

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PERSETUJUAN	
PERNYATAAN	
PRAKATA	
DAFTAR ISI	
DAFTAR TABEL	
DAFTAR GAMBAR	
DAFTAR LAMPIRAN	
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	
INTISARI DAN ABSTRACT	
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Permasalahan	1
1.2 Perumusan Masalah	6
1.3 Keaslian Penelitian	7
1.4 Tujuan Penelitian	13
1.5 Manfaat Penelitian	14
1.6 Batasan Masalah	14
1.7 Sistematika Penulisan	15
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	16
2.1 Karakteristik <i>Knock</i>	16
2.2 Pengolahan Sinyal Untuk Deteksi dan Identifikasi <i>Knock</i>	24
2.3 Teori Pendukung Pengolahan Sinyal	31
2.3.1 Tapis Aktif Analog	31
2.3.2 Tapis Transformasi Diskrit <i>Wavelet</i>	35
2.3.3 Analisis Fungsi Amplop	40

2.3.4	Regresi	41
2.3.5	Fungsi Ketetapan	45
2.4.	Waktu Pengapian Optimum	47
<b>BAB 3</b>	<b>METODE PENELITIAN</b>	<b>52</b>
3.1	Alat Penelitian dan Penyetelan	53
3.2	Pengambilan Data Suara	55
3.3	Pengolahan Data Rekaman Suara	61
3.3.1	Pengolahan Data Rekaman Sensor Berbeda	62
3.3.2	Pengolahan Data Rekaman Mesin Berbeda	62
3.3.3	Pengolahan Data Spektral	62
3.3.4	Pengolahan Data Dengan Tapis Berbeda	63
3.4.	Pengolahan Data Deteksi dan Indetifikasi <i>Knock</i>	63
3.4.1	Proses Penapisan dan Penggabungan Sinyal	65
3.4.2	Proses <i>Sampling</i>	66
3.4.3	Proses <i>Windowing</i>	67
3.4.4	Proses Pembuatan Fungsi Amplop	68
3.4.5	Proses Pembuatan Fungsi Regresi	68
3.4.6	Pola Referensi <i>Knock</i>	69
3.4.7	Klasifikasi Pola <i>Knock</i>	72
3.5	Penetapan Keputusan <i>Knock</i>	74
3.6	Prosedur Penelitian Karakteristik Kinerja Mesin	75
3.7	Penyusunan Peta KL-MBT	76
<b>BAB 4</b>	<b>HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN</b>	<b>79</b>
4.1	Hasil Perekaman Dengan Sensor Berbeda	79
4.2	Hasil Rekaman Suara Mesin Mobil Berbeda	81
4.3	Hasil Analisis Spektral	89
4.4	Hasil Penapisan	90
4.5	Hasil Proses <i>Sampling</i>	92



4.6 Hasil Proses <i>Windowing</i>	94
4.7 Hasil Fungsi Amplop dan Regresi	100
4.8 Hasil Penetapan Keputusan	106
4.9 Hasil Penelitian Karakteristik Mesin	113
4.10 Hasil Karakteristik Sudut Pengapian	118
4.11 Hasil Karakteristik Mesin Pengapian Optimum	126
4.12 Hasil Peningkatan Kinerja Mesin	130
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	135
DAFTAR PUSTAKA	137
LAMPIRAN	L-1
RINGKASAN	

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Daftar Penelitian yang Tersedia	7
Tabel 1.2. Rekapitulasi pustaka deteksi dan identifikasi knock	12
Tabel 4.1. Rangkuman hasil perekaman suara mesin	88
Tabel 4.2. Tingkat keberhasilan proses identifikasi <i>knock</i> .	113
Tabel 4.3. Peta sudut pengapian optimum	126
Tabel 4.4. Analisis peningkatan daya	131
Tabel 4.5. Analisis peningkatan efisiensi mesin	133

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Pengaruh sudut <i>crank</i> pada tekanan silinder untuk berbagai sudut pengapian ( <i>spark advance</i> ) [1]	1
Gambar 1.2. Torsi relatif vs sudut pengapian [1]	2
Gambar 1.3. Pengaruh sudut pengapian terhadap tekanan ruang bakar : (a) normal, (b) <i>knock</i> kecil, (c) <i>knock</i> besar [1].	2
Gambar 1.4. Torsi vs sudut pengapian pada berbagai putaran [1]	4
Gambar 2.1. Tahapan kenaikan tekanan vs waktu tunda pembakaran [1].	17
Gambar 2.2. Proses <i>knock</i> terjadi, ledakan yang tak terkendali sebelum waktunya [30]	18
Gambar 2.3. Tekanan silinder vs sudut <i>crank</i> ATC ( <i>after top centre</i> ) [25]	18
Gambar 2.4. Sinyal <i>knock</i> yang ditapis, frekuensi 5 – 10 kHz [25]	19
Gambar 2.5. Spektrum frekuensi tanpa <i>knock</i> , frekuensi tinggi intensitas kecil [16]	19
Gambar 2.6. Spektrum frekuensi terjadi <i>knock</i> , frekuensi tinggi intensitas besar [16]	20
Gambar 2.7. Pola sinyal <i>knock</i> , mirip delta [16]	20
Gambar 2.8. <i>Superimpose</i> sinyal sensor tekanan silinder gelap (hitam) dengan sinyal sensor mikrofon agak terang (abu-abu) [16] .	21
Gambar 2.9. Korelasi sinyal sensor tekanan dan mikrofon [16]	22
Gambar 2.10. Pola sinyal <i>knock</i> , a) tanpa <i>knock</i> (rata), b) terjadi <i>knock</i> [13]	22
Gambar 2.11. Fungsi amplop dari $w_p(t)$ [17]	23
Gambar 2.12. Pencuplikan sinyal getaran tekanan <i>knock</i> [32]	26
Gambar 2.13. Sinyal getaran tekanan yang ditapis saat tanpa dan ada <i>knock</i> [32]	26
Gambar 2.14. Proses pengolahan sinyal pengenalan pola (klas) [22]	27
Gambar 2.15. Sistem tapis	31
Gambar 2.16. Karakteristik LPF ( <i>low pas filter</i> ) [38]	32
Gambar 2.17. Rangkaian tapis pasif RC, lolos frekuensi rendah (LPF) dan	

lolos frekuensi tinggi (HPF)	33
Gambar 2.18. Rangkaian HPF Sallen-Key : op-amp	33
Gambar 2.19. Analisis Bode-plot untuk HPF Sallen-Key	35
Gambar 2.20. Mekanisme sinyal input ditapis ( <i>filter</i> ) pada dekomposisi dan digabungkan kembali pada rekonstruksi [39]	38
Gambar 2.21. Struktur paket <i>discrete wavelet filter bank</i> [40].	39
Gambar 2.22. Struktur <i>discrete wavelet filter bank</i> [40].	39
Gambar 2.23. Ilustrasi fungsi amplop $V(t)$	41
Gambar 2.24. Rangkaian sistem fungsi amplop: sebagai <i>envelope detector</i>	41
Gambar 2.25. Model linier orde 1	42
Gambar 2.26. Hubungan X dan Y a) linier dan b) non linier	43
Gambar 2.27. Fungsi ketetapan linier dari Tou dkk. [41]	45
Gambar 2.28. Fungsi ketetapan linier dari Bishop [42]	45
Gambar 2.29. Jarak dari Y ke $Y_1$	46
Gambar 2.30. Sudut pengapian terbaik (optimum) untuk berbagai angka oktan dan putaran mesin [43]	47
Gambar 2.31. Sudut pengapian yang optimum ( <i>imep Max</i> ) [43]	48
Gambar 2.32. Peta sudut pengapian yang optimum Bosch [44]	49
Gambar 3.1. Bagan alir penelitian	52
Gambar 3.2. Sistem sensor Engine Test Bed (ETB)	53
Gambar 3.3. Struktur konstruksi Engine Test Bed (ETB)	54
Gambar 3.4. Pusat kendali (konsol) Engine Test Bed (ETB)	54
Gambar 3.5. Alat perekaman data	55
Gambar 3.6. Proses perekaman suara mesin	56
Gambar 3.7. Diagram sistem perekaman suara mesin	57
Gambar 3.8. Waktu (sudut) pengapian	58
Gambar 3.9. Pengukuran sudut pengapian	58
Gambar 3.10. Proses perekaman suara <i>knock</i>	59
Gambar 3.11. Proses pengolahan data eksperimen	60
Gambar 3.12. Proses pengolahan data	61
Gambar 3.13. Proses deteksi dan identifikasi <i>knock</i>	64



Gambar 3.14. Proses penapisan dan penggabungan dengan sinyal pengapian	65
Gambar 3.15. Proses <i>sampling</i> dan penggabungan (penumpang)an)	66
Gambar 3.16. Proses <i>windowing</i> dan normalisasi	67
Gambar 3.17. Proses pembuatan fungsi amplop	68
Gambar 3.18. Pembuatan fungsi regresi	69
Gambar 3.19. Analisis polinomial knock berdasarkan pola Zatik	69
Gambar 3.20. Pola <i>knock</i> intensitas besar / kecil.	71
Gambar 3.21. Proses translasi (pergeseran).	72
Gambar 3.22. Kalkulasi jarak terhadap referensi	73
Gambar 3.23. Proses klasifikasi pola sinyal <i>knock</i>	73
Gambar 3.24. Proses identifikasi <i>knock</i>	74
Gambar 3.25. Prosedur penelitian karakteristik mesin pada setelan tertentu	75
Gambar 3.26. Proses pembuatan peta sudut pengapian optimum (KL-MBT)	76
Gambar 4.1. Rekaman pola getaran mesin dengan sensor akselerometer	79
Gambar 4.2. Rekaman pola getaran mesin dengan sensor mikrofon	80
Gambar 4.3. Hasil rekaman suara mesin mobil A dan tapisannya	82
Gambar 4.4. Hasil rekaman suara mesin mobil B dan tapisannya	84
Gambar 4.5. Hasil rekaman suara mesin mobil C dan tapisannya	85
Gambar 4.6. Hasil rekaman suara mesin mobil D dan tapisannya	87
Gambar 4.7. Analisis spektral dari sinyal suara mesin	89
Gambar 4.8. Hasil penapisan dengan DWT dan HPF	91
Gambar 4.9. Pembuatan sampel	93
Gambar 4.10. Proses <i>windowing</i> dari Sampel-05, Eksperimen I (tanpa <i>knock</i> )	94
Gambar 4.11. Rincian proses <i>windowing</i> (tanpa <i>knock</i> )	95
Gambar 4.12. Proses <i>windowing</i> dari Sampel-07, Eksperimen II (terjadi <i>knock</i> )	97
Gambar 4.13. Rincian proses <i>windowing</i> (terjadi <i>knock</i> )	98
Gambar 4.14. Pembentukan fungsi amplop eksperimen I (tanpa <i>knock</i> )	100
Gambar 4.15. Rincian proses pembuatan fungsi amplop dan regresi (tanpa <i>knock</i> )	101
Gambar 4.16. Pembentukan fungsi amplop eksperimen II (terjadi <i>knock</i> )	102
Gambar 4.17. Rincian proses pembuatan fungsi amplop dan regresi (terjadi <i>knock</i> )	103



Gambar 4.18. Pembentukan fungsi amplop eksperimen III (tanpa <i>knock</i> )	104
Gambar 4.19. Pembentukan fungsi amplop eksperimen IV (terjadi <i>knock</i> )	105
Gambar 4.20. Rincian total jarak (bukan pola <i>knock</i> )	107
Gambar 4.21. Penetapan keputusan eksperimen I (tanpa <i>knock</i> )	108
Gambar 4.22. Rincian total jarak (pola <i>knock</i> )	109
Gambar 4.23. Penetapan keputusan eksperimen II (terjadi <i>knock</i> )	110
Gambar 4.24. Penetapan keputusan eksperimen III (tanpa <i>knock</i> )	111
Gambar 4.25. Penetapan keputusan eksperimen IV (terjadi <i>knock</i> )	112
Gambar 4.26. Karakteristik daya vs putaran pengapian normal (standar)	114
Gambar 4.27. Karakteristik torsi vs putaran pengapian normal (standar)	115
Gambar 4.28. Karakteristik BSFC vs putaran pengapian normal (standar)	115
Gambar 4.29. Karakteristik sudut pengapian vs putaran pengapian normal	116
Gambar 4.30. Karakteristik daya vs sudut pengapian (standar)	116
Gambar 4.31. Karakteristik torsi vs sudut pengapian (standar)	117
Gambar 4.32. Karakteristik BSFC vs sudut pengapian (standar)	118
Gambar 4.33. Karakteristik sudut pengapian dengan setelan mundur 3D.	119
Gambar 4.34. Sudut pengapian vs <i>throttle</i> pada setelan mundur	119
Gambar 4.35. Sudut pengapian vs putaran pada setelah mundur	120
Gambar 4.36. Karakteristik sudut pengapian dengan setelan normal (standar) 3D	120
Gambar 4.37. Sudut pengapian vs <i>throttle</i> pada setelan normal	121
Gambar 4.38. Sudut pengapian vs putaran pada setelan normal	121
Gambar 4.39. <i>Knock</i> pada torsi vs sudut pengapian pada berbagai putaran pada bukaan <i>throttle</i> 60 %.	122
Gambar 4.40. Karakteristik batas maksimum sudut pengapian 3D.	123
Gambar 4.41. Sudut pengapian vs <i>throttle</i> pada batas maksimum	123
Gambar 4.42. Sudut pengapian vs putaran pada batas maksimum.	124
Gambar 4.43. Karakteristik sudut pengapian optimum 3D	125
Gambar 4.44. Sudut pengapian optimum vs <i>throttle</i> pada berbagai putaran.	125
Gambar 4.45 Sudut pengapian optimum vs putaran pada berbagai bukaan <i>throttle</i> .	126
Gambar 4.46. Karakteristik daya pada sudut pengapian optimum.	128
Gambar 4.47. Karakteristik torsi pada sudut pengapian optimum.	129



- Gambar 4.48. Karakteristik BSFC pada sudut pengapian optimum. 129
- Gambar 4.49. Perbandingan torsi dan daya pada throttle 65% dan variasi pengapian 130
- Gambar 4.50. Perbandingan BSFC pada throttle 60% dan variasi pengapian 132

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran - 1 – Hasil Analisis Spektral	L-1
Lampiran - 2- Hasil Analisis Penapisan	L-17
Lampiran - 3 – Proses <i>Sampling</i>	L-33
Lampiran - 4 - Proses Windowing, Fungsi Amplop dan Regresi	L-49
Lampiran - 5 – Proses Kalkulasi Total Jarak	L-69

## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

### 1. Lambang

A = luas

C = kapasitansi

c = panas jenis

f = frekuensi

E = tegangan

G = perbesaran

H = enthalpy

I = arus

L = induktansi

m = massa

n = putaran

P = daya

p = tekanan

Q = aliran panas

R = resistansi

$\mathcal{R}$  = konstanta gas

T = suhu

t = waktu

U = energi internal

V = voltase, tegangan

v = volume

W = usaha

$\delta$  = sudut pengapian

$\eta$  = efisiensi

$\theta$  = sudut

$\rho$  = kerapatan

$\omega$  = kecepatan sudut

$\mu$  = perbesaran

## 2. Singkatan

ARMA	= <i>auto regressive moving average</i>
ADC	= <i>analog to digital converter</i>
AFR	= <i>air fuel ratio</i>
BDC	= <i>bottom dead centre</i>
BFT	= <i>best first tree</i>
BPF	= <i>band pass filter</i>
CAD	= <i>crank angle degrees</i>
CAIE	= <i>controlled auto-ignition engine</i>
CDI	= <i>condenser discharge ignition</i>
CR	= <i>compression ratio</i>
CWT	= <i>continuous wavelet transform</i>
DFT	= <i>discrete fourier transform</i>
DKI	= <i>difference of knock intensity</i>
DSO	= <i>digital signal oscilloscope</i>
DWT	= <i>dicrete wavelet transform</i>
ECU	= <i>engine control unit</i>
ETB	= <i>engine test bed</i>
FFT	= <i>fast fourier transform</i>
FLIC	= <i>fuzzy logic ignition controller</i>
HCCI	= <i>homogeneous charge compression ignition</i>
HPF	= <i>high pass filter</i>
IMEP	= <i>indicated mean effectivePressure</i>
KI	= <i>knock intensity</i>
KL-MBT	= <i>knock limited maximum best torque</i>
KSW	= <i>knock sensitive window</i>
LES	= <i>large eddy simulation</i>

LKI	= <i>logarithmic knock intensity</i>
LMT	= <i>linear model tree</i>
LPF	= <i>low pass filter</i>
MAP	= <i>manifold absolute pressure</i>
MAPO	= <i>maximum amplitude of pressure oscillations</i>
MBT	= <i>maximum best torque</i>
MEP	= <i>mean effective pressure</i>
MISO	= <i>multiple input single output</i>
MPRA	= <i>maximum pressure rise acceleration</i>
MPRR	= <i>maximum pressure rise rate</i>
MRA	= <i>multi resolution analysis</i>
MW	= <i>molecule weight</i>
ON	= <i>octan number</i>
PID	= <i>proposional-integral-differensial</i>
RCM	= <i>rapid compressed machine</i>
RFT	= <i>random forest tree</i>
RMW	= <i>real mother wavelet</i>
RON	= <i>research octane number</i>
RSE	= <i>residual standart error</i>
RSS	= <i>residual sum of squares</i>
SE	= <i>standart error</i>
SISO	= <i>single input single output</i>
SPWVD	= <i>smoothed pseudo wigner-ville distribution</i>
STFT	= <i>short time fourier transform</i>
TDC	= <i>top dead centre</i>
TJ	= total jarak
TMA	= titik mati atas
TMB	= titik mati bawah
uC	= <i>microcontroller</i>
VDWL	= <i>variable detection window length</i>
VVT	= <i>varible valve timing</i>



UNIVERSITAS  
GADJAH MADA

**DETEKSI DAN IDENTIFIKASI KNOCK UNTUK MERANCANG PETA WAKTU PENGAPIAN OPTIMUM  
PADA MOTOR BAKAR OTTO**

AUGUSTINUS SUJONO, IR, MT, Ir. Oyas Wahyunggoro, MT, Ph.D.; Ir. R. Soekrisno, MSME, Ph.D.; Eka Firmansyah  
Universitas Gadjah Mada, 2016 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

WFT = *windowed fourier transform*

WPT = *wavelet packet transformation*