

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	I
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	Ii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b>	Iii
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b>	Iv
<b>KATA PENGANTAR</b>	V
<b>DAFTAR ISI</b>	Vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	Xii
<b>DAFTAR TABEL</b>	Xv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	Xvii
<b>DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN</b>	Xviii
<b>INTISARI</b>	Xx
<b><i>ABSTRACT</i></b>	Xxi
 <b>BAB I PENDAHULUAN</b>	 1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	5
1.4. Tujuan Penelitian	5
1.5. Manfaat Penelitian	6
 <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	 7
2.1. Penelitian tentang Perancangan dan Analisis Kegagalan Poros Engkol Satu Silinder dengan FEM	7
2.2. Penelitian Analisis Tegangan Poros Engkol pada Pembebanan Dinamis dengan Pendekatan FEA	8
2.3. Penelitian Analisis Frekuensi Poros Engkol Menggunakan Simulasi FEA	17
2.4. Penelitian Analisis Frekuensi Alami Poros Engkol dengan Metode Bump Test	19

2.5.	Penelitian yang dilakukan	20
<b>BAB III DASAR TEORI</b>		24
3.1.	Mesin Bensin	24
3.1.1.	Prinsip Kerja Mesin Empat Langkah	24
3.1.2.	Siklus Ideal	26
3.1.3.	Siklus Aktual Motor Bensin	26
3.1.4.	Siklus Udara Volume Konstan (Siklus Otto)	28
3.2.	<i>Crankshaft</i>	29
3.2.1.	Pengertian <i>Crankshaft</i>	29
3.2.2.	Fungsi <i>Crankshaft</i>	30
3.2.3.	Konstruksi	30
3.2.4.	Keseimbangan Poros Engkol	31
3.2.5.	Bagian – Bagian dari <i>Crankshaft</i>	31
3.3.	Karakteristik Permesinan	32
3.3.1.	Kecepatan Piston	33
3.3.2.	Kerja	34
3.3.3.	<i>Mean Effective Pressure</i>	34
3.3.4.	<i>Torsi</i>	35
3.3.5.	Daya	35
3.4.	Kinematika pada Konstruksi Silinder Mesin	36
3.4.1.	Massa dari Keseluruhan Sistem Konstruksi Silinder	37
3.4.2.	Gaya – Gaya yang Bekerja pada Mekanisme Poros Engkol	38
3.4.2.1.	Gaya Proses Pembakaran	38
3.4.2.2.	Gaya Inersia	39
3.4.2.3.	Gaya yang Bekerja pada Piston	40
3.4.2.4.	Gaya yang Bekerja pada <i>Crank journal</i>	41
3.5.	Tegangan dan Faktor Keamanan	41
3.5.1.	Tegangan	41

3.5.2.	Regangan	42
3.5.3.	Diagram Tegangan Regangan	42
3.5.4.	Modulus Elastisitas	43
3.5.5.	Modulus Geser	44
3.5.6.	<i>Possion Ratio</i>	45
3.5.7.	Faktor Konsentrasi Tegangan	46
3.5.8.	Faktor Keamanan	46
3.6.	Getaran Mekanis	50
3.6.1.	Gerak Harmonik	50
3.6.2.	Getaran Bebas	52
3.6.3.	Persamaan Gerakan	52
3.6.4.	Getaran Paksa	54
3.6.5.	Getaran Torsi	55
3.6.6.	Getaran Pada Mesin	56
3.6.7.	Pengolahan Data Vibrasi	58
3.6.7.1.	Data Domian Waktu	58
3.6.7.2.	Data Domian Frekuensi	59
3.6.8.	Analisa Getaran Bantalan	60
3.6.8.1.	Frekuensi Putaran atau Kecepatan	62
3.6.8.2.	Cacat Lokal pada Lintasan Dalam	62
3.6.8.3.	Cacat Lokal pada Lintasan Luar	62
3.6.8.4.	Cacat Lokal pada Bola	62
3.6.8.5.	Cacat Lokal pada Sangkar	63
3.6.9.	Getaran akibat Massa <i>Unbalance</i>	63
3.6.10.	Getaran akibat <i>Misalignment</i>	63
3.6.11.	Tingkat Kerusakan	64
3.7.	Putaran Kritis	65
3.8.	Teori Kegagalan	66
3.8.1.	Pemilihan Kriteria Kegagalan	72
3.9.	<i>Finite Element Analysis (FEA)</i>	72

3.9.1.	Tahapan yang Dilakukan didalam Metode Elemen Hingga	75
3.9.2.	Teori Komputasi dengan Menggunakan <i>Software ANSYS</i>	76
3.9.3.	Tahapan dalam Penyelesaian Masalah dengan <i>Software ANSYS</i>	78
3.9.4.	Analisis <i>Stress</i> Tiga Dimensi	79
3.9.5.	<i>Governing Equation</i> Metode Elemen Hingga Pada Poros engkol	80
<b>BAB IV METODOLOGI PENELITIAN</b>		84
4.1.	Diagram Alir Penelitian	84
4.2.	Metode Penelitian	85
4.3.	Peralatan dan Material yang Digunakan	86
4.4.	Tahapan Penelitian	88
4.4.1.	Melakukan <i>Bump Test</i> pada Poros Engkol	88
4.4.2.	Melakukan Pengukuran Vibrasi pada Sistem Beroperasi	92
4.4.2.1	Desain Penelitian	93
4.4.2.2	Hasil Pengukuran yang diharapkan	96
4.4.3.	Pemodelan dan Analisis Elemen Hingga Poros Engkol	96
<b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		99
5.1.	Analisis Teoritik Kinematika Mekanisme Poros Engkol	99
5.1.1.	Kinematika Pergerakan Piston	100
5.1.2.	Kinematika Kecepatan dan Percepatan Piston Seketika	102
5.1.3.	Kinematika Kecepatan dan Percepatan <i>Connecting Rod</i> Seketika	102
5.1.4.	Gaya – Gaya yang Bekerja pada Mekanisme Poros Engkol	103
5.2.	Analisis Teoritik Tegangan dan Regangan yang Terjadi di Poros Engkol	104

5.3.	Analisis Teoritik <i>Modal Analysis</i> Poros Engkol	106
5.4.	Analisis Teoritik Kerusakan Dini Bantalan Poros Engkol	107
5.5.	Experimentasi Pengukuran Frekuensi Alami dengan Metode <i>Bump Test</i>	109
5.6.	Eksperimentasi Pengukuran Vibrasi pada Saat Unit Beroperasi	111
5.7.	Analisis <i>Finite Element</i> Poros Engkol	116
5.7.1.	Geometri Poros Engkol	116
5.7.2.	Analisis Metode Element Hingga dengan ANSYS 16.0	117
5.8.	Analisis Teoritik Kegagalan	122
5.9.	Hasil dan Pembahasan	123
<b>BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN</b>		126
6.1.	Kesimpulan	126
6.2.	Saran	127
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		128
<b>LAMPIRAN</b>		130

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Kerangka Konsep	4
Gambar 2.1	<i>Boundary condition applied to crankshaft</i>	12
Gambar 2.2	Diagram <i>Pressure – Crankshaft Angle</i>	13
Gambar 2.3	Variasi gaya sudut poros engkol dengan kecepatan 3000 RPM	13
Gambar 2.4	Tegangan <i>Von-Mises</i> di poros engkol	14
Gambar 3.1	Siklus motor bakar pada mesin 4 langkah	26
Gambar 3.2	Diagram P – V siklus aktual motor bensin	28
Gambar 3.3	Diagram P – V Siklus Otto (Siklus Volume Konstan)	28
Gambar 3.4	<i>Crankshaft</i>	29
Gambar 3.5	Bagian – bagian <i>Crankshaft</i>	32
Gambar 3.6	Geometri Piston dan Silinder	32
Gambar 3.7	Mekanisme <i>slider</i> engkol	36
Gambar 3.8	Massa model untuk massa berosilasi dan massa berputar	37
Gambar 3.9	Gaya – gaya yang bekerja pada mekanisme poros engkol	38
Gambar 3.10	Torsi yang dihasilkan dari proses pembakaran	39
Gambar 3.11	Torsi yang dihasilkan dari gerak piston untuk mesin satu silinder	40
Gambar 3.12	Gaya – gaya yang bekerja pada piston	40
Gambar 3.13	Free body diagram pada <i>crank</i> dalam koordinat umum	41
Gambar 3.14	Diagram Tegangan Regangan	42
Gambar 3.15	Gaya Geser	45
Gambar 3.16	Perubahan bentuk akibat gaya Tarik & Tekan	45
Gambar 3.17	Gerak harmonik sebagai proyeksi suatu titik yang bergerak pada lingkaran	51
Gambar 3.18	Sistem pegas massa dan diagram benda bebas	53
Gambar 3.19	Sistem yang teredam karena kekentalan dengan eksitasi harmonik	54
Gambar 3.20	Getaran torsi	56

Gambar 3.21	Karakteristik sinyal statik dan dinamik	59
Gambar 3.22	Hubungan <i>data time domain</i> dengan <i>frequency domain</i>	60
Gambar 3.23	Konstruksi bantalan	61
Gambar 3.24	Jenis – jenis <i>misalignment</i> poros (a) parallel, (b) angular	64
Gambar 3.25	Tren kenaikan amplitudo getaran akibat kerusakan komponen	65
Gambar 3.26	Grafik kombinasi titik – titik tegangan maksimum	66
Gambar 3.27	Energi regangan yang tersimpan pada elemen terdefleksi	67
Gambar 3.28	Grafik representasi TED dalam keadaan tegangan 2 dimensi	68
Gambar 3.29	Grafik batas aman Von Mises	69
Gambar 3.30	Grafik <i>maximum normal stress</i>	70
Gambar 3.31	<i>Stress</i> tiga dimensi pada sebuah elemen	80
Gambar 4.1	Diagram alir penelitian	84
Gambar 4.2	Mesin Honda C70 yang akan diuji	87
Gambar 4.3	Metode penelitian bump test	89
Gambar 4.4	<i>Bode plot</i>	90
Gambar 4.5	<i>Polar plot</i>	90
Gambar 4.6	Proses <i>bump test</i>	91
Gambar 4.7	Nilai waktu dan frekuensi yang dihasilkan uji <i>impact</i>	92
Gambar 4.8	<i>Set up</i> Pengujian getaran mesin	93
Gambar 4.9	Metode Pengujian Getaran Mesin	95
Gambar 4.10	<i>Assembly</i> Poros engkol Honda C70 dengan Inventor 2017	96
Gambar 4.11	Metode analisis Finite Element dengan ANSYS 16.0	97
Gambar 4.12	Hasil <i>Modal Analysis</i> dengan menggunakan ANSYS 16.0	98
Gambar 4.13	Hasil <i>Stress Analysis</i> dengan menggunakan ANSYS 16.0	98
Gambar 5.1	Geometri mekanisme engkol lurus	100
Gambar 5.2	Kinematika pergerakan piston	101
Gambar 5.3	Bantalan Pendukung Poros Engkol Honda C70	107
Gambar 5.4	Spektrum <i>bump test</i>	110
Gambar 5.5	Pengukuran getaran pada posisi horizontal	112
Gambar 5.6	Pengukuran getaran pada posisi vertikal	113

Gambar 5.7	Pengukuran getaran pada posisi <i>Horz peakvue</i>	114
Gambar 5.8	Pengukuran getaran pada posisi Axsial	115
Gambar 5.9	Hasil pengukuran vibrasi pada saat unit beroperasi	116
Gambar 5.10	Geometri poros engkol dengan Inventor 2017	116
Gambar 5.11	<i>Meshing</i> poros engkol	118
Gambar 5.12	Hasil FEA Tegangan Von Mises	118
Gambar 5.13	Hasil FEA Regangan	119
Gambar 5.14	Variasi <i>mesh size</i> dengan analisis tegangan Von Mises	120
Gambar 5.15	Tegangan Von Mises dari <i>element mesh size</i> yang terkecil	120
Gambar 5.16	<i>Strain</i> untuk <i>element size mesh</i> 0,45	121
Gambar 5.17	Hasil FEA <i>Modal Analysis</i>	122

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan respon frekuensi modal dan langsung	10
Tabel 2.2	Frekuensi alami dari poros engkol dalam satuan Hz	10
Tabel 2.3	Tegangan Von Mises pada Poros Engkol	14
Tabel 2.4	Perbandingan dengan penelitian sebelumnya	21
Tabel 3.1	Beberapa harga Modulus Young (E) dari bahan teknik	44
Tabel 3.2	Harga <i>Possion Ratio</i> ( $\nu$ ) beberapa material	46
Tabel 3.3	Faktor keamanan beberapa material	47
Tabel 4.1	<i>Material Properties Carbon Steel 1065</i>	87
Tabel 5.1	Spesifikasi mesin Honda C70	99
Tabel 5.2	Dimensi poros engkol	99
Tabel 5.3	Analisis teoritis kinematika dan tegangan	105
Tabel 5.4	Analisis teoritis frekuensi alami poros engkol	106
Tabel 5.5	Spesifikasi teknis <i>bearing 6304</i>	107
Tabel 5.6	Peralatan yang digunakan untuk <i>bump test</i>	109
Tabel 5.7	Hasil Pengukuran <i>Bump Test CSI 2130 Machinery Heath Analyzer</i>	110
Tabel 5.8	Putaran kritis dari hasil pengukuran <i>bump test</i>	111
Tabel 5.9	Pengukuran getaran mesin beroperasi pada radial horizontal	111
Tabel 5.10	Pengukuran getaran mesin beroperasi pada radial vertikal	112
Tabel 5.11	Pengukuran getaran mesin beroperasi pada radial <i>horz peakvue</i>	113
Tabel 5.12	Pengukuran getaran mesin beroperasi pada <i>axial</i>	114
Tabel 5.13	<i>Material properties carbon steel 1065</i>	117
Tabel 5.14	Tegangan Von Mises terhadap variasi <i>mesh size</i>	119
Tabel 5.15	Regangan terhadap variasi <i>mesh size</i>	121
Tabel 5.16	Hasil modal analysis dengan ANSYS 16.0	122
Tabel 5.17	Tegangan Von Mises antara analisis teoritik dan FEA	123

Tabel 5.18	Regangan antara analisis teoritik dan FEA	124
Tabel 5.19	<i>Natural Frequency</i> antara analitik, eksperimen dan FEA	124
Tabel 5.20	Frekuensi cacat FTF eksperimen dan Teoritik	125

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	<i>Young Modulus</i>	130
Lampiran 2	<i>Yield Tensile Stress and Tensile Strength</i>	131
Lampiran 3	<i>Density</i>	132
Lampiran 4	<i>Young Modulus – Density</i>	133
Lampiran 5	<i>Strength - Density</i>	134
Lampiran 6	<i>Young Modulus - Density</i>	135
Lampiran 7	<i>Definition of stress concentration factors in crankshaft fillets</i>	136
Lampiran 8	<i>Stress concentration factors and stress distribution at the edge of oil drilling</i>	137
Lampiran 9	<i>Bearing Specification</i>	138
Lampiran 10	<i>Bearing frequency</i>	139