, agar dapat meningkatkan pembakaran.

**Kata kunci:** CPO, B35, mesin diesel, performa, emisi gas buang, keausan

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
PRAKATA.....	ii
INTISARI .....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	6
1.3 Tujuan .....	6
1.4 Batasan Masalah .....	6
1.5 Manfaat .....	7
BAB II DASAR TEORI .....	8
2.1 Mesin Diesel .....	8
2.1.1 Siklus Termodinamika Mesin Diesel.....	8
2.1.2 Langkah Kerja Siklus Diesel .....	9
2.1.3 Pengaturan Waktu Katup.....	11
2.2 Biodiesel .....	12
2.3 B35.....	15
2.4 <i>Crude Palm Oil</i> .....	16
2.5 Keausan.....	18
2.5.1 Jenis-jenis Keausan .....	18
2.5.1.1 Faktor Mekanis .....	18



2.5.1.2 Faktor Kimiawi.....	21
2.5.2 <i>Wear Maps</i> .....	22
2.6 Emisi Gas Buang .....	25
2.6.1 Nitrogen Oksida (NO <sub>x</sub> ).....	26
2.6.2 Karbon Monoksida (CO).....	26
2.6.3 Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> ) .....	27
2.7 Performa Mesin.....	28
2.7.1 <i>Brake Power</i> (BP).....	28
2.7.2 <i>Brake Torque</i> (BT) .....	29
2.7.3 <i>Brake Spesific Fuel Consumption</i> (BSFC).....	30
2.7.4 <i>Brake Thermal Efficiency</i> (BTE).....	30
2.8 Tinjauan Pustaka.....	31
2.8.1 Performa Mesin .....	31
2.8.1.1 <i>Brake Power</i> (BP).....	31
2.8.1.2 <i>Brake Torque</i> (BT) .....	31
2.8.1.3 <i>Brake Spesific Fuel Consumption</i> (BSFC).....	32
2.8.1.4 <i>Brake Thermal Efficiency</i> .....	33
2.8.2 Emisi Gas Buang .....	34
2.8.2.1 Karbon monoksida (CO) .....	34
2.8.2.2 <i>Nitrogen Oxide</i> (NO <sub>x</sub> ).....	35
2.8.2.3 <i>Hydrocarbon</i> (HC) .....	36
2.8.3 <i>Review Artikel Terdahulu</i> .....	36
2.8.3.1 <i>Review</i> Terkait Performa Mesin .....	37
2.8.3.2 <i>Review</i> Terkait Emisi Gas Buang .....	39
2.8.3.3 <i>Review</i> Terkait Keausan .....	42
BAB III METODE PENELITIAN .....	45

3.1 <i>Flowchart</i> .....	45
3.2 Lokasi Penelitian.....	46
3.3 Skema Penelitian.....	46
3.3.1. Alat .....	46
3.3.2 Bahan.....	49
3.3 Kondisi Eksperimen.....	50
3.4 Proses Pengumpulan Data .....	51
3.4.1 Pra-Operasi dan <i>Set Up</i> .....	51
3.4.2 Testing dan Kalibrasi.....	51
3.4.3 Pengambilan data.....	53
3.4.3.1 Performa Mesin .....	53
3.4.3.2 Temperatur Komponen.....	53
3.4.3.4 Emisi Gas Buang .....	53
3.4.3.5 Keausan Kehilangan Dimensi .....	53
3.4.3.6 Keausan Kehilangan Massa.....	57
3.4.3.7 Visual Komponen.....	57
3.5 Pengolahan dan Penafsiran Data .....	58
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	59
4.1 Performa.....	59
4.1.1 <i>Brake Power</i> .....	59
4.1.2 <i>Brake Torque</i> .....	60
4.1.3 <i>Brake Specific Fuel Consumption</i> .....	61
4.1.4 <i>Brake Thermal Efficiency</i> .....	63
4.2 Temperatur Komponen .....	64
4.2.1 Temperatur <i>Cylinder Head</i> .....	64
4.2.2 Temperatur <i>Cylinder Block</i> .....	66

4.2.3	Temperatur <i>Exhaust Pipe</i> .....	67
4.2.4	Temperatur <i>Intake Pipe</i> .....	68
4.2.5	Temperatur <i>Coolant Tank</i> .....	69
4.3	Kondisi Lingkungan .....	70
4.3.1	<i>Analysis of Variance</i> (ANOVA).....	70
4.3.2	ANOVA <i>Two Way</i> Pada Mesin Berbahan Bakar CPO .....	70
4.3.3	ANOVA <i>Two Way</i> Pada Mesin Berbahan Bakar B35 .....	71
4.4	Emisi Gas Buang .....	72
4.4.1	Karbon Monoksida (CO).....	72
4.4.2	Nitrogen Oksida (NO <sub>x</sub> ).....	74
4.4.3	Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> ).....	75
4.4.4	Hidrogen (H <sub>2</sub> ) .....	76
4.4.5	<i>Particulate Matter</i> (PM).....	78
4.5	Keausan.....	79
4.5.1	Kehilangan Dimensi .....	79
4.5.1.1	<i>Compression Ring I</i> .....	80
4.5.1.2	<i>Compression Ring II</i> .....	82
4.5.1.4	<i>Oil Ring</i> .....	87
4.5.1.5	Connecting Rod Bearing .....	89
4.5.1.6	<i>Connecting Small End</i> .....	91
4.5.1.7	<i>Pin Piston</i> .....	92
4.5.1.8	<i>Intake Rocker Arm</i> .....	94
4.5.1.9	<i>Exhaust Rocker Arm</i> .....	95
4.5.1.10	Intake Rocker Arm House .....	97
4.5.1.11	<i>Exhaust Rocker Arm House</i> .....	99
4.5.1.12	<i>Intake Push Rod</i> .....	101

4.5.1.13 <i>Exhaust Push Rod</i> .....	104
4.5.1.14 <i>Cylinder Liner</i> .....	108
4.5.1.15 <i>Plunger</i> .....	113
4.5.1.16 <i>Assy Tappet</i> .....	115
4.5.1.17 <i>Delivery Valve</i> .....	117
4.5.1.18 <i>Valve Holder</i> .....	119
4.5.1.19 <i>Barrel</i> .....	120
4.5.1.20 <i>Control Sleeve</i> .....	122
4.5.2 <i>Kehilangan Massa</i> .....	124
4.5.2.1 <i>Compression Ring I</i> .....	124
4.5.2.2 <i>Compression Ring II</i> .....	125
4.5.2.3 <i>Wiper Ring</i> .....	126
4.5.2.4 <i>Oil Ring</i> .....	127
4.5.2.5 <i>Connecting Rod Bearing</i> .....	128
4.5.2.6 <i>Metal Crank Pin</i> .....	129
4.5.2.7 <i>Pin Piston</i> .....	130
4.5.2.8 <i>Intake Push Rod</i> .....	131
4.5.2.9 <i>Exhaust Push Rod</i> .....	132
4.5.2.9 <i>Intake Rocker Arm</i> .....	133
4.5.2.10 <i>Exhaust Rocker Arm</i> .....	134
4.5.2.11 <i>Rocker Arm House</i> .....	135
4.5.2.12 <i>Plunger</i> .....	136
4.5.2.13 <i>Delivery Valve</i> .....	137
4.5.2.14 <i>Valve Holder</i> .....	138
4.5.2.15 <i>Barrel</i> .....	139
4.5.2.16 <i>Assy Tappet</i> .....	140

4.5.2.17 Control Sleeve .....	141
4.5.3 Visual Komponen .....	143
4.5.3.1 <i>Ring Piston</i> .....	143
4.5.3.2 Connecting Rod Bearing .....	147
4.5.3.3 Push Rod.....	153
4.5.3.4 <i>Rocker Arm dan Rocker Arm House</i> .....	157
4.5.3.5 <i>Assy Tappet</i> .....	159
4.5.3.6 <i>Barrel</i> .....	161
4.5.3.7 <i>Delivery Valve</i> .....	162
4.5.3.8 <i>Plunger</i> .....	164
4.5.3.9 <i>Control Sleeve</i> .....	165
4.5.3.10 <i>Cylinder Liner</i> .....	167
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	169
5.1 Kesimpulan .....	169
5.2 Saran .....	170
DAFTAR PUSTAKA .....	171
LAMPIRAN.....	196
Lampiran 1. Spesifikasi Alat .....	196
Lampiran 2. Data Ketidakpastian Alat Ukur .....	200
Lampiran 3. Data Performa .....	203
Lampiran 4. Data Temperatur Komponen .....	209
Lampiran 5. Data Kondisi Lingkungan .....	215
Lampiran 6. Data Keausan.....	221
Lampiran 6.1 Data Keausan Kehilangan Dimensi .....	221
Lampiran 6.2 Data Keausan Kehilangan Massa.....	228

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Cadangan minyak bumi di Indonesia pada tahun 2016-2022.....	1
Gambar 1.2 Penjualan Bahan Bakar Minyak 2018-2022 .....	2
Gambar 1. 3 Penjualan bahan bakar minyak Indonesia 2018-2022 .....	4
Gambar 1. 4. Proyeksi kebutuhan BBM.....	5
Gambar 2. 1. Siklus diesel, (a) diagram P-V, (b) diagram T-S .....	8
Gambar 2. 2. Siklus operasi mesin diesel empat langkah.....	9
Gambar 2. 3. Diagram pengoperasian waktu valve pada mesin diesel 4 langkah.....	11
Gambar 2. 4. (a) Keausan abrasive pada metal crank pin pada kondisi standar, (b) setelah pengujian dengan biodiesel, (c) setelah pengujian dengan bahan bakar diesel.....	19
Gambar 2. 5. (a) Keausan abrasive dua permukaan, (b) keausan <i>abrasive</i> tiga permukaan.....	19
Gambar 2. 7. Keausan fatigue.....	20
Gambar 2. 8. (a) <i>Tangential fretting</i> , (b) <i>radial fretting</i> , (c) <i>rotational fretting</i> , (d) <i>torsional fretting</i> .....	21
Gambar 2. 9. Keausan <i>corrosive</i> .....	22
Gambar 2. 10 <i>Wear Maps</i> pada baja yang tanpa diberi pelumas.....	23
Gambar 2.11. Grafik peta pembentukan emisi NO <sub>x</sub> dan jelaga pada operasi pembakaran.....	25
Gambar 2.12. Grafik peta pembentukan emisi H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CO, dan H <sub>2</sub> pada operasi pembakaran.....	25
Gambar 2. 13 Grafik kesetimbangan yang mengandung sulfur dalam pembakaran propana-udara .....	26
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> jalan penelitian .....	45
Gambar 3. 2. Skema penelitian berbahan bakar B35.....	46
Gambar 3.3. Skema penelitian berbahan bakar CPO.....	46
Gambar 3. 4 Heater dengan sistem agitasi.....	49
Gambar 3. 5. Bagian pengambilan data keausan dimensi pada <i>ring piston</i> .....	53
Gambar 3. 6. Bagian pengambilan data keausan dimensi pada <i>cylinder liner</i> .....	54

Gambar 3.7 Bagian pengambilan data keausan dimensi pada connecting rod bearing dan connecting small end.....	54
Gambar 3. 8. Bagian pengambilan data keausan dimensi pada <i>pin piston</i> .....	54
Gambar 3.9. Bagian pengambilan data keausan dimensi pada <i>push rod</i> .....	55
Gambar 3. 10. Bagian pengambilan data keausan dimensi pada rocker arm .....	55
Gambar 3. 11. Bagian pengambilan data keausan dimensi pada rocker arm shaft....	55
Gambar 3. 12. Bagian pengambilan data keausan dimensi pada plunger.....	56
Gambar 3.13. Bagian pengambilan data keausan dimensi pada assy tappet .....	56
Gambar 3.14. Bagian pengambilan data keausan dimensi pada delivery valve .....	56
Gambar 3.15. Bagian pengambilan data keausan dimensi pada valve holder .....	56
Gambar 3.16 Bagian pengambilan data keausan dimensi pada barrel .....	57
Gambar 3. 17. Bagian pengambilan data keausan dimensi pada control sleeve .....	57
Gambar 4. 1. Grafik Brake Power .....	59
Gambar 4. 2. Grafik torsi .....	60
Gambar 4. 3. Grafik Brake Spesific Fuel Consumption .....	62
Gambar 4. 4. Grafik brake thermal efficiency .....	63
Gambar 4. 5. Grafik temperatur cylinder head .....	65
Gambar 4.6. Grafik temperatur cylinder block.....	66
Gambar 4. 7. Grafik temperatur exhaust pipe.....	67
Gambar 4.8. Grafik temperatur intake pipe .....	68
Gambar 4. 9. Grafik temperatur coolant tank .....	69
Gambar 4. 10. Hasil emisi gas buang Karbon monoksida.....	72
Gambar 4. 11. Hasil emisi gas buang Nitrogen oksida.....	74
Gambar 4. 12. Hasil emisi gas buang Sulfur dioksida.....	75
Gambar 4.13. Hasil emisi gas buang Hidrogen .....	77
Gambar 4. 14. Hasil emisi gas buang Particulate Matter.....	78
Gambar 4.15. Hasil persentase kehilangan dimensi compression ring piston I bagian lebar ring (a), gap ring (s), dan ketebalan ring (h).....	80
Gambar 4.16. Hasil pengukurankehilangan dimensi compression ring piston II bagian lebar ring (a), gap ring (s), dan ketebalan ring (h).....	82
Gambar 4. 17. Hasil pengukuran kehilangan dimensi wiper ring bagian lebar ring (a), gap ring (s), dan ketebalan ring (h).....	84

Gambar 4.18. Hasil pengukuran kehilangan dimensi <i>oil ring</i> bagian lebar ring (a), gap ring (s), dan ketebalan ring (h).....	87
Gambar 4. 19 Hasil persentase kehilangan dimensi connecting rod bearing .....	89
Gambar 4.20. Hasil persentase kehilangan dimensi connecting small end .....	91
Gambar 4. 21. Hasil pengukuran kehilangan dimensi pin piston bagian diameter (D) dan panjang pin piston (L) .....	92
Gambar 4. 22. Hasil pengukuran kehilangan dimensi intake rocker arm bagian x-axis dan y-axis.....	94
Gambar 4. 23. Hasil persentase kehilangan dimensi exhaust rocker arm bagian x-axis dan y-axis.....	95
Gambar 4. 24. Hasil persentase kehilangan dimensi intake rocker arm house bagian x-axis, y-axis, dan panjang shaft (L).....	98
Gambar 4. 25. kehilangan persentase dimensi exhaust rocker arm shaft bagian x-axis, y-axis, dan panjang shaft (L) .....	100
Gambar 4. 26. Hasil persentase kehilangan dimensi intake push rod.....	102
Gambar 4. 27 Hasil persentase kehilangan dimensi exhaust push rod .....	105
Gambar 4. 28. Hasil persentase kehilangan dimensi cylinder liner.....	109
Gambar 4. 29. Hasil persentase kehilangan dimensi plunger .....	113
Gambar 4. 30. Hasil persentase kehilangan dimensi assy tappet.....	116
Gambar 4. 31. Hasil persentase kehilangan dimensi delivery valve .....	117
Gambar 4. 32. Hasil persentase kehilangan dimensi valve holder .....	119
Gambar 4.33. Hasil persentase kehilangan dimensi barrel .....	120
Gambar 4. 34. Hasil persentase kehilangan dimensi control sleeve.....	122
Gambar 4. 35. Hasil persentase kehilangan massa compression ring I.....	124
Gambar 4. 36. Hasil persentase kehilangan massa compression ring II.....	125
Gambar 4. 37. Hasil persentase kehilangan massa wiper ring.....	126
Gambar 4. 38. Hasil pengukuran kehilangan massa oil ring .....	127
Gambar 4. 39. Hasil pengukuran kehilangan massa connecting rod bearing .....	128
Gambar 4. 40. Hasil pengukuran kehilangan massa metal crank pin atas dan bawah.....	129
Gambar 4. 41. Hasil pengukuran kehilangan massa pin piston .....	130
Gambar 4. 42. Hasil persentase kehilangan massa pada intake push rod.....	131



Gambar 4. 43. Hasil persentase kehilangan massa exhaust push rod .....	132
Gambar 4. 44. Hasil pengukuran kehilangan massa intake rocker arm.....	133
Gambar 4. 45. Hasil pengukuran kehilangan massa exhaust rocker arm .....	134
Gambar 4. 46. Hasil persentase kehilangan massa rocker arm house .....	135
Gambar 4. 47. Hasil pengukuran kehilangan massa plunger.....	136
Gambar 4. 48. Hasil persentase kehilangan massa delivery valve .....	137
Gambar 4. 49. Hasil persentase kehilangan massa valve holder .....	138
Gambar 4. 50 Hasil persentase kehilangan massa barrel.....	139
Gambar 4. 51 Hasil persentase kehilangan massa assy tappet .....	140
Gambar 4. 52. Hasil persentase kehilangan massa control sleeve.....	141
Gambar 4. 53. Visual keausan pada ring piston, (a) compression ring I (CPO), (b) compression ring I (B35), (c) compression ring II (CPO), (d) compression ring II (B35), (e) wiper ring (CPO), (f) wiper ring (B35), (g) oil ring (CPO), dan (h) oil ring (B35).....	146
Gambar 4. 54. Visual keausan (a) connecting rod bearing (CPO), (b) connecting rod bearing (B35), (c) connecting small end (CPO), (d) metal crank pin (CPO), (e) metal crank pin (B35), (f) connecting small end (CPO), connecting small end (B35), (g) pin piston (CPO), (h) pin piston (B35) .....	152
Gambar 4. 55. Visual keausan (a) intake push rod (CPO), (b) intake push rod (B35), (c) exhaust push rod (CPO), dan (d) exhaust push rod (B35).....	156
Gambar 4. 56 Visual keausan waktu operasi 300 jam, (a) intake rocker arm CPO, (b) intake rocker arm B35, (c) exhaust rocker arm CPO, (d) exhaust rocker arm B35, (e) rocker arm house CPO, dan (f) rocker arm house B35.....	159
Gambar 4. 57. Visual keausan waktu operasi 300 jam, (a) assy tappet CPO, (b) assy tappet B35 .....	160
Gambar 4. 58 Visual waktu operasi 300 jam barrel, (a) barrel CPO, (b) barrel B35...162	
Gambar 4. 59. Visual waktu operasi 300 jam delivery valve, (a) delivery valve CPO, (b) delivery valve (B35).....	164
Gambar 4. 60. Visual waktu operasi 300 jam plunger, (a) plunger (CPO), (b) plunger (B35).....	165
Gambar 4. 61. Visual waktu operasi 300 jam control sleeve, (a) control sleeve CPO, (b) control sleeve B35.....	166

Gambar 4. 62. Visual waktu operasi cylinder liner, (cylinder liner (CPO), (b) cylinder liner (B35)..... 167

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Karakteristik biofuel berbagai macam properti .....	14
Tabel 2. 2 Karakteristik B35 .....	15
Tabel 2. 3 <i>Certificate of analysis CPO off grade</i> .....	17
Tabel 2. 4. Baku mutu emisi gas buang .....	28
Tabel 3. 1. Spesifikasi mesin diesel .....	47
Tabel 3. 2. Spesifikasi alternator .....	47
Tabel 3. 4. Kondisi eksperimen .....	50
Tabel 3. 5 Rentang pengukuran, akurasi dan ketidakpastian alat ukur.....	52
Tabel 4. 1. Hasil <i>Analysis of Variance Two Way</i> pada kondisi lingkungan terhadap <i>Brake Thermal Efficiency</i> mesin berbahan bakar CPO .....	71
Tabel 4. 2. Hasil <i>Analysis of Variance Two Way</i> pada kondisi lingkungan terhadap <i>Brake Thermal Efficiency</i> mesin berbahan bakar B35.....	71
Tabel 4. 3. Hasil visual <i>ring piston</i> .....	143
Tabel 4. 4. Hasil visual <i>connecting rod bearing, metal crank pin seat, metal crank pin, dan pin piston</i> .....	147
Tabel 4. 5. Hasil visual <i>push rod</i> .....	153
Tabel 4. 6. Hasil visual <i>rocker arm dan rocker arm house</i> .....	157
Tabel 4. 7. Hasil visual <i>assy tappet</i> .....	159
Tabel 4. 8 Hasil visual <i>barrel</i> .....	161
Tabel 4. 9. Hasil visual <i>delivery valve</i> .....	162
Tabel 4. 10. Hasil visual <i>plunger</i> .....	164
Tabel 4. 11. Hasil visual <i>control sleeve</i> .....	166

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Spesifikasi calipermeter .....	196
Lampiran 2. Spesifikasi timbangan digital .....	196
Lampiran 3. Spesifikasi dial bore gauge.....	197
Lampiran 4. Spesifikasi kamera DSLR .....	197
Lampiran 5. Spesifikasi multimeter.....	197
Lampiran 6. Spesifikasi multimeter.....	198
Lampiran 7. Spesifikasi tachometer.....	198
Lampiran 8. Spesifikasi thermogun .....	198
Lampiran 9. Spesifikasi hygometer-humidity meter .....	199
Lampiran 10. Spesifikasi stopwatch .....	199
Lampiran 11. Data ketidakpastian tachometer .....	200
Lampiran 12 Data ketidakpastian thermogun .....	200
Lampiran 13. Data ketidakpastian multimeter arus .....	200
Lampiran 14. Data ketidakpastian multimeter tegangan .....	201
Lampiran 15 Data ketidakpastian stopwatch .....	201
Lampiran 16 Data ketidakpastian calipermeter .....	201
Lampiran 17. Data ketidakpastian timbangan digital .....	202
Lampiran 18. Data ketidakpastian temperatur lingkungan.....	202
Lampiran 19. Data ketidakpastian kelembaban .....	202
Lampiran 20. Data performa mesin berbahan bakar CPO.....	203
Lampiran 21. Data performa mesin berbahan bakar B35.....	206
Lampiran 22. Data temperatur komponen mesin berbahan bakar CPO .....	209
Lampiran 23. Data temperatur komponen mesin berbahan bakar B35 .....	212
Lampiran 24. Data temperatur lingkungan dan kelembaban .....	215
Lampiran 25. Grafik temperatur lingkungan dan kelembaban .....	218
Lampiran 26. Grafik <i>Residual plots ANOVA Two-Way</i> mesin berbahan bakar CPO.....	219
Lampiran 27. Grafik <i>Residual plots ANOVA Two-Way</i> mesin berbahan bakar B35.....	221
Lampiran 28. Data kehilangan dimensi <i>compression ring I</i> .....	221

Lampiran 29. Data kehilangan dimensi <i>compression ring II</i> .....	222
Lampiran 30. Data kehilangan dimensi <i>wiper ring</i> .....	222
Lampiran 31 Data kehilangan dimensi <i>pin piston</i> .....	223
Lampiran 32. Data kehilangan dimensi <i>connecting small end</i> .....	223
Lampiran 33. Data kehilangan dimensi <i>connecting rod bearing</i> .....	223
Lampiran 34. Data kehilangan dimensi <i>intake push rod</i> .....	224
Lampiran 35. Data kehilangan dimensi <i>exhaust push rod</i> .....	224
Lampiran 36. Data kehilangan dimensi <i>intake rocker arm</i> .....	224
Lampiran 37. Data kehilangan dimensi <i>exhaust rocker arm</i> .....	225
Lampiran 38. Data kehilangan dimensi <i>intake rocker arm shaft</i> .....	225
Lampiran 39. Data kehilangan dimensi <i>exhaust rocker arm shaft</i> .....	225
Lampiran 40. Data kehilangan dimensi <i>plunger</i> .....	226
Lampiran 41. Data kehilangan dimensi <i>assy tappet</i> .....	226
Lampiran 42. Data kehilangan dimensi <i>delivery valve</i> .....	226
Lampiran 43. Data kehilangan dimensi <i>valve holder</i> .....	227
Lampiran 44. Data kehilangan dimensi <i>barrel</i> .....	227
Lampiran 45. Data kehilangan dimensi <i>cylinder liner</i> .....	227
Lampiran 46. Data kehilangan massa <i>compression ring I</i> .....	228
Lampiran 47. Data kehilangan massa <i>compression ring II</i> .....	228
Lampiran 48. Data kehilangan massa <i>oil ring</i> .....	229
Lampiran 49. Data kehilangan massa <i>pin piston</i> .....	229
Lampiran 50. Data kehilangan massa <i>connecting rod bearing</i> .....	230
Lampiran 51. Data kehilangan massa <i>intake push rod</i> .....	230
Lampiran 52. . Data kehilangan massa <i>exhaust push rod</i> .....	230