



UNIVERSITAS INDONESIA

**Penentuan Kerusakan Dini pada Elemen Mesin Dinamis
Bantalan Gelinding Melalui Deteksi Sinyal Penjalaran
Gelombang Tegangan Frekuensi Tinggi**

DISERTASI

WAHYU NIRBITO

8405000088

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM DOKTOR (S3) TEKNIK MESIN**

**DEPOK
Juli 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**Penentuan Kerusakan Dini pada Elemen Mesin Dinamis
Bantalan Gelinding Melalui Deteksi Sinyal Penjalaran
Gelombang Tegangan Frekuensi Tinggi**

DISERTASI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
gelar Doktor dalam ilmu Teknik Mesin**

WAHYU NIRBITO

8405000088

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM DOKTOR (S3) TEKNIK MESIN**

**DEPOK
Juli 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.



Nama : Wahyu Nirbito

NPM : 8405000088

Tanggal : 12 Juli 2011

Tanda Tangan:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Wahyu Nirbito', is written over the 'Tanda Tangan:' label. To the right of the signature, there is a horizontal line.

HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :

Nama : Wahyu Nirbito

NPM : 8405000088

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Disertasi : PENENTUAN KERUSAKAN DINI PADA ELEMEN MESIN DINAMIS BANTALAN GELINDING MELALUI DETEKSI SINYAL PENJALARAN GELOMBANG TEGANGAN FREKUENSI TINGGI

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN / TIM PENGUJI

Promotor : Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M. Eng

Kopromotor : Prof. Dr. Ir. Bambang Suryawan, MT

Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA

Anggota : Prof. Dr. Ir. I Made Kartika D., Dipl. Ing.

Dr. Ir. Bambang Daryanto, MSME

Dr. Ir. Ganjar Kiswanto, M. Eng.

Dr. Ir. Winarto, M. Eng.

Ditetapkan di : UI - Depok

Tanggal : 12 Juli 2011

KATA PENGANTAR / UCAPAN TERIMA KASIH

Puji Syukur saya panjatkan kepada Yang Maha Kuasa Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan disertasi ini. Penulisan disertasi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa awal program S3 dimulai sampai pada penyusunan disertasi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan disertasi ini. Oleh karena itu, saya menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

- 1) Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M. Eng, selaku Promotor dan Dekan FTUI yang telah menyediakan waktu, tenaga, pikiran dan kepemimpinannya untuk mengarahkan saya menyelesaikan program S3 dan penyusunan disertasi ini;
- 2) Prof. Dr. Ir. Bambang Suryawan, MT dan Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA, selaku Kopromotor yang dengan sabar dan penuh pengertian dalam mengarahkan serta membimbing saya menyelesaikan disertasi ini;
- 3) Prof. Dr. Andy Tan dan Prof. Dr. Joe Mathew dari School of Mechanical and Biomedical Engineering - Queensland University of Technology (QUT) di Brisbane Australia, yang telah membimbing, membuka wawasan, memberikan pencerahan dan membagi ilmunya terutama mengenai Vibration Monitoring and Analysis, serta memberikan kesempatan seluas-luasnya kepada saya untuk menggunakan segala fasilitas dari Dynamics and Vibration laboratory di QUT untuk penelitian yang saya lakukan;
- 4) Para seluruh anggota Dewan/Tim Penguji dan khususnya Dr. Ir. Bambang Daryanto, MSME dari Departemen Teknik Mesin ITS Surabaya, yang telah menyediakan waktu, tenaga, pikiran serta masukan-masukan kepada saya untuk menyelesaikan disertasi ini;
- 5) Para mantan Dekan FTUI yaitu Ir. Boy Mewengkang, Ir. Indradjid Soebardjo, MM (alm.), Ir. Todung Barita L.R., M.Sc. (alm.), Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, MSEE, Prof. Dr. Ir. Budi Susilo S., DEA dan Prof. Dr. Ir. Rinaldi Dalimi, MSEE yang telah terus-menerus mendorong dan memberikan semangat untuk saya menyelesaikan program S3;

- 6) Para guru, senior, sahabat serta sejawat di Universitas Indonesia dan Fakultas Teknik UI pada umumnya, dan di Departemen Teknik Mesin khususnya yang telah memberikan dorongan semangat tidak henti-hentinya serta bantuan baik moril maupun materiil untuk saya menyelesaikan disertasi ini;
- 7) Keluarga, yaitu orangtua dan mertua (almarhum dan almarhumah) tercinta, istri dan anak-anak tercinta serta kakak-kakak dan adik-adik tersayang, yang telah memberikan doa, dukungan moral dengan penuh pengertian dan kesabaran untuk saya menyelesaikan program S3.

Akhir kata, saya memohon kepada Allah SWT, Tuhan Yang Maha Kuasa, berkenan membalas segala budi baik dan bantuan semua pihak yang tidak mampu saya sebutkan seluruhnya satu-persatu. Semoga disertasi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di tanah air serta memberikan manfaat bagi kemajuan negara dan bangsa.

Kampus UI – Depok, 12 Juli 2011

Penulis,

(Ir. Wahyu Nirbito, MSME)

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

DISERTASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Wahyu Nirbito

NPM : 8405000088

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Disertasi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

PENENTUAN KERUSAKAN DINI PADA ELEMEN MESIN DINAMIS BANTALAN GELINDING MELALUI DETEKSI SINYAL PENJALARAN GELOMBANG TEGANGAN FREKUENSI TINGGI

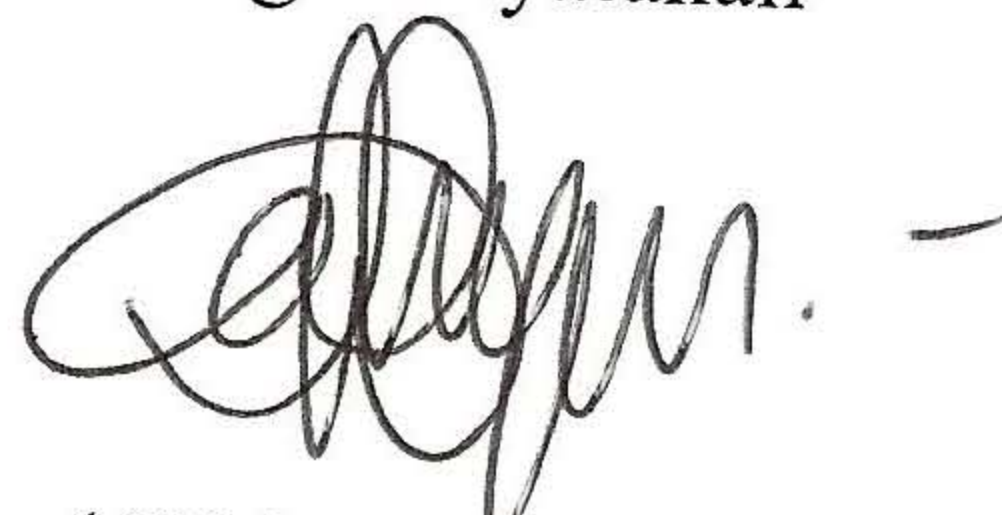
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan disertasi saya selama tetap menantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Kampus UI – Depok

Pada tanggal : 12 Juli 2011

Yang menyatakan



(Wahyu Nirbito)

ABSTRAK

Nama : Wahyu Nirbito
Program Studi : Teknik Mesin - FTUI
Judul : Penentuan Kerusakan Dini pada Elemen Mesin Dinamis Bantalan Gelinding Melalui Deteksi Sinyal Penjalaran Gelombang Tegangan Frekuensi Tinggi

Dalam riset ini dikembangkan satu teknik baru untuk mendeteksi kerusakan dini pada satu elemen mesin dinamis, yaitu suatu bantalan gelinding. Dengan menggunakan bantalan gelinding sebagai benda uji elemen mesin, ternyata teknik baru yang dikembangkan tersebut bekerja dengan sangat baik sebagaimana yang diharapkan. Tahapan-tahapan eksperimen telah dilakukan dari percobaan simulasi computer sampai percobaan-percobaan simulasi langsung nyata (*real-time*). Eksperimen-eksperimen dalam penelitian ini terdiri dari pengembangan suatu rancangan khusus sensor AE, sekalian dengan pengembangan metode pemrosesan sinyal yang mampu menampilkan kembali sinyal asli AE dari ketertutupannya oleh sinyal-sinyal pengotor (*noise*) yang menyembunyikannya. Sinyal AE tersebut mempunyai frekuensi yang sangat tinggi, tetapi dengan amplitude yang sangat rendah sehingga sulit dideteksi secara langsung karena terkubur didalam sinyal-sinyal pengotor lainnya. AE, *Acoustic Emissions*, adalah gelombang tegangan yang menjalar sebagai emisi akustik walaupun tidak ada hubungannya sama sekali dengan suara. Sensor-sensor rancangan khusus dikembangkan terlebih dahulu, dan kemudian metode-metode pemrosesan sinyal diteliti secara luas sampai ditemukan satu metode yang paling efektif dan cukup efisien. Metode pemrosesan sinyal yang terpilih tersebut dimodifikasi dan disesuaikan lagi agar cocok dengan penggunaan dan persyaratan dari sistem deteksi yang dikembangkan. Dengan kemampuan untuk mendeteksi penjalaran gelombang tegangan, maka kerusakan dini pada elemen mesin dinamis dapat ditentukan. Ini adalah dikarenakan bahwa pada kondisi saat-saat sangat awal yang kemudian tumbuhnya keretakan, bahan dari elemen mesin mengalami regangan sehingga melepaskan energi regangan tersebut dengan sangat cepat dengan membangkitkan gelombang-gelombang tegangan. Gelombang-gelombang tegangan ini akan menjalar ke semua arah dengan bentuk yang sama dengan gelombang suara, yaitu bentuk gelombang-gelombang Raleigh atau bentuk gelombang P longitudinal.

Kata-kata kunci: getaran/vibrasi, emisi akustik, pemantauan kondisi, perawatan prediktif, pemrosesan sinyal, kerusakan dini

ABSTRACT

Name : Wahyu Nirbito

Study Program : Mechanical Engineering - FTUI

Title : *Determination of Incipient Failure on Dynamics Machine Element – Rolling Elements Bearing by Detection of High Frequency Stress Waves Signals Propagation*

The development of a new technique to detect incipient damage in a dynamic machine component, i.e. rolling elements bearing, had been done in this research. By using a rolling element bearing as the machine component test object, it was revealed that this new developed technique performed quite well as expected. Experimental stages had been done from computer simulation to real time simulation tests. The experimental research consisted of the development of the special design AE sensor, as well as the development of the signal processing method that enhanced the AE signal out of the corrupting noise signals. The AE were very high frequency, but with very low amplitude that difficult to detect directly since they were burried under other noise signals. The stress waves were called as Accoustic Emissions (AE) even had nothing to do with sound. Special design sensors were developed first and then signal-processing methods were studied extensively. The chosen method was modified and adjusted in order to suit the requirements of the detection system. By the ability to detect the stress waves, the incipient failure of the dynamic machine component could be determined. This was dued to the conditions that at the beginning of the failure, and then in the crack growth, material were strained and would release its strain energy very quick which were generating stress waves. These stress waves were propagating to all direction with a same type of wave with the sound wave, i.e. Raleigh or longitudinal P waves.

Keywords: vibration, Accoustic Emissions, condition monitoring, predictive maintenance, signal processing, incipient damage

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

PERNYATAAN ORISINALITAS	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR NOTASI.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.1.1. Kebutuhan Mengetahui Kerusakan Sedini Mungkin	1
1.1.2. Deteksi Sinyal Kerusakan Dini.....	2
1.2. Perumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Manfaat dan Kontribusi Penelitian.....	7
1.5. Batasan Penelitian	8
1.6. Model Operasional Penelitian	9
1.7. <i>Roadmap</i> Penelitian.....	11
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	13
2.1. Pemantauan Kondisi dan Diagnosa Kerusakan Mesin FTUI.....	13
2.2. Sinyal Frekuensi Tinggi dari Kerusakan Dini Bantalan	21
2.3. Sensor Emisi Akustik Piezo keramik	24
2.4. Teknik Pemrosesan Sinyal.....	26
2.5. Teori dan Aplikasi <i>Blind Deconvolution</i>	37
2.6. Perkembangan Terakhir	39
3. METODE PENELITIAN	44
3.1. Tahapan Penelitian	44

viii

3.2. Pengembangan Sensor AE	46
3.2.1. Deteksi AE (Emisi Akustik)	46
3.2.2. Pengembangan Sensor Emisi Akustik	51
3.3. Pengembangan Pemrosesan Sinyal Dijital.....	57
3.3.1. Sinyal Dijital	57
3.3.2. Pemrosesan Sinyal Dengan <i>Blind Deconvolution</i>	59
3.3.3. Metode <i>Blind Deconvolution</i>	63
3.3.4. Algoritma Metode <i>Blind Deconvolution</i> Pendekatan EVA	67
3.3.5. Parameter Parameter Pemrosesan Sinyal	73
3.3.6. Modifikasi dan Optimasi Metode <i>Blind Deconvolution</i>	74
3.4. Pengembangan Rig Uji	81
3.4.1. Rig Uji Simulasi.....	81
3.4.2. Rig Uji Kondisi Sesungguhnya	85
3.5. Uji Coba Sesungguhnya (<i>Real Time</i>)	86
4. PEMBAHASAN	88
4.1. Kinerja Rancangan Sensor AE	88
4.2. Kinerja Algoritma <i>DSP</i> Metode <i>Blind Deconvolution</i>	90
4.3. Kinerja Teknik Deteksi kerusakan Dini Komponen Mesin Dinamis dengan Deteksi Gelombang Tegangan atau AE (<i>Acoustic Emissions</i>)	98
5. KESIMPULAN.....	108
DAFTAR PUSTAKA	112
LAMPIRAN	129

DAFTAR GAMBAR

Judul Gambar	Hal:
Gambar 1. Peta jalan (<i>roadmap</i>) penelitian penentuan kerusakan dini pada komponen mesin	11
Gambar 2.1. Diagram blok proses iterasi metode <i>Blind Deconvolution</i>	38
Gambar 2.2. Hasil hasil penelitian yang berkaitan dengan deteksi gelombang AE tahun 2000 - 2004	43
Gambar 2.3. Hasil hasil penelitian yang berkaitan dengan deteksi gelombang AE tahun 2005 - 2010	43
Gambar 3.1. Sistem massa – pegas pada alat sensor getaran <i>Accelerometer</i>	44
Gambar 3.2. Skema tahapan pekerjaan dan penelitian yang dilaksanakan	46
Gambar 3.3. Bentuk bentuk dislokasi yang terjadi pada batas butir material	47
Gambar 3.4. Terjadinya lapisan lapisan PSB (<i>Persistent Slip Bands</i>) pada material serta timbulnya intrusi dan ekstrusi akibat beban dinamis yang menyebabkan geseran pencetus gelombang tegangan atau AE	48
Gambar 3.5. Bentuk gelombang kontinyu	49
Gambar 3.6. Bentuk gelombang semburan	49
Gambar 3.7. Contoh bentuk gelombang tegangan atau gelombang AE	50
Gambar 3.8. Penjalaran gelombang P, arah longitudinal, dalam benda pejal, gerakannya maju	50
Gambar 3.9. Penjalaran gelombang Rayleigh, biasanya di permukaan, gerakannya naik-turun	51
Gambar 3.10. Penjalaran gelombang tegangan atau gelombang AE dalam material pejal	52
Gambar 3.11. Skema bahan keramik PZT yang akan mengeluarkan arus listrik bila mengalami regangan (<i>strain</i>) akibat gaya gaya luar F	53
Gambar 3.12. Grafik yang menunjukkan prosentase deviasi dari frekuensi pribadi/alamiah dan konstanta piezoelektrik bahan PZT terhadap perubahan temperatur (dengan metode resonansi IEEE)	54
Gambar 3.13. Skema hubungan antara permukaan benda pejal, yang	55

dijalari gelombang tegangan, dengan permukaan bahan PZT yang digunakan sebagai sensor. Gelombang yang menjalar akan diterima dan diikuti oleh bahan PZT tersebut sehingga mengeluarkan arus listrik yang linier terhadap amplitude gelombang tersebut	
Gambar 3.14. Rancangan sensor AE yang dikembangkan dalam penelitian ini yaitu (a) bentuk baut dengan bahan PZT kecil dan (b) bentuk probe dengan bahan PZT besar	55
Gambar 3.15. Rancangan sensor AE bentuk baut dengan struktur dasar baut metrik	56
Gambar 3.16. Rancangan sensor AE bentuk probe untuk meneliti efektivitas penggunaan bahan PZT yang lebih besar dan lebih tebal	57
Gambar 3.17. Diagram dari masukan - keluaran dari istem sinyal digital diskret - waktu	63
Gambar 3.18. Diagram konfigurasi dasar dari proses <i>Blind Deconvolution</i>	64
Gambar 3.19. Diagram penyelesaian <i>Blind Deconvolution</i> yaitu dengan penambahan satu <i>inverse filter FIR</i> yang sejajar sebagai acuan pembangkit nilai koefisien equalizer $e(k)$ dalam proses iterasi agar hasil konvolusinya adalah $x(k) = \text{time - delay}$ dari $d(k)$	66
Gambar 3.20. Diagram proses konvolusi dasar dari sinyal masukan $x(k)$ dengan respons dari sistem impuls $h(k)$	67
Gambar 3.21. Diagram metode <i>Blind Deconvolution</i> dengan penyelesaian <i>Eigen Vector Approach (EVA)</i>	68
Gambar 3.22. Grafik hubungan antara nilai perbandingan sinyal asli terhadap sinyal pengotor (<i>signal to noise ratio</i> , SNR) terhadap tingkat energi sinyal (grafik sebelah kiri) dan terhadap faktor puncak, <i>Crest Factor</i> (grafik sebelah kanan)	76
Gambar 3.23. Grafik hubungan antara prosentase jumlah data yang diproses dengan nilai factor puncak sinyal, <i>Crest Factor</i> , yang dapat terdeteksi	77
Gambar 3.24. Diagram alir dari proses metode pemrosesan sinyal <i>Blind Deconvolution</i> dengan penyelesaian EVA untuk merekonstruksi sinyal asli guna mendeteksi kerusakan dini	80
Gambar 3.25. Diagram sistem pelaksanaan penelitian penentuan kerusakan dini dengan pemrosesan sinyal menggunakan metode <i>Blind Deconvolution</i>	81
Gambar 3.26. <i>Bearing test rig</i> dengan bantalan yang disimulasi kerusakannya dan diberikan sinyal pengotor dari rodagigi serta sinyal dari aktuator PZT	81


Gambar 3.27. Sistem <i>bearing test rig</i> dengan pemasok sinyal pengotor dari rangkaian rodagigi	82
Gambar 3.28. Peralatan ukur yang digunakan yaitu DAQ DAS18 dengan sampling rates 800 kHz - 1 MHz yang terpasang dalam PC dan <i>signal analyzer</i> untuk memantau gelombang tegangan yang terdeteksi oleh sensor AE	82
Gambar 3.29. Lokasi lokasi pemasangan sensor AE dalam percobaan dengan bantalan yang disimulasi kerusakannya dan diberi sinyal pengotor (<i>noise</i>)	83
Gambar 3.30. Penambahan pasokan sinyal pengotor dari beban tidak seimbang (<i>unbalanced force</i>) dan pemantauan getaran dengan <i>accelerometer</i>	84
Gambar 3.31. Percobaan dengan sinyal pengotor (<i>noise</i>) berasal dari beban tidak seimbang dan rangkaian rodagigi dengan pemantuan getaran yang terjadi oleh <i>accelerometer</i>	84
Gambar 3.32. Rumah bantalan yang dirancang khusus untuk percobaan dengan beban dari mesin tekan hidrolik, sensor AE, pemantau getaran <i>accelerometer</i> dan kabel kabel bimetal pengukur temperatur yang terjadi	85
Gambar 3.33. Rumah bantalan yang dirancang khusus untuk percobaan <i>real – time</i>	86
Gambar 3.34. Sistem yang digunakan untuk percobaan <i>real – time</i> terdiri dari alat tekan hidrolik dengan <i>strain gauges</i> pengukur beban penekan, <i>DAQ</i> , <i>Low Pass filter</i> , <i>AE linear filter</i> , <i>oscilloscope</i> , komputer dengan <i>data base</i> serta <i>data analyzer</i> , dan rumah bantalan khusus dimana terpasang <i>sensor AE</i> , <i>accelerometer</i> , <i>bimetal</i> pengukur temperatur	87
Gambar 4.1. Hasil pengukuran dengan <i>Accelerometer B&K 4334</i>	88
Gambar 4.2. Hasil pengukuran dengan sensor AE yang dirancang dan dikembangkan sendiri	88
Gambar 4.3. Hasil pengukuran menggunakan sensor AE probe dengan PZT tipis	89
Gambar 4.4. Hasil pengukuran menggunakan sensor AE probe dengan PZT tebal	89
Gambar 4.5. Sinyal asli dari bantalan yang sengaja dibuat rusak	91
Gambar 4.6. Sinyal bantalan rusak yang ditutup oleh sinyal pengotor (<i>noise</i>) berupa harmonik sinusoidal 500 Hz	92
Gambar 4.7. Hasil rekonstruksi dari sinyal tertutup <i>noise</i> (gambar 4.6.)	92

dengan metode <i>Blind Deconvolution</i>	
Gambar 4.8. Sinyal asli bantalan yang sengaja dirusak tertutup oleh sinyal latar pengotor yang acak (<i>random noise</i>)	93
Gambar 4.9. Hasil rekonstruksi sinyal yang tertutup oleh <i>random noise</i> (gambar 4.8.) ternyata tidak berhasil dengan baik	94
Gambar 4.10. Sinyal bantalan yang sengaja dirusak tertutup oleh 5 frekuensi gelombang harmonik sinusoidal sebagai <i>noise</i>	95
Gambar 4.11. Hasil rekonstruksi sinyal bantalan yang sengaja dirusak yang berhasil menampilkan kembali sinyal asli	95
Gambar 4.12. Sinyal asli bantalan yang sengaja dirusak	96
Gambar 4.13. Sinyal bantalan rusak yang tertutup noise besar dengan SNR = 0,262	97
Gambar 4.14. Sinyal bantalan rusak yang tertutup <i>noise</i> sekedarnya dengan SNR = 0,738	97
Gambar 4.15. Sinyal bantalan rusak hasil rekonstruksi dari SNR = 0,262	98
Gambar 4.16. Sinyal bantalan rusak hasil rekonstruksi dari SNR = 0,738	98
Gambar 4.17. Hasil rekonstruksi sinyal pengukuran pada 70, 80, 100, 105 jam. Sinyal dari komponen uji yang telah direkonstruksi terlihat hanya berupa <i>noise</i> yang merata	99
Gambar 4.18. Hasil rekonstruksi sinyal pengukuran pada 107, 108 jam. Sinyal yang telah direkonstruksi telah berubah bentuk karena telah terjadi kerusakan dini	101
Gambar 4.19. Hasil rekonstruksi sinyal pengukuran pada 109, 110 jam	101
Gambar 4.20. Hasil rekonstruksi sinyal pengukuran pada 111, 114 jam. Sinyal hasil rekonstruksi yang menunjukkan terjadinya Fenomena <i>Strain hardening</i>	103
Gambar 4.21. Hasil rekonstruksi sinyal pengukuran pada 117, 118 jam. Bantalan uji akhirnya rusak di jam operasi ke 118	103
Gambar 4.22. Hasil rekonstruksi sinyal dari pengukuran <i>Accelerometer</i> pada jam ke 107, 108	104
Gambar 4.23. Hasil rekonstruksi sinyal dari pengukuran <i>Accelerometer</i> pada jam ke 109, 110	105
Gambar 4.24. (a) sinyal AE yang tertutup <i>noise</i> terutama dari harmonik gelombang listrik 50 Hz (b) hasil rekonstruksi sinyal dari pengukuran (a)	106

pada jam jam ke 109, 111	
Gambar 4.25. (a) sinyal AE yang tertutup <i>noise</i> terutama dari harmonik gelombang listrik 50 Hz (b) hasil rekonstruksi sinyal dari pengukuran (a) pada jam ke 113, 115	106



DAFTAR NOTASI



AE	= <i>Acoustic Emissions</i> , emisi akustik
EVA	= <i>Eigen Vector Approach</i> , pendekatan vektor Eigen
SNR	= <i>Signal to Noise Ratio</i> , perbandingan sinyal terhadap pengotor
DAQ	= <i>Data Acquisition</i> , pengambilan data
B&K	= Brüel and Kjør
LP	= <i>Low Pass</i> , frekuensi rendah lewat
HP	= <i>High Pass</i> , frekuensi tinggi lewat
FFT	= <i>Fast Fourier Transform</i> , transformasi Fourier cepat
PZT	= <i>Piezoelectric Lead-Zirconate Titanate</i>
PSB	= <i>Persistent Slip Bands</i> , lapisan lapisan geser yang kencang
MSE	= <i>mean square error</i>
FIR	= <i>Finite Impulse Response</i>
RMS	= <i>Root Mean Square</i>
BPFO	= <i>Ball Pass Frequency Outer</i>
BPFI	= <i>Ball Pass Frequency Inner</i>
L	= panjang filter FIR, jumlah koefisien filter FIR
N	= jumlah data <i>sampling</i> diskret
$x(n)$	= sinyal asli diskret
$s(n)$	= sinyal pengotor (<i>noise</i>) diskret

- $y(n)$ = sinyal hasil pengukuran/pengambilan data diskret
- $e(n)$ = koefisien filter FIR, panjang filter
- $f(n)$ = koefisien filter acuan, panjang filter
- $x^{\wedge}(n)$ = sinyal hasil rekonstruksi diskret
- $u(n)$ = sinyal keluaran filter acuan diskret
- C = *cross kurtosis cumulant*, kurtosis silang antara kumulan 2 deret
- R = *autocorrelation cumulant*, otokorelasi antara kumulan 2 deret
- $d(k)$ = sinyal masukan asli diskret yang tidak diketahui
- $h(n)$ = respons impuls diskret dari sistem kanal
- σ = tegangan (*stress*) yang terjadi, N/m^2
- d_{xx} = koefisien arus listrik dari bahan *Piezoelectric*, Coulomb/N
- A = luas permukaan bahan *Piezoelectric*, m^2
- D = vektor perpindahan arus listrik dari bahan *Piezoelectric*, Coulomb/ m^2
- Q = potensi listrik yang dibangkitkan dari bahan *Piezoelectric*, Coulomb

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 :

- Perhitungan umur benda uji bantalan gelinding
- Perhitungan nilai *Ball Pass Frequency Outer* (BPFO) dan *Ball Pass Frequency Inner* (BPFI) benda uji bantalan gelinding

LAMPIRAN 2 :

Program berbasis bahasa pemrograman MATLAB© untuk pemrosesan sinyal digital dengan penyelesaian metode EVA *Blind Deconvolution* yang dimodifikasi dan dioptimasi

LAMPIRAN 3 :

Makalah makalah yang pernah dipublikasikan secara lokal, nasional, regional, maupun internasional yang berintikan kepada penelitian ini.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

1.1.1. Kebutuhan Mengetahui Kerusakan Mesin Sedini Mungkin

Peralatan mesin perlu diusahakan untuk dapat bekerja selama mungkin agar kapasitas produksinya dapat digunakan sepenuhnya. Usaha ini membutuhkan pemantauan terhadap kondisi komponen-komponennya secara menerus agar bisa didapat tanda awal bila komponen mesin tersebut mulai rusak. Walaupun sudah diketahui metode perhitungan empiris untuk memperkirakan umur kerja satu komponen mesin, tetap saja kerusakan dini pada komponen mesin masih bisa terjadi secara mendadak yang dapat menyebabkan kerusakan hebat pada sistem mesin secara keseluruhan. Metode perhitungan empiris tersebut diatas berdasarkan antara lain beban kerja yang diterima, putaran kerja, pelumasan, pendinginan, pemasangannya, cara pengoperasiannya, kondisi kerja dan pengaruh lainnya dari dalam maupun luar mesin. Komponen mesin yang sangat kritis karena peran dan tugasnya yang utama dan berat dalam sistem mesin contohnya adalah bantalan bantalan seperti bantalan luncur atau bantalan gelinding. Oleh karena itu akan sangat membantu dan menguntungkan bila kerusakan dini pada komponen mesin dapat dideteksi sebelum tanda awal terjadinya kerusakan dapat diketahui.

Teknik yang selama ini yaitu sudah lebih dari 2 dekade secara umum dilakukan adalah dengan melakukan pemantauan terhadap kondisi getaran yang terjadi pada komponen mesin yang kritis karena ternyata getaran yang timbul berkaitan dengan kerusakan komponen mesin yang terjadi secara spesifik. Komponen mesin yang kritis seperti antara lain bantalan atau roda gigi. Besarnya getaran yang terjadi pada satu komponen mesin diukur nilainya dengan alat sensor yang sudah umum digunakan yaitu *accelerometer* atau *velocity transducer*. Dari nilai hasil pengukuran tersebut dapat ditentukan tingkat keparahan getaran yang sudah terjadi sehingga tingkat kerusakan komponen mesinnya juga dapat ditentukan.

Keterbatasan teknik ini adalah karena keterbatasan sensornya yaitu teknik pengukurannya adalah mengukur gerakan osilasi getaran yang ada. Hal ini berarti bahwa sensor tersebut baru bisa menghasilkan nilai pengukuran bila komponen mesinnya sudah bergetar atau permukaannya bergerak osilasi. Pada dasarnya bila satu komponen mesin sudah bergetar maka artinya adalah bahwa komponen mesin tersebut relatif sudah tidak statik lagi karena sudah mempunyai kerusakan dan kerusakannya sedang bertumbuh. Dengan demikian teknik pemantauan kondisi getaran komponen mesin dengan mengukur nilai getarannya setiap saat pemantauan sebenarnya mempunyai kelemahan yaitu hasil pengukuran baru dapat diketahui bila komponen mesin sudah mulai rusak. Biaya pengukuran getaran adalah cukup mahal, sehingga bila kemudian pengukuran dilakukan terlampau awal akan menyebabkan kerugian biaya tinggi sedangkan bila mulai dilakukannya setelah ditunggu sekian waktu berjalan bisa menyebabkan kerusakan parah terlambat diketahui. Adalah sangat penting dan menguntungkan bila ada suatu teknik baru yaitu satu teknik yang mampu mendeteksi sinyal kerusakan yang benar benar dini sebelum kerusakan fisik yang sebenarnya timbul dan tumbuh.

1.1.2. Deteksi Sinyal Kerusakan Dini

Sebelum terjadinya pertumbuhan retakan pada material pejal yang meregang, terjadi dahulu suatu disintegrasi mikroskopik antara ikatan ikatan molekuler material tersebut. Bersamaan dengan itu terjadi suatu pelepasan energi regangan yang sangat cepat yang membangkitkan suatu gelombang tegangan. Gelombang tegangan ini menjalar dan disebut sebagai emisi akustik. Emisi Akustik, *Acoustic Emission* = AE, sering disebut juga sebagai penjalaran gelombang tegangan, *Stress Waves*. AE adalah gelombang elastik yang dibangkitkan oleh lepasnya energi dalam yang tersimpan dalam struktur atau ikatan molekuler suatu material pejal yang mengakibatkan terjadinya gelombang tegangan berfrekuensi tinggi dalam material benda pejal (*solid*) tersebut. Fenomena ini disebabkan oleh adanya gerakan mendadak sehubungan dengan kerusakan pada material yang meregang atau mengalami tegangan (disintegrasi struktur internal). Frekuensi gelombangnya berkisar 0,1 ~ 0,4 MHz, yang jauh diluar jangkauan pendengaran manusia. Proses

timbulnya tegangan elastis yang merupakan sumber dari penjaran AE tersebut diatas dibagi menjadi 4 macam yaitu :

1. Gerakan perpindahan/dislokasi; contohnya gerakan dislokasi akibat ketidak sempurnaan garis bidang dari kisi-kisi (*lattice*) kristal material. Energi yang lepas dari satu garis bidang adalah kecil sekali, tetapi biasanya yang terjadi adalah kombinasi dari banyak garis bidang kisi-kisi kristal material yang tidak sempurna dimana menyebabkan dislokasi molekuler/mikroskopik yang besar (disintegrasi) dalam material akibat suatu beban. Energi yang dilepaskan disini cukup besar sehingga penjaran AE menjadi kontinyu dan bisa terdeteksi.
2. Pembentukan retakan dan pertumbuhannya; retakan terbentuk bila di satu titik dalam material terjadi tegangan lokal yang melebihi tegangan rusaknya (*fracture stress*) akibat suatu beban. Sebagai akibatnya terjadi permukaan bidang baru yang juga biasanya saling bergerak sehingga timbul gesekan. Pada saat disintegrasi yaitu terjadinya pemisahan waktu terbentuknya bidang permukaan baru, energi regangan lepas dan menjadi gelombang elastis sebagai penjaran AE. Demikian pula saat bidang bidang permukaan baru itu saling bergerak sehingga bergesekan.
3. Mekanisme gesekan; gesekan biasa terjadi pada kejadian retakan dan gerak relatif antar permukaan bidang. Pada saat terjadinya retakan, terjadi permukaan bidang baru yang akan saling bergerak sehingga bergesekan. Terjadinya permukaan bidang baru (pemisahan) dan gesekan ini menimbulkan semburan (*burst*) gelombang elastik yang menjadi penjaran AE.
4. Bisa juga pada proses perubahan/transformasi *phase*; contohnya adalah terbentuknya martensit dalam baja karbon dimana setiap perubahan /transformasi dari setiap *grain* menimbulkan satu semburan (*burst*) gelombang elastis yang menjalar sebagai AE.

Penjaran gelombang AE adalah mirip seperti pada suatu antena radio dengan pola radiasi yang tertentu untuk satu bentuk gelombang tertentu. Penjaran gelombang AE yang umum adalah dalam 2 bentuk yaitu berbentuk gelombang Rayleigh dan gelombang tekanan atau gelombang *P longitudinal*. Sumber AE akan menjalaran gelombang dengan bentuk satu paket bola (*spheres*) dimana

akan berubah di bidang permukaan karena akan menjalar dalam bentuk gelombang *Rayleigh* atau longitudinal seperti tersebut diatas. Bila dipasang suatu alat dengan material yang dapat menangkap gelombang yang menjalar pada permukaan bidang itu maka dengan demikian penjalaran gelombang AE itu akan dirasakan oleh material tersebut sebagai sensor sehingga menjadi terukur. Seperti dijelaskan dimuka bahwa penjalaran gelombang AE adalah merupakan kejadian awal sebelum terjadinya inisiasi retakan yang disebabkan oleh kelelahan (*fatigue*), pertumbuhan lambat (*creep*) atau pembebanan yang kompleks dan masih berskala mikroskopik atau molekuler. Kemudian setelah itu kerusakannya akan terjadi tiba-tiba disebabkan selip serta perubahan arah dari batas butiran molekuler (*grain*) material pejal tersebut sehingga terjadilah disintegrasi molekuler yang melepaskan energi dalamnya berupa gelombang AE. Saat ini sama sekali belum terjadi kerusakan fisik yang nyata seperti berupa retakan atau permukaan yang merekah apalagi pecah, sehingga dengan demikian bila gelombang AE ini dapat dideteksi kemunculannya sebagai sinyal gelombang getaran maka berarti bahwa sinyal kerusakan dini telah dapat diketahui sebelum tanda awal kerusakan timbul.

1.2. Perumusan Masalah

Sinyal gelombang AE mempunyai orde frekuensi yang tinggi sampai lebih dari 4 kHz dan penjalarnya melalui medium material pejal dengan deformasi plastis, maka amplitudonya sebagai sinyal gelombang getaran adalah sangat kecil. Pada mesin yang dinamis terdapat banyak sumber sumber getaran lain yang sinyal gelombangnya, walaupun frekuensinya lebih rendah ataupun mendekati sama, mempunyai amplitudo yang relatif lebih besar sehingga menutupi atau dapat dikatakan mengubur sinyal gelombang AE tersebut didalamnya. Sinyal getaran dari sumber lain itu yang menutupi sinyal gelombang AE disebut sebagai sinyal pengotor atau *noise*. Kondisi sinyal seperti ini disebut sebagai sinyal getaran dengan SNR (*signal to noise ratio*) yang kecil. Sensor getaran yang sudah dibuat komersial atau umum digunakan masa ini ternyata masih mempunyai keterbatasan yaitu belum mampu menangkap sinyal gelombang AE yang berfrekuensi tinggi, amplitudo kecil dan terkubur didalam sinyal pengotor (*noise*). Demikian pula

metode analisa getaran yang masa ini umum diaplikasikan pada analisa sinyal getaran, baik yang berdasarkan analisa spektrum getaran domain frekuensi maupun berdasarkan analisa domain waktu, ternyata belum mampu menganalisa sinyal gelombang AE tersebut karena metode tersebut hanya dapat diaplikasikan pada sinyal getaran dengan SNR besar. Dari kedua tantangan tersebut yang sampai sekarang belum terjawab, dalam usaha mendeteksi sinyal gelombang dari kerusakan dini pada komponen mesin yang dinamis sebelum tanda tanda kerusakan awal yang nyata muncul, maka dapat dirumuskan masalah yang harus dilalui dan diselesaikan dalam penelitian ini. Pengembangan rancangan sampai membuat dan uji coba satu sensor yang mampu menangkap sinyal gelombang AE, akibat disintegrasi molekuler material pejal komponen mesin yang dinamis sebagai sinyal gelombang kerusakan dini yang masih berupa kerusakan mikroskopis, merupakan tahapan awal dalam melaksanakan penelitian ini. Selanjutnya setelah sinyal gelombang AE telah berhasil ditangkap oleh rancangan sensor tadi, yang ternyata sinyal gelombang AE tersebut tertutup dan bahkan terkubur dalam sinyal sinyal pengotor lain (*noise*), maka tahapan berikutnya adalah mencari dan kemudian mengembangkan teknik pemrosesan sinyal secara digital yang cocok, efektif dan efisien untuk membersihkan semua sinyal pengotor (*noise*) dari sinyal gelombang AE tersebut sehingga sinyal gelombang kerusakan dini yang sebenarnya dapat ditampilkan sebagai hasil deteksi. Dari hasil deteksi ini dapat ditentukan adanya kerusakan dini pada komponen mesin yang dinamis yang selama ini suatu teknik deteksi yang efektif, efisien dan handal belum berhasil dicapai apalagi diterapkan dalam dunia nyata industri.

1.3. Tujuan Penelitian

Motivasi kuat yang mendasari dilakukannya penelitian ini adalah semangat dan keinginan serta komitmen untuk membuat suatu peningkatan (*improvement*) dalam kemampuan, kehandalan dan produktivitas mesin mesin dinamis melalui kemampuan mendeteksi kerusakan dini yang terjadi sebelum tanda awal kerusakan nyata diketahui tampil terlihat. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan satu teknik baru yang mampu mendeteksi kerusakan dini pada

komponen mesin yang dinamis, dalam kasus ini adalah bantalan gelinding, dengan mengaplikasikan pengembangan suatu alat sensor yang khusus serta metode pemrosesan sinyal digital yang efektif dan efisien. Sinyal gelombang tegangan dari kerusakan dini pada komponen mesin, ditangkap oleh suatu sensor khusus yang dikembangkan untuk itu. Kemudian sinyal tersebut harus diproses terlebih dahulu sebagai sinyal digital untuk menghilangkan semua sinyal sinyal pengotor (*noise*) dan menampilkan sinyal kerusakan yang sebenarnya. Metode *Blind deconvolution* dengan pendekatan *Eigen Vector* yang dimodifikasi dan dioptimasi digunakan untuk pemrosesan sinyal digital tersebut diatas. Hasil dari penelitian ini adalah suatu teknik baru yang dapat mendeteksi kerusakan dini pada komponen mesin dinamis, disamping dapat pula membangun pemahaman yang lebih baik mengenai terjadinya kerusakan secara dini pada satu bantalan gelinding sebagai dasar untuk menilai kondisi mekanisnya serta mendukung keputusan dan tindakan yang harus diambil dalam proses sistem pemantauan kondisi getaran dan perawatan prediktif.

Beberapa sasaran dapat dicapai dari pelaksanaan penelitian ini seperti antara lain:

1. Investigasi dan identifikasi penggunaan material khusus keramik Piezo yang paling efektif dan efisien dalam aspek jenis, ukuran, lokasi penempatan serta pemasangan atau pembuatannya agar mampu menangkap informasi sinyal maksimum yang sebaik-baiknya.
2. Pengembangan dan perancangan satu sensor yang tepat guna untuk menangkap sinyal gelombang tegangan atau sinyal AE (*acoustic emissions*), dengan menggunakan material khusus yaitu keramik Piezo.
3. Identifikasi dan evaluasi metode pemrosesan sinyal digital yang cocok diaplikasikan untuk menghilangkan sinyal sinyal pengotor (*noise*) yang menutupi sinyal kerusakan dini yang sebenarnya.
4. Pengembangan algoritma modifikasi dan optimasi pemrosesan sinyal digital yg berdasarkan metode *Blind Deconvolution* untuk mampu menampilkan gelombang tegangan yang merupakan sinyal kerusakan dini yang sebenarnya dari sinyal sinyal pengotor (*noise*) yang menutupinya.

5. Investigasi dan penentuan karakteristik getaran dan sinyal gelombangnya dari kerusakan dini pada komponen mesin yang dinamis seperti bantalan gelinding.
6. Pengembangan suatu teknik baru untuk menganalisa sinyal frekuensi tinggi dari sumber kerusakan dini pada komponen mesin yang dinamis.

1.4. Manfaat dan Kontribusi Penelitian

Penelitian ini akan menghasilkan suatu teknik baru, yang sebelumnya belum pernah ada yang berhasil baik, yang mampu mendeteksi kerusakan dini pada komponen mesin yang dinamis dengan cara mendeteksi penjaralan gelombang tegangan (*stress waves*). Kemampuan mendeteksi tersebut adalah melalui perancangan suatu sensor yang khusus dikembangkan untuk itu dan algoritma pemrosesan sinyal digital yang khusus pula dikembangkan sebagai modifikasi dan optimasi dari metode *blind deconvolution* untuk menampilkan secara efektif dan efisien sinyal gelombang tegangan yang lemah, dengan menghilangkan sinyal pengotor yang menutupinya. Analisa gelombang frekuensi tinggi pada teknik ini juga akan membangun suatu pemahaman yang lebih baik mengenai karakteristik komponen mesin yang dinamis, seperti bantalan gelinding, pada saat timbulnya suatu kerusakan dini pada tahapan yang sangat awal. Hasil penelitian ini akan memberikan suatu kontribusi pula kepada praktek rekayasa didalam pemantauan kondisi mesin untuk menjadikannya lebih proaktif dan efisien dari sebelumnya.

Pada proses-proses dari sistem *tribo* yang terjadi antar komponen mesin yang saling bergerak masih digunakan metode konvensional dari analisa kondisi komponen mesin berdasarkan karakteristik sistem operasi *tribo* seperti koefisien gesekan, laju keausan dan temperatur kontak. Metode *tribo* ini ternyata sering gagal dalam memprediksi sisa umur kerja dari sistem mekanikal tersebut dengan akurasi yang sekedar memadai. Karakteristik *tribo* tersebut tidak cukup untuk mengendalikan tingkat keadaan sistem *tribo* dalam banyak kasus. Disamping itu, metode sistem *tribo* konvensional tersebut membutuhkan sistem mekanikal yang bergesekan dihentikan dan dibongkar untuk dilakukan analisisnya. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut diatas sekarang dibutuhkan pemantauan langsung dan menerus terhadap unit-unit gesekan yang kemudian selanjutnya dibutuhkan

suatu teknik yang berfungsi diagnosa. Metode AE ini dapat dikembangkan untuk diaplikasikan sebagai penangkap atau pengumpul serta analisa terhadap gelombang frekuensi tinggi gelombang tegangan (*stress waves*) atau emisi akustik (*Acoustic Emissions, AE*) yang dibangkitkan dalam kejadian gesekan antara komponen dari sistem mekanikal yang bergerak. Gelombang AE membawa hampir semua informasi proses yang terjadi didalam struktur pejal (*solid*) dan memberikan data penting mengenai keadaan terkini dari sistem. Dengan mengembangkan teknik pemantauan dan diagnosa terhadap gelombang AE yang dibangkitkan oleh proses gesekan antara material pejal dari sistem mekanikal ini, merupakan suatu potensi kemajuan bagi sistem *Tribo* dan bidang *Tribology*.

Hasil penelitian ini dapat pula mendukung terbukanya suatu bidang baru (*new frontier*) untuk penelitian dan pengembangan alat sensor cerdas untuk sistem pemantauan kondisi getaran mesin. Demikian dapat pula dikembangkan potensinya untuk menghasilkan peningkatan yang bermakna pada praktek sistem perawatan prediktif melalui pemantauan kondisi mesin di waktu sebenarnya (*real time*), ataupun untuk sistem pengawasan kualitas produk komponen komponen mesin dari kerusakan dini yang mungkin saja terjadi dalam proses produksinya.

1.5. Batasan Penelitian

Teknik untuk menilai kesehatan satu komponen mesin yang berdasarkan pada analisa getaran frekuensi rendah atau menengah telah dikembangkan sejak lebih dari 2 dekade yang lalu. Sayangnya teknik tersebut hanya efektif bila diaplikasikan terhadap sinyal dengan SNR (*signal to noise ratio*) tinggi. Kenyataan ini berarti bahwa teknik tersebut hanya efektif terhadap kondisi dengan kerusakan yang sudah terjadi dan telah cukup bermakna. Kerusakan yang telah terjadi dan bermakna menimbulkan gaya osilasi yang besar yang mampu menyebabkan seluruh badan komponen mesin bergetar, sedangkan pada kerusakan dini gaya osilasi tersebut belum timbul dan yang ada hanya pelepasan energi dalam yang kemudian menjadi penjalaran gelombang tegangan (*stress waves*) dengan frekuensi tinggi pada material komponen mesin tersebut. Penjalaran gelombang tegangan ini menjalar kesemua arah dalam bentuk seperti

gelombang akustik (AE) tetapi pada orde frekuensi yang tinggi sehingga tidak terdengar sebagai suara dan tidak menyebabkan gerak relatif dari badan komponen mesin tersebut. Walaupun frekuensinya tinggi, tetapi amplitudo gelombang tegangan ini sangat kecil sehingga terkubur dalam dalam oleh sinyal sinyal pengotor (*noise*) lainnya yang ada dari mana mana. Bila sinyal gelombang tegangan yang berfrekuensi tinggi tetapi beramplitudo kecil tersebut dapat ditangkap, dimana sebelumnya belum pernah ada yang berhasil dengan baik, maka kerusakan dini sebagai pencetus penjalaran gelombang tegangan tersebut dapat dideteksi.

Penelitian ini dibatasi sampai berhasilnya dikembangkan satu teknik baru tersebut yang mampu mendeteksi kerusakan dini pada komponen mesin yang dinamis. Besaran kuantitatif nilai ukuran amplitudo sinyal, lokasi sumber kerusakan dini, karakteristik sinyal yang terdeteksi dengan jenis kerusakan yang akan terjadi, serta pengembangan potensinya ke bidang lain seperti seismik gempa bumi, teknik sipil konstruksi bangunan dan aplikasi lain yang lebih luas lagi tidak termasuk didalam penelitian ini. Aspek aspek tersebut diatas akan dimasukkan kedalam perancangan penelitian penelitian tahapan selanjutnya karena membutuhkan persiapan lain lagi yang besar dan waktu yang lama lagi.

1.6. Model Operasional Penelitian

Dalam praktek pemantauan kondisi mesin, yang mengandalkan pada pemantauan getaran, mempunyai satu permasalahan yaitu sinyal getaran yang dipantau baru bisa dideteksi dan diukur setelah kondisi komponen mesinnya rusak. Bantalan sebagai salah satu komponen mesin yang penting yang mendukung poros mesin yang berputar selalu menjadi pusat perhatian sebagai salah satu komponen mesin yang kritis. Bantalan dan komponen mesin lainnya yang rusak akan bergetar pada kisaran frekuensi rendah dan menengah yaitu pada 5 Hz – 10 kHz. Dengan demikian praktek yang umum dilakukan bertahun-tahun selama ini untuk pemantauan, diagnosa dan prognosa terhadap kondisi bantalan adalah teknik analisa getaran frekuensi rendah yang efektif hanya terhadap bantalan yang kerusakannya sudah cukup besar dan bermakna. Demikian pula alat sensor yang

telah berkembang dan umum di pasaran sampai sekarang ini adalah alat sensor getaran yang hanya efektif untuk mengukur getaran dengan frekuensi dibawah 20 kHz. Hal ini adalah karena alat sensor tersebut, *accelerometer* maupun *velocity transducer*, bekerja berdasarkan prinsip gaya inersia sehingga harus bergerak mengikuti gerak osilasi dari getaran badan komponen mesin yang diukur. Pada kerusakan dini dimana tingkat kerusakannya masih molekuler atau mikroskopik, maka yang terjadi adalah pelepasan energi dalam akibat disintegrasi mikroskopik tersebut yang memicu menjalarnya gelombang tegangan (*stress waves*) sebagai AE (emisi akustik) ke segala arah. Gelombang tegangan ini menjalar dengan frekuensi tinggi yang biasanya diatas 20 kHz dan seringkali sampai melebihi 400 kHz. Karena amplitudo gelombang tegangan tersebut relatif sangat kecil sehingga belum mampu menggetarkan badan komponen mesinnya, maka dengan mudahnya gelombang seluruhnya tertutup atau seakan terkubur didalam sinyal pengotor lain (*noise*).

Dengan demikian model operasional penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur yang intensif dari awal dan seterusnya untuk mendapatkan informasi perkembangan yang ada dan selalu mutakhir mengenai segala aspek yang terkait dengan penelitian ini.
2. Pengembangan rancangan sensor khusus yang mampu menangkap sinyal gelombang tegangan yang berfrekuensi tinggi tetapi beramplitudo sangat rendah. Termasuk percobaan simulasi dengan bantuan sinyal dari komputer sampai dicoba untuk kondisi nyata yang sesungguhnya.
3. Dari studi literatur juga dapat ditentukan satu metode pemrosesan sinyal yang cukup efektif untuk menampilkan sinyal kerusakan dini dari dalam sinyal pengotor yang menutupinya. Tentunya metode itu tidak bisa langsung harus digunakan, tetapi harus dimodifikasi dan dioptimasi sesuai dengan karakteristik sinyal gelombang tegangan. Demikian pula harus dicoba dengan simulasi komputer terlebih dahulu dan pada akhirnya di penggunaan yang sesungguhnya.
4. Dengan berhasil dibersihkannya sinyal pengotor (*noise*) dan sinyal gelombang tegangannya dapat ditampilkan, maka dapat ditentukan bahwa kerusakan dini

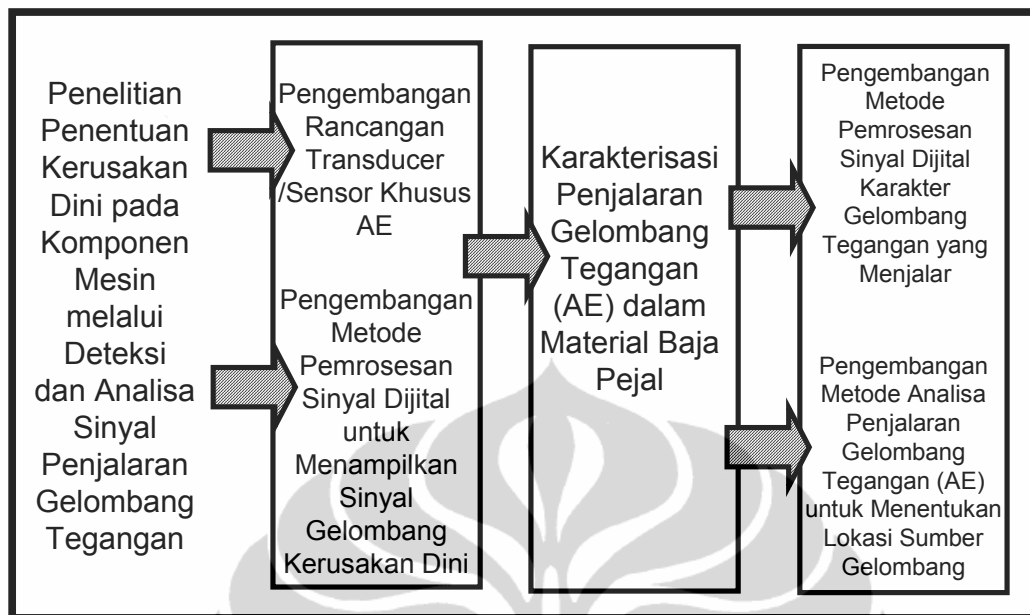
yang tingkatannya masih mikroskopik/molekuler telah dapat dideteksi jauh sebelum kerusakannya menjadi nyata terlihat dan bermakna seperti kemampuan teknik sekarang ini.

Sarana pendukung yang dibutuhkan untuk operasionalisasi model penelitian ini antara lain: material keramik Piezo, laboratorium dan bengkel yang mampu membuat badan alat sensor dengan cukup presisi dan akurat, komputer berkemampuan tinggi, *data acquisition* dengan kemampuan *sampling rate* yang tinggi yaitu sekitar 0,8 – 1 MHz, peralatan *waves generator*, peralatan filter dan pengkondisian sinyal, perangkat lunak pemrosesan sinyal digital dan rig rig uji yang dirancang dan dibangun khusus baik untuk test awal simulasi maupun untuk test sesungguhnya berikut komponen mesin dinamik sebagai benda uji yaitu bantalan gelinding.

1.7. Roadmap Penelitian

Tujuan akhir dari Penelitian ini adalah mengembangkan suatu teknik deteksi dan penentuan lokasi kerusakan dini dari suatu komponen mesin melalui analisa sinyal penalaran gelombang tegangan frekuensi tinggi. Dari penelitian yang sudah dilakukan dan didukung dengan studi literatur mengenai perkembangan mutakhir dari topik topik yang terkait, satu peta jalan (*roadmap*) penelitian yang menuju ke tujuan akhir penelitian besar telah dapat dikembangkan seperti yang ditunjukkan pada rencana roadmap penelitian pada halaman berikut ini.

Penelitian untuk pengembangan teknik deteksi kerusakan dini telah berhasil dilakukan dan hasil laporannya ditulis sebagai disertasi ini dimana didalamnya termasuk aktivitas pengembangan satu sensor khusus dengan bahan *Piezoceramic* PZT untuk mendeteksi sinyal penalaran gelombang tegangan serta pengembangan dan aplikasi algoritma pemrosesan sinyal digital tersebut untuk menghilangkan sinyal pengotor yang ada. Disamping itu segala perkembangannya telah disampaikan didalam berbagai seminar ataupun konferensi nasional maupun internasional dan dijadikan sebagai bahan referensi tahapan berikutnya.



Gambar 1. Peta jalan (*roadmap*) penelitian penentuan kerusakan dini pada komponen mesin

Sedangkan untuk tahapan selanjutnya secara khusus perlu dilakukan terlebih dahulu satu penelitian kecil yang sifatnya mendukung yaitu penelitian yang bertujuan untuk mendapatkan data data karakter penjalaran gelombang tegangan dalam material baja pejal. Manfaat dari penelitian ini adalah didapatnya pengetahuan tentang karakteristik penjalaran gelombang tegangan didalam material pejal dan kaku, yang akan menjadi dasar selanjutnya yaitu untuk penelitian pengembangan rancangan teknik penentuan lokasi kerusakan dini pada satu komponen mesin. Bila karakter penjalaran gelombang tegangan dalam material baja pejal telah diketahui, maka dengan menggunakan beberapa buah *transducer receiver* secara simultan akan dapat ditentukan lokasi kerusakan dini tersebut. Teknik ini adalah seperti aplikasi teknik GPS (*Global Positioning Satellites*) untuk menentukan lokasi tertentu berdasarkan sinyal yang diterima oleh minimal 3 buah satelit secara simultan dari sumber sinyal di lokasi yang akan ditentukan. Dapat diantisipasi bahwa penelitian selanjutnya dapat dijadikan penelitian untuk program S3 maupun penelitian penelitian yang dipecah menjadi beberapa penelitian S2.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pemantauan Kondisi dan Diagnosa Kerusakan Mesin

Metode metode penganalisa sinyal getaran komponen mesin bantalan untuk deteksi kerusakan dan diagnosa kondisinya telah ditelaah kembali walaupun kebanyakan metode tersebut bekerja pada kisaran frekuensi getaran yang rendah atau menengah yang juga berarti bahwa secara fisik elemen mesin tersebut telah bergetar atau rusaknya secara fisik telah terjadi. Metode metode penyampul (*Enveloping*) telah dikembangkan dan berhasil untuk mendeteksi dan mengidentifikasi 11 jenis kerusakan utama pada bantalan gelinding yang sangat mempengaruhi umur kerjanya pada kondisi operasional normal. Metode ini menggunakan teknik analisa spektrum getaran bantalan yang tersampul pada lebar pita getaran 1/3 oktaf di kisaran frekuensi 10 kHz. Sistem ini mampu memberikan hasil diagnosa yang terinci dan prakiraan kondisi satu bantalan melalui satu pengukuran tunggal [1,2,3,4]. Analisa sampul getaran (*vibration envelope analysis*) adalah satu teknik yang sangat ampuh untuk menganalisa kerusakan kerusakan pada komponen mesin bantalan gelinding. Dari analisa kuantitatifnya ditunjukkan bahwa penghalangan sinyal getaran yang sebenarnya oleh sinyal sinyal tambahan tidak menghilangkan sinyal yang termodulasi. Terlihatnya saja seakan tertutup keseluruhannya, tetapi ternyata juga meningkatkan besarnya komponen getaran tambahan didalam spektrum getaran tersampulnya yang bisa menutup komponen komponen getaran yang penting akibat modulasi amplitudo. Hal tersebut terjadi karena sinyal yang amplitudonya termodulasi akan memodulasi getaran frekuensi tinggi gelombang pembawa pada sinyal yang sebenarnya menjadi gelombang peningkat dalam sinyal yang tersampul. Hal ini sama sekali tidak tergantung apakah modulasi gelombangnya terjadi akibat dari proses rektifikasi sederhana ataupun dari penghilangan modulus dari sinyal gelombang waktu yang komplek, melalui proses transformasi balik dari spektrum getaran satu muka satu yang juga telah melalui satu filter frekuensi lebar satu pita. Sinyal sinyal gelombang getaran yang dimodulasi yang berhubungan dengan

kerusakan pada bantalan, selalu berlaku sebagai peningkat walaupun kelihatannya malahan tertutup [5].

Pabrikan bantalan SKF juga telah mencoba mengembangkan suatu metode untuk mendeteksi kerusakan bantalan. Metode ini, yaitu teknologi SEE (*Spectral Emitted Energy*), menggabungkan deteksi emisi akustik dengan teknik penyampulan (*enveloping*). Metode ini dijalankan pada lebar pita frekuensi 250 kHz – 350 kHz, yang kemudian memindahkan sinyal aslinya kedalam bentuk frekuensi rendah dan memfilternya dengan *Low pass Filter* 10 kHz. Sinyal itu kemudian dianalisa dalam kisaran pita frekuensi rendah oleh perangkat lunak Micrologs, Multilogs atau PRISM. Teknik SEE ini juga mendeteksi masalah pelumasan, yaitu dari permasalahan pelumas yang tidak baik sampai kepada permasalahan pelumas yang terkontaminasi. Kegagalan melumasi dan pecahnya lapisan film dari pelumas akan menyebabkan kontak antar metal yang kemudian akan meningkatkan gesekan yang membangkitkan getaran dengan frekuensi tinggi pada kisaran 300 kHz. Sistem dengan metode SEE pada dasarnya adalah memantau sinyal getaran dengan menggunakan *Transducer AE*. Bila suatu sinyal getaran yang lebih tinggi dari normal biasanya terbaca berdasarkan rata rata statistiknya dan deviasi standardnya, maka sistem SEE ini akan memberikan saran tindakan yang harus dilakukan. Dengan teknologi SEE juga akan dapat terlihat perubahan sinyal yang cepat atau mendadak yang timbul yaitu bila lapisan film pelumas pecah dan terjadi kontak antara metal dengan metal. Sistem dengan metode SEE memantau kerusakan bantalan dan permasalahan pelumasan. Walaupun demikian sistem SEE belum mampu mendeteksi kerusakan dini dari bantalan karena sistem ini memberikan responsnya bila amplitudo getaran yang besar muncul di frekuensi yang berkaitan dengan frekuensi kerusakan bantalan di dalam spektrum tersampul [6].

Sejak dekade 1960-1970 teknik analisa numerik untuk frekuensi tinggi yang ada hanyalah Analisa Statistik untuk Energi (SEA, *Statistical Energy Analysis*). Hasil analisa teknik ini mampu menjabarkan perilaku statistik dari set frekuensi getaran akustik dari struktur struktur yang mirip. Dasar teknik analisa numerik adalah transformasi Fourier cepat (FFT, *Fast Fourier Transform*), tetapi hasilnya ternyata tergantung pada kasus yang terjadi. Dalam 10 tahun terakhir minat dan

kebutuhan akan formulasi dan teknik menyelesaikan permasalahan getaran akustik menaik kembali dan mulai beralih kepada sinyal frekuensi menengah dan tinggi. Model baru untuk analisa sinyal getaran frekuensi menengah dan tinggi mulai dikembangkan dan diperkenalkan. Teknik transformasi Hilbert digunakan sebagaimana mestinya untuk menghasilkan satu sampul yang kompleks mengenai diskripsi dari persoalannya. Ini juga mendiskripsikan beberapa karakteristik representatif dari solusi daripada solusinya itu sendiri. Hal ini adalah untuk menghindari adanya problem komputasi yang berhubungan dengan problem frekuensi tinggi. Ini menunjukkan kelebihan dua sisi yaitu menghindari problem komputasi sementara tetap mempertahankan kemampuan untuk memperbaiki kembali respons bolak balik saat dibutuhkan. Model metode ini adalah hasil evolusi dari perkembangan model penyampulan sebelumnya yaitu model energi sampul (EEM, *Envelope Energy Model*) dan model fase energi sampul (EPHEM, *Envelope Phase Energy Model*). Metode ini ingin dicoba untuk menunjukkan kecenderungan sampul dari beberapa variable lapangan (energi atau perpindahan), mengubah solusi bolak-baliknya menjadi solusi yang halus dengan persamaan Helmholtz, dalam frekuensi domain. Dengan menggunakan transformasi Hilbert, yang menghilangkan bagian bolak balik pada solusi, sampul jawab bisa didapat. Satu deskriptor baru didefinisikan berhubungan dengan perpindahan fisik secara satu persatu. Hampir semua energi yang ada terkonsentrasi didalam daerah nomor gelombang rendah dibawah kondisi tertentu. Satu solusi numerik diskret untuk persamaan terkait yang diatur, disediakan untuk model tersebut [7].

Suatu model yang lebih disederhanakan juga ditunjukkan, berdasarkan pada analisa statistik energi (SEA, *Statistical Energy Analysis*), tetapi dengan pertimbangan variabel lokal daripada variabel global. Deskripsinya menjadi lebih jelas, akurat, dan terutama pengaturan ulang kerapatan energi didalam setiap subsistem dapat diperkirakan. Dengan mengabaikan saling pengaruh antara gelombang gelombang yang menjalar dan menggunakan beberapa asumsi asumsi kecil lainnya, formulasi energi ini cukup cocok untuk frekuensi tinggi. Walaupun demikian perhitungan harus dilakukan pada pita yang lebar yang mengandung sedikitnya beberapa Frekuensi Eigen. Untuk dapat menyelesaikan persamaan-persamaannya dibutuhkan derajat kebebasan yang sedikit [8-11].

Pada teknik klasifikasi induksi, spektrum frekuensi dibagi menjadi beberapa klasifikasi berdasarkan kondisi bantalannya. Penentuan klasifikasi menggunakan perkiraan panjang deskripsi dari setiap spektrum. Pertama, pembagian klasifikasi dibagi secara acak, dan kemudian dengan mengacak antar kelas, mengkombinasi antar kelas, dan kemudian membagi bagi kelas pada sepanjang spektrumnya sehingga panjang deskripsi setiap kelas yang optimum didapat. Spektrum frekuensi terbagi menjadi 6 klasifikasi atau 6 kondisi bantalan yang berbeda [12].

Teori *Chaos* telah diaplikasikan untuk menampilkan parameter *chaotik* dari deret waktu sinyal getaran. Dengan menggunakan ukuran korelasi yang mengukur kemunculan dan deteksi dari perilaku *chaotic* didalam satu deret waktu sinyal getaran, satu nilai index bisa didapat sebagai karakteristik dari kondisi bantalan. Penentuan ukuran korelasi dari deret waktu sinyal getaran yang *chaotic* telah dilakukan secara eksperimental pada spektrum frekuensi dibawah 10 kHz, yaitu pada 2 kHz. Hasil eksperimen ini mengidentifikasi perlunya untuk melakukan kehati-hatian yang tinggi dalam mencoba untuk menggunakan ukuran korelasi untuk mengkuantifikasi penundaan yang bawaan pada deret waktu. Bila pemilihan parameter parameter tidak sesuai maka bisa memungkinkan terjadinya perkiraan yang sangat jauh lebih rendah maupun yang sangat jauh lebih tinggi. Penentuan parameter parameter perlu lebih disederhanakan karena penelitian ini sangat memakan waktu yang lama [12,13].

Telah diketahui bahwa getaran dari bantalan yang rusak mengandung 2 sinyal Gaussian dimana sama sama dengan rata rata nol tetapi berbeda varians nya, sinyal pertama adalah sinyal latar pengotor (*background noise*) dan sinyal kedua adalah sinyal kerusakan bantalan. Secara teoritis, pergantian antara kedua distribusi sinyal tersebut dapat terjadi saat elemen gelinding sedang melewati bagian yang rusak. Kerusakan lokal dapat dideteksi dengan menggunakan alat test hipotesa dari kriteria Neyman-Pearson, dan kemudian diperiksa frekuensi pergantiannya. Getaran bantalan pada sesaat sebagai salah satu sinyal distribusi kemudian diklasifikasi dan digunakan untuk menentukan jenis kerusakannya. Tetapi ternyata metode sistem ini kurang efektif untuk menentukan kerusakan dini karena efek sinyal yaitu amplitudo yang dapat dideteksi jauh lebih kecil dibanding amplitudo sinyal pengotor [14-16].

Pada spektrum sinyal getaran yang dapat diperbesar, satu frekuensi yang diperbesar dijadikan pusat yaitu di frekuensi resonansi cincin luar bantalan. Kemudian spektrum frekuensinya diteliti lagi ke arah depan dan ke arah belakang untuk mendeteksi frekuensi bantalan rusak. Tidak hanya komponen arah depan dan arah belakang dari karakteristik getaran bantalan rusak yang dapat dideteksi, tetapi juga pergeseran frekuensi pada spektrum untuk kerusakan pada bagian cincin dalam juga dapat dideteksi. Pergeseran frekuensi tidak terjadi pada spektrum frekuensi kerusakan cincin luar karena komponen ini stasioner tidak berputar. Terindikasi pula bahwa sebenarnya spektrum getaran yang konvensional didapat dari lipatan komponen frekuensi ke depan dan ke belakang adalah daerah frekuensi satu bidang [17].

Pada diagnosa getaran mesin mesin, pendekatan dengan pemodelan matematika telah lama diabaikan karena klasifikasi pola kerusakan dan teknik bersumber pada dasar aturan telah berkembang dengan baik sekali dari pengalaman pengalaman empiris karena perkembangan atau capaian baru dalam pengukuran getaran merupakan sumber dari diagnosa baru terhadap gejala kerusakan. Walaupun demikian 3 pemodelan matematika *autoregressive* yaitu : pemodelan *Box-Jenkins linear autoregressive*, *backpropagation neural networks*, dan *radial basis function networks* telah diperkenalkan dan diperbandingkan. Setiap teknik pemodelan ini dievaluasi untuk digunakan dalam mendiagnosa kerusakan pada bantalan elemen gelinding di suatu test rig. Teknik pengetestan dengan fase deteksi sampel dilakukan pada frekuensi getaran 900 Hz. Kelemahan terbesar dari pendekatan berdasarkan pemodelan prediktif semacam ini adalah kebutuhan akan sejumlah besar data untuk latihan sistem dan percobaan saat pengembangan sistem. Dapat terindikasi pula bahwa dengan pendalaman lebih lanjut terhadap pengembangan sistem pemodelan deret waktu *autoregressive* telah berhasil, walaupun belum menjadi praktek umum di lapangan, terutama untuk diagnosa kerusakan mesin mesin dengan kecepatan rendah atau berubah-ubah [18,19].

Beberapa eksperimen lain dengan menggunakan metode pemodelan *wavelets* dan *neural networks*, seperti teknik *Adaptive Subspace Self-Organising Map (ASSOM)*, mengindikasikan bahwa kemungkinan untuk dapat mengenali kerusakan komponen mesin dinamik tanpa perlu pemrosesan awal yang eksplisit

dimana juga kecepatan putarannya tidak perlu konstan. Frekuensi maksimum yang dilakukan untuk data diskret eksperimen adalah 20.000 Hz, dan lebar pita frekuensi yang diamati adalah pada kisaran 500 – 3800 Hz. Berdasarkan karakteristik data deret waktu yang mengindikasikan getaran kerusakan bantalan yang diamati dalam eksperimen, pemodelan dari teknik ASSOM tersebut menunjukkan bahwa pemetaan kerusakan yang berbeda dapat dipelajari dari perbedaan klasifikasi yang terpisah tanpa dibatasi oleh kecepatan putaran yang tertentu. Pengembangan lanjut masih sangat dibutuhkan terutama untuk memasukkan kuantifikasi vektor pembelajaran dari pengembangan model yang kemungkinan dengan memperbaiki pemisahan lokalisasi dari klasifikasi setiap pemetaan kerusakan [20,21].

Satu usaha untuk membuat pemodelan sinyal getaran dari kerusakan umum bantalan gelinding yang diturunkan dari persamaan matematik fungsi otokorelasi sampel nilai diskret deret waktu sinyal getaran (*envelope-autocorrelation*), telah dikembangkan untuk kasus kecepatan putaran poros yang rendah. Pengembangan pemodelan tersebut adalah untuk kasus khusus yaitu kecepatan putaran poros sangat rendah hanya pada kisaran 36 rpm. Frekuensi getaran yang menunjukkan adanya puncak puncak (*peaks*) sebagai indikasi kerusakan adalah pada 8,5 Hz dan 50 Hz, sedangkan frekuensi harmoniknya adalah dari sinyal latar pengotor (*noise*). Data data buatan untuk simulasi pemodelan menunjukkan bahwa data sebenarnya dari pengukuran dengan pemodelan yang dikembangkan telah memberikan hasil yang menunjukkan kinerja yang memuaskan [22].

Pengembangan teknik lain yaitu dengan cara memprediksi puncak puncak frekuensi (*peaks*) pada spektrum yang diskret yang mengindikasikan karakteristik frekuensi kerusakan beserta harmoniknya dari suatu kerusakan yang terlokalisasi pada cincin luar bantalan, cincin dalam bantalan atau dari elemen gelindingnya dibawah beban radial dan aksial. Satu pemodelan matematika dibuat untuk bantalan dengan asumsi terisolasi sebagai sistem menerus, cincin luar bantalan tidak bergerak (stasioner) dan cincin dalam pada kondisi berputar dengan kecepatan putaran poros. Persamaan umum untuk gaya gaya dari setiap bagian komponen mesin itu diturunkan, dan dengan penyelesaian terhadap persamaan ini dapat dihitung defleksi atau deformasi dari setiap bagian komponen mesin

tersebut. Dari total defleksi atau deformasi arah radial maka amplitudo perpindahan dan spektrum frekuensi getarannya dapat ditentukan. Dapat ditunjukkan bahwa nilai nilai hasil perhitungan analitik seperti tersebut diatas mempunyai kesesuaian yang cukup dengan nilai hasil eksperimen. Dengan demikian untuk bagian komponen mesin dapat getaran kerusakannya diprediksi pada frekuensi kerusakan cincin dalam beserta harmonik sidebands sebagai kelipatan dari frekuensi putaran poros. Teknik Prediksi ini diimplementasikan didalam satu proposal teknik analisa pemodelan. Walaupun demikian pemodelan ini belum mampu memprediksi puncak (*peaks*) dari bagian komponen mesin dinamik sebagai kelipatan kecepatan putaran poros [23].

Teknik klasifikasi pola dan penentuan berdasarkan aturan adalah umum digunakan untuk diagnosa kerusakan dari sinyal getaran mesin mesin. Pengetahuan untuk penentuan kerusakan telah terakumulasi dari pengalaman banyak ahli dan dalam waktu lama, kemudian dikumpulkan dan dijadikan suatu basis pengetahuan. Dengan menggunakan suatu mesin penentu, pengetahuan yang telah dikumpulkan sebagai basis data pengetahuan ini digunakan untuk mendiagnosa kondisi satu mesin atau komponen bantalan serta menjadi dasar untuk suatu penilaian dan rekomendasi. Teknik ini telah dikembangkan menjadi satu teknik berdasarkan sistem komputer yang disebut sebagai sistem pakar (*Expert System*), yang telah dibangun, diuji-coba serta diimplementasikan untuk menganalisa sinyal getaran pada kisaran frekuensi 5 – 22 kHz menggunakan sistem pakar dan logika *fuzzy*. Sistem pakar mampu memberikan dasar pengetahuan untuk menentukan berbagai aspek tentang pemantauan kondisi, diagnosa bantalan, frekuensi sinyal getaran kerusakan, pemilihan fitur, klasifikasi bantalan dan lain-lain. Sedangkan penalaran logika *fuzzy* dapat membedakan kondisi antara bantalan yang rusak dengan bantalan yang baik dengan akurasi mendekati 100% berdasarkan kriteria dari basis data pengetahuan dan kondisi bantalan yang terpantau atau terukur [24].

Pada kecepatan putaran yang rendah, amplitudo sinyal getaran bantalan menjadi sangat rendah sehingga sinyal getaran dari kerusakan menjadi sulit untuk dikenali apalagi dianalisa dengan metode diagnosa kondisi yang biasa dilakukan. Hal ini karena sinyal kerusakan yang sebenarnya sangat kecil dan tertutup oleh

penambahan sinyal getaran amplitudo besar dengan rentang frekuensi dari rendah sampai tinggi berupa sinyal latar pengotor (*noise*) yang berasal dari berbagai sumber. Sinyal latar pengotor (*noise*) ini adalah sinyal getaran yang menjalar dari bagian komponen mesin lain, bahkan bisa dari mesin lain dan peralatan lain yang terpisah tetapi terpasang pada dasar atau fondasi yang sama. Amplitudo getaran frekuensi tinggi akan lebih cepat mengecil dengan menurunnya kecepatan putaran poros, dibanding dengan amplitudo dari getaran frekuensi rendah atau menengah. Hal ini menyebabkan kesulitan dalam pengukuran terutama untuk sinyal getaran rentang frekuensi tinggi. Pada bantalan berkecepatan tinggi, daya atau amplitudo dari getaran frekuensi tinggi menurun atau berkurang dengan menjalarnya getaran. Pada kecepatan rendah, hubungan atau pengaruh antara frekuensi getaran rendah atau menengah dari sinyal getaran komponen mesin yang diukur dengan getaran getaran frekuensi tinggi dari bagian mesin lainnya lebih buruk dibanding dengan mesin dengan kecepatan tinggi. Dengan demikian mesin dengan moda operasi tidak stabil dan getaran frekuensi tinggi dengan amplitudo rendah menyebabkan satu kekhasan dalam diagnosa kondisi bantalan dengan kecepatan rendah. Walaupun demikian analisa sampel spektrum frekuensi getaran sampai frekuensi tinggi merupakan metode diagnosa kondisi komponen mesin yang paling handal diantara metode metode lainnya yang ada untuk bantalan berkecepatan rendah. Efisiensi diagnosa akan semakin tinggi dengan semakin besarnya kisaran dinamik serta linieritas dari sensor yang digunakan dan sampel dari sinyal sinyal acak berasal dari bagian komponen mesin mana saja [25-27].

Satu pendekatan dengan pemodelan baru yang berbeda, yaitu pemodelan penjalaran kerusakan, juga telah mulai dikembangkan. Sinyal getaran dari pengukuran getaran digunakan untuk memperkirakan tingkat keparahan kerusakan. Kemudian dengan menggunakan suatu metode diagnostik kerusakan maka ukuran kerusakan dapat diperkirakan dan kemudian dibandingkan dengan ukuran kerusakan yang diprediksi dari pemodelan penjalaran kerusakan. Suatu ukuran sesaat laju penjalaran kerusakan kemudian dapat ditentukan daripada suatu ukuran dan perilaku pertumbuhan kerusakan yang bervariasi. Dengan demikian suatu perkiraan umur sisa komponen mesin yang cukup tepat bisa ditentukan. Metode prognostik yang mampu menyesuaikan diri ini melebihi kemampuan

pemodelan deterministik tanpa penyesuaian. Terlihat bahwa metode prognostik yang mampu menyesuaikan diri ini secara efektif mampu memperkirakan proses penjalaran kerusakan bantalan tanpa pengetahuan awal apapun mengenai parameter parameter pemodelan prognostik. Yang menjadi faktor kritis untuk kinerja keseluruhan dari sistem prognostik adaptif ini adalah kehandalannya untuk diagnostik kerusakan [28].

Meskipun metode pemantauan kondisi dan diagnosa kerusakan sudah umum diaplikasikan dan pada umumnya di kisaran frekuensi rendah sampai menengah, maka metode diagnostik kondisi bantalan yang sudah berkembang maupun yang masih berkembang termasuk yang sudah umum dipakai maupun yang masih diusulkan tetap akan memberikan inspirasi, rangsangan dan menjadi pedoman acuan dalam penelitian penelitian pengembangan selanjutnya [29,30,31]. Dari semua teknik dan metode yang ada sampai saat ini, semuanya efektif hanya untuk kerusakan yang sudah bermakna dimana sinyal getarannya sudah dapat terukur dengan nyata [32-34]. Sedangkan untuk kerusakan dini yang sinyalnya belum merupakan sinyal getaran, sampai saat ini belum ada teknik dan metode yang sudah dapat diaplikasikan secara bermakna. Disinilah penelitian ini akan berkontribusi suatu kemajuan didalam metode atau teknik untuk menentukan kerusakan dini melalui deteksi sinyal penjalaran tegangan.

2.2. Sinyal Frekuensi Tinggi dari Kerusakan Dini Bantalan

Pada tahapan awal dari suatu kerusakan biasanya sinyal getarannya kecil pada amplitudonya tetapi tinggi pada tingkatan frekuensinya. Pada bantalan bantalan dengan elemen gelinding, saat kerusakannya masih berukuran mikroskopik, impuls awal dari sinyal bantalan biasanya pendek dan pada frekuensi yang tinggi bisa sampai 300 kHz [35]. Suatu sinyal berfrekuensi tinggi sampai diatas 200 kHz, yang berasal dari tumbukan yang ditimbulkan oleh elemen gelinding bantalan yang berputar berulang terhadap satu kerusakan, telah ditemukan pada satu bantalan yang mengalami kerusakan tahapan awal di sistem roda gigi penggerak baling baling helikopter pada tahun 1977. Tumbukan semacam ini dapat membangkitkan berbagai resonansi dari elemen bantalan. Dengan

menganalisa modulasi dari semua resonansi yang terjadi, frekuensi tumbukan pada bantalan dapat ditentukan [36].

Pada sistem bantalan dengan elemen gelinding, tumbukan lemah dengan waktu yang singkat dapat membangkitkan resonansi dengan frekuensi tinggi. Gelombang resonansi ini merupakan energi terkonsentrasi pada satu lebar pita yang sempit dengan kisaran frekuensi tinggi daripada tersebar luas, dimana kisaran frekuensi tinggi tersebut lebih tinggi daripada frekuensi frekuensi resonansi ataupun harmonik yang ada. Demikianlah satu sinyal getaran dari suatu kerusakan dini dengan ukuran sangat kecil bahkan mikroskopik [37,38]. Sinyal getaran kerusakan pada bantalan dilaporkan pada umumnya pada kisaran frekuensi rendah daripada kisaran frekuensi tinggi. Hal ini adalah karena kerusakan sudah terjadi dan ada secara nyata bermakna sehingga tumbukannya cukup keras. Satu daftar dari 11 jenis kerusakan bantalan yang penting dengan frekuensi getarannya yang timbul telah dibuat. Sinyal getaran yang diukur adalah ukuran dari gerak relatif yang merupakan kumpulan dari keseluruhan getaran yang ada. Frekuensi frekuensi getaran dari kerusakan yang penting ternyata timbul dengan suatu nilai indeks yang tinggi seperti contoh nilai indeks 10 untuk kerusakan pada penutup komponen mesin dan nilai indeks 11 untuk eksitasi dari pemipaan. Nilai indeks ini merupakan faktor kelipatan dari frekuensi kecepatan putaran poros [39,40].

Perhatian dan minat untuk analisa getaran dengan kisaran frekuensi tinggi tidak bertambah besar selama ini. Satu faktor yang menghambat perkembangan analisa getaran pada kisaran frekuensi tinggi ini adalah pembatasan yang sangat ketat yang ditentukan berdasarkan perhitungan tradisional. Hal ini adalah dikarenakan kenyataan bahwa frekuensi tinggi berarti karakteristik panjang gelombang yang pendek, sehingga teknik penentuan deterministik yang tradisional seperti elemen hingga dan elemen elemen batas, diarahkan untuk menggunakan diskretisasi *mesh* yang sangat halus sehingga konsekuensinya membuat biaya perhitungan menjadi tinggi [41,42]. Terdapat 2 gejala utama yang dapat diamati untuk mendeteksi sinyal getaran dari kerusakan dini pada bantalan. Pertama, adalah penampilan dari pulsa kejut, dan kedua, adalah penampilan amplitudo modulasi dari gaya gaya geser didalam bantalan. Pulsa kejut tergantung pada kecepatan

putaran poros. Amplitudo dari pulsa kejut adalah jauh lebih kecil tetapi jumlah pulsa yang timbul adalah lebih banyak untuk poros berkecepatan putaran rendah dibandingkan dengan poros berkecepatan putaran tinggi. Hal ini adalah karena lapisan pelumas lebih mudah pecah pada kecepatan putaran lebih rendah sehingga menimbulkan pulsa tumbukan lebih sering tetapi dengan gaya tumbukan yang lebih kecil karena kecepatan putaran yang rendah. Amplitudo dari modulasi gaya gesek relatif sama pada kecepatan putaran poros yang rendah ataupun tinggi. Hal ini adalah dikarenakan mekanisme gaya gesekan yang sama pada kecepatan putaran rendah maupun tinggi [43,44].

Analisa spektrum frekuensi tinggi tidak memberikan banyak informasi diagnostik karena getaran mesin pada lebar pita frekuensi tinggi pada umumnya tidak mengandung komponen harmonik yang kuat yang dengan mudah dapat dideteksi. Akan tetapi dengan menggunakan analisa spektrum terhadap sampul dari sinyal acak berfrekuensi tinggi, modulasi dapat terlihat dengan jelas didalam sampul tersebut tetapi tidak mudah di sinyal acak berfrekuensi tinggi. Timbulnya komponen harmonik dalam spektrum dari sampul memberikan petunjuk bahwa pada bagian yang didiagnosa terdapat kerusakan atau beban dinamis dari mesin disebelahnya [45-47]. Terdapat 5 masalah utama mengenai implementasi suatu diagnostik: pertama, besarnya volume parameter diagnostik yang didapat dari sinyal; kedua, pengaruh dari beban kejut periodik lain yang bukan berasal dari kerusakan (pada tahapan awal dari kerusakan bantalan, sampai sekarang belum ditemukan solusi praktis untuk menampilkan komponen getaran yang kuat akibat eksitasi dari beban kejut seperti diatas); ketiga, perlunya memperbaiki sensor sensor di titik titik dimana dapat dijamin bisa mendapatkan informasi sebanyak-banyaknya, contohnya didaerah terdekat ke bantalan (hal tersebut dikarenakan sinyal frekuensi tinggi muncul cepat di daerah sekitar kerusakan tetapi kemudian cepat pula melemah dengan semakin jauhnya dari sumber sinyal); Keempat, pemilihan atau pengaturan moda operasi mesin pada saat mesin beroperasi dan sedang dilakukan pengukuran (pada mesin dengan pengaturan multi mode, kerusakan kerusakan dapat bermunculan secara acak dan tidak konsisten, terjadi hanya pada moda operasi mesin dimana bagian yang rusak mengalami beban); Kelima, pernyataan khusus untuk memperhatikan kerusakan

yang muncul pada berbagai tahapan dalam umur kerja mesin. Sangat perlu untuk menggunakan algoritma diagnostik sehingga paling tidak memperhitungkan keadaan getaran frekuensi tinggi yang memberikan respons perubahan osilasi minimal, untuk mendeteksi kerusakan manufaktur dari produk percobaan. Tetapi, saat bersamaan secara berlawanan, karakteristik getaran frekuensi tinggi adalah yang pertama sekali memberi respons terhadap kerusakan pada pemasangan atau dudukan sehingga pada penggunaannya hal itu tidak boleh diabaikan [48-54].

2.3. Sensor Emisi Akustik Piezoceramic

Pekerjaan pekerjaan awal yang pernah dilakukan peneliti adalah berfokus pada penelitian untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi teknik teknik pemrosesan sinyal untuk aplikasi penampilan sinyal yang tertutup oleh sinyal latar pengotor (*noise*) dengan menggunakan bermacam sensor mulai dari sensor yang sudah umum dipasaran seperti accelerometer, sensor akustik sampai dengan sensor sensor yang dirancang khusus. Material keramik Piezoelektrik Lead-Zirconate Titanate PZT adalah material yang dipilih untuk digunakan dalam pengembangan rancangan sensor khusus emisi akustik atau gelombang tegangan (*stress waves*) untuk menangkap kerusakan dini dari komponen mesin bantalan gelinding secara tepat. Efektifitas material Piezoelektrik tersebut dalam menangkap sinyal gelombang tegangan (*stress waves*) telah dibuktikan dan dilaporkan dari beberapa pekerjaan penelitian sebelumnya oleh banyak peneliti [55-62].

Walaupun telah terbukti efektif menggunakan material PZT sebagai bahan dasar sensor, lokasi dan pemasangan sensor PZT yang paling efektif untuk menangkap informasi secara maksimum telah dicoba dan diteliti terlebih dahulu dalam pekerjaan penelitian ini. Kemudian rancangan dan pemasangan yang optimum dari sensor yang akan digunakan harus diketahui betul agar keberhasilan menangkap sinyal getaran kerusakan dini bantalan dan mengimplementasikan teknik pembersihan sinyal latar pengotor (*noise*) bisa tercapai dengan baik. Karena kompleksitas dari konfigurasi sistem mesin, maka hal tersebut bisa menjadi permasalahan sehingga membutuhkan proses uji coba *trial and error* [55].

Penggunaan bahan keramik PZT untuk sensor emisi akustik menunjukkan sensitivitasnya untuk mendeteksi emisi akustik sebagai sinyal getaran. Terdapat 2 frekuensi sinyal yang mengatasi frekuensi lainnya baik pada bantalan yang tidak rusak maupun yang rusak, dan penyebab penyebabnya harus ditentukan kemudian. Demikian pula lokasi pemasangan sensor sedekat mungkin dengan sumber emisi adalah penting untuk meminimalkan penurunan sinyal akibat media penjarannya dan meningkatkan ratio sinyal asli ke sinyal pengotor (SNR, *Signal-Noise ratio*) [57].

Sejumlah besar teknik teknik *Non Destructive Evaluation* (NDE) telah menjadi alat dan digunakan secara umum termasuk analisa analisa percobaan : deformasi, penetrasi cairan warna penunjuk retakan, tanda khusus dinamis (*dynamic signature*), tumbukan palu (*impact hammer*), percobaan gaung tumbukan (*impact echo*), serta analisa analisa gelombang : ultrasonik, radiographik, gelombang mikro (*microwave*), magnetik dan getaran. Satu teknologi NDE yang tumbuh unggul adalah implementasi dari percobaan emisi akustik (AE, *acoustic emission*). Permasalahan utama pada penggunaan AE sebagai metode praktis adalah kesulitan untuk menghubungkan antara sinyal yang diamati/ditangkap/diukur oleh sensor dengan kejadian atau kemunculan gelombang tegangan/AE. Sangat sulit untuk membuat pemodelan dari penjaran gelombang tegangan/elastis yang membawa informasi mengenai AE yang dikandungnya setelah gelombang tersebut menjaral didalam suatu media pejal. Permasalahan permasalahan yang timbul adalah sebagai berikut :

1. Sinyal AE akan terlihat pemunculannya dengan perubahan yang besar akibat gangguan dalam perjarannya pada satu jarak tertentu didalam media pejal.
2. Karena sinyal AE tersebut pada orde frekuensi tinggi maka sensor biasa yang digunakan biasanya akan mengalami resonansi saat penangkapan/pengukuran sinyal tersebut yang akan memperbesar gangguan dan perubahan pada sinyal gelombang yang ditangkap.
3. Gelombang tegangan/AE dapat menjaral didalam media pejal dengan refleksi berganda, atau melalui jalur yang banyak, atau tanpa refleksi di perjalanan antara sumber dengan sensor.

Adalah suatu kesulitan tersendiri untuk menampilkan sinyal yang terkubur didalam sinyal latar pengotor (*noise*) yang pada tingkatan tinggi.

Permasalahan tersebut diatas menjadikan kegiatan penelitian untuk melakukan investigasi dan arahan untuk mengimplementasikan suatu teknik semacam jaringan syaraf buatan (*artificial neural network*) untuk dapat menunjukkan hubungan antara data yang ditangkap sensor dengan gelombang dari pemunculan/pemancaran gelombang tegangan/AE. Jaringan syaraf adalah suatu sistem jaringan yang cukup dikenal dengan baik sebagai sistem yang mampu memperkirakan fungsi fungsi yang tepat pada kondisi hubungan tidak linier yang kompleksitasnya sangat tinggi. Dalam prakteknya, teknik jaringan syaraf (*neural network*) akan bekerja dengan mengambil hasil pengukuran sensor yang mutakhir dan juga memperkirakan intensitas dan lokasi pemunculan suatu gelombang tegangan/AE yang terjadi tepat sesaat sebelum saat pengukuran. Disamping banyak hal hal baru yang muncul atau baru diketahui dari kegiatan investigasi dan kebutuhan akan penyelesaian masalah lebih lanjut, kelihatan bahwa kerangka kerja pengembangan teknik dan metode tersebut diatas akan menuju ke pengembangan sistem NDE yang sangat kompleks. Dengan demikian masih banyak pekerjaan yang harus dilakukan dan diselesaikan untuk dapat mengangkat ide-ide tersebut dari tahapan konsep ke implementasi praktis di lapangan yang sebenarnya [63].

2.4. Teknik Pemrosesan Sinyal

Penggunaan teknik pembuangan sinyal pengotor yang adaptif (*adaptive noise cancellation*, ANC), tidak membutuhkan informasi atau pengetahuan mengenai kedua sinyal karena saringan yang adaptif mempunyai kemampuan untuk mengatur parameternya sendiri secara otomatis. Walaupun demikian sangat dibutuhkan informasi mengenai model dari sinyal latar pengotor (*noise*) yang menutupi sinyal getaran yang sebenarnya. Semakin akurat atau semakin mendekati kesamaannya dengan sinyal latar pengotor, menentukan kinerja dari teknik ANC tersebut. Sebenarnya aplikasi teknik ANC untuk menghilangkan sinyal latar pengotor dalam berbagai bentuk aplikasi telah dilaporkan cukup luas pengembangan dan penerapannya [64,65].

Pada situasi dimana sinyal getaran terkubur didalam sinyal latar pengotor (*noise*) karena sinyal getaran frekuensi rendah dari antara lain ketidak-sebarisan poros, ketidak-seimbangan rotor, harmonik getaran kaitan gigi roda gigi ataupun getaran struktur mesin menutupinya dibutuhkan suatu pendekatan metode lain yang mampu mengatasi permasalahan itu. Satu metode untuk membersihkan ataupun menekan komponen sinyal pengotor tersebut adalah penggunaan teknik penyaringan. Teknik ini membutuhkan informasi pengetahuan lanjut mengenai sinyal latar pengotor (*noise*) dan karakteristik sinyal sebenarnya [66].

Teknik ANC dengan sensor tunggal berdasarkan algoritma matematika *Estimate Maximise*, EM, telah dicoba dikembangkan. Sinyal latar pengotor (*noise*) yang harus dihilangkan dimodelkan sebagai suatu proses *stochastic* dan menggunakan algoritma mampu sesuai diri menurut waktu (*time adaptive*) untuk secara adaptif memperkirakan parameter parameter untuk membuat perkiraan bentuk sinyal yang akan dihilangkan. Algoritma mampu sesuai diri tersebut dikembangkan berdasarkan modifikasi dari algoritma matematika *Block Estimate Maximise* (EM) [67].

Kerusakan pada bantalan gelinding dapat ditentukan untuk setiap tingkat kerusakan dengan cara membandingkan parameter getaran pada waktu pengukuan yang berbeda. Hasilnya menunjukkan bagaimana kecendrungan dari pertumbuhan kerusakannya dan dapat digunakan untuk memperkirakan waktu rata-rata sebelum rusak hancur (*mean time before breakdown, MTBB*) atau sisa umur kerjanya [68].

Dari percobaan percobaan pendahuluan dalam beberapa eksperimen awal telah didapat hasil yang menjanjikan dari aplikasi sensor berbahan keramik Piezoelektrik serta implementasi dari teknik ANC untuk menyaring sinyal latar pengotor (*noise*) dimana sinyal kerusakan bantalan yang sebenarnya dapat ditampilkan. Akan tetapi terdapat permasalahan untuk aplikasi praktisnya yaitu dibutuhkannya 2 sinyal masukan : sinyal primer dan sinyal referensi, untuk mengimplementasikan teknik ANC tersebut diatas. Sinyal primer adalah sinyal hasil pengukuran yang berisi sinyal kerusakan bantalan beserta sinyal latar pengotor (*noise*) yang menguburnya, sedangkan sinyal referensi adalah suatu sinyal yang merupakan pemodelan dari sinyal latar pengotor (*noise*). Keberhasilan teknik ANC adalah sangat tergantung dari seberapa dekatnya sinyal referensi

dengan sinyal latar pengotor yang ada saat itu. Sulit membuat satu pemodelan sinyal latar pengotor maupun mengambil langsung dari bagian lain di mesin yang sedang diteliti karena ternyata hasilnya tidak sesuai karena banyaknya faktor-faktor luar dan dalam yang menentukan sinyal latar pengotor (*noise*). Aplikasi deteksi emisi akustik dapat mengidentifikasi frekuensi dering atau “ring” yang menunjukkan adanya kerusakan bantalan mesin. Pengembangan sensor emisi akustik dengan menggunakan bahan keramik Piezo PZT telah menunjukkan dapat mendeteksi sinyal getaran bantalan mesin [69-71].

Keberhasilan penerapan teknik ANC untuk mendeteksi kerusakan awal dari bantalan elemen gelinding tergantung dari hasil pengukuran sinyal primer dan sinyal sekunder yang memenuhi asumsi dasar dari sinyal yang terdapat dalam teori ANC. Sinyal primer adalah sinyal getaran yang diukur secara total dan perlu dibersihkan sinyal latar pengotornya, sedangkan sinyal sekunder adalah sinyal yang diukur untuk dijadikan sebagai pemodelan dari sinyal latar pengotor (*noise*) [69]. Kelayakan dari penggunaan teknik ANC untuk mendeteksi sinyal getaran dari bantalan elemen gelinding telah ditunjukkan dengan percobaan percobaan. Algoritma matematik LMS (*Least Mean Square*) sebagai teknik penghilang sinyal latar pengotor (*noise*) telah dicoba dan dikembangkan dalam bidang pemrosesan sinyal digital. Penerapan algoritma LMS ini untuk teknik ANC dalam pemrosesan sinyal getaran dari emisi akustik telah diuji coba untuk analisis kerusakan bantalan dan proses permesinan alat [29,69,71].

Metode lain untuk teknik ANC dengan sensor tunggal juga dikembangkan, yaitu menggunakan suatu struktur dengan seri dari algoritma adaptasi dengan penerapan penyaring *Finite Impulse Response* (FIR) dan algoritma jenis LMS. Hasilnya belum dapat diandalkan karena penundaan pada konvergensinya dan malahan kesalahan dalam proses penghilangan sinyal pengotor bisa terjadi pada penerapan teknik ini. Penyebab utama dari permasalahan algoritma ini adalah kompleks dan banyaknya perkalian yang dibutuhkan didalam algoritma matematika yang diterapkannya [72]. Algoritma *Estimation-Maximisation* (EM) diajukan untuk memperkirakan parameter parameter pemodelan sinyal pengotor yang akan dihilangkan dengan menerapkan proses *Auto Regressive* (AR). Hasil kinerjanya menunjukkan bahwa algoritma tersebut berhasil memperkirakan parameter

parameter sinyal pengotor walaupun untuk kondisi sinyal dari pengukuran yang mempunyai nilai SNR kecil [73].

Namun kenyataan sebenarnya tidak banyak peneliti yang menaruh perhatian kepada penerapan teknik ANC untuk menghilangkan sinyal latar pengotor dari suatu hasil pengukuran sinyal getaran. Hal ini kemudian dapat dipahami karena ternyata teknik penghilangan sinyal latar pengotor dalam analisis getaran bantalan elemen gelinding hanya dibutuhkan bila perbandingan sinyal terhadap pengotor (*signal to noise ratio*, SNR) sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa kerusakan bantalan adalah masih sangat kecil atau masih dalam kondisi kerusakan awal. Padahal teknik ANC akan efektif dan efisien bila SNR pada sinyal getaran hasil pengukuran relatif cukup besar yang artinya kerusakan bantalannya sudah cukup bermakna. Tantangan lainnya adalah bahwa teknik ANC akan menghasilkan hasil yang baik tergantung dari nilai faktor konvergensi iterasinya yang paling optimum. Nilai faktor konvergensi tersebut harus dicari dengan cara percobaan *trial and error*. Analisis getaran untuk deteksi kerusakan dini mendapat perhatian yang sangat kecil dari peneliti karena untuk kondisi kerusakan dini ternyata sinyalnya dalam kisaran frekuensi tinggi tetapi tingkat amplitudonya sangat kecil sehingga menjadi terkubur oleh sinyal latar pengotor dan sinyal pengaruh lainnya. Dengan demikian nilai SNR adalah sangat kecil dan pemodelan bentuk sinyal latar pengotor menjadi sangat kompleks sehingga jauh dari kesamaan. Sebagai konsekuensi logisnya pula akan dibutuhkan teknik analisis sinyal frekuensi tinggi yang lebih kompleks, serta dibutuhkannya pula sensor yang harus dirancang khusus dan lokasi penempatannya yang tepat. Dari satu laporan hasil *review* terhadap kegiatan penelitian dalam bidang analisis getaran yang dimuat dalam *report of a review of rolling element bearing vibration "Detection, Diagnosis and Prognosis" for the Defence Science and Technology Organisation of Department of Defence – Australia*, ternyata hanya ada 3 peneliti di dunia yang mengawali sebagai pionir penelitian analisis getaran bantalan dengan menggunakan teknik ANC secara langsung yaitu Chaturvedi (ASME - USA), Bannister (Cranfield - UK) and Tan (QUT - Aus) yang melakukan penelitiannya pada tahun 1982, 1985, 1991 berturut-turut [74].

Teknik awal diagnosa kegagalan dan pemantauan kondisi telah diteliti untuk digunakan dalam praktek menentukan kerusakan terutama pada mulanya terhadap mesin perkakas sejak dua dekade yang lalu [75]. Pencitraan sinyal emisi akustik untuk pemantauan kondisi perkakas dalam teknik permesinan juga telah diteliti untuk diaplikasikan. Tingkat energi emisi akustik yang dideteksi oleh sensor tergantung dari lokasi penempatan sensor karena adanya pelemahan (*attenuation*) dan kerugian transmisi sinyal gelombang dalam perkakas mesin dan pemegangnya. Telah ditunjukkan bahwa tingkat energi emisi akustik meningkat secara eksponensial pada kecepatan potong yang tinggi seiring dengan keausan perkakas mesin [29].

Pada awalnya penggunaan spektrum dari komponen komponen sinyal gelombang emisi akustik memberikan hasil yang cukup menjanjikan untuk deteksi keausan pada pemantauan kondisi perkakas potong. Spektrum sinyal gelombang emisi akustik ini digunakan dalam pengembangan model dinamik untuk mendeteksi keausan perkakas potong dalam proses pemotongannya yang secara bertahap bertambah buruk kondisinya dari kondisi dapat diterima sampai kondisi tidak dapat diterima, yaitu kondisi perkakas potong dari kondisi tajam sampai menjadi tumpul. Model tersebut dicoba dengan dua kumpulan data dari percobaan pemotongan logam dengan dua kondisi yang berbeda. Kumpulan data tersebut berupa spektrum frekuensi dari gelombang sinyal emisi akustik yang dideteksi dari perkakas potong yang melakukan proses pemotongan logam. Satu kumpulan data mewakili hasil dari pemotongan dengan perkakas potong yang tajam, sedangkan kumpulan data lainnya mewakili hasil dari pemotongan dengan perkakas potong yang tumpul. Ternyata didapat dari percobaan tersebut diatas adalah bahwa kinerja pemodelan yang dibuat dapat handal pada aspek jumlah pengamatan yang diklasifikasikan secara benar dan konsistensi pada klasifikasi pengamatan yang diurut secara benar [76].

Algoritma Griffith juga telah menunjukkan potensinya untuk menjadi metode untuk teknik ANC. Metode ini hanya menggunakan sinyal primer dari sensor emisi akustik yang dibuat khusus dengan menggunakan bahan keramik Piezo. Hasil percobaannya menunjukkan efektivitas penggunaan algoritma Griffith untuk menampilkan sinyal kerusakan bantalan dan untuk diterapkan dalam teknik ANC

walaupun belum cukup memuaskan dan efisiensi prosesnya yang masih rendah [38]. Efektivitas penerapan teknik ANC dengan menggunakan algoritma matematik LMS (*Least Mean Square*) untuk menghilangkan sinyal latar pengotor sangat bergantung pada pemilihan nilai faktor konvergensi untuk proses iterasi penghilangan sinyal latar pengotor. Suatu metode yang lebih tepat atau definitif perlu dikembangkan terus untuk menentukan nilai faktor konvergensi daripada melalui cara coba-coba (*trial and error*) [71].

Sinyal getaran bantalan berasal pada respons dari material bantalan dan sekelilingnya terhadap suatu sumber yang non linier. Respons getaran diakibatkan dari tumbukan dan gesekan antara elemen bantalan, dan umumnya digunakan sebagai bahan analisis getaran bantalan berfrekuensi tinggi. Pada analisis getaran yang konvensional, sinyal getaran diasumsikan sebagai satu deret bilangan frekuensi sementara sinyal bantalan yang dibangkitkan dari gesekan dan kerusakan adalah satu distribusi frekuensi yang kontinyu. Perbedaan karakter dasar dari sinyal getaran bantalan dengan sinyal getaran bagian mesin lainnya membuat pemisahan antara sinyal getaran bantalan dengan sinyal latar pengotornya yang menutupinya dapat dilakukan secara praktis. Dengan menggunakan teknik pemrosesan sinyal. Ada dua cara untuk menyaring sinyal getaran dengan perangkat lunak yang khusus dikembangkan untuk itu, yaitu dengan penyaringan sebelum proses deteksi (*pre-detection filter*) dan penyaringan setelah proses deteksi (*post-detection filter*). Pada teknik penyaringan sebelum deteksi, data yang didapat disaring dengan penyaring lebar pita frekuensi 1/3 oktaf lewat. Kemudian data yang sudah disaring diubah kedalam frekuensi domain sehingga spektrum frekuensinya dapat dianalisis sehingga dapat ditentukan frekuensi mana saja yang merupakan sinyal pengganggu untuk dibuang. Kemudian setelah itu kumpulan data setelah proses penyaringan disaring lagi dengan saringan lain yang sudah dimodifikasi untuk mengkompensasi bagian dari sinyal getaran bantalan yang terbuang bersama pengaruh sinyal pengotornya. Setelah transformasi balik kembali ke sinyal domain waktu, kumpulan data tersebut kemudian dilakukan demodulasi sehingga muncul kembali sebagai sinyal getaran bantalan yang asli. Pada teknik penyaringan setelah deteksi, dilakukan demodulasi terhadap data yang didapat dan kemudian ditransformasikan menjadi

spektrum frekuensi. Setelah itu frekuensi-frekuensi tertentu yang telah dihitung spesifik dari komponen-komponen sinyal yang telah didemodulasi, dipercaya sebagai sinyal yang sudah terpengaruh, kemudian dibuang. Untuk mendapatkan sinyal getaran bantalan yang asli, spektrum frekuensi tadi dikompensasikan dahulu dengan suatu filter yang telah dimodifikasi sebelum ditransformasikan kembali ke dalam domain waktu. Walaupun kedua teknik tersebut efektif, hasilnya tergantung dan membutuhkan penentuan masukan frekuensi sinyal yang terpengaruh yang harus dibuang. Teknik pertama berguna untuk keperluan diagnosa kerusakan, sedangkan teknik kedua lebih berguna untuk keperluan pemantauan dan penyaringan [2,77].

Teknik pemrosesan sinyal digital dapat digunakan untuk memisahkan sinyal bantalan dengan sinyal getaran bagian mesin lainnya karena sinyal-sinyal tersebut mempunyai dasar karakteristik yang berbeda. Dua variasi teknik telah cukup dikenal yaitu satu variasi yang memisahkan sinyal-sinyal tersebut sebelum modulasi, sedangkan variasi yang satunya adalah yang memisahkan sinyal dengan komponen modulasinya yang spesifik. Keduanya berguna bagi berbagai aplikasi. Variasi pertama sangat berguna untuk keperluan diagnosa karena dapat melakukan pemisahan sinyal bantalan dari sinyal getaran bagian mesin lainnya tanpa perlunya masukan secara manual oleh operator. Variasi kedua lebih berguna untuk pemantauan yang menerus dan aplikasi penyaringan lainnya, terutama bila sudah diketahui frekuensi komponen getarannya yang spesifik perlu dibuang dari suatu sinyal demodulasi. Proses-proses penyaringan dan modulasi dilakukan oleh perangkat lunak pemrosesan sinyal digital. Dengan demikian tidak diperlukan lagi penyaring khusus atau perangkat keras *demodulator* yang dibutuhkan [77].

Pada aplikasi yang lain, respons frekuensi tinggi getaran yang berupa sinyal gelombang emisi akustik telah diteliti untuk mendeteksi gelembung-gelembung gas dalam fluida yang diisikan ke dalam satu tabung dalam tangki silinder untuk mendeteksi adanya kebocoran. Respons harmonik frekuensi tinggi terhadap satu gaya titik pada kulit silinder tangki tersebut mewakili gelembung-gelembung gas di dalam tabung dalam silinder tersebut telah diteliti secara analitik. Sinyal getaran tersebut dideteksi oleh sensor emisi akustik, dan kemudian dianalisis dan dijabarkan dalam kontribusi bentuk gelombang untuk berbagai bentuk tabung gas.

Percobaan ini menunjukkan pentingnya eksitasi frekuensi sinyal getaran pada kinerja metode deteksi kebocoran gas berdasarkan deteksi emisi akustik [78].

Sinyal getaran berupa emisi akustik dari satu *gearbox* yang dirancang dan dibangun khusus telah digunakan pada percobaan untuk memantau kondisi roda roda gigi. Berbagai variasi bentuk kerusakan sengaja dibuat dengan maksud mensimulasi kondisi aus dan putus yang mungkin terjadi pada gigi-gigi roda gigi yang digunakan selama umur kerjanya. Hasil percobaan yang didapat dari berbagai kecepatan operasi diplot terhadap kemungkinan penyebab kerusakan. Analisis sementara awal telah menunjukkan pentingnya menghubungkan antara sinyal emisi akustik yang dideteksi dengan bentuk kerusakan yang diketahui. Metode ini mempunyai potensi untuk dapat digunakan sebagai alat pada pengembangan teknik diagnosa kerusakan dini roda gigi untuk perawatan prediktif [79]. Kemampuan sensor emisi akustik untuk mendeteksi sinyal dari suatu sumber pada percobaan getaran bantalan mesin ternyata sebanding dengan kemampuan *accelerometer* untuk beberapa kasus kerusakan [58].

Sejumlah teknik yang mampu mendeteksi kerusakan dini di awal sebelum kerusakan yang hebat terjadi telah berkembang dan tersedia dengan kemampuan dan kecocokannya dengan kebutuhan berbeda-beda antara satu sistem dengan sistem lainnya. Satu persyaratan penting untuk semua teknik deteksi sinyal adalah kemampuannya mendeteksi kerusakan fungsi dalam yang berasal dari sumber sinyalnya pada suatu kerusakan dini. Satu diagnostik terhadap kondisi mesin yang rinci dan lengkap menggunakan analisis terhadap getaran frekuensi tinggi dari komponen suatu sistem bantalan. Ini termasuk dengan deteksi dan identifikasi terhadap kemungkinan kerusakan walaupun pada tahapan dini dari pertumbuhannya. Permasalahan utama dari aplikasi metode ini muncul bila komponen getaran frekuensi tingginya sangat lemah, karena komponen sinyal getaran frekuensi tinggi dengan tingkat amplitudo rendah dari bagian mesin lainnya dan bahkan dari mesin atau peralatan lainnya yang berada pada satu fondasi yang sama, akan menjalar pula ke titik pengukuran. Untuk mengatasi permasalahan ini, aplikasi metode yang lebih kompleks untuk pengukuran lanjut dan diagnosa, serta instrumentasi analisis sinyal dibutuhkan. Metode menggunakan teknik analisis getaran frekuensi tinggi dibutuhkan, demikian pula

instrumentasi pengukuran yang mampu menangkap sinyal getaran frekuensi tinggi [25].

Satu sistem diagnosa dan pemantauan kondisi generasi baru telah dikembangkan. Sistem ini menggunakan kombinasi analisis getaran dengan semua teknik diagnosa dan pemantauan kondisi yang modern serta sistem komputer atau teknologi informasi yang mutakhir. Sistem ini melakukan diagnosa kondisi secara otomatis dengan pemantauan dan pengukuran yang berkala daripada pemantauan kondisi yang menerus. Penekanan utama dari sistem ini adalah aplikasi dari sistem yang dapat dibawa (*portable*), sistem tidak terikat (*off-line*) yang memungkinkan dilakukannya pemantauan kondisi ratusan mesin. Dasar dari sistem ini adalah suatu sistem pakar yang berkemampuan untuk melakukan proses otomatis dengan cakupan yang luas dan banyak dalam mengumpulkan data komponen harmonik getaran serta mengukur amplitudo, frekuensi dan kemungkinan sumber getarannya. Sistem generasi baru ini melangkah lebih maju dari sistem pemantauan keadaan getaran mesin menjadi sistem pemantauan kondisi teknis getaran mesin [25,80].

Metode baru *Blind Equalisation (Deconvolution)* telah dicoba kembangkan pada awalnya untuk kebutuhan kanal komunikasi data pada teknik GSM agar komunikasinya dapat berlangsung dengan terang dan jernih tanpa adanya sinyal pengotor. Tujuan dari metode *Blind Deconvolution* adalah untuk mendapatkan kembali satu sinyal yang diteruskan dari suatu penerima tanpa harus mempunyai pengetahuan ataupun informasi apapun sebelumnya mengenai kanal yang tidak diketahui. Kelebihan utama dari metode *Blind Deconvolution* dibanding metode konvensional yang ada adalah kemampuan mengetahui proses mulainya secara otomatis (*automatic start up*) dan kemampuan untuk tidak membutuhkan tahapan pelatihan atau coba-coba awal (*training stages*) [81,82].

Metode analisis statistik kumulatif orde tinggi (*Higher Order Cumulants*) telah dibuktikan kemampuannya sebagai alat perhitungan yang sangat kuat untuk proses *Blind Deconvolution* pada kanal telekomunikasi data. Skema berdasarkan pemodelan *non causal auto regressive (AR)* telah menjadi pilihan yang lebih terpilih karena algoritmanya yang linier dan penerapan proses iterasi penyamaan (*equalisation*) yang mudah dan nyaman. Walaupun demikian, tetap ada beberapa

kekurangan dalam metode *Blind Deconvolution* seperti antara lain : (1) Penggunaan potongan kumulan yang diagonal dan non-diagonal (*diagonal and non-diagonal cumulant slices*) dibutuhkan. Padahal penggunaan potongan kumulan yang non-diagonal dapat menyebabkan degradasi atau penurunan kinerja dari berjalannya algoritma matematika yang digunakan, (2) algoritma matematika yang terbentuk mempunyai tingkat kompleksitas perhitungan yang sangat tinggi, (3) laju konvergensi perhitungannya dapat menjadi sangat lambat. Satu algoritma matematika statistik orde tinggi *Blind Deconvolution* yang lain dan baru juga telah dikembangkan dimana melibatkan hanya fungsi statistik otokorelasi atau kumulan orde 2 dan potongan diagonal kumulan orde 4. Algoritma tersebut juga berdasarkan pemodelan *non causal*, tetapi bedanya adalah parameter *Auto Regression*-nya selalu disesuaikan untuk setiap sampel dengan menggunakan skema relaksasi lebih yang berurutan (*Successive Over-Relaxation*, *SOR*). Skema yang digunakan ini menyebabkan laju konvergensi perhitungannya menjadi lebih cepat dan memperbaiki ketangguhan (*robustness*) dari pemilihan ukuran tahapan iterasi dibandingkan terhadap skema biasanya dengan *LMS* [83]. Suatu perbandingan mengenai ketangguhan dan efisiensi dari teknik *Blind Deconvolution* menggunakan skema statistik orde tinggi yaitu antara orde 3, orde 4, orde 5 dengan orde 6 telah diteliti dan dibandingkan hasilnya. Hasil perbandingan tersebut digunakan sebagai pedoman untuk memilih skema orde statistik ke-berapa yang akan memberikan kinerja terbaik. Walaupun demikian, skema orde ke-berapa yang akan mempunyai kinerja yang lebih baik daripada yang lain tidak dapat ditentukan dengan mudah. Hal ini adalah dikarenakan standard deviasi dari hasil hasil *Blind Deconvolution* dan tujuan analisis harus pula dipertimbangkan. Sebagai contoh, bila yang diutamakan adalah hanya puncak amplitudo tinggi atau utama saja, maka skema dengan orde 6 statistik adalah pilihan yang baik karena beban perhitungannya yang lebih rendah. Sedangkan skema dengan orde 3 statistik dapat memberikan kualitas hasil terbaik dimana sinyal pengotor yang lebih sedikit sehingga sinyal yang ditampilkan lebih jelas dan lebih bersih. Akan tetapi skema ini membutuhkan lebih banyak proses iterasi sehingga skema orde 3 statistik ini cocok bila memang hasil *Blind Deconvolution* yang paling utama dan yang dibutuhkan adalah sebaik mungkin.

Sedangkan untuk kebutuhan yang tidak terlalu tinggi tuntutananya seperti masih diperbolehkan adanya sedikit sinyal pengotor atau hasilnya boleh tidak begitu terang atau jelas, maka skema orde 6 statistik akan lebih baik dipilih dan bermanfaat karena berkurangnya tingkat kompleksitas perhitungannya [84].

Teknik pemrosesan sinyal digital (*Digital Signal processing, DSP*) lainnya yang baru dan lanjut juga dikembangkan dalam bidang teknik kelistrikan, teknik elektronika dan teknik telekomunikasi untuk menghilangkan sinyal latar pengotor, pemrosesan pembicaraan serta pemrosesan citra, dan mempunyai potensi yang besar untuk digunakan dalam usaha deteksi sinyal getaran kerusakan bantalan dan analisis lainnya dalam bidang Teknik Mesin.

Pekerjaan awal difokuskan pada penelitian untuk menemukan dan mengevaluasi teknik pemrosesan sinyal gelombang yang cocok untuk menampilkan sinyal gelombang kerusakan dini. Karakteristik getaran dan sinyal dari kerusakan bantalan elemen gelinding pada tahapan awal/dini dapat diteliti, dipelajari dan ditentukan setelah sinyal-sinyal tersebut dapat diekstraksi dan direkonstruksi kembali dari dalam sinyal gelombang yang ditangkap oleh sensor secara keseluruhan. Pengutamaannya adalah untuk menverifikasi penggunaan algoritma *Blind Deconvolution* sebagai metode pemrosesan sinyal digital yang terpilih dari berbagai metode yang ada, serta mendapatkan suatu peluang untuk mengembangkan wawasan pengetahuan yang lebih dalam terhadap aplikasi dan operasi metode tersebut diatas. Demikian pula untuk memperluas kemungkinan untuk mengkolaborasi cabang-cabang keteknikan lainnya dengan praktek teknik mesin. Sinyal gelombang kerusakan dini pada elemen bantalan gelinding yang dikorupsi atau terkubur didalam sinyal latar pengotor (*noise*) dicoba diekstraksi dengan menggunakan metode pemrosesan sinyal yang dipilih, yaitu algoritma *Blind Decovolution*, yang dijalankan pada program aplikasi Matlab®.

Dari kajian pustaka dapat diketahui bahwa metode *Blind Deconvolution* adalah suatu metode yang sangat ampuh, dan telah terbukti sebagai praktek terbaik untuk restorasi sinyal asli pada pemrosesan sinyal digital untuk komunikasi, pembicaraan maupun citra. Kelayakannya untuk diterapkan pada penghilangan sinyal latar pengotor dalam pemrosesan sinyal getaran juga telah diteliti terus karena hasilnya

sangat menjanjikan [85]. Algoritma statistik orde tinggi untuk metode *Blind deconvolution* telah dikaji terus, dikembangkan dan diterapkan aplikasinya dalam pelaksanaan penelitian ini dimana hasilnya baik dan dapat dijadikan sebagai teknik penghilang sinyal latar pengotor yang baru, efektif dan efisien.

2.5. Teori dan Aplikasi *Blind Deconvolution*

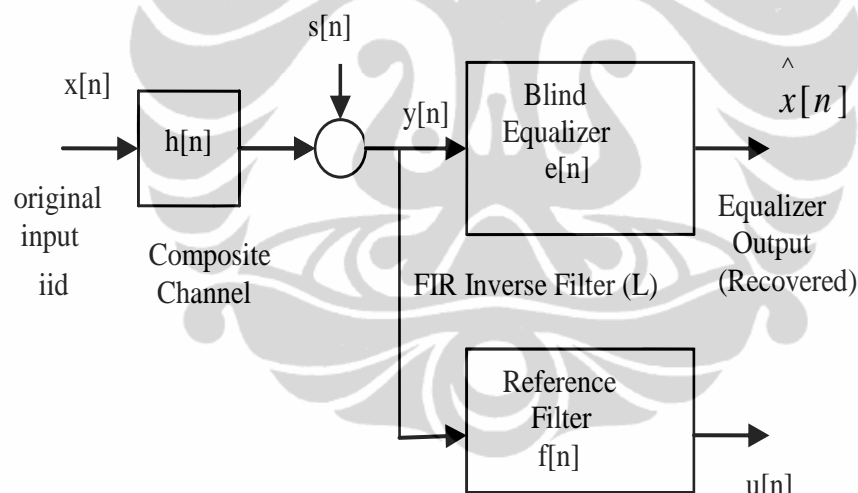
Terdapat dua klasifikasi metode *Blind Deconvolution* dimana tergantung pada cara menampilkan informasi sinyal asli dari sinyal hasil pengamatan/pengukuran, yaitu [86,87]:

1. *Second Order Cyclostationary Statistics* (SOCS).
2. *Higher Order Statistics* (HOS), baik secara implisit maupun eksplisit.

Pembahasan mengenai kedua pendekatan klasifikasi tersebut diatas beserta penerapannya banyak terdapat didalam referensi mengenai *Blind Equalization* atau pemrosesan sinyal untuk komunikasi dan citra. Dalam tesis penelitian ini tidak dimasukkan pembahasan mengenai kedua klasifikasi metode *Blind Deconvolution* tersebut diatas, walaupun demikian pembahasan mengenai metode *Blind Deconvolution* yang diimplementasikan dalam pelaksanaan penelitian ini akan dituliskan dalam bab berikut ini dan bab lainnya yang berkaitan.

Metode *Blind Deconvolution* yang diimplementasikan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah berdasarkan algoritma statistik orde tinggi eksplisit (*explicit Higher Order Statistics*) [88,89]. Teknik perhitungan *Eigen Vector Approach* (EVA) yang dikembangkan oleh Prof Kammeyer dan Dr. Jellonek beserta teamnya dari Universitas Bremen di Jerman Barat, untuk menyelesaikan perhitungan skema orde 4 statistik metode *Blind Deconvolution* [90-93], dipilih untuk diimplementasikan dalam pelaksanaan penelitian ini dengan beberapa tambahan dan modifikasi pada rutin program setelah mendapat ijin dan persetujuan dari mereka. Teknik perhitungan ini dipilih karena terlihat kemudahan/kesederhanaannya serta kinerjanya yang lebih menonjol dibanding teknik teknik lainnya yang ada. Algoritma penyelesaian EVA sebenarnya adalah suatu skema murni proses penyamaan (*equalization*) yang memperkirakan kanal baliknya secara langsung dari penyelesaian empiris statistiknya dengan menggunakan kurtosis silang dari 2 kumulan orde tinggi. Dengan penyelesaian

Eigen Vector Approach penyamaan linier maupun non linier yang optimum dapat tercapai dari sejumlah sampel sinyal hasil pengamatan/pengukuran yaitu dari sejumlah prosentase dari jumlah sampel total seluruhnya. Satu rutin dari program Matlab telah dibuat sebagai tambahan yaitu mencari dahulu prosentase optimum jumlah sampel yang cukup untuk proses *Blind Deconvolution*. Prosentase optimum itu didapat dari nilai *Crest Factor* maksimum yang didapat dari iterasi penggunaan jumlah sampel untuk mendapatkan nilai *Crest factor* tertinggi. Iterasi penyamaan (*equalization*) yang berlangsung dalam metode *Blind Deconvolution* efektif untuk data yang *Newtonian* yaitu mempunyai nilai rata rata adalah nol. Oleh karena itu, ditambahkan pula satu rutin dari program Matlab yang dipasang di awal sekali yaitu untuk memindahkan data sinyal gelombang hasil pengamatan/pengukuran ke nilai rata rata = 0. Skema diagram proses metode *Blind Deconvolution* adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 1. Diagram blok proses iterasi metode *Blind Deconvolution*

Secara garis besar langkah langkah metode *Blind Deconvolution* dengan pendekatan penyelesaian *Eigen Vector Approach* adalah sebagai berikut:

1. Siapkan sistem referensi yaitu satu deret sejumlah panjang deret (filter penyaring FIR) dengan nilai bukan nol yang tunggal. Nilai lainnya adalah nol. Jumlah nilai referensi adalah sama dengan nilai panjang filter FIR yaitu (l) of 16, 24 atau 32. $f[l] = f[0], \dots, f[l] = (0, 0, \dots, 1, \dots, 0, 0)$. Setelah itu masukkan jumlah nilai sampel yang akan diproses yaitu N , dan jumlah batas maksimum iterasi dilakukan yaitu i bila kriteria berhenti belum tercapai. Jumlah nilai

sampel yang akan di proses N didapat dari hasil optimasi prosentase jumlah data sampel untuk maksimum *Crest Factor*. Dari nilai nilai data sampel yang dimasukkan $y[0], \dots, y[N-1]$ dan nilai awal referensi $e[n]$ and $f[n]$, maka dari operasi *convolution* antara nilai masuk dengan nilai filter FIR akan dihasilkan nilai nilai keluaran proses penyamaan (*equalizer*) yaitu $x[n]$ dan demikian pula keluaran nilai sistem referensi yaitu $u[n]$ dapat ditentukan.

2. Tahapan kumulasi silang statistik orde 4 dengan 2 dimensi (*2-dimensional 4th order cross-cumulant*) yaitu kurtosis silang antara keluaran $x[n]$ and $u[n]$ dilaksanakan dan nilai skalar kumulasi silang c_4^{uy} dapat diperkirakan.

Dengan mensubstitusikan nilai perkiraan R_{yy} and c_4^{uy} kedalam persamaan penyamaan (*equalizer*) maka nilai baru $e[n]$ yaitu e_{EVA} dapat dihitung dan ditentukan. Bila nilai nilai $x[n]$ yang baru dari *convolution* $e[n]$ yang baru dengan nilai $y[n]$ yang terakhir sebelumnya mempunyai perbedaan dengan nilai $x[n]$ sebelumnya adalah sama dengan atau lebih dari kecil daripada nilai kriteria MMSE (*minimum mean square error*) yang telah ditentukan sebelumnya, maka proses dihentikan. Kondisi ini berarti bahwa nilai $e[n]$ atau $e_{EVA}^i(n)$ yang terakhir adalah nilai nilai FIR yang optimum dan nilai $x[n]$ yang terakhir adalah sinyal sebenarnya yang telah dibersihkan dari sinyal latar pengotor (*noise*). Bila nilai perbedaannya masih lebih besar, maka proses diulang sebagai tahapan iterasi yaitu kembali langkah 1 dengan memasukkan nilai $e_{EVA}^i[n]$ terakhir sebagai nilai referensi untuk FIR *Blind Deconvolution* dan nilai referensi yang baru untuk $f[n]$. Proses iterasi ini akan berulang kembali sampai nilai perbedaan hasil perhitungan baru dengan lama lebih kecil daripada nilai MMSE atau jumlah iterasi maksimum telah tercapai [94-96].

2.6. Perkembangan Terakhir

Minat untuk mengaplikasikan teknik dengan metode deteksi AE untuk mendeteksi kerusakan mulai meluas ke peralatan lain, antara lain yaitu untuk mencoba mendeteksi kerusakan pada rel kereta. Potensi teknik deteksi AE mulai dipelajari untuk aplikasi ini, didorong oleh kejadian tragedi kecelakaan kereta di Hatfield UK akibat kerusakan rel yang tidak terdeteksi. Kejadian kecelakaan masih sekitar

100 kejadian per tahun (laporan tahun 2001 EU) padahal biaya pemeliharaan rel kereta di EU sudah mencapai 300 juta EURO pertahun. Walaupun teknik deteksi AE ini tidak baru, tetapi aplikasi untuk deteksi kerusakan pada rel kereta adalah sangat unik. Dari hasil percobaan pada test rig yang dibangun, ternyata teknik deteksi AE dapat menjadi alat pelengkap untuk mendeteksi kerusakan dini pada rel kereta [97].

Aplikasi teknik deteksi AE juga diterapkan untuk mendeteksi kerusakan pada bejana tekan yang terbuat dari metal. Dari studi literatur yang dilakukan, didapat kesimpulan bahwa sampai saat itu (tahun 2004) masih sedikit publikasi hasil penelitian yang bisa menjawab kapan teknik deteksi AE benar benar bisa digunakan dan untuk mendeteksi kerusakan macam apa saja. Artinya adalah bidang deteksi AE masih sangat terbuka untuk di teliti secara luas dan lebih dalam lagi disamping masih sedikit penelitian kearah bidang tersebut. Dengan motivasi ini dicoba penerapan teknik deteksi AE untuk mendeteksi kerusakan pada bejana tekan yang terbuat dari metal. Hasilnya sangat menjanjikan dan dapat diketahui bahwa ada kerusakan yang sangat baik dideteksi dengan teknik deteksi AE ini, seperti a.l. : kerusakan akibat pengelasan, kerusakan akibat korosi pada lapisan, kerusakan yang tidak beraturan dan retakan yang bercabang banyak. Sedangkan kerusakan yang buruk dideteksi dengan teknik AE a.l. : kerusakan pada bahan yang liat (*ductile*), kerusakan bukan karena lingkungan yang korosif atau melemahnya material misalnya korosi karena terkena asam, retakan karena kelelahan dengan siklus sangat tinggi, retakan yang bermula dari satu lekukan yang tajam [98].

Aplikasi teknik deteksi AE untuk mendeteksi secara dini adanya masalah kavitasi serta untuk menentukan titik operasional dengan efisiensi terbaik pada 2,2 MW pompa sentrifugal telah dilakukan. Hasil penerapannya menunjukkan kesuksesan dalam mendeteksi secara dini adanya masalah kavitasi yang timbul didalam pompa tersebut. Penerapan teknik deteksi AE untuk mendeteksi secara dini timbulnya kavitasi telah berhasil pula untuk pompa sentrifugal 60 kW karena ternyata ada hubungan antara sinyal gelombang AE yang timbul dengan pertumbuhan kavitasi didalam pompa. Hasil penerapannya juga menunjukkan kesuksesan dalam menentukan titik operasional dengan efisiensi terbaik, *Best*

Efficiency Points (BEP). Disimpulkan bahwa korelasi terbaik antara AE dengan kavitasi adalah pada BEP yang optimum. Disimpulkan adanya hubungan yang sangat erat antara AE yang terdeteksi dengan Kavitasi yang akan terjadi, ternyata juga bahwa korelasi terbaik antara AE dengan kavitasi adalah pada BEP yang optimum [99,103].

AE yang timbul pada unit Turbin Pembangkit Tenaga pada saat mulai dihidupkan (*run-up*) dan pada saat dimatikan (*run-down*) diteliti dengan intensif. Penelitian ini adalah penelitian awal untuk lebih memahami AE sebelum dilakukan penerapan teknik deteksi AE untuk pemantauan bantalan luncur pada unit turbin tersebut. Hasil penelitian ini menggambarkan hubungan antara aktivitas AE dengan beban yang dialami oleh unit turbin gas. Ternyata sumber AE berhubungan dengan aliran uap, aliran minyak pelumas, turbulensi aerodinamik pada sudu, dan gesekan yang terjadi pada bantalan. Untuk penerapan pemantauan terhadap AE, pengaruh pembebanan pada turbin harus diperhatikan [100].

Penelitian terhadap kekuatan pelat dengan rusuk yaitu pada aspek konsentrasi tegangan dinamikanya kali ini dilakukan dengan teknik *propagator Acoustic Wave*. Pola penjalaran gelombang AE digunakan untuk meneliti pengaruh rusak pada kekuatan pelat terhadap lendutan (*flexural*), yaitu pada penyebaran lendutan dan distribusi konsentrasi tegangan dinamik. Berdasarkan perbandingan antara hasil eksperimen ini dengan perhitungan analitik yang menggunakan metode numerik ekspansi polinomial Chebyshev, didapatkan bahwa metode eksperimental dengan *propagator Acoustic Wave* ini memberikan hasil yang cukup akurat [101].

Penelitian terhadap teknik pemantauan *on-line* dan inspeksi dari pengelasan laser dilakukan di tahun 2005. Salah satunya adalah terhadap teknik dengan AE. Dari penelitian ini diungkapkan bahwa teknik pemantauan *on-line* dan inspeksi pengelasan laser dengan teknik AE masih dikembangkan terus didalam dunia akademik dan belum diterima sepenuhnya oleh dunia industri, dibanding dengan teknik lainnya. Kendala yang ada antara lain dibutuhkannya instalasi kontak untuk *transducer*-nya, gangguan sinyal pengotor (*noise*) yang sangat kuat di lingkungan pabrik, sehingga menjadikan keterbatasan bagi teknik AE terutama untuk aplikasi pada produksi produk masal. Diyakini untuk masa yang akan datang sistim dengan sensor berganda dan gabungan (*multiple & fusion sensors*) didukung

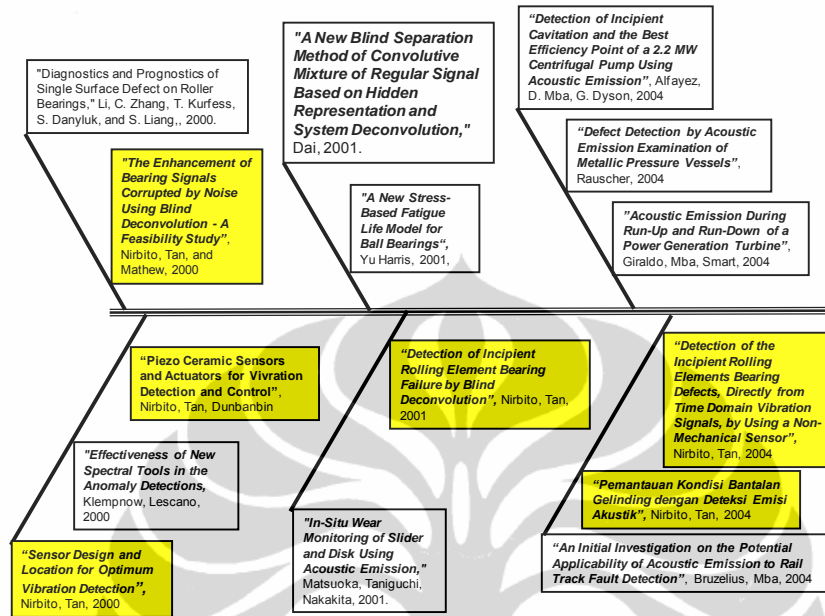
dengan kemajuan perkembangan metode statistik dan kecerdasan buatan akan semakin maju dan diaplikasikan [102].

Satu metode pemantauan dan penelitian terhadap penjalaran tegangan kerak bumi (*crustal stress propagation*) dengan menggunakan teknik deteksi AE dalam kisaran bunyi ultra frekuensi sangat tinggi telah dikembangkan. Yang dilakukan bukan perkiraan terjadinya gempa tetapi adalah diagnosa kerak bumi berdasarkan data data deteksi AE yang direkam tersebar tetapi simultan dengan gabungan setting tektonik spesifik. seperti antara lain : semenanjung Italia, kepulauan Chepallonia Yunani dan Amerika Selatan. Dengan metode ini telah berhasil didapat informasi pengamatan gempa beberapa bulan sebelum terjadi beserta kisaran area lokasi terjadinya [104].

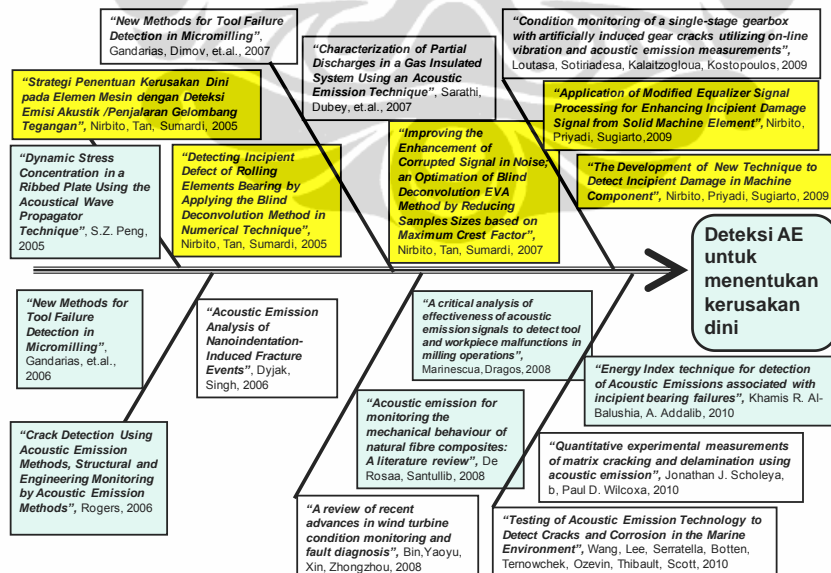
Terjadinya kerusakan pada material komponen mesin yang diakibatkan oleh adanya cacat permukaan yang berukuran sangat kecil skala nano (*Nanoindentation-Induced Fracture Events*) mulai diteliti pula dengan menganalisa gelombang AE yang ditimbulkan oleh kejadian tersebut. Melalui analisa gelombang AE yang timbul dapat diikuti pertumbuhan kerusakannya [105]. Dasar dan aplikasi metode untuk mendeteksi adanya dan perkembangannya suatu retak retak juga dikembangkan melalui pemantauan teknis terhadap struktur dengan analisa AE [106]. Sedangkan untuk kerusakan pahat pada mesin perkakas (*micromilling*) juga dikembangkan metode baru untuk mendeteksinya yaitu juga dengan melalui analisa AE [107]. Teknik pemantauan dan analisa AE juga dikembangkan tidak hanya pada benda benda pejal tetapi juga untuk mendeteksi dan mengkarakterisasi kebocoran sebagian gas dari suatu system yang terisolasi [108].

Dari tinjauan pustaka beberapa tahun terakhir seperti dapat dilihat pada gambar di halaman berikut bahwa metode deteksi dan analisa AE untuk deteksi suatu kerusakan ataupun kegagalan integritas dari suatu sistem semakin banyak dan meluas tidak hanya terhadap material komponen mesin. Hal tersebut menunjukkan bahwa penelitian mengenai analisa dan deteksi AE masih berjalan dan berkembang terus sampai sat ini karena prospek aplikasinya sangat baik sehingga implementasinya di masa depan sangat menjanjikan untuk menjadikan

pekerjaan penentuan kerusakan ataupun kegagalan integritas suatu sistem lebih efektif, efisien dan mudah.



Gambar 2.2. Hasil hasil penelitian yang berkaitan dengan deteksi gelombang AE tahun 2000 - 2004



Gambar 2.3. Hasil-hasil penelitian yang berkaitan dengan deteksi gelombang AE tahun 2005 - 2010

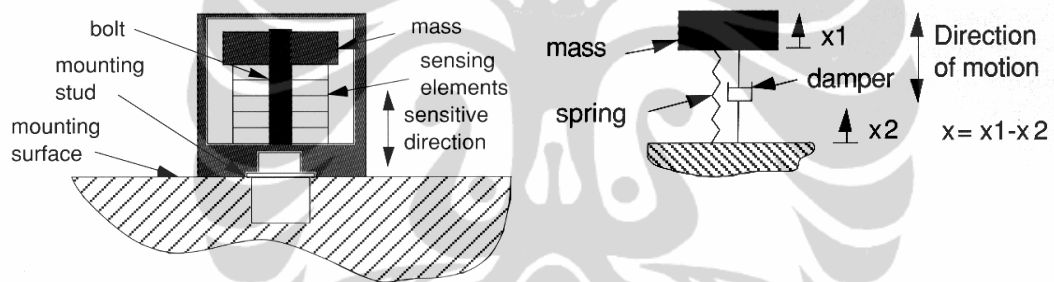
BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Tahapan Penelitian

Dua hambatan besar dan utama harus diatasi untuk mengembangkan satu teknik baru untuk mendeteksi kerusakan dini pada komponen mesin.

Yang pertama, alat sensor *accelerometer* yang umum atau *velocity transducer* tidak mungkin digunakan untuk mendeteksi sinyal emisi akustik karena kedua jenis alat sensor umum tersebut menggunakan dasar sistem getaran massa-pegas yang membutuhkan satu badan yang bergetar untuk bisa melakukan pengukuran seperti ditunjukkan pada gambar skema dibawah ini [109].

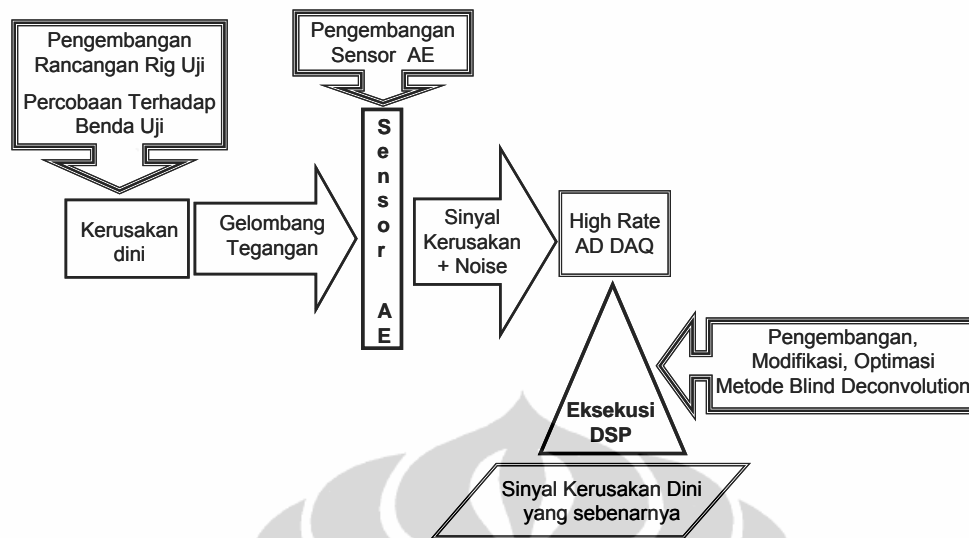


Gambar 3. 1. Sistem massa – pegas pada alat sensor getaran Accelerometer [109]

Padahal untuk kasus kerusakan dini, badan mesin belum memberikan respons dinamik berupa getaran secara gerak fisik. Yang terjadi baru penjalaran gelombang tegangan berupa emisi akustik dari sumber kerusakan dini yang masih pada tingkatan mikroskopik. Kesulitan ditambah pula dari kenyataan bahwa gelombang tegangan yang menjalar adalah emisi akustik dengan gelombang frekuensi tinggi tetapi tingkat amplitudo yang sangat kecil, sehingga terkubur oleh gelombang getaran dari bagian mesin yang lain ataupun dari sumber mesin/alat lain pada fondasi yang sama termasuk gelombang getaran pengaruh lainnya. Sinyal getaran yang menutupi sinyal gelombang emisi akustik dari suatu kerusakan dini disebut sebagai sinyal latar pengotor (*noise*) membuat deteksi sinyal kerusakan dini menjadi sangat sulit dan bahkan tidak mungkin secara langsung. Seperti diketahui secara umum bahwa kemampuan mendeteksi sinyal dari kerusakan dini suatu

komponen mesin yang dinamik adalah satu hal yang sangat penting dan vital dalam semua program pemantauan kondisi mesin. Dengan demikian suatu cara khusus harus dibuat untuk dapat menangkap sinyal dari kerusakan dini komponen mesin dinamik dimana kerusakan tersebut belum mampu menggetarkan badan mesin karena yang ada barulah penalaran gelombang tegangan berupa emisi akustik.

Yang kedua, walaupun bila suatu sensor yang khusus dirancang dan dikembangkan telah dibuat dan mampu menangkap sinyal gelombang tegangan dari kerusakan dini, tetaplah sinyal hasil pengukuran tersebut belum dapat memberikan informasi yang berarti karena sinyal yang asli terkubur didalam sinyal latar pengotor (*noise*). Dengan demikian dibutuhkan suatu upaya lagi untuk menampilkan sinyal sebenarnya dari kerusakan dini tersebut dengan membuang sinyal latar pengotor yang menutupinya. Walaupun telah banyak teknik teknik yang relatif canggih diteliti dan dikembangkan sampai sekarang, tingkat keberhasilannya masih bermacam macam tingkatannya dan kebanyakan masih jauh dari memuaskan. Hal lain yang perlu juga diingat adalah bahwa analisis sinyal getaran berdasarkan besarnya frekuensi dan amplitudo serta gelombangnya pada domain waktu, hanya bisa dilakukan secara efektif dan efisien bila nilai *Signal to Noise Ratio*, SNR nya relatif besar. Ternyata berbagai teknik analisis sinyal getaran komponen mesin tidak mampu mendeteksi kerusakan dini yang muncul dikarenakan nilai SNR-nya kecil [15,16,19-24,29,46,47,55-61,69-73]. Oleh karena itu dalam pelaksanaan penelitian ini juga dilakukan pengembangan perangkat lunak pemrosesan sinyal digital (*Digital Signal processing*, DSP) yang mampu membersihkan sinyal latar pengotor yang menutupi sinyal asli kerusakan dini yang dibutuhkan untuk analisis kerusakannya. Dengan demikian dalam pelaksanaan penelitian ini perlu dilakukan dahulu 2 pekerjaan pengembangan sistem yaitu pengembangan sistem sensor dan pengembangan sistem pemrosesan sinyal dalam rangka upaya menampilkan sinyal gelombang kerusakan dini yang tingkat amplitudonya sangat rendah tetapi frekuensinya tinggi, seperti yang ditunjukkan pada gambar skema di halaman berikut ini.



Gambar 3. 2. Skema tahapan pekerjaan dan penelitian yang dilaksanakan

3.2. Pengembangan Sensor AE

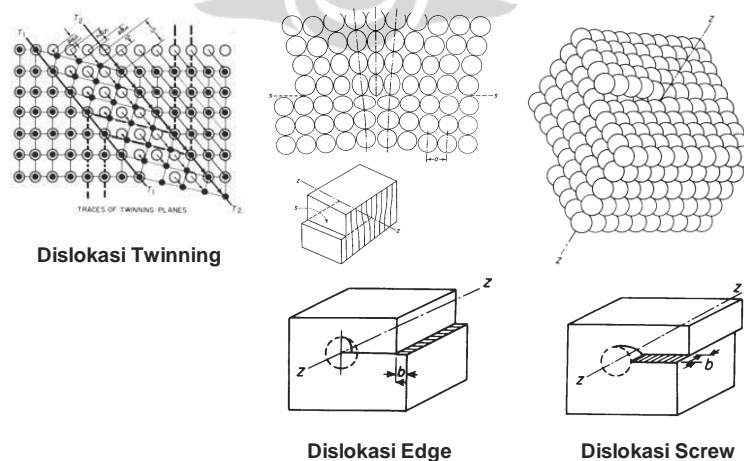
3.2.1. Deteksi AE (Emisi Akustik)

Perhatian terhadap fenomena emisi akustik ini dan pendeteksiannya untuk mendeteksi adanya kerusakan pada elemen mesin telah dimulai dari dua dekade yang lalu. Demikian pula banyak studi dan riset telah dilakukan orang untuk menjelaskan mekanisme terbangkitnya getaran serta getaran pengotor (*noise*) pada elemen mesin termasuk pada bantalan bantalan. Kerusakan pada bantalan bisa terjadi secara lokal pada suatu tempat tertentu ataupun terdistribusi mencakup lokasi yang luas. Kerusakan berupa timbulnya retakan dan sebagainya serta penjarannya baik di permukaan maupun didalam bahan merupakan sumber utama terbangkitnya emisi akustik seperti dijelaskan dimuka. Permasalahan utama adalah masalah teknik pengukuran atau pendeteksian dari fenomena emisi akustik ini sebagai penunjuk adanya kerusakan walaupun masih sangat dini. Untuk bisa mendapatkan sinyal yang berasal dari emisi akustik atau emisi gelombang tegangan elastik ini dibutuhkan alat sensor yang berbeda dengan alat sensor getaran yang biasa karena gerak relatif getaran dari badan elemen mesin yang sangat kecil. Oleh karena itu dibutuhkan suatu sensor yang mampu menangkap/mengukur gelombang tegangan elastik tersebut secara langsung.

Emisi Akustik, *Acoustic Emission* = AE, sering disebut juga sebagai penjalaran gelombang tegangan, *Stress Waves*. AE adalah gelombang elastik yang dibangkitkan oleh lepasnya energi dalam yang tersimpan dalam struktur. AE timbul akibat terjadinya gelombang tegangan berfrekuensi tinggi dalam benda pejal (*solid*) yang disebabkan oleh adanya gerakan mendadak sehubungan dengan disintegrasi pada material yang meregang atau mengalami tegangan (disintegrasi struktur internal). Frekuensi gelombangnya berkisar 0,1 ~ 0,4 MHz, yang jauh diluar jangkauan pendengaran manusia. Di awal mula terjadinya dan kemudian di pertumbuhan retakan pada material yang meregang, terjadi suatu pelepasan energi regangan yang sangat cepat yang membangkitkan gelombang tegangan. Gelombang tegangan ini menjalar dan disebut sebagai emisi akustik. Sumber dari energi AE adalah medan tegangan elastis didalam komponen/mesin yang sedang dibebani. Dengan kata lain, tanpa adanya tegangan dalam material maka tidak akan ada AE sehingga teknik deteksi AE hanya dapat diaplikasikan kepada komponen/mesin yang sedang dibebani/operasional, sehingga menjadi cocok untuk pemantauan kondisi mesin yang *on-line* dan *real-time* [110].

Proses timbulnya tegangan elastis yang merupakan sumber dari penjalaran AE dibagi menjadi 4 macam yaitu :

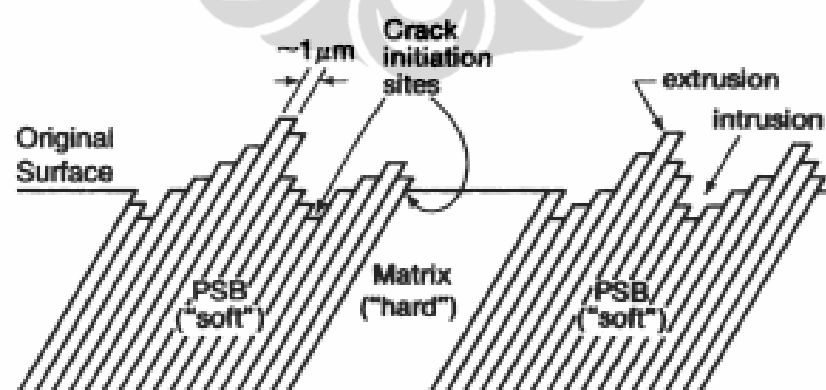
1. gerakan perpindahan/dislokasi; contohnya gerakan dislokasi akibat ketidak sempurnaan garis bidang dari kisi-kisi (*lattice*) kristal material. Energi yang lepas dari satu garis bidang adalah kecil sekali, tetapi biasanya yang terjadi



Gambar 3. 3. Bentuk bentuk dislokasi yang terjadi pada batas butir material [111]

adalah kombinasi dari banyak garis bidang kisi-kisi kristal material yang tidak sempurna dimana menyebabkan dislokasi molekuler/mikroskopik yang besar (disintegrasi) dalam material akibat suatu beban. Energi yang dilepaskan disini cukup besar sehingga penjarangan AE menjadi kontinyu dan bisa terdeteksi [111].

2. perubahan/transmansi phase; contohnya adalah terbentuknya martensit dalam baja karbon dimana setiap perubahan/transmansi dari setiap butir (*grain*) menimbulkan satu semburan (*burst*) gelombang elastis yang menjalar sebagai AE.
3. mekanisme gesekan; gesekan biasa terjadi pada gerak relatif antar permukaan bidang. Pada saat mulai terjadinya suatu disintegrasi mikromolekuler sebagai asal dari kerusakan dini, maka secara bertahap terbentuklah lapisan-lapisan dengan lebar masing-masing sekitar 1 μm yang merupakan bidang yang akan saling bergesekan disebut sebagai *Persistent Slip Bands* (PSB). Pada saat menerima beban, PSB yang terbentuk itu di bagian material yang relatif lunak sebagian akan mengalami ekstrusi yaitu bergerak keluar dan sebagian mengalami intrusi yaitu gerakan kedalam. Karena adanya perbedaan relatif antara kedua gerakan itu maka terjadilah gesekan seperti dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 3. 4. Terjadinya lapisan lapisan PSB (Persistent Slip Bands) pada material serta timbulnya intrusi dan ekstrusi akibat beban dinamis yang menyebabkan geseran pencetus gelombang tegangan atau AE [112]

Pada saat terjadinya gesekan antara PSB-PSB tersebut maka gesekan ini menimbulkan semburan (*burst*) gelombang elastik yang menjadi penjalaran AE. Setelah sekian waktu bergesekan maka terjadi permukaan bidang baru yang akan terpisah dan saling bergerak. Ini disebut sebagai asal inisiasi retak kelelahan (*fatigue crack initiation*) yaitu batas kelelahan (*fatigue limit*) yaitu dimulainya proses kelelahan material, dan selanjutnya menjadi pertumbuhan atau penjalaran retak kelelahan (*fatigue crack propagation*) sampai akhirnya menjadi kerusakan kelelahan (*fatigue failure*) yang salah satu akibat akhirnya bisa berupa putusya komponen mesin [112].

4. pembentukan retakan dan pertumbuhannya; retakan terbentuk bila di satu titik dalam material terjadi tegangan lokal yang melebihi tegangan rusaknya (*fracture stress*) akibat suatu beban atau tumbukan (*impact*). Sebagai akibatnya terjadi permukaan bidang baru yang juga biasanya saling bergerak sehingga timbul gesekan. Pada saat disintegrasi yaitu terjadinya pemisahan waktu terbentuknya bidang permukaan baru, energi regangan lepas dan menjadi gelombang elastis sebagai penjalaran AE. Demikian pula saat bidang-bidang permukaan baru itu saling bergerak sehingga bergesekan.

Umumnya sinyal gelombang AE mempunyai 2 bentuk yaitu:

1. gelombang emisi kontinyu



Continuous emission

Gambar 3. 5. Bentuk gelombang kontinyu [110]

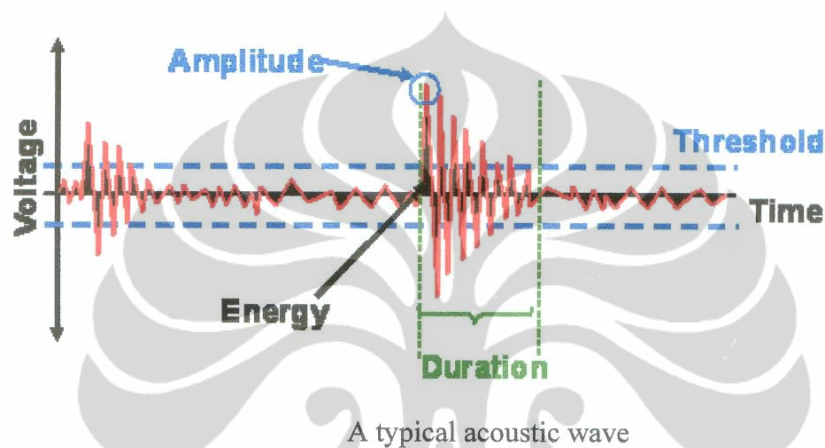
2. gelombang emisi semburan (*burst*)



Burst-Type emission

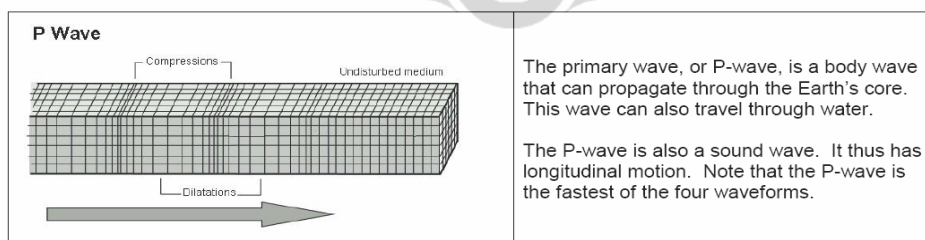
Gambar 3. 6. Bentuk gelombang semburan [110]

Belum ada standard bagi kode spesifikasi untuk pemilihan parameter sinyal gelombang AE, karakterisasi diserahkan kepada pemilihan dan pemahaman masing masing pengguna. Yang biasa diambil adalah amplitudo sinyal dari voltase maksimum yang terukur dalam satu sinyal, durasi adalah waktu selama voltase masih terukur diatas batas atas (*threshold*), sedangkan energi gelombangnya adalah nilai absolut dari luas daerah didalam sinyal akustik.

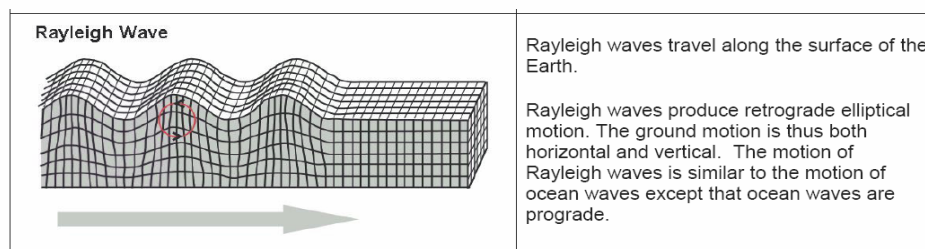


Gambar 3. 7. Contoh bentuk gelombang tegangan atau gelombang AE [110]

Penjalaran sinyal gelombang AE yang umum adalah dalam 2 bentuk yaitu berbentuk gelombang Rayleigh dan gelombang tekanan atau gelombang P longitudinal [110].



Gambar 3. 8. Penjalaran gelombang P, arah longitudinal, dalam benda pejal, gerakannya maju [110]



Gambar 3. 9. Penjalaran gelombang Rayleigh, biasanya di permukaan, gerakannya naik-turun [110]

Selanjutnya, penjelasan yang lebih mendalam bisa dilihat pada literature-literatur lainnya seperti antara lain yang ditunjukkan dalam bab Referensi [113-115].

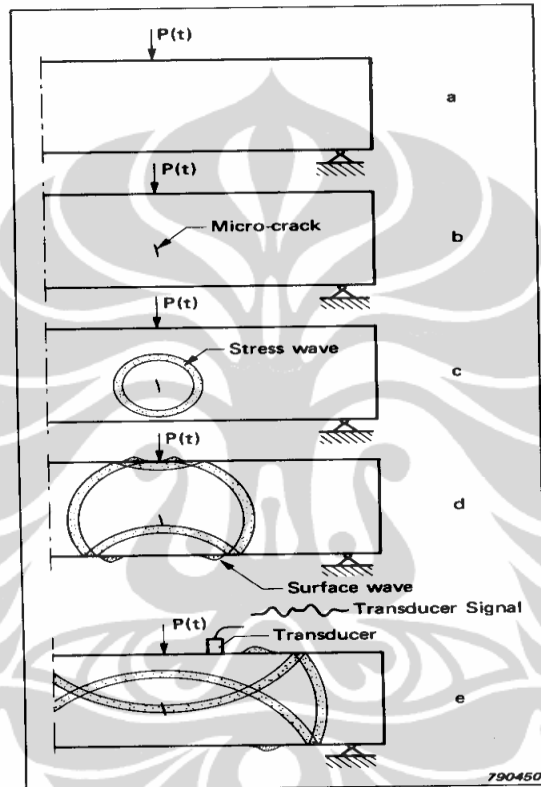
3.2.2. Pengembangan Sensor Emisi Akustik

Untuk bisa mendapatkan sinyal yang berasal dari emisi akustik atau emisi gelombang tegangan elastik dibutuhkan alat sensor yang berbeda dengan alat sensor getaran yang biasa karena gerak relatif getaran dari badan elemen mesin yang ada sangat kecil. Oleh karena itu dibutuhkan suatu sensor yang mampu menangkap/mengukur gelombang tegangan elastik tersebut secara langsung.

Sinyal getaran berupa emisi akustik dari satu gearbox yang dirancang dan dibangun khusus telah digunakan pada satu percobaan untuk memantau kondisi roda gigi-roda gigi. Berbagai variasi bentuk kerusakan sengaja dibuat dengan maksud mensimulasi kondisi aus dan putus yang mungkin terjadi pada gigi-gigi roda gigi yang digunakan selama umur kerjanya. Hasil percobaan yang didapat dari berbagai kecepatan operasi diplot terhadap kemungkinan penyebab kerusakan. Analisis sementara awal telah menunjukkan pentingnya menghubungkan antara sinyal emisi akustik yang dideteksi dengan bentuk kerusakan yang diketahui. Metode ini mempunyai potensi untuk dapat digunakan sebagai alat pada pengembangan teknik diagnosa kerusakan dini roda gigi untuk perawatan prediktif [116]. Kemampuan sensor emisi akustik untuk mendeteksi sinyal dari suatu sumber pada percobaan getaran bantalan mesin ternyata sebanding dengan kemampuan *accelerometer* untuk beberapa kasus kerusakan [117].

Penjalaran sinyal gelombang AE adalah mirip seperti pada suatu antena radio dengan pola radiasi yang tertentu untuk satu bentuk sinyal gelombang tertentu.

Sumber sinyal akan menjalankan sinyal gelombang dengan bentuk satu paket bola (*spheres*) dimana akan berubah di bidang permukaan karena akan menjalar dalam bentuk gelombang rayleigh atau longitudinal. Suatu bahan *Piezoelectric* adalah suatu bahan Piezo yang bila dalam keadaan meregang, dengan kata lain mendapatkan suatu tegangan, akan membangkitkan arus listrik seperti yang digambarkan dalam gambar di halaman berikut ini [110].

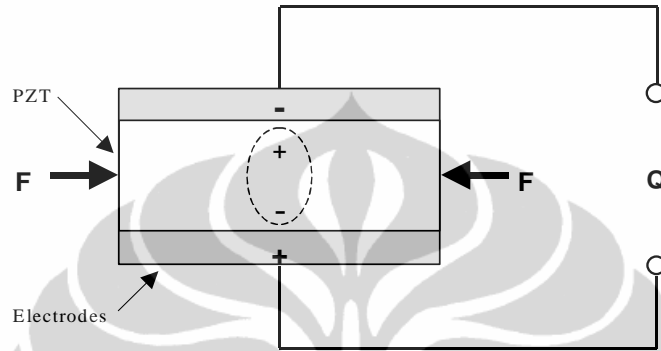


Propagation of a stress wave in a specimen

Gambar 3. 10. Penjalaran gelombang tegangan atau gelombang AE dalam material pejal [110]

Lead-Zirconate Titanate (PZT) adalah suatu bahan *piezoceramic* yang khusus dibuat dan terpilih oleh banyak peneliti sebagai bahan *piezoelectric* terbaik untuk digunakan sebagai pengukur getaran. Bahan PZT dengan formula khususnya mempunyai kinerja yang stabil dan umur kehandalannya yang cukup lama. Bahan PZT ini mempunyai impedansi mekanis yang rendah tetapi mempunyai kisaran frekuensi yang sangat luas dari beberapa Hz sampai MHz. Dengan teknik pematangan dan penuaan yang tepat, material ini mempunyai stabilitas yang sangat tinggi baik untuk fisik maupun termal. Biasanya bahan keramik PZT dilapis

elektroda positif dan negatifnya untuk tempat memasang kabel listrik penerima atau penyalur arus listrik. Teknik solder pemasangan kabel listrik tersebut membutuhkan ketrampilan tinggi karena termasuk kelas solder mikro dan harus cepat agar bahan PZT nya tidak rusak akibat menerima panas yang berlebihan dan berkepanjangan. Gambar pada halaman berikut ini menunjukkan skema bahan PZT dengan elektroda kutubnya.



Gambar 3. 11. Skema bahan keramik PZT yang akan mengeluarkan arus listrik bila mengalami regangan (*strain*) akibat gaya gaya luar F [118]

Vektor perpindahan akibat gaya luar,

$$D = d_{xx}\sigma \quad (3.1)$$

dan potensi listrik yang dibangkitkan,

$$Q = DA = Ad_{xx}(F/S) = (A/S)dF \quad (3.2)$$

dimana,

D adalah vektor perpindahan

σ adalah tegangan yang terjadi (N/m^2)

d_{xx} adalah koefisien arus listrik dari bahan *piezoelectric* (coulomb/N)

A adalah luas permukaan dari bahan

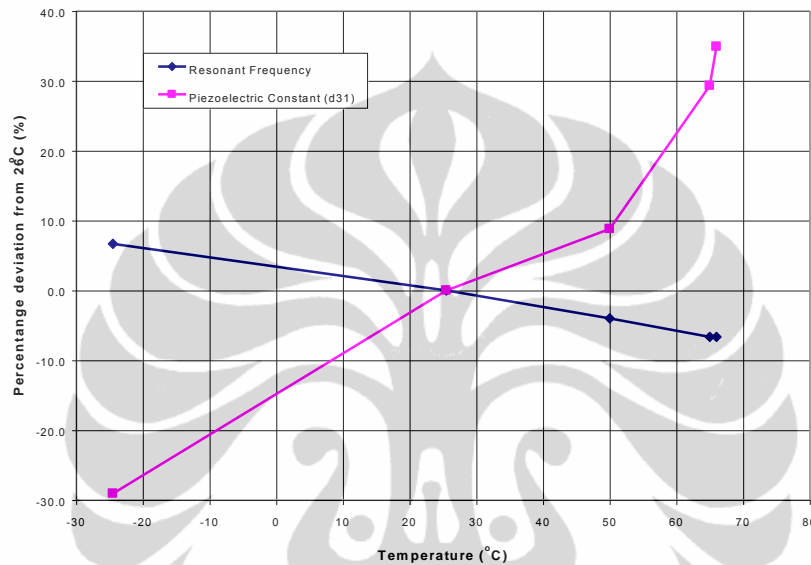
Q adalah potensi listrik yang dibangkitkan

Perekatan bidang elemen sensor merupakan faktor penting dalam penerusan efek efek Elektromekanikal serta meningkatkan kualitas dari sinyal yang akan diukur atau di amati. Dalam suatu percobaan penelitian telah ditunjukkan bahwa zat perekatnya harus mampu atau kuat merekatkan atau menahan elemen sensor itu tetap pada posisi krusialnya [118].

Sensor tersebut harus tahan pada perubahan variasi temperatur yang cukup besar.

Pernah terjadi pada temperatur sekitar $60^\circ - 70^\circ$ Celcius, bahan perekat epoxy

yang biasa digunakan untuk merekatkan sesuatu ternyata mengalami pergeseran tempat walaupun dalam orde mikrometer tetap dapat mempengaruhi kemampuan damping atau redamannya bila penggunaannya adalah sebagai aktuator. Efek dari temperatur pada frekuensi resonansinya terhadap konstanta d_{xx} dapat dilihat pada grafik di halaman berikut ini.

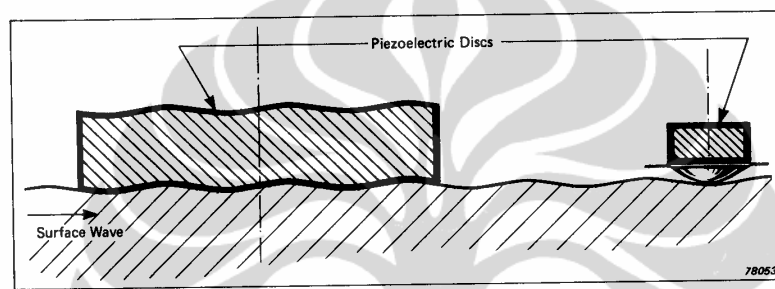


Gambar 3. 12. Grafik yang menunjukkan prosentase deviasi dari frekuensi pribadi/alamiah dan konstanta piezoelektrik bahan PZT terhadap perubahan temperatur (dengan metode resonansi IEEE) [119]

Frekuensi resonansi akan mengalami reduksi sebesar 10% dan konstanta d_{xx} mengalami penurunan 60%, untuk kisaran temperatur dari -25°C dan sampai ke 65°C . Efek ini akan menjadi kritis bila PZT sensor ini akan digunakan sebagai aktuator. Sifat material PZT termasuk mempunyai koefisien kopling elektromekanis yang tinggi, sensitivitas pembangkit arus listrik yang tinggi, dan sangat stabil menurut waktu maupun terhadap temperatur. Temperatur Curie-nya adalah diatas 300°C sehingga cocok untuk berbagai kondisi penggunaan [119].

Bila bahan PZT tersebut dipasang sebagai sensor AE pada permukaan bidang itu maka penjalaran gelombang AE itu akan dirasakan oleh sensor dan menjadi terukur. Saat suatu perubahan ('kerusakan') mulai terjadi pada komponen bantalan yang merupakan bahan padat/pejal (*solid*) dan elastis, walaupun masih sangat kecil

berupa retakan mikroskopik misalnya, akibat tegangan mekanis ataupun termal maka energi regangan akan dilepaskan dengan cepat dalam bentuk gelombang elastik. Terbangkitnya gelombang tersebut didalam bahan disebut sebagai Emisi Akustik. Gelombang tegangan elastis atau gelombang akustik ini menjalar dari sumbernya ke segala arah sampai terasa oleh elemen PZT tersebut diatas yang dipasang didalam suatu sensor yang dikembangkan. Akibatnya elemen PZT ini akan berdefleksi mengikuti gelombang elastik yang menjalarinya seperti yang terlihat dalam gambar diatas sehingga membangkitkan pulsa listrik yang merupakan sinyal.



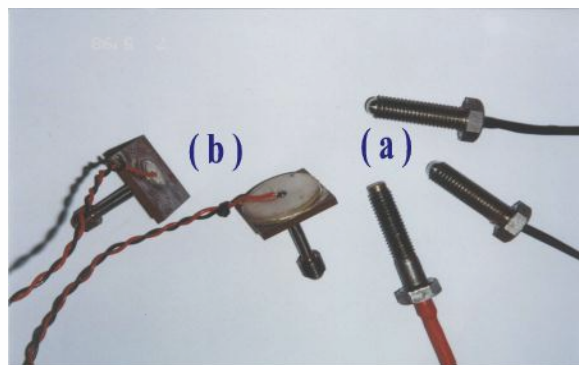
Coupling of surface waves to two different transducers

Gambar 3. 13. Skema hubungan antara permukaan benda pejal, yang dijalar gelombang tegangan, dengan permukaan bahan PZT yang digunakan sebagai sensor.

Gelombang yang menjalar akan diterima dan diikuti oleh bahan PZT tersebut sehingga mengeluarkan arus listrik yang linier terhadap amplitud gelombang tersebut [110]

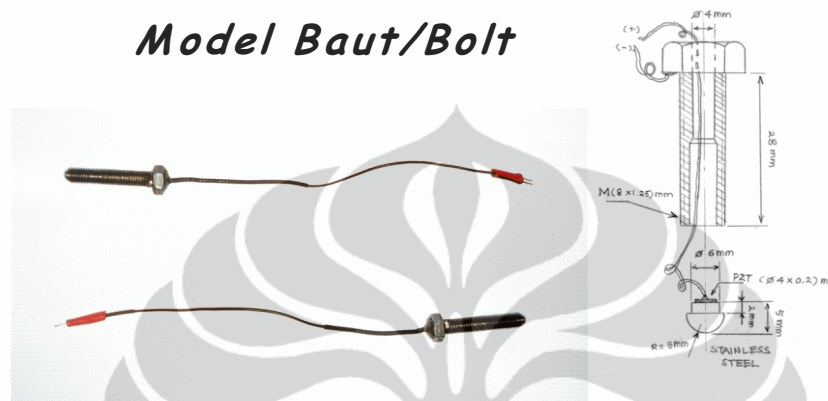
Beberapa penelitian telah dilakukan untuk memulai penelitian atas respons terhadap emisi akustik ini pada bantalan yang rusak, maupun penelitian atas penggunaan pengukuran emisi akustik untuk pemantauan konsisi sistim mekanikal [110].

Dua rancangan utama sensor khusus untuk mendeteksi gelombang akustik ini telah dikembangkan seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3.14. berikut ini, yaitu berupa rancangan bentuk baut dan rancangan bentuk *probe*.



Gambar 3. 14. Rancangan sensor AE yang dikembangkan dalam penelitian ini yaitu (a) bentuk baut dengan bahan PZT kecil dan (b) bentuk probe dengan bahan PZT besar

Kedua sensor khusus tersebut dirancang untuk dapat dipasang pada rumah mesin dengan cara ulir seperti pada pemasangan baut sehingga dapat diusahakan ujung sensornya mencapai tempat sedekat mungkin dengan bantalan sebagai sumber emisi akustik dalam penelitian ini.

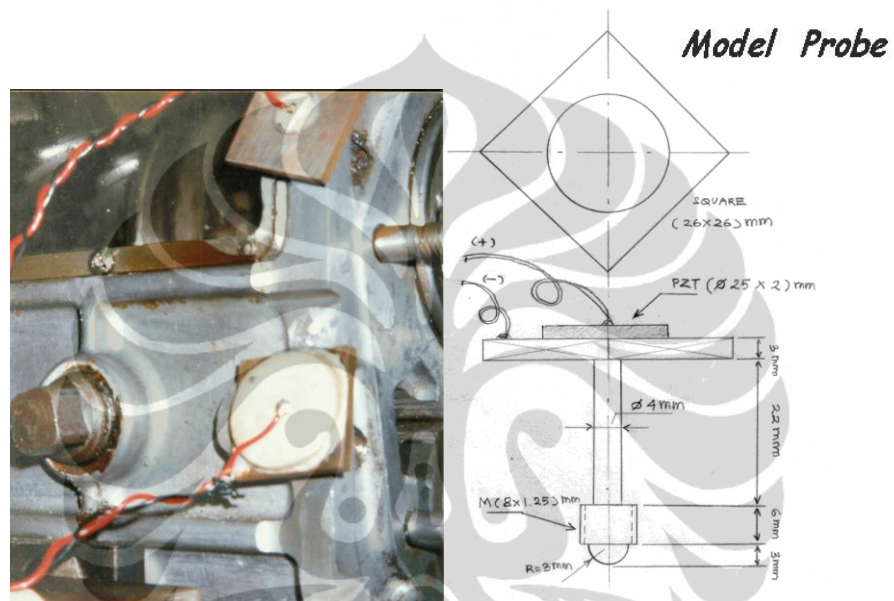


Gambar 3. 15. Rancangan sensor AE bentuk baut dengan struktur dasar baut metrik

Pada rancangan bentuk baut seperti pada gambar diatas, struktur dasarnya adalah satu baut M8×1,25 mm, panjang 36 mm, yang dibuat berongga dimana ujungnya dipasang suatu ujung berbentuk bulat terbuat dari baja tahan karat (*stainless steel*) dengan jari-jari ujung 8 mm. Dibalik ujung tersebut dipasang elemen PZT yang tebalnya 0,2 mm dan berbentuk lingkaran dengan diameter 3 mm sampai 4 mm. Kabel listrik untuk menyalurkan sinyal pulsa listrik dipasang pada elemen PZT tersebut dengan proses *microsoldering* dan melalui rongga pada baut akan keluar dan disambungkan kepada peralatan data akusisi. Ujung bulat dari sensor ini menyentuh pada bantalan gelinding yang diteliti.

Sedangkan untuk rancangan yang berbentuk *probe* seperti ditunjukkan dalam gambar 3.16. di halaman berikut ini, digunakan 2 ukuran elemen PZT yaitu yang kecil dengan tebal 0,2 mm serta diameter 8 mm dan yang tebal 2 mm serta diameter 25 mm. Suatu *probe* yang dapat dipasang seperti pemasangan baut akan masuk kedalam rumah mesin sehingga ujungnya menyentuh bantalan gelinding yang diteliti dan elemen PZT terpasang pada satu kedudukan diluar dari rumah mesin tersebut.

Keberhasilan dan kehandalan rancangan sensor khusus ini telah diteliti pada suatu rig penelitian yang dibangun khusus yaitu berupa suatu rumah rodagigi dengan set rodagigi dan bantalan gelinding yang telah sengaja dirusak untuk diteliti sinyal yang akan dibangkitkan. Sistem mekanikal ini kemudian diputar oleh satu motor listrik. Hasilnya menunjukkan bahwa rancangan dengan bentuk baut cukup baik untuk mendeteksi gelombang akustik dari suatu bantalan gelinding yang rusak dan juga cukup baik hasilnya.



Gambar 3. 16. Rancangan sensor AE bentuk probe untuk meneliti efektivitas penggunaan bahan PZT yang lebih besar dan lebih tebal

3.3. Pengembangan Pemrosesan Sinyal Digital

3.3.1. Sinyal Digital

Sinyal yang ditangkap dapat dipandang sebagai variabel yang berisi informasi yang relevan dengan satu situasi tertentu. Pada prakteknya dapat diklasifikasi menjadi 3 kelompok yaitu [120] :

1. Sinyal analog atau sinyal kontinu (menerus); yaitu variabel variabel waktu dan amplitudo saling berhubung secara kontinu
2. Sinyal Diskret-Waktu; yaitu variabel waktu adalah diskret tetapi variabel amplitudo adalah kontinu
3. Sinyal Digital; yaitu variabel variabel waktu dan amplitudo adalah diskret

Sinyal yang ditangkap dari satu pengukuran adalah sinyal kontinyu-waktu. Dapat dijadikan diskret dengan cara menetapkan waktu diskretnya dengan satu nilai integer n dalam periode pengukuran (*sampling period*) T , dan disebut sebagai sinyal sampel ukur (*sampled signal*), yaitu $y(k) = y(t)|_{t=nT} = y(nT)$. Notasi $y(k)$ menunjukkan fungsi y diskret-waktu atau nilai fungsi y pada satu k tertentu. Mewakili satu urutan yang telah ditetapkan tertentu untuk semua nilai integer k . Untuk k bukan integer, maka $y(k)$ adalah tidak nol tetapi menjadi tak tentu. Dengan kuantifikasi amplitudo, maka sinyal digital dibentuk, yaitu satu sinyal yang amplitudonya kuantitatif dengan urutan waktu yang seragam dari hasil proses kuantifikasi pada suatu alat perubah Analog/Digital (*A/D converter*). Sinyal bentuk ini disebut sebagai sinyal digital. Komputer hanya menggunakan dan hanya dapat memproses data sinyal yang berupa sinyal digital. Oleh sebab itu disebut sebagai pemrosesan sinyal digital (*Digital Signal Processing, DSP*) untuk mendapatkan kembali informasi-informasi dari variabel variabel sinyal tanpa penurunan kualitas atau degradasi apapun, penyimpangan atau distorsi, kekurangan atau kehilangan dan dalam waktu proses yang cepat [120-123].

Sinyal diskret-waktu hanya ditentukan untuk nilai nilai diskret dari variabel pada interval yang seragam $k = nT$, dimana T adalah interval antara sampel waktu dan n adalah nilai integer. Sinyal ini merupakan suatu urutan atau deret dari nilai-nilai berupa angka, disebut sebagai sampel, pada satu interval waktu antara yang seragam antara setiap sampel, sehingga dengan demikian dapat dipandang sebagai suatu deret matematika yaitu Deret Waktu (*Time Series*). Karakter kunci dari suatu deret waktu adalah bahwa sampel-sampelnya teratur menurut waktu dan antara sampel-sampel yang berdampingan ada hubungannya. Bila sampel-sampel yang berurutan dalam satu deret adalah berhubungan, maka sampel terdahulu dapat digunakan untuk memperkirakan nilai sampel yang akan datang berikutnya. Bila perkiraannya bisa tepat atau eksak, maka deret itu disebut sebagai deterministik dan dapat dijabarkan dengan suatu hubungan matematik yang eksplisit. Akan tetapi pada kebanyakan atau hampir semua situasi nyatanya satu deret waktu tidak dapat diperkirakan secara tepat, dan deret waktu ini disebut sebagai acak (*random*) atau *stochastik*. Derajat tingkat mampu diperkirakan ditentukan dari ketergantungan antara sampel-sampel yang berurutan. Karakter

dasar dari sinyal acak (*random*) adalah ketidak-mampuannya untuk secara tepat menetapkan nilainya, tidak dapat diperkirakan, dirinya sendiri tidak pernah berulang, dan tidak ada rumusan matematika yang dapat menggambarkan nilai nilainya sebagai fungsi dari waktu. Walaupun sinyal acak muncul pada suatu waktu dengan bentuk atau karakter yang tidak dapat diperkirakan, tetap saja nilai rata-ratanya seringkali dapat diasumsikan sebagai deterministik. Dengan demikian dapat ditentukan dengan rumusan matematika yang merupakan pemodelan dari proses *stochastik*. Walaupun demikian ternyata tidak ada data fisik dalam prakteknya yang benar-benar acak murni ataupun yang benar-benar deterministik sepenuhnya. Akan selalu ada kemungkinan adanya suatu kejadian yang tidak disangka sebelumnya di waktu yang akan datang yang mungkin bisa mempengaruhi fenomena dalam membentuk data dengan cara atau jalan yang tidak terpikirkan selama ini. Di sisi lain suatu penjabaran matematik yang tepat mungkin bisa dibuat bila pengetahuan yang cukup mengenai mekanisme dasar atau tata cara kerja dari fenomena pembentukan data data itu diketahui [86,120]. Jadi, suatu sinyal acak sebagai satu Deret Waktu dapat dianalisis dengan menggunakan metode-metode statistik dan dapat dijabarkan secara matematik dengan proses *stochastik* [86]. Teknik pemrosesan sinyal yaitu dengan menggunakan metode *Blind Deconvolution* dalam pelaksanaan penelitian ini juga pada intinya adalah berdasarkan pada metode statistik orde tinggi (*higher-order statistical methods*), yaitu kriteria kriteria otokorelasi (*auto-correlation*), korelasi silang (*cross-correlation*) dan kumulatif silang maksimum (*maximum cross cumulant*) atau kurtosis silang (*cross kurtosis*), yang membuat sinyal yang dianalisis memenuhi persyaratan sebagai fungsi dari deret waktu.

3.3.2. Pemrosesan Sinyal Dengan *Blind Deconvolution*

Sinyal asli dari kerusakan dini pada bantalan elemen gelinding yang tertutupi oleh sinyal latar pengotor diupayakan untuk ditampilkan keluar dengan menggunakan metode pemrosesan sinyal digital yang telah dipilih yaitu metode *Blind Deconvolution*, yang dijalankan pada lingkungan aplikasi program Matlab®. Setelah sinyal asli tersebut diatas dapat diambil keluar atau direkonstruksi

/ditampilkan kembali, maka karakteristik getaran dan sinyal dari kerusakan dini pada bantalan elemen gelinding dapat diteliti dan dikaji serta ditentukan.

Dalam pemrosesan sinyal, permasalahan konvolusi (*convolution*) adalah perhitungan sinyal keluaran $y(k)$, dengan diketahuinya sinyal masukan ke sistem $x(k)$ dan respons impuls dari sistem $h(k)$. Sedangkan dekonvolusi (*deconvolution*) adalah perhitungan menentukan sinyal masukan ke sistem atau respons impuls dari sistem. Keluaran dari suatu sistem biasanya bisa diakses, yaitu dapat diukur, yang artinya sinyal keluaran dari sistem tersedia untuk diproses. Lebih tepat lagi adalah sinyal keluaran dari sistem dan respons impuls dari sistem keduanya diketahui, dan kebutuhannya adalah untuk mendapatkan kembali atau merekonstruksi bagaimana seharusnya sinyal masukan ke sistem. Karena konvolusi adalah operasi komutatif maka jawabannya adalah bisa langsung dihitung.

Bila pengetahuan atau informasi yang tepat mengenai sinyal masukan ke sistem tidak tersedia atau tidak mungkin diakses, dan juga respons impuls dari sistem sama sekali tidak diketahui, maka akan dibutuhkan suatu pekerjaan yang lebih sulit dibandingkan dengan usaha dekonvolusi biasa untuk merekonstruksi kembali sinyal masukan ke sistem dengan diketahuinya sinyal keluaran yang terukur dan respons impuls dari sistem. Dalam situasi praktek nyata, situasi yang ada seperti itu. Suatu sinyal hasil pengukuran adalah bukan sinyal masukan asli melainkan hasil konvolusi antara sinyal masukan asli $x(k)$ dengan respons sistem $h(k)$, ditambah sinyal latar pengotor (*noise*) $s(k)$. Sinyal masukan yang asli tidak dapat diakses dan respons impuls dari sistem tidak diketahui, demikian pula sinyal latar pengotor tidak diketahui bentuk ataupun besarnya. Sistem atau kanal terdiri dari media dan saluran transmisi fisik serta penyaring penyalur (*transmit filter*) dan penyaring penerima (*receive filter*). Untuk dapat menampilkan atau merekonstruksi sinyal masukan asli pada situasi nyata seperti ini, maka dibutuhkan suatu proses dekonvolusi tanpa informasi ataupun pengetahuan dari sistem atau kanal yang ada (*respons impuls*) maupun sinyal masukan aslinya. Karena ketidaktahuan tersebut maka proses dikonvolusinya terpaksa akan dijalankan secara “buta” sehingga disebut sebagai proses *Blind Deconvolution* [9,81-85]. Metode *Blind Deconvolution* yang dikembangkan dan kemudian diimplementasikan didalam pelaksanaan penelitian ini merupakan teknik yang digunakan untuk

mendapatkan atau menampilkan kembali sinyal yang ingin diketahui dari satu kanal penerima tunggal tanpa informasi atau pengetahuan apapun mengenai kanal sistem tersebut maupun sinyal masukan asli ke sistem. Metode *Blind Deconvolution* sendiri asalnya adalah metode *Blind Equalization* yang dikembangkan dalam bidang telekomunikasi GSM unruk mendapatkan hasil komunikasi yang jernih dengan dibuangnya sinyal latar pengotor. Diusulkan aplikasinya pada tahun 1980an dan sampai sekarang masih diteliti untuk ditingkatkan kualitasnya maupun ditingkatkan kesesuaiannya dengan kebutuhan implementasi yang ada. Dilaporkan pula bahwa metode *Blind Deconvolution* akhir-akhir ini telah dicoba untuk diaplikasikan dalam bidang-bidang lain seperti bidang kesehatan untuk peningkatan kualitas ECG dan EEG, bidang audio untuk memperbaiki suara pembicaraan (*speech enhancement*), bidang transportasi maupun pertahanan untuk aplikasi pada sistem Radar, bidang *Seismic*, bidang telekomunikasi bergerak (*mobile*), bidang mesin-mesin putar (*rotating machinery*), bidang nuklir pada sistem reaktornya, bidang komunikasi radio, bidang pemrosesan citra optik maupun digital pada teleskop biasa maupun teleskop raksasa non optik termasuk peralatan *Scanning* [97-108]. Walaupun metode *Blind Deconvolution* sudah mulai meluas dicobakan untuk aplikasi ke bidang bidang lain, ternyata tidak ada laporan yang menyebutkan perluasan ke bidang teknik mesin khususnya aplikasi untuk deteksi getaran apalagi kerusakan dini pada komponen mesin dinamik. Implementasi metode *Blind Deconvolution* dalam pelaksanaan penelitian ini dapat dikatakan sebagai pembukaan cakrawala baru dalam teknik mengatasi persoalan teknis pada bidang Teknik Mesin. Metode *Blind Deconvolution* dengan solusi *Eigen Vector Approach* (EVA) algoritma diterapkan dalam pelaksanaan penelitian ini terutama pada usaha menghilangkan sinyal latar pengotor (*noise*) dalam rangka menampilkan atau merekonstruksi sinyal asli yang berasal dari gelombang tegangan berupa emisi akustik dari kerusakan dini komponen mesin dinamik. Metode *Blind Deconvolution* ini pada awalnya dikembangkan dalam bidang telekomunikasi bergerak sistem GSM untuk mendapatkan sinyal pembicaraan yang bersih secara langsung [86,91-96].

Klasifikasi metode *Blind Deconvolution* yang diterapkan dalam penelitian ini adalah berdasarkan metode statistik orde tinggi yang eksplisit (*explicit Higher*

Order Statistics). Klasifikasi metode statistik orde tinggi seperti ini menggunakan teknik solusi statistik kumulatif orde tinggi, *ceptra* maupun transformasi Fourier untuk membuka karakteristik fasa nonminimum dari suatu kanal yang tidak diketahui. Aplikasi statistik orde tinggi untuk solusi masalah pemrosesan sinyal secara umum, khususnya metode *Blind Deconvolution*, telah mulai menarik perhatian karena ternyata permasalahan yang ada tidak dapat diselesaikan dengan statistik orde 2 yang konvensional. Statistik orde tinggi dari sinyal yang diukur berhubungan langsung dengan kanal sistemnya yang tidak diketahui dan mencari penyamaan (*equalizer*). Metode metode yang berdasarkan statistik orde tinggi eksplisit membutuhkan daya hitung yang kuat untuk melakukan perhitungan statistik empiris, sehingga menjadi berkembang dengan cepat setelah tahun 1980an seiring dengan kemajuan teknologi komputer atau informasi yang berkembang secara eksponensial. Metode statistik orde tinggi kinerjanya dalam laju konvergensi jauh secara bermakna melebihi metode metode pendahulu *Blind Deconvolution* konvensional seperti metode metode algoritma Bussgang (1970s), algoritma Sato (1975), algoritma buta dari Godard (1980s), algoritma dan kriteria blind deconvolution dari Donoho, kemudian Shalvi dan Weinstein (1990s) [84,87-90].

Terdapat 3 algoritma yang berbeda pada metode statistik orde tinggi :

1. *Tricetrum Equalisation* (TEA), merupakan solusi pendekatan pada masa awal yang dikembangkan oleh Hatzinakos dan Nikias.
2. *Super-Exponential Algorithm* (SEA), yang pengembangannya diawali oleh kerja penelitian dari Benveniste-Goursat-Ruget dan Shalvi-Weinstein.
3. *Eigen Vector Approach* (EVA), developed by Kammeyer and Jellonek.

Metode EVA mempunyai lebih banyak daya tarik dibanding kedua metode yang lain karena prosedur solusinya lebih sederhana, lebih mudah dikembangkan-lanjutan dan kinerjanya yang baik. Metode TEA menggunakan teknik perhitungan *cepstrum* untuk kumulatif orde 4 dan kemudian langsung ke langkah menengah dari identifikasi kanal sebelum menetapkan proses penyamaan (*equalizer*). Algoritmanya ini sekarang menjadi sulit diterapkan lagi dalam praktek masa kini karena kompleksitas prosedurnya yang tinggi. Metode-metode SEA dan EVA sebenarnya adalah metode murni skema *equalization* yang memperkirakan respons

impuls dari kebalikan kanal sistem secara langsung dengan statistik empiris. Tetapi dari hasil perbandingan kinerja yang pernah dilakukan, terlihat bahwa laju konvergensi dalam operasi perhitungannya ternyata metode EVA paling cepat dengan konsekuensi beban perhitungannya lebih tinggi karena adanya operasi dekomposisi *eigenvalue*. Proses penyamaan (*equalization*) yang optimum untuk yang linier maupun non linier dalam metode EVA dapat dicapai dengan operasi menggunakan beberapa jumlah sampel sinyal yang diukur saja, atau dengan kata lain tidak perlu seluruh sampel yang ada hasil pengukuran digunakan untuk pemrosesan sinyal. Cukup sejumlah prosentase tertentu dari jumlah sampel keseluruhan yang diproses dalam metode EVA *Blind Deconvolution* ini. Dan setelah menjalani proses iterasi, metode ini akan konvergensi ke satu hasil perhitungan solusi equalizer linier optimum secepat proses algoritma *non-blind Recursive Least Square* [90,92-95].

3.3.3. Metode *Blind Deconvolution*

Pada pemrosesan sinyal, konvolusi adalah perhitungan suatu sinyal keluaran $y(k)$ dengan diketahui kedua sinyal lainnya yaitu sinyal masukan $d(k)$ dan respons impuls dari sistem kanal $h(k)$ seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 3. 17. Diagram dari masukan - keluaran dari istem sinyal digital diskret - waktu

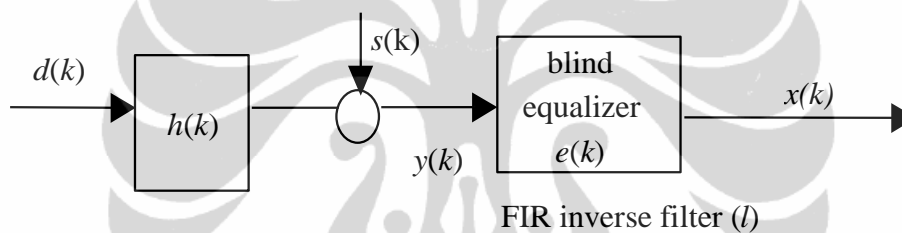
Dengan panjang urutan *finite impulse response* FIR yang terbatas yaitu m , dan nilai indeks untuk pergeseran urutan data menjadi $[k-m]$ maka hasil konvolusi dapat ditulis sebagai berikut,

$$y(k) = h(k) * d(k) \quad (3.3)$$

$$y(k) = \sum_{m=0}^{\infty} h(m)d(k - m) \quad (3.4)$$

Dekonvolusi adalah cara perhitungan penentuan dari respons impuls dari kanal sistem $h(k)$ atau sinyal masukan asli $d(k)$ dimana sinyal keluaran $y(k)$ adalah dapat diakses atau diukur sedangkan informasi ataupun pengetahuan tentang sinyal masukan asli $d(k)$ samasekali tidak ada. Karena proses dekonvolusinya berjalan tanpa informasi atau pengetahuan apapun sebelumnya, sehingga dapat dikatakan berjalan secara buta, maka disebutkan prosesnya adalah dekonvolusi secara buta atau *Blind Deconvolution*.

Pada situasi nyata dalam prakteknya, sinyal yang akan diteliti dari hasil suatu pengukuran bukanlah merupakan sinyal masukan yang asli melainkan sinyal hasil konvolusi antara sinyal masukan yang asli $d(k)$ dengan respons impuls dari sistem $h(k)$ ditambah sinyal latar pengotor (*noise*) $s(k)$ seperti ditunjukkan pada gambar diagram dibawah ini.



Gambar 3. 18. Diagram konfigurasi dasar dari proses Blind Deconvolution

Untuk bisa merekonstruksi atau mendapatkan kembali sinyal masukan asli, maka dibutuhkan satu proses dari suatu sistem yang secara optimum mampu menghilangkan sinyal penutup atau pengotor dari kanal atau sistem sinyal yang tidak diketahui tersebut. Dalam bidang telekomunikasi, sistem yang dibutuhkan tersebut dikenal sebagai proses penyamaan atau *equalizer* dalam komunikasi sinyal. Tetapi berbeda dengan *equalizer* yang biasa atau sudah umum, *blind equaliser* bekerja tanpa akses apapun kepada sinyal masukan yang asli, demikian juga tanpa informasi tahapan latihan atau coba-coba, tanpa target maupun gambaran bagaimana sinyal asli yang hendak didapat, tidak seperti yang biasa didapat pada proses *adaptive filtering*.

Sinyal pengamatan yang didapat dari hasil pengukuran:

$$y(k) = h(k) * d(k) + s(k) \quad (3.5)$$

Sinyal keluaran dari sistem tambahan *blind equaliser* dinyatakan sebagai $x(k)$:

$$x(k) = e(k) * y(k) \quad (3.6)$$

Menggunakan persamaan normal yang umum, maka *equaliser* yang linier dan ideal dengan kesalahan rata rata kuadrat minimum (*minimum mean square error*) dapat dihitung secara statistik dari [81,86]:

$$e_{MMSE} = R_{yy}^{-1} r_{yd} \quad (3.7)$$

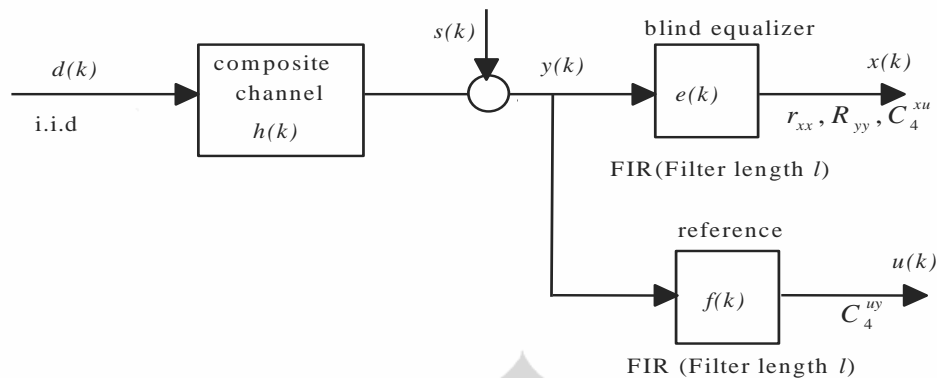
Bila sinyal hasil pengukuran $y(k)$ dan sebagian sinyal asli $d(k)$ diketahui sebagai bahan tahapan latihan atau coba-coba, maka R_{yy}^{-1} adalah satu matrik *non-singular* $(l+1) \times (l+1)$ *Hermitian Toeplitz auto-correlation* dan r_{yd} adalah vektor *cross-correlation*. l adalah panjang dari kebalikan saringan (*inverse filter length*).

Kesalahan kuadrat rata rata (*Mean Square Error, MSE*) adalah:

$$MSE(e, k_0) \triangleq E\{ |x(k) - d(k - k_0)|^2 \} = \text{minimum} \quad (3.8)$$

dimana k_0 adalah penundaan (*delay*) dari sinyal. Untuk setiap tingkat jumlah l dan penundaan k_0 , maka hasil perhitungan koefisien *equaliser* $e_{MMSE}(k)$ akan memperkecil nilai MSE. Dengan demikian, tujuan dari proses *linear equalisation* adalah mendapatkan kumpulan nilai inverse filter $e(k)$ dari *Finite Impulse Response* (FIR), yang akan menghasilkan nilai $x(k)$ yang sedekat mungkin dengan nilai sinyal asli yang tertunda $d(k - k_0)$. Karena nilai $MSE(e, k_0)$ tidak akan banyak berubah untuk satu kisaran nilai penundaan yang luas, maka nilai penundaan k_0 untuk mudahnya dapat diambil sebagai $\frac{1}{2} l$ [96].

Untuk penyelesaian *blind solution*, yaitu pada situasi tanpa adanya akses apapun kepada sinyal masukan asli ataupun kepada tahapan latihan apapun, maka set nilai koefisien *equaliser* $e(k)$ akan ditentukan dengan menggunakan tambahan *FIR inverse filter* yang lain dipasang sejajar terhadap *equaliser FIR inverse filter* semula. Tambahan sistem FIR ini, seperti ditunjukkan kemudian pada gambar 3.19. di halaman berikut, berfungsi sebagai pembuat data acuan (*reference data generator*) untuk setiap tahapan iterasi dari proses iterasi untuk menentukan set nilai koefisien *equaliser*. Set nilai koefisien FIR filter untuk sistem referensi ini adalah $f(k)$ dan sinyal keluarannya adalah set $u(k)$.



Gambar 3. 19. Diagram penyelesaian *Blind Deconvolution* yaitu dengan penambahan satu *inverse filter FIR* yang sejajar sebagai acuan pembangkit nilai koefisien equalizer $e(k)$ dalam proses iterasi agar hasil konvolusinya adalah $x(k) = \text{time - delay}$ dari $d(k)$

Menggunakan metode statistik orde tinggi kriteria kualitas kumulatif silang (*cross-cumulant quality criterion*) serta daya keluaran dari *equaliser* [90-94,96], maka penyelesaian tertutup yang optimum untuk perhitungan koefisien dari *equaliser* adalah soal *eigenvector* sebagai berikut :

$$\begin{aligned} C_4^{uy} e &= \lambda R_{yy} e \\ R_{yy}^{-1} C_4^{uy} e &= \lambda e \end{aligned} \tag{3.9}$$

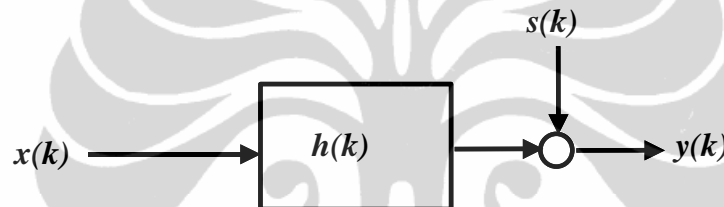
dimana R_{yy} adalah matrik otokorelasi (*autocorrelation matrix*) dari sinyal pengukuran $y(k)$, dan C_4^{uy} adalah matrik kumulatif silang statistik orde 4 (*4th order statistic cross-cumulant matrix*) dari set nilai keluaran referensi $u(k)$ dengan nilai sinyal pengukuran $y(k)$. Dengan menyelesaikan soal *eigenvector* secara iterasi dengan nilai *eigenvalues* maksimum, maka set nilai koefisien equaliser $e(k)$ dapat ditentukan untuk melakukan rekonstruksi sinyal $x(k)$ yang mendekati bentuk sinyal asli [90,92-94,96].

Sinyal keluaran dari equaliser yaitu $x(k)$ akan mendekati bentuk sinyal aslinya yaitu *time - delay* dari $d(k)$ pada konteks nilai kesalahan minimum MSE. r_{yd} sebagai vektor *cross-correlation* $\lambda^{-1} C_4^{uy} e$ dapat digantikan oleh matrik kumulatif dan *eigenvector* yang berkaitan dengan nilai *eigenvalue* maksimum. Hal ini berdasarkan dari hasil kriteria kualitas kumulatif yang diaplikasikan dalam proses dan yang dikembangkan oleh Shalvi dan Weinstein [91,95,123]. Ini berlaku

untuk situasi dimana tidak ada informasi sama sekali mengenai sinyal masukan asli $d(k)$ yang bisa digunakan untuk mencoba tahapan latihan. Dengan kata lain proses dekonvolusi ini berlangsung secara buta (*blind deconvolution*).

3.3.4. Algoritma Metode *Blind Deconvolution* dengan Pendekatan EVA (*Eigen Vector Approach*)

Sinyal yang diukur pada satu bantalan elemen gelinding sebenarnya adalah bukan sinyal asli dari bantalan tersebut. Sinyal bantalan yang asli sulit diakses secara langsung, sementara respons impuls dari kanal sistem juga tidak diketahui. Gambar berikut menunjukkan situasi tersebut diatas dimana sinyal yang didapat dari hasil pengukuran bukanlah sinyal asli yang ingin diteliti ataupun dianalisis.



Gambar 3. 20. Diagram proses konvolusi dasar dari sinyal masukan $x(k)$ dengan respons dari sistem impuls $h(k)$

Gambar diatas menunjukkan diagram situasi nyata dari dasar konvolusi pada sistem linier.

Sinyal yang terbaca (dari pengukuran), $y(k)$:

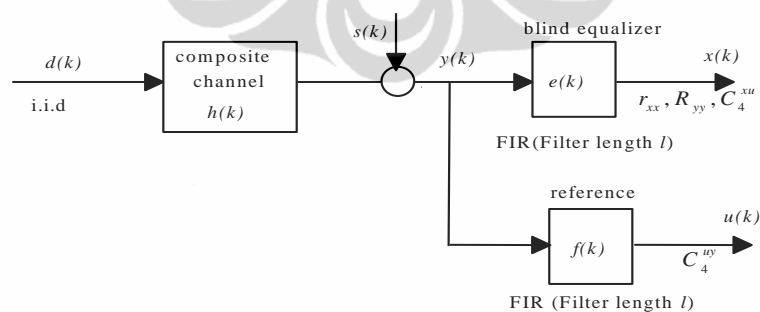
$$y(k) = h(k) * x(k) + s(k) \quad (3.10)$$

$$y(k) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} h(m) \cdot x(k - m) + s(k) \quad (3.11)$$

Pendekatan penyelesaian yang diambil untuk menyelesaikan persoalan merekonstruksi sinyal masukan asli $d(k)$ pada soal *blind deconvolution* ini adalah dengan penyelesaian yang disebut sebagai *Eigen Vector Approach* (EVA), yang awalnya dikembangkan oleh Kammeyer dan Jellonek dari Universitas Bremen Jerman Barat [90-92,95]. Pada awalnya penyelesaian dengan *eigen vector*

approach (EVA) dikembangkan sebagai algoritma baru yang cepat untuk identifikasi *blind MA (Moving Average)* sistem berdasarkan pada operasi kumulatif statistik orde tinggi sebagaimana di jelaskan dengan detail dalam referensi [87,90,91].

Sistem *blind equalizer* yang digunakan dalam pendekatan penyelesaian ini adalah satu *equalizer Finite Impulse Response (FIR)* dan *equalizer* kedua yang sama sebagai *FIR filter* acuan atau referensi, dimana keduanya disusun sebagai sejajar. Dengan mengaplikasikan pendekatan *Eigen Vector Approach ini*, nilai hasil proses penyamaan (*equalization*) yang optimum baik linier maupun tidak linier bisa didapat dari pemrosesan sejumlah data sampel dari sinyal hasil pengukuran. Hanya sejumlah prosentase data sampel saja dari jumlah total keseluruhan data sampel yang dibutuhkan untuk pemrosesan sinyal untuk kanal sistem apapun dengan ada atau tidaknya sinyal *Gaussian* pengotor tambahan. Untuk menentukan berapa persentase data sampel yang cukup untuk pemrosesan data dilakukan dahulu perhitungan optimasi jumlah sampel data untuk mendapatkan satu nilai kriteria *Crest Factor* tertinggi dimana pada prosentase data sampel disitulah yang diambil. Gambar diagram selanjutnya menunjukkan sinyal yang diteruskan $x(k)$ berupa sinyal i.i.d yang mandiri (*independent*) dan terdistribusi merata (*identically distributed*) sehingga sinyal masukan itu adalah deret data sampel dengan nilai rata rata nol tetapi tidak dapat diakses sama sekali.



Gambar 3. 21. Diagram metode *Blind Deconvolution* dengan penyelesaian *Eigen Vector Approach (EVA)*

Kanal sistem sama sekali tidak diketahui respons impuls-nya tetapi dapat diasumsikan bahwa sistemnya *causal*, dan *time invariant* untuk satu waktu sesaat tertentu (*quasi time-invariant*).

Sinyal yang didapat dari hasil pengukuran $y(k)$ tertutupi penuh atau terkubur dalam suatu sinyal latar pengotor yang *independent stationary zero mean additive noise* $s(k)$. Sistem *FIR filter* referensi digunakan untuk membentuk set deretan data sampel untuk menjadi data nilai acuan untuk proses iterasi yang menghasilkan set nilai koefisien dari *equalizer* $f(k)$. Algoritma EVA adalah suatu skema perhitungan *equalizer* yang akan memperkirakan kanal sebaliknya dengan cara langsung menggunakan metode statistik orde tinggi empiris yaitu kurtosis silang dari dua kumulasi orde tinggi. Tujuannya adalah untuk mendapatkan set nilai *inverse filter* $e(k)$ dari *Finite Impulse Response* (FIR), dimana kemudian set nilai sinyal asli $d(k)$ dapat ditentukan sedekat mungkin dengan set nilai *delayed original signal* $x[n-n_0]$ berdasarkan nilai kesalahan minimum dari *Mean Square Error* (MSE) [4] yaitu :

$$MSE(e, k_0) \triangleq E\{|d[k] - x[k - k_0]|^2\} \quad (3.12)$$

dimana n_0 adalah penundaan sinyal hasil perhitungan terakhir.

Andaikan terdapat penyelesaian yang *non-blind* yaitu seandainya sinyal $y(k)$ dan $x(k)$ diketahui, maka dengan menggunakan persamaan normal set nilai koefisien *equalizer* dengan kriteria nilai kesalahan minimum MMSE (l, k_0) dapat dihitung,

$$e_{MMSE(k_0)} = R_{yy}^{-1} r_{yx} \quad (3.13)$$

dan,

$$\begin{aligned} r_{yx} &\triangleq E\{y(k) \cdot x(k - k_0)\} \\ R_{yy} &\triangleq E\{y_k y_k^*\} \end{aligned} \quad (3.14)$$

dimana r_{yx} and R_{yy} berturutan menunjukkan vektor *cross-correlation* dan matrik *non-singular* $(l+1) \times (l+1)$ *Hermitian Toeplitz auto-correlation*, kemudian vektor vektor y_n and y_n^* dapat dituliskan sebagai :

$$\begin{aligned} y_k &\triangleq [y^*(k), y^*(k-1), \dots, y^*(k-l)]^T \text{ dan} \\ y_k^* &\triangleq [y(k), y(k-1), \dots, y(k-l)] \end{aligned} \quad (3.15)$$

(bentuk *conjugate transpose*)

Dengan penyelesaian *blind* EVA, tujuannya adalah menentukan nilai dari MMSE- (l, k_0) tanpa mempunyai informasi mengenai data sinyal $x(k)$ dan hanya informasi dari data sinyal $y(k)$. Berdasarkan set nilai sinyal $y(k)$, set nilai keluaran *equalizer* $d(k)$ dan set data keluaran sistem referensi $u(k)$ dapat ditentukan berdasarkan pada urutan kumulatif silang - 2 dimensi - statistik orde 4,

$$\begin{aligned}
 C_4^{du}(i_1, i_0) &\triangleq C_4^{dudu}(i_1, 0, i_2) \\
 &= E\{|d(k)|^2 u^*(k+i_1)u(k+i_2)\} \\
 &\quad - r_{dd}(0)r_{uu}(i_2-i_1) \\
 &\quad - r_{du}(i_2)r_{du}^*(i_1) \\
 &\quad - \bar{r}_{du}^*(i_1)\bar{r}_{du}(i_2)
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

disini $r_{dd}(i), r_{du}(i), \bar{r}_{du}(i)$ menunjukkan berturut-turut *auto-correlation*, *cross correlation* dan *modified cross-correlation*, dimana,

$$\begin{aligned}
 r_{dd}(i) &\triangleq E\{d^*(k)d(k+i)\}; \\
 r_{du}(i) &\triangleq E\{d^*(k)u(k+i)\}; \\
 \bar{r}_{du}(i) &\triangleq E\{d(k)u(k+i)\};
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Berdasarkan fungsi kualitas dari kurtosis silang maksimum, persamaan (3.16) dituliskan kembali sebagai

$$\begin{aligned}
 C_4^{du}(0,0) &= E\{|d(k)|^2|u(k)|^2\} - E\{|d(k)|^2\}E\{|u(k)|^2\} \\
 &\quad - |E\{d^*(k)u(k)\}|^2 - |E\{d(k)u(k)\}|^2
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Dari kurtosis silang antara $d(k)$ dengan $u(k)$, didapat ukuran kualitas dari *equalization* yaitu :

$$\text{maksimumkan } |C_4^{du}(0,0)| \text{ membuat } r_{dd}(0) = \sigma_x^2 \tag{3.19}$$

dari referensi [93,96], menunjukkan keluaran dari *equalizer* dalam term sinyal pengukuran dan respons impuls dari *equalizer* maka fungsi kualitas dapat ditunjukkan sebagai,

$$\text{maksimumkan } |e^* C_4^{uy} e| \text{ membuat } e^* R_{yy} e = \sigma_x^2 \tag{3.20}$$

$$C_4^{uy} e_{EVA} = \lambda R_{yy} e_{EVA} \tag{3.21}$$

Persamaan (3.21) adalah persamaan EVA untuk menentukan vektor koefisien:

$$e_{EVA} \triangleq [e_{EVA}(0), \dots, e_{EVA}(l)]^T \quad (3.22)$$

disebut sebagai penyelesaian EVA-(l) untuk soal *blind equalisation*, didapat dengan cara memilih nilai eigenvector dari $R_{yy}^{-1}C_4^{wy}$ yang berkaitan dengan nilai maksimum *eigenvalue* λ . Prosedur DSP *blind deconvolution* ini dan program optimasi jumlah data sampel dan banyaknya iterasi ditulis dalam program aplikasi Matlab®. Data pengukuran/pengamatan, yang ditangkap dengan sensor non mekanik hasil pengembangan kemudian diproses dengan program aplikasi Matlab® yang dibuat untuk rekonstruksi sinyal asli, yaitu sinyal dari kerusakan dini pada bantalan gelinding. Uraian mengenai algoritma *eigenvector approach* (EVA) yang lebih rinci dan lebih dalam dapat ditemui pada beberapa referensi mengenai metode *Blind Deconvolution* [92-94,96].

Algoritma lengkap dari *Eigen Vector Approach* (EVA) dapat disarikan sebagai langkah-langkah sebagai berikut :

1. Siapkan sistem referensi dengan nilai nol kecuali hanya satu nilai bukan nol, yaitu $\delta(k)$ sebagai satu deret data sampel. Jumlah elemen adalah tetap menurut barisan (l) adalah 16, 24 or 32, yaitu $f(l) = f(0), \dots, f(l) = (0, 0, \dots, 1, \dots, 0, 0)$. l adalah nilai panjang atau jumlah koefisien *filter FIR*. Jumlah data sampel N yang akan dibaca atau diproses dimasukkan atau dibaca oleh program aplikasi yang telah dibuat. Dengan demikian data sampel yang akan diproses adalah $[y(0), y(1), \dots, y(N-1)]$, Jumlah proses iterasi maksimum ditetapkan adalah i . Matrik *auto correlation non-singular* $(l+1) \times (l+1)$ *Hermitian Toeplitz* dapat diperkirakan dari data sampel sinyal yang diukur $y(N)$, yaitu sebagai berikut :

$$R_{yy} \triangleq E\{y_k y_k^*\} \quad (3.23)$$

$$\text{dimana, } y_k \triangleq (y^*[k], y^*[k-1], \dots, y^*[k-l])^T \quad (3.24)$$

dan, $y_k^* \triangleq (y[k], y[k-1], \dots, y[k-l])$ dalam bentuk matrik transpose conjugate [93]

Elemen elemen matrik dapat dihitung dari:

$$\hat{R}_{yy} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=l}^{N-1} y_k y_k^* \quad (3.25)$$

2. Set nilai keluaran sistem referensi $u(k)$ ditentukan dari hasil konvolusi total $u(k) = y(k) * f(k)$. mengacu ke persamaan (3.17) sampai persamaan (3.21), matrik *cross cumulant Hermitian* $(l+1) \times (l+1)$ dari sistem referensi dapat ditentukan sebagai berikut :

$$C_4^{uy} \triangleq E\{|u(k)|^2 y_k y_k^*\} - E\{|u(k)|^2\} E\{y_k y_k^*\} - E\{u(k) y_k\} E\{u^*(k) y_k^*\} - E\{u^*(k) y_k\} E\{u(k) y_k^*\} \quad (3.26)$$

Bila dituliskan kembali dalam bentuk matrik, nilai skalar dari kumulan silang $C_4^{uy} [\circ]$ dapat diperkirakan.

Elemen elemen matrik kemudian didapat dari:

$$\hat{C}_4^{uy} = \frac{1}{N-1} \left(\sum_{k=l}^{N-1} |u(k)|^2 y_k y_k^* \right) - \frac{1}{(N-1)^2} \left[\left(\sum_{k=l}^{N-1} |u(k)|^2 \right) \cdot \left(\sum_{k=l}^{N-1} y_k y_k^* \right) + \left(\sum_{k=l}^{N-1} y_k u^*(k) \right) \cdot \left(\sum_{k=l}^{N-1} y_k^* u(k) \right) + \left(\sum_{k=l}^{N-1} y_k u(k) \right) \cdot \left(\sum_{k=l}^{N-1} y_k^* u^*(k) \right) \right] \quad (3.27)$$

3. Substitusi nilai perkiraan \hat{R}_{yy} dan \hat{C}_4^{uy} kedalam persamaan (3.21):

$$C_4^{uy} \cdot e_{EVA} = \lambda \cdot R_{yy} \cdot e_{EVA}$$

maka koefisien *equaliser* e_{EVA} dihitung dengan menyelesaikan nilai *eigenvector* yang paling bermakna dari nilai perkiraan $R_{yy}^{-1} C_4^{uy}$ sebagaimana dalam persamaan (3.16). Proses perhitungan akan memberikan hasilnya begitu kriteria MMSE (*minimum mean square error*) terpenuhi seperti ditunjukkan dalam persamaan (3.14) dan (3.15). Hasil e_{EVA} ini menunjukkan sebagai $e_{EVA}^i(l)$ dari hasil proses *blind equaliser* (superscript i menunjukkan nomor iterasi terakhir).

4. Masukkan set nilai $e_{EVA}^i(l)$ kedalam sistem referensi sebagai set nilai perkiraan baru untuk $f^{(i+1)}(k)$, kemudian kembali ke langkah 2 dan mengulangi langkah

berikutnya. Proses iterasi ini memberikan nilai terakhir set nilai koefisien *equalizer* $e_{EVA}^i(l)$ untuk menjadi set nilai perkiraan baru untuk koefisien sistem referensi $f(l)$. Proses iterasi akan berhenti bila suatu penyamaan (*equalization*) yang mencukupi sudah tercapai yang dikendalikan dengan menetapkan nilai kesalahan relatif antara koefisien equalizer dengan koefisien sistem referensi, yaitu bila kedua nilai tersebut sudah tidak jauh berbeda atau sudah sangat mendekati sama yaitu bila nilai kesalahan relatif sudah sama atau lebih kecil daripada nilai error yang ditetapkan semula. Bila kriteria tersebut tidak bisa tercapai maka proses iterasi akan berhenti dengan sendirinya bila jumlah iterasinya sudah mencapai jumlah maksimum iterasi yang ditetapkan semula yaitu sejumlah i kali iterasi.

5. Rekonstruksi sinyal $x(k)$ untuk menjadi perkiraan sinyal asli $d(k)$, ditentukan dari proses konvolusi total $x(k) = y(k) * e(k)$ seperti diuraikan dalam persamaan (3.4) sebagai set nilai keluaran dari *equaliser*.

3.3.5. Parameter Parameter Pemrosesan Sinyal

Beberapa parameter harus ditetapkan dahulu untuk memroses sinyal getaran secara efektif dan efisien. Berdasarkan karakteristik proses metode *Blind Deconvolution*, ternyata tidak seluruh data sampel dibutuhkan untuk melakukan pemrosesan sinyal. Hanya sejumlah prosentase tertentu dari total jumlah sampel data saja yang dibutuhkan, dengan demikian biaya beban pemrosesan juga menjadi turun. Sebagian data sampel ternyata sudah cukup untuk memroses data sinyal untuk merekonstruksi sinyal asli yang diinginkan. Walaupun demikian perlu juga untuk berhati-hati untuk tidak memberikan terlalu sedikit jumlah sampel data sinyal untuk menghindari terjadinya "aliasing" dalam pembacaan data sampel sinyal.

Crest Factor adalah perbandingan antara nilai absolut maksimum dari amplitudo sampel terhadap nilai *Root Mean Square* (R.M.S.) dari seluruh jumlah total data sampel. Faktor ini mengindikasikan adanya suatu *pulse* pada sinyal data sampel, dimana biasanya *pulse* terjadi karena adanya tumbukan yang begitu cepat yang mengidentifikasi adanya suatu kerusakan sebarangpun kecilnya. Nilai *Crest factor* digunakan untuk mencari jumlah prosentase jumlah data sampel yang optimum.

Parameter berikutnya yang harus dipilih untuk suatu proses yang optimum adalah tingkatan dari *equalizer* yang diwakili oleh nilai panjang *filter* yaitu jumlah koefisien *equalizer* yang akan digunakan dalam pemrosesan data sampel. Koefisien *equalizer* ini adalah untuk kedua *filter FIR* yang sama dan dipasang sejajar untuk melakukan proses iterasi penyamaan (*equalization*) sampai didapat set nilai koefisien *equalier* yang stabil. Kedua *filter FIR* tersebut adalah *filter FIR equalizer* utama dan *filter FIR* sistem referensi. Panjang *filter FIR* atau jumlah koefisien *equalizer* yang optimum akan memberikan proses rekonstruksi sinyal yang optimum. Jumlah standard koefisien *equalizer* atau panjang *filter FIR* adalah $l = 16, 24, 32$.

Jumlah iterasi adalah juga satu parameter penting yang harus ditentukan sebelum pemrosesan data sampel dengan metode *Blind Deconvolution* dijalankan. Nilai ini membatasi jumlah proses iterasi maksimum yang akan dilakukan. Nilai ini sebenarnya juga untuk mendukung sistem kendali iterasi yang menggunakan nilai kesalahan relatif minimum. Bila dalam pemrosesan sinyal terjadi ketidak-konvergensi maka besar kemungkinan nilai kesalahan relatif minimum tidak akan ditemui sehingga proses iterasi bisa terus berlangsung tak hingga. Dengan menentukan jumlah maksimum proses iterasi maka permasalahan tersebut diatasi yaitu pemrosesan data sampel sinyal akan berhenti bila nilai kesalahan relatif telah ditemui atau jumlah iterasi yang maksimum telah dilakukan.

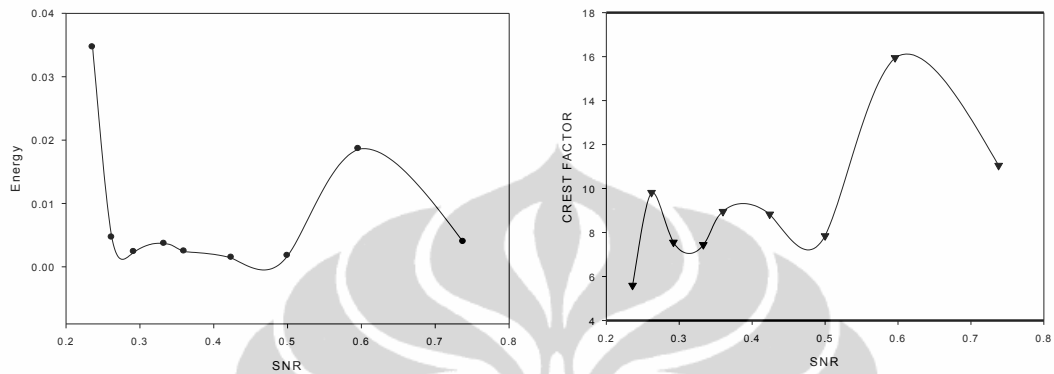
3.3.6. Modifikasi dan Optimasi Metode *Blind Deconvolution*

Telah ditunjukkan nilai keunggulan dari metode *Blind deconvolution* sebagai suatu teknik untuk mendapatkan kembali sinyal dari kerusakan bantalan yang tertutupi oleh sinyal pengotor (*noise*). Telah ditunjukkan dan dibuktikan pula bahwa metode *Blind deconvolution* mampu merekonstruksi kembali sinyal asli yang sudah terkubur didalam sinyal sinyal pengotor dari mana mana [85,93]. Teknik ini ternyata bekerja sangat baik terhadap sinyal sinyal yang periodik, baik sebagai sinyal asli maupun sebagai sinyal pengotor (*noise*). Juga ternyata diketahui bahwa *equalizer* yang diaplikasikan dalam proses *Blind deconvolution* bekerja juga seperti suatu *notch filter* yang menghilangkan sinyal pengotor (*noise*) pada frekuensi yang berhubungan [124].

Hasil dari simulasi yang telah dilakukan dalam percobaan aplikasi metode *blind deconvolution* pada penelitian ini maupun penelitian lain ternyata menunjukkan bahwa kemampuan dari metode *Blind deconvolution* untuk mengidentifikasi sinyal asli yang ingin didapatkan atau direkonstruksi kembali ternyata tidak terkendala oleh jumlah data sampel (1200, 200, 3200), panjang filter FIR atau jumlah koefisien equalizer (16, 24, 32) ataupun jumlah maksimum proses iterasi dilakukan (120, 200). Ternyata kombinasi apapun dari nilai nilai parameter tersebut tetap membuat metode *Blind Deconvolution* bekerja secara efektif dalam merekonstruksi sinyal asli yang terkubur oleh sinyal pengotor. Akan tetapi hasil yang bisa paling mendekati dengan sinyal asli sebenarnya untuk sinyal bantalan yang rusak adalah tergantung pada pemilihan jumlah data sampel dan panjang filter. Nilai panjang filter atau jumlah koefisien *equalizer* yang besar cenderung akan menghilangkan banyak komponen periodik didalam sinyal asli sehingga hasil rekonstruksi sinyal aslinya terlihat sebagai sinyal yang terlalu bersih. Sedangkan dengan jumlah data sampel yang besar, hasil rekonstruksi sinyal asli membutuhkan waktu yang lebih lama [85,125,126].

Suatu percobaan simulasi juga telah dilakukan untuk mendapatkan hubungan antara nilai panjang filter atau jumlah koefisien *equalizer* dengan nilai *Signal to Noise Ratio* SNR. Tujuannya adalah untuk dapat menentukan panjang filter yang optimum yang bisa memberikan nilai SNR yang tinggi yang berarti bahwa sinyal asli sudah tidak terkubur didalam sinyal pengotor. Ternyata terlihat bahwa untuk menghasilkan sinyal rekonstruksi dengan SNR yang tinggi hanya nilai kecil untuk panjang filter yang dibutuhkan. Dan untuk nilai panjang filter yang lebih tinggi maka nilai SNR yang rendah akan didapat yang berarti rekonstruksi sinyal aslinya tidak baik. Dari percobaan simulasi didapat nilai optimum untuk nilai panjang filter atau jumlah koefisien equalizer adalah $l = 14$ untuk menghasilkan nilai SNR = 4,2. Sedangkan untuk nilai yang tinggi yaitu $l = 78$ ternyata nilai SNR = 0,14. Dengan memperhatikan nilai kurtosis yang perbedaan relatifnya tidak terlalu besar saat iterasi dalam proses *Blind deconvolution* yang disimulasikan, ternyata bahwa nilai panjang filter atau jumlah koefisien equalizer yaitu $l = 32$ mampu menghasilkan nilai SNR yang relatif stabil yaitu tidak terlalu tinggi ataupun terlalu rendah dengan kisaran yang cukup lebar. Dengan demikian dapat dianggap bahwa

nilai panjang filter l yang optimum adalah pada nilai sekitar 32 atau ditengah tengah antara nilai 14 dan 78. Percobaannya juga berdasarkan pada pengamatan terhadap nilai *Crest Factor* yang tinggi yang terjadi pada sinyal hasil rekonstruksi [126, 128].



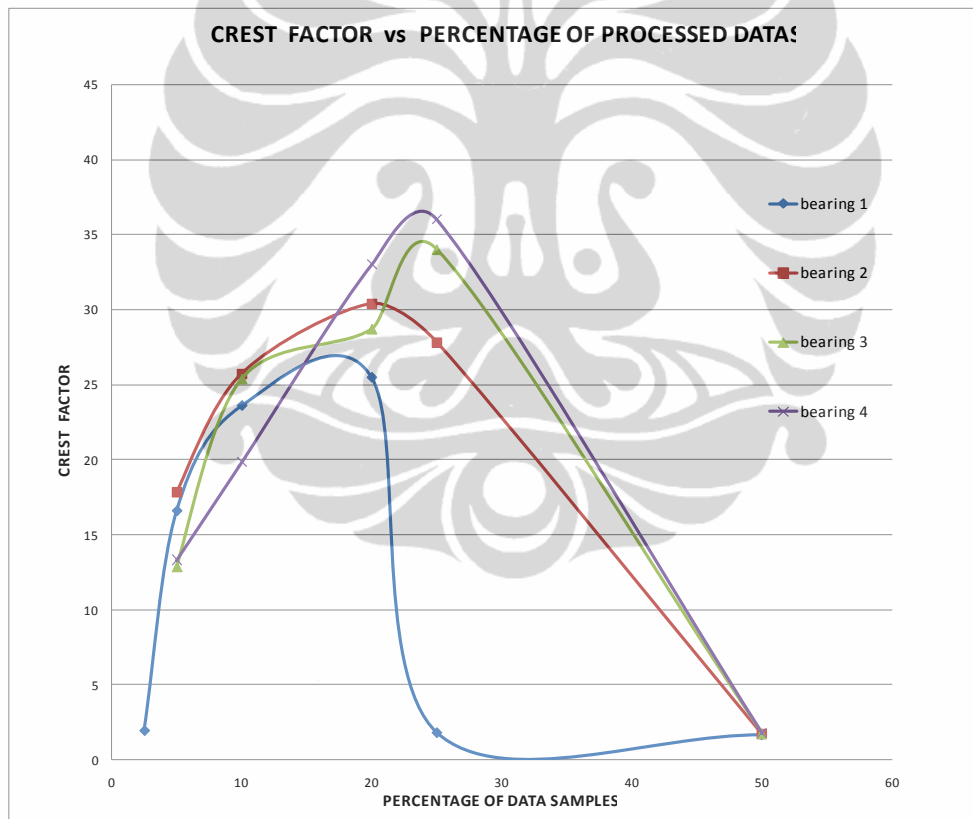
Gambar 3.22. Grafik hubungan antara nilai perbandingan sinyal asli terhadap sinyal pengotor (*signal to noise ratio*, SNR) terhadap tingkat energi sinyal (grafik sebelah kiri) dan terhadap faktor puncak, *Crest Factor* (grafik sebelah kanan)

Dari gambar grafik kanan diatas dari suatu hasil percobaan simulasi yang lain terlihat bahwa nilai *Crest Factor* berada pada kisaran antara 7,5 sampai 9,8 untuk kisaran nilai SNR = 0,25 – 0,5 dan untuk kisaran SNR yang kurang lebih sama terlihat bahwa tingkat energi sinyal relatif konstan pada nilai sekitar 0,005 (V_{rms})². Tetapi yang menarik dari hasil percobaan simulasi ini adalah pada SNR yang rendah yaitu SNR = 0,236 terjadi kondisi dimana tingkat energi menjadi tinggi tetapi nilai *Crest Factor* turun menjadi lebih rendah. Dari gambar kedua grafik ini terlihat bahwa antara nilai *Crest Factor* dengan tingkat energi sinyal tidak terdapat hubungan yang bermakna. Demikian pula antara *Crest Factor* dengan SNR tidak bisa dihubungkan secara langsung karena dari data percobaan simulasi sebelumnya nilai SNR lebih bergantung pada nilai panjang filter atau nilai jumlah koefisien *equalizer* yang digunakan dalam proses *Blind Deconvolution*.

Jumlah data sampel yang berbeda akan memberikan sinyal yang berbeda dengan nilai *Crest Factor* yang berbeda pula. Oleh karena itu pemilihan prosentase jumlah data sampel yang akan diproses dilakukan berdasarkan evaluasi terhadap nilai *Crest Factor* yang ada. Nilai *Crest Factor* yang maksimum pada satu nilai prosentase jumlah data sampel yang diproses, menentukan nilai optimum

prosentase jumlah data sampel yang akan diproses. Yaitu prosentase jumlah data sampel diproses yang mana yang menunjukkan nilai *Crest Factor* yang maksimum.

Dimulai dengan prosentase jumlah data sampel yang kecil dan menaik, nilai *Crest Factor* juga menaik sampai kemudian mencapai suatu nilai maksimum pada suatu nilai prosentase jumlah data sampel yang tertentu, selanjutnya ternyata nilai *Crest Factor* menurun terus seiring dengan naiknya prosentase jumlah data sampel sampai mencapai 100%. Suatu "*fine tuning*" dilakukan yaitu percobaan simulasi yang sama dengan tingkat perubahan yang sedikit demi sedikit untuk mendapatkan nilai optimum prosentase jumlah data sampel yang lebih tepat pada nilai *Crest Factor* maksimum yang lebih tepat pula.



Gambar 3. 23. Grafik hubungan antara prosentase jumlah data yang diproses dengan nilai factor puncak sinyal, *Crest Factor*, yang dapat terdeteksi

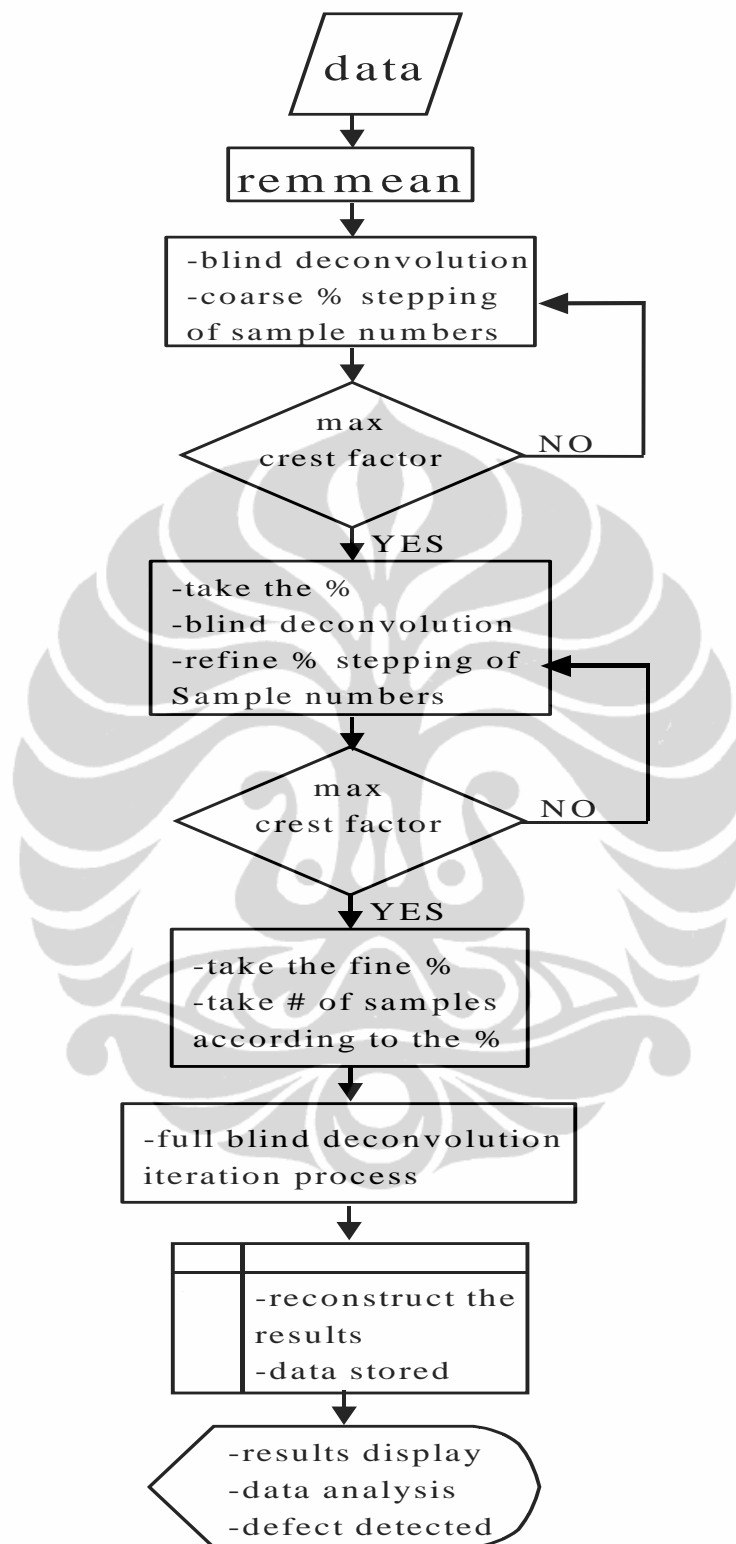
Dari gambar grafik diatas dapat dilihat bahwa dari beberapa percobaan simulasi ternyata hasilnya saling berdekatan yaitu prosentase jumlah data sampel yang optimum akan memberikan nilai *Crest Factor* yang maksimum ada di kisaran 20%

- 40% jumlah data sampel. Terlihat pula dengan menambah jumlah data sampel untuk diproses, ternyata untuk prosentase jumlah data sampel diatas 50% proses rekonstruksi sinyal asli malah gagal yang ditunjukkan dengan rendahnya nilai *Crest Factor* yang berarti bahwa sinyal hasil rekonstruksinya kurang menggambarkan sinyal asli yang seharusnya.

Peningkatan kualitas kinerja proses *Blind Deconvolution* telah dipelajari kembali dengan tujuan untuk dapat menentukan panjang filter FIR atau jumlah koefisien *equalizer* atau vektor $e(k)$ sebelum proses tanpa adanya informasi ataupun akses kepada sinyal masukan yang asli. Pada pemodelan proses *Blind Deconvolution* digunakan 2 filter FIR yang paralel untuk proses *equalization* dimana filter pertama sebagai *equalizer* dan filter kedua sebagai sistem referensi. Sebagai 2 filter FIR yang tidak saling bergantung (*independent*), maka hubungan yang paling sederhana antara kedua kumulasi silang statistik orde 4 dari masing masing sinyal keluaran adalah *kurtosis* silang antara keduanya. Kemudian dengan memaksimalkan *kurtosis* silang tersebut sebagai fungsi kualitas, maka statistik *auto-corellation* dari sinyal keluaran akan sama dengan kuadrat dari *variant* statistiknya σ_x^2 . Dengan menyelesaikan persamaan persamaan *auto-corellation* dan *cross cumulants* secara simultan akan menghasilkan suatu persamaan soal *Eigen Value* yang diselesaikan dengan cara iterasi memperkirakan matrik *equalizer*. Hasilnya penyelesaian soal tersebut adalah set nilai panjang filter FIR atau jumlah koefisien *equalizer* atau vektor $e(k)$. Bila perkiraan matrik *equalizer* bisa dibuat dengan baik dan optimum, maka rekonstruksi sinyal asli akan menjadi lebih baik dengan waktu proses yang lebih cepat.

Pada implementasi metode *Blind Deconvolution* sebagai alat untuk merekonstruksi sinyal masukan yang asli, maka beberapa peningkatan telah dikembangkan dan diterapkan yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas hasil rekonstruksi sinyal asli dan mempercepat proses atau laju konvergensinya. Langkah pertama menjalankan metode *Blind Deconvolution* ini adalah menyesuaikan data sampel dengan persyaratan data yang akan diproses yaitu distribusi data harus *Newtonian* atau sebagai deret *Gauss* yaitu dengan nilai rata rata adalah nol. Sebagai langkah awal data sampel dimasukkan dalam program aplikasi yang akan merubah distribusi data sampel menjadi data *Newtonian* atau deret *Gauss* dengan rutin

matlab yang diberi nama REMMEAN atau "remove mean" yaitu menghilangkan nilai rata rata bila ada menjadi nilai nol. Setelah itu diberi masukan nilai prosentase optimum data sampel yang akan diproses dengan jalan iterasi berdasarkan kriteria nilai *Crest Factor* tertinggi. Proses iterasi ini terdiri dari, pertama, mencari nilai *Crest Factor* maksimum dari sinyal data sampel dengan urutan prosentase 1, 2, 4, 8, 32, 64 % dari jumlah data sampel keseluruhannya. Untuk nilai kisaran prosentase jumlah data yang memberikan kisaran nilai *Crest Factor* maksimum dilakukan iterasi kembali tetapi dengan tahapan yang lebih halus atau dekat sehingga didapat nilai prosentase jumlah data yang benar benar optimum memberikan nilai *Crest Factor* maksimum. Nilai prosentase jumlah data sampel itu kemudian dijadikan pegangan untuk menentukan jumlah data sampel yang akan diproses sebenarnya. Panjang filter FIR ditentukan $l = 32$ orde yang tinggi, dan nilai maksimum proses iterasi ditentukan $i = 120$ atau nilai kesalahan relatif maksimum adalah 0,005. Penentuan nilai nilai awal ini cukup baik dari segi nilai biaya proses, waktu, efektivitas dan efisiensi. Barulah kemudian proses rekonstruksi sinyal asli berjalan sewajarnya. *Flow Chart* untuk menjalankan proses metode *Blind Deconvolution* ini dilampirkan pada halaman berikut.

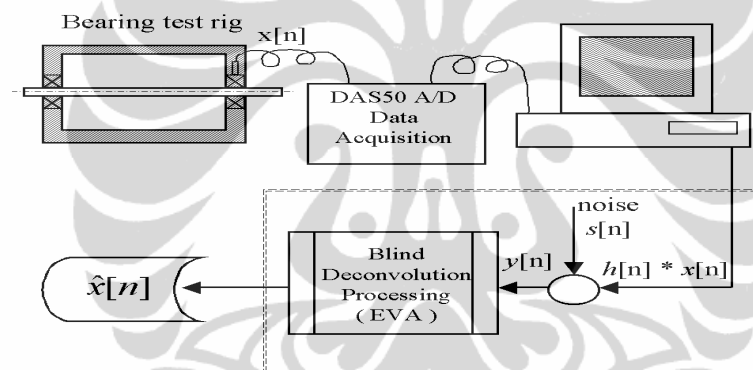


Gambar 3. 24. Diagram alir dari proses metode pemrosesan sinyal Blind Deconvolution dengan penyelesaian EVA untuk merekonstruksi sinyal asli guna mendeteksi kerusakan dini

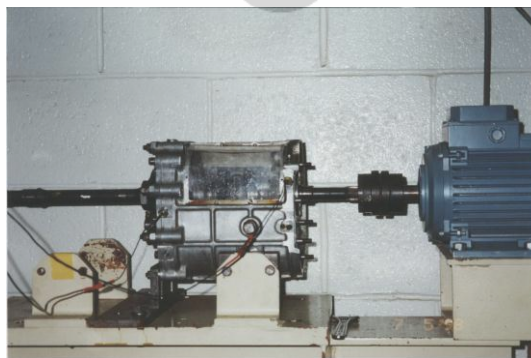
3.4. Pengembangan Rig Uji

3.4.1. Rig Uji Simulasi

Percobaan simulasi dilakukan untuk menguji kelayakan dari penerapan metode *Blind Deconvolution* untuk mendapatkan kembali sinyal asli. Satu bantalan gelinding yang jelas sengaja dirusak pada bagian cincin luarnya untuk bisa memberikan sinyal kerusakan bantalan. Sinyal bantalan rusak kemudian di tutupi oleh sinyal latar pengotor (*noise*) baik yang periodik maupun yang acak. Sinyal latar pengotor (*noise*) di dapat dari roda gigi-roda gigi yang terpasang pada mesin uji simulasi. Sinyal hasil pengukuran diproses dengan metode *Blind Deconvolution* untuk mendapatkan kembali sinyal bantalan rusak yang ditutupi oleh sinyal latar pengotor (*noise*). Dibawah ini adalah gambar diagram skematik percobaan simulasi yang dilakukan.



Gambar 3. 25. Diagram sistem pelaksanaan penelitian penentuan kerusakan dini dengan pemrosesan sinyal menggunakan metode *Blind Deconvolution*



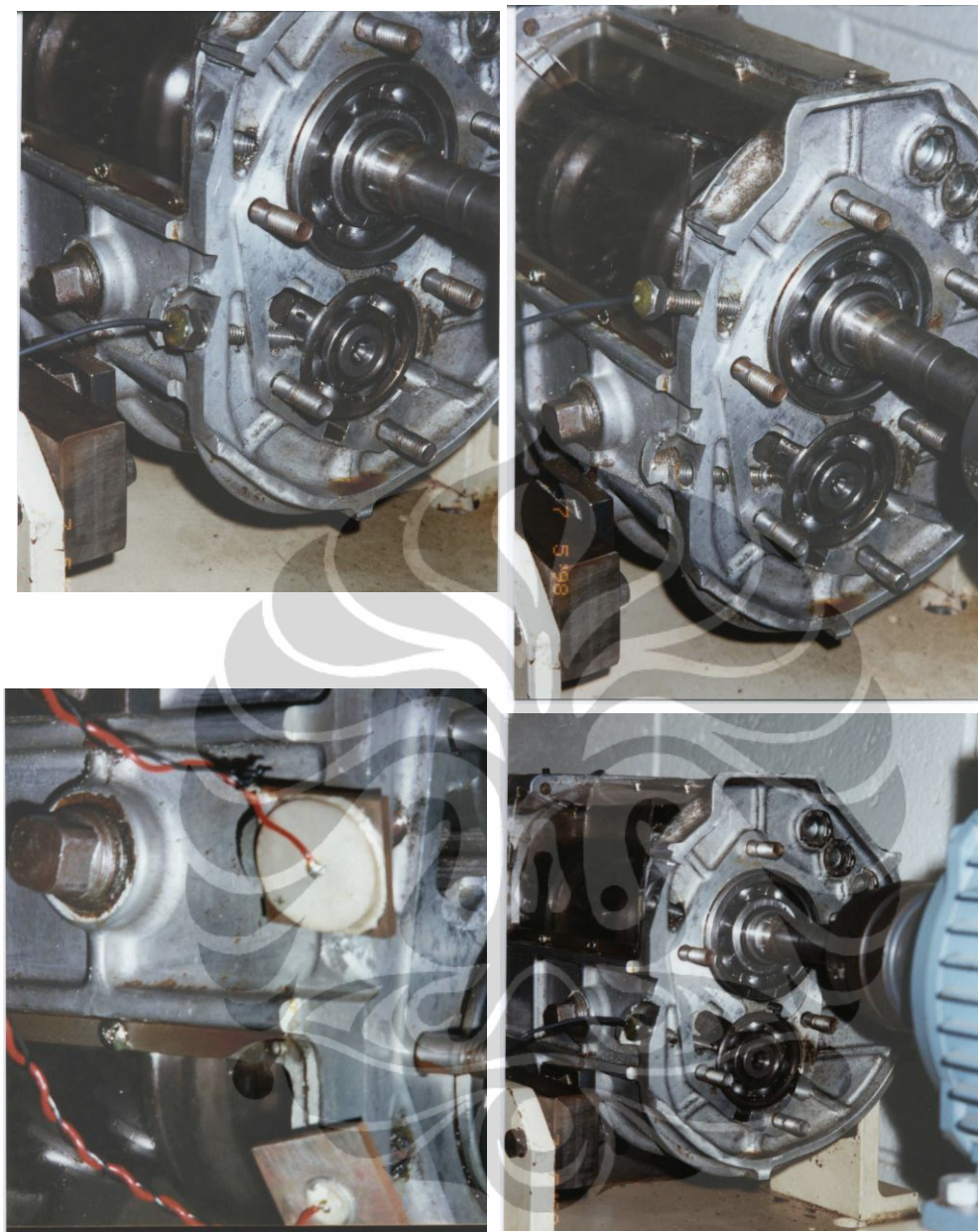
Gambar 3. 26. *Bearing test rig* dengan bantalan yang disimulasi kerusakannya dan diberikan sinyal pengotor dari rodagigi serta sinyal dari aktuator PZT



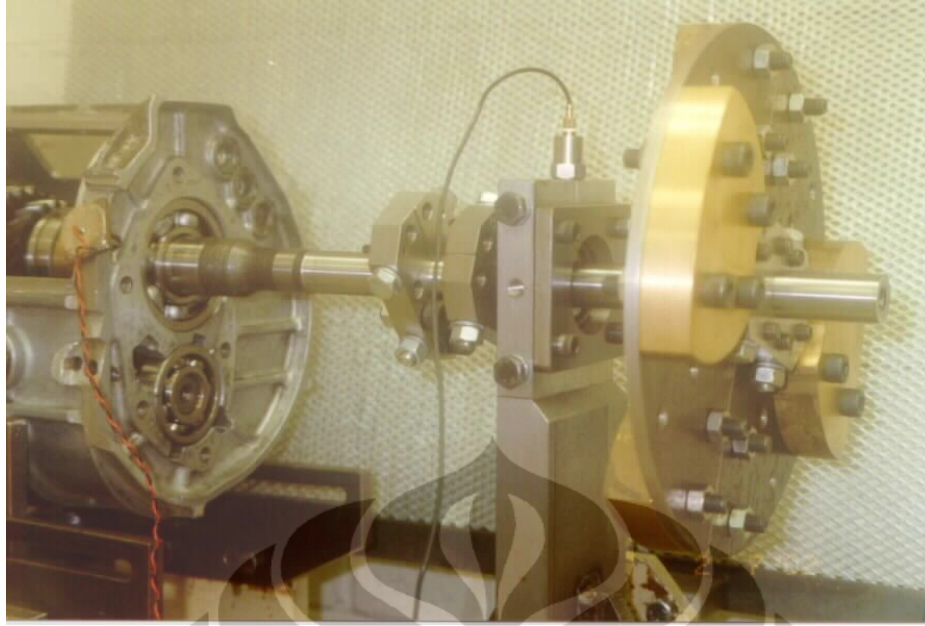
Gambar 3. 27. Sistem *bearing test rig* dengan pemasok sinyal pengotor dari rangkaian rodagigi



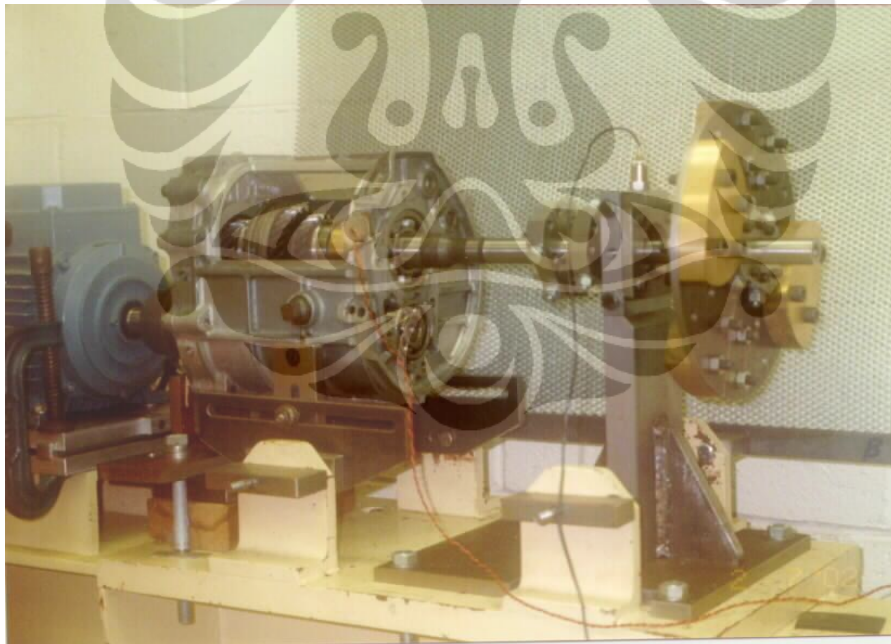
Gambar 3. 28. Peralatan ukur yang digunakan yaitu DAQ DAS18 dengan *sampling rates* 800 kHz - 1 MHz yang terpasang dalam PC dan *signal analyzer* untuk memantau gelombang tegangan yang terdeteksi oleh sensor AE



Gambar 3. 29. Lokasi lokasi pemasangan sensor AE dalam percobaan dengan bantalan yang disimulasi kerusakannya dan diberi sinyal pengotor (*noise*)



Gambar 3. 30. Penambahan pasokan sinyal pengotor dari beban tidak seimbang (*unbalanced force*) dan pemantauan getaran dengan *accelerometer*



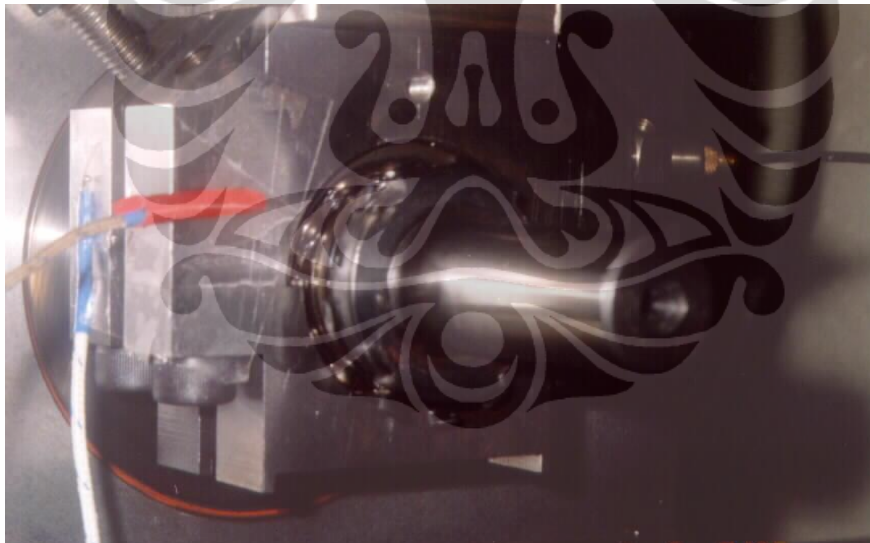
Gambar 3. 31. Percobaan dengan sinyal pengotor (*noise*) berasal dari beban tidak seimbang dan rangkaian rodagigi dengan pemantauan getaran yang terjadi oleh *accelerometer*

Pada percobaan simulasi ini, respons impuls kanal sistem $h(n)$ adalah konstan dari rig uji coba itu sendiri. Sinyal sinyal pengotor acak didapat dari rangkaian roda

gigi dan beban tidak seimbang, sedangkan gelombang harmonik sinusoidal buatan dibangkitkan oleh peralatan pembangkit gelombang dan perangkat lunak DSP. Gelombang sinusoidal yang dibangkitkan alat pembangkit gelombang disambung ke aktuator Piezo untuk memberikan sinyal pengotor (*noise*). Dengan perangkat lunak DSP, sinyal hasil pengukuran ditambahi dengan sinyal pengotor (*noise*) buatan dengan mengatur frekuensi dan amplitudonya bisa didapat total gelombang dengan nilai SNR yang diinginkan [126].

3.4.2. Rig Uji Kondisi Sesungguhnya

Sebuah rig percobaan lain dibangun untuk percobaan simulasi praktek nyata seperti ditunjukkan gambar. Rig percobaan ini terdiri dari satu mesin press hidrolik untuk memberi beban kepada bantalan uji yang terpasang pada poros motor listrik. Pada bantalan uji dipasang sensor *accelerometer* dan sensor emisi akustik yang dirancang dan dibuat sendiri.



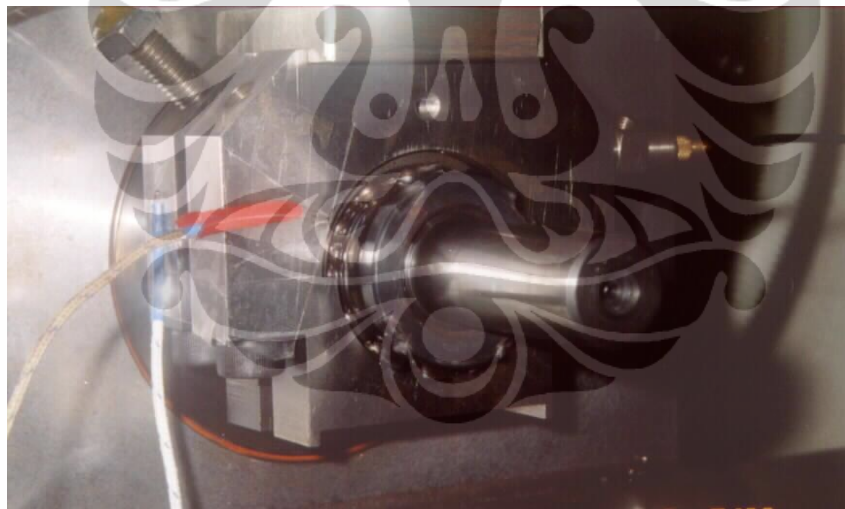
Gambar 3. 32. Rumah bantalan yang dirancang khusus untuk percobaan dengan beban dari mesin tekan hidrolik, sensor AE, pemantau getaran *accelerometer* dan kabel kabel bimetal pengukur temperature yang terjadi

Satu bantalan elemen gelinding baru belum rusak dipasang pada poros motor listrik, dan bantalan tersebut juga dipasang didalam satu rumah bantalan yang dirancang khusus. Bantalan elemen gelinding ini sebagai benda uji mendapat beban radial dari tekanan yang diberikan oleh mesin hidrolik dan secara simultan diputar oleh motor listrik pada kecepatan putaran normal. Percobaan ini dirancang

sebagai simulasi kondisi operasi ekstrim yang nyata. Berdasarkan pembebanan dan kondisi kerja yang diberikan kepada bantalan tersebut, umur bantalan elemen gelinding dapat dihitung atau diperkirakan berdasarkan perhitungan, yaitu dengan menggunakan prosedur perhitungan umur dan kinerja bantalan dari pabrikan buku manual bantalan tersebut. Dengan pengamatan langsung “*real time*” dan pengambilan data pemantauan kondisi yang rutin setiap jam, kemudian dilakukan pemrosesan data dan analisis kondisi bantalan. Rekonstruksi sinyal asli dilakukan *offline* untuk setiap jam pengamatan untuk melihat timbulnya kerusakan dini pada bantalan baru.

3.5. Uji Coba Sesungguhnya (*Real Time*)

Untuk uji coba sesungguhnya, satu rig percobaan baru telah dibangun terdiri dari satu mesin press hidrolik besar dan motor listrik serta rumah bantalan yang dirancang khusus supaya bisa dipasang berbagai macam sensor.



Gambar 3. 33. Rumah bantalan yang dirancang khusus untuk percobaan *real - time*

Sebagai benda uji digunakan bantalan bola gelinding #16005 (beban dinamis maksimum 7610 N) yang dipasang pada poros keluaran dari motor listrik. Benda uji bantalan tersebut diberi beban radial sebesar 4000 N dengan suatu alat press hidrolik. Dan bersamaan bantalan juga diputar oleh motor listrik tersebut pada kecepatan putar normal yaitu sekitar 1320 rpm. BPF0 = 108 Hz, BPF1 = 153 Hz,

Sampling rates 400 kHz. Dgn perhitungan manual diketahui umur kerja bantalan = 117 jam dengan kondisi kerja seperti yang direncanakan.

Pemantauan kondisi bantalan setiap 1 jam. Dilakukan pemeriksaan kondisi bantalan. Diambil data getaran bantalan dan data emisi akustik dari bantalan. Data getaran dan data emisi akustik diproses offline. Untuk test konsistensi dan *robustness* dilakukan uji eksperimen untuk beberapa bantalan sebagai benda uji.



Gambar 3. 34. Sistem yang digunakan untuk percobaan real – time terdiri dari alat tekan hidrolik dengan strain gauges pengukur beban penekan, DAQ, Low Pass filter, AE linear filter, oscilloscope, computer dengan data base serta data analyzer, dan rumah bantalan khusus dimana terpasang sensor AE, accelerometer, bimetal pengukur temperatur

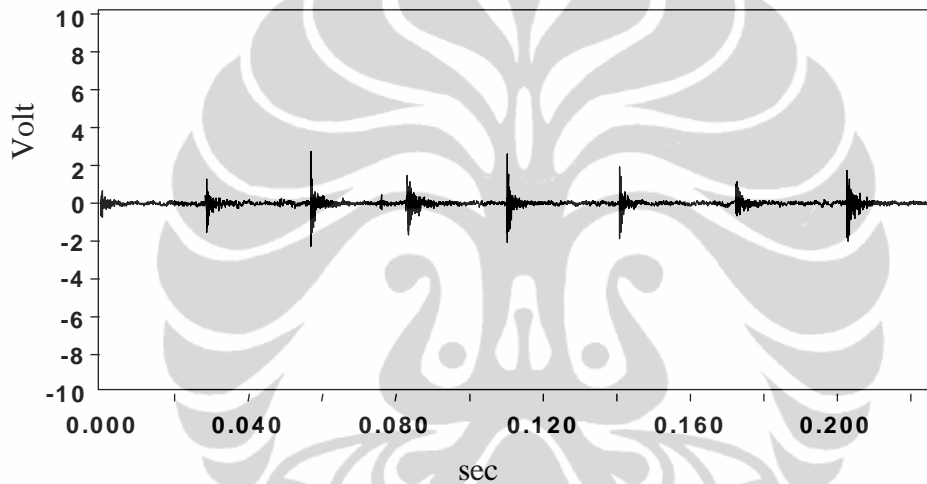
Sistem pengujian yang dibangun adalah berupa satu test rig yang dirancang khusus dan rumah bantalan uji yang juga dirancang khusus untuk dapat dilakukan percobaan pembebanan, pengukuran, observasi dan pemantauan. Sistem yang terpasang adalah seperti pada gambar 3.34. diatas.

BAB 4

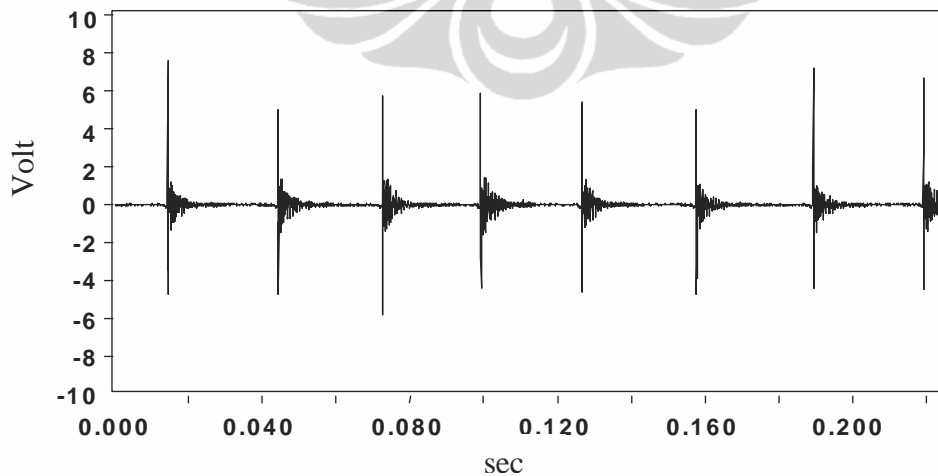
PEMBAHASAN

4.1. Kinerja Rancangan Sensor AE

Percobaan yang dilakukan adalah dengan langsung menggunakan sensor AE yang dikembangkan dalam penelitian ini untuk mengukur suatu getaran dari bantalan gelinding yang sengaja dirusak. Sinyal hasil pengukuran itu dibandingkan terhadap hasil pengukuran dengan menggunakan alat sensor yang biasa digunakan di lapangan dan tersedia di lapangan yaitu *accelerometer* dari B&K.



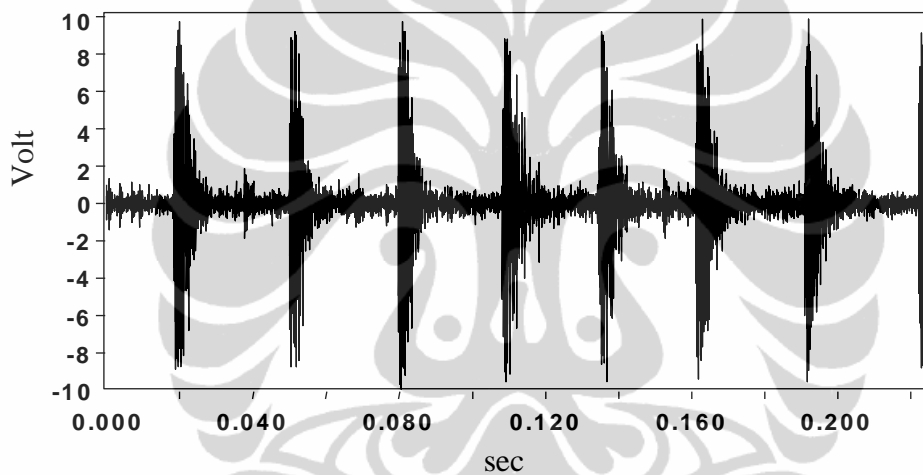
Gambar 4. 2. Hasil pengukuran dengan *Acelerometer* B&K 4334



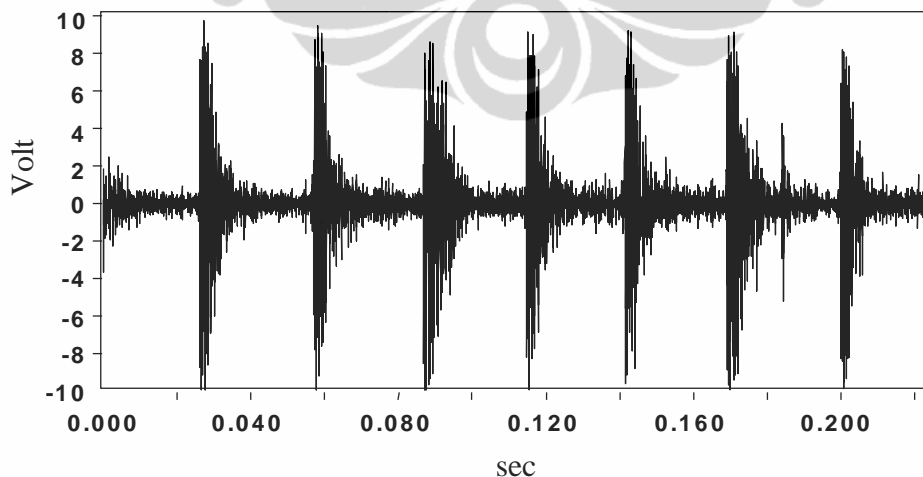
Gambar 4. 1. Hasil pengukuran dengan sensor AE yang dirancang dan dikembangkan sendiri

Gambar 4.1. adalah hasil pengukuran dengan alat sensor komersial B&K 4334 *accelerometer*, sedangkan gambar 4.2. adalah hasil pengukuran dengan sensor AE yang dikembangkan rancangan tipe baut menggunakan elemen PZT diameter 3 mm dan tebal 0,2 mm. Dari gambar tersebut diatas dapat dilihat bahwa dari perbandingan tersebut diatas ternyata hasilnya relatif sama.

Sedangkan hasil pengukuran dengan sensor AE yang dikembangkan dengan model *probe* menggunakan elemen PZT diameter 8 mm dan tebal 0,2 mm seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3. dan model *probe* menggunakan elemen PZT diameter 8 mm dan tebal 2 mm pada gambar 4.4., menunjukkan perbedaan yang sangat bermakna dibanding dengan *accelerometer* komersial.



Gambar 4. 3. Hasil pengukuran menggunakan sensor AE *probe* dengan PZT tipis



Gambar 4. 4. Hasil pengukuran menggunakan sensor AE *probe* dengan PZT tebal

Dari gambar sinyal pada gambar 4.3. dan 4.4. dimuka terlihat bahwa terjadi pembesaran hasil pengukuran oleh sensor model *probe* dengan elemen PZT berdiameter 8 mm baik yang tipis maupun yang tebal.

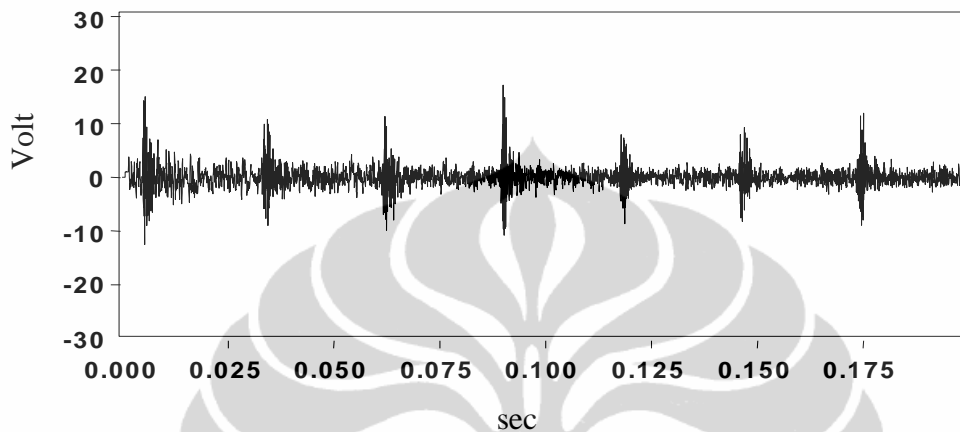
Kalau dibandingkan dengan penggunaan *accelerometer* biasa model B&K 4334 ternyata sensor AE dengan rancangan bentuk baut memberikan hasil pengukuran yang tidak jauh berbeda. Sedangkan rancangan berbentuk *probe* dengan kedua elemen PZT yang lebih besar ukurannya dibanding pada bentuk baut menunjukkan bahwa sensitivitasnya ternyata sangat besar sehingga malah memberikan efek berupa ikut terdeteksinya gelombang-gelombang latar belakangnya yang sebenarnya adalah sinyal-sinyal pengotor. Ditunjukkan bahwa semakin tebal dan semakin besarnya elemen PZT sebagai pendeteksi, maka sensitivitasnya semakin besar sehingga hasil deteksinya menjadi tidak jelas karena terdeteksinya pula sinyal pengotor yang lebih banyak dan lebih besar, dibanding dengan hasil dari rancangan berbentuk baut. Walaupun sifat-sifat teknis bahan PZT sebagai bahan *Piezoelectric* telah dipublikasikan secara luas, penggunaan PZT sebagai elemen untuk sensor masih terus diteliti dan berkembang. Demikian pula masih terbuka luas kesempatan untuk lebih mendalami perancangan serta modifikasi alat sensor ini agar menjadi benar-benar layak sesuai standard industri yang sudah berkembang.

4.2. Kinerja Algoritma Pemroses Sinyal Digital Metode *Blind Deconvolution*

Untuk mengetahui kinerja algoritma pemroses sinyal digital yang dikembangkan dalam penelitian ini dilakukan percobaan simulasi komputer dengan bantuan perangkat lunak pemrosesan sinyal digital DaDISP untuk menangani data sinyalnya. Teknik percobaannya adalah satu sinyal getaran yang berasal dari bantalan gelinding yang sengaja dirusak ditambahkan sinyal latar pengotor dengan amplitudo yang lebih besar sehingga sinyal getaran tersebut terkubur didalam sinyal latar pengotor. Dengan metode *Blind Deconvolution* yang dikembangkan dan dimodifikasi serta dioptimasi, dilakukan rekonstruksi atau pembersihan sinyal latar pengotor (*noise*) sehingga sinyal getaran tadi dapat ditampilkan kembali.

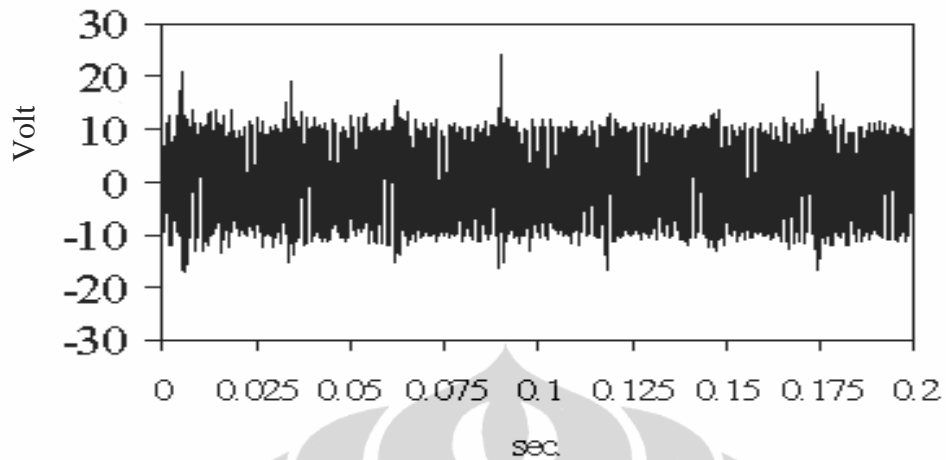
Contoh dari sinyal bantalan yang belum ditutup sinyal pengotor ditunjukkan pada gambar 4.5. di halaman berikut. Pada gambar tersebut terlihat sinyal impulsif

yang periodik timbul akibat elemen gelinding mengenai kerusakan bantalan. Dengan menetapkan kecepatan putarannya pada 800 rpm (13.33 Hz) dan dimensi bantalan diketahui dari buku katalog, maka periode tumbukan kerusakan sebagai periode sinyal bantalan rusak itu adalah 0.026 sec.



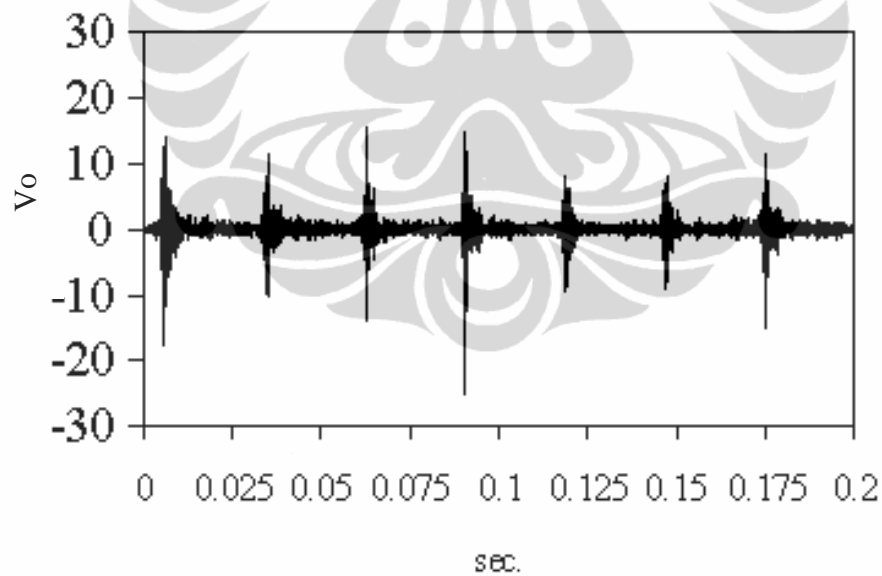
Gambar 4. 5. Sinyal asli dari bantalan yang sengaja dibuat rusak

Pada percobaan ini sinyal bantalan diberikan berbagai sinyal latar pengotor (*noise*) buatan. Tes untuk aplikasi metode *Blind Deconvolution* menggunakan jumlah iterasi maksimum sebanyak 120 iterasi, dengan jumlah data sampel 3200 dan 2000 data sampel serta panjang filter atau jumlah koefisien equalizer adalah 16 dan 32. Hasil dari metode *Blind Deconvolution*, ternyata antara 3200 and 2000 data sampel tidak ada perbedaannya atau sulit sekali membedakannya, untuk jumlah iterasi dan panjang filter yang sama dan tetap. Walaupun demikian ada penghematan waktu, yaitu untuk jumlah data sampel yang lebih sedikit waktu yang dibutuhkan untuk proses sinyalnya lebih sedikit. Dengan nilai panjang filter yang lebih besar, hasil rekonstruksi sinyal asli menjadi lebih bersih dibanding dengan hasil dari proses dengan panjang filter yang lebih kecil. Dengan nilai panjang filter yang lebih besar, ternyata ada bagian-bagian dari sinyal asli yang ikut terbuang. Dari pengamatan terhadap hasil percobaan yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa hasil keluaran proses metode *Blind Deconvolution* yang terbaik yaitu hasilnya sangat mirip atau sama dengan sinyal aslinya adalah dari pengaturan jumlah 2000 data sampel, nilai panjang filter 32 dan banyaknya iterasi adalah 120 kali.



Gambar 4. 6. Sinyal bantalan rusak yang ditutup oleh sinyal pengotor (*noise*) berupa harmonik sinusoidal 500 Hz

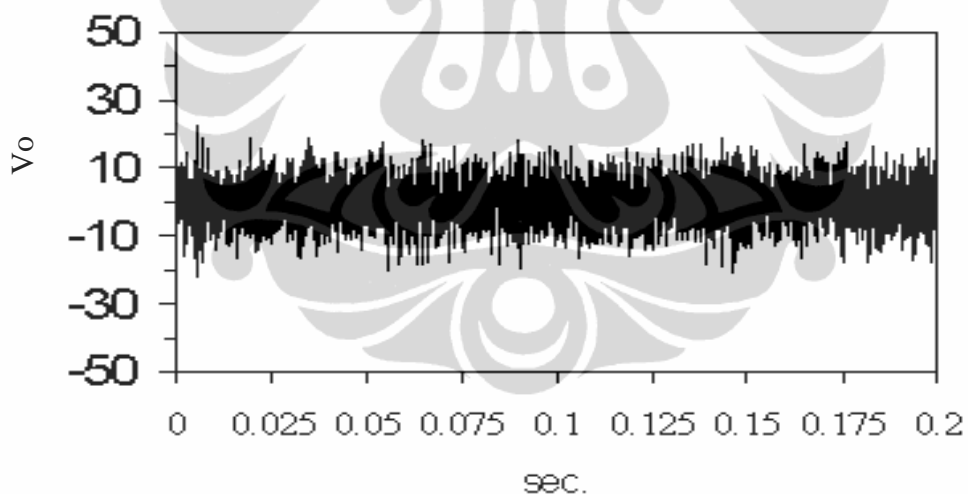
Gambar 4.6. menunjukkan sinyal bantalan yang terkubur oleh sinyal latar pengotor (*noise*) berupa gelombang sinusoidal (500 Hz). Pulsa tumbukan periodik pada sinyal bantalan menjadi sulit sekali terlihat.



Gambar 4. 7. Hasil rekonstruksi dari sinyal tertutup *noise* (gambar 4.6.) dengan metode *Blind Deconvolution*

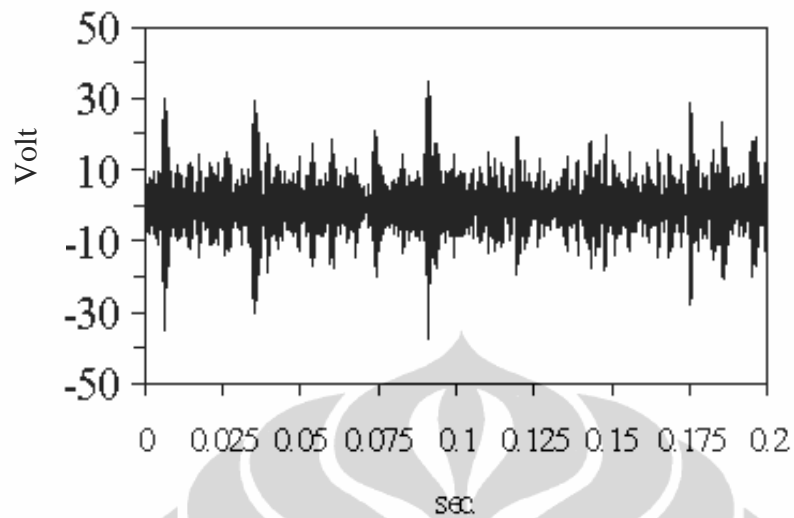
Hasil setelah proses sinyal dengan metode *Blind Deconvolution* adalah seperti pada gambar 4.7. Dari hasil tersebut, terlihat bahwa teknik untuk menghilangkan sinyal latar pengotor (*noise*) atau teknik untuk mendapatkan kembali (rekonstruksi) sinyal asli telah berhasil dan sukses. Teknik yang diterapkan telah berhasil menampilkan kembali sinyal asli yang telah terkubur walaupun beberapa komponen sinyal yang frekuensi rendah terbawa ikut dihilangkan. Periode tumbukan dari sinyal bantalan rusak tersebut sama dengan yang ada pada sinyal asli dari bantalan yang sengaja dirusak.

Contoh sinyal asli bantalan yang terkubur didalam sinyal latar acak (*random noise*) adalah seperti pada gambar 4.8. dibawah ini. Dapat dilihat bahwa sinyal bantalan aslinya terkubur didalam sinyal latar pengotor yang acak yaitu tidak berupa gelombang periodik maupun harmonik.



Gambar 4. 8. Sinyal asli bantalan yang sengaja dirusak tertutup oleh sinyal latar pengotor yang acak (*random noise*)

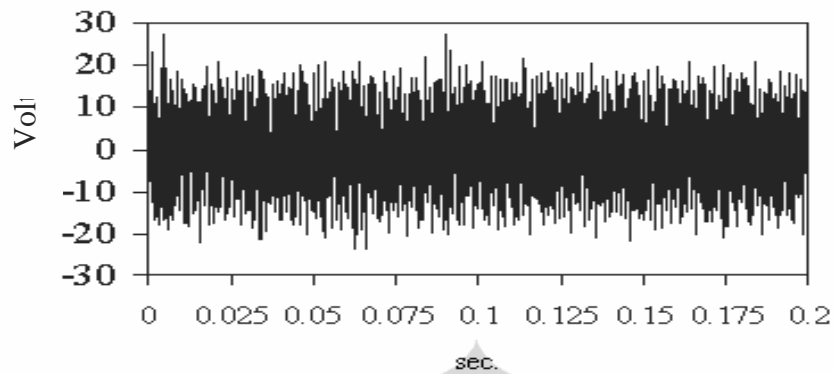
Hasil dari pemrosesan sinyal dengan metode *Blind Deconvolution* ditunjukkan pada gambar 4.9. di halaman berikut ini. Walaupun ada kemungkinan untuk dapat mengenali kembali sinyal asli yang telah berusaha direkonstruksikan kembali, tetap saja hasil dari pemrosesannya adalah tidak memuaskan karena rekonstruksi sinyal asli bantalan yang sengaja dirusak tidak berhasil.



Gambar 4. 9. Hasil rekonstruksi sinyal yang tertutup oleh *random noise* (gambar 4.8.) ternyata tidak berhasil dengan baik

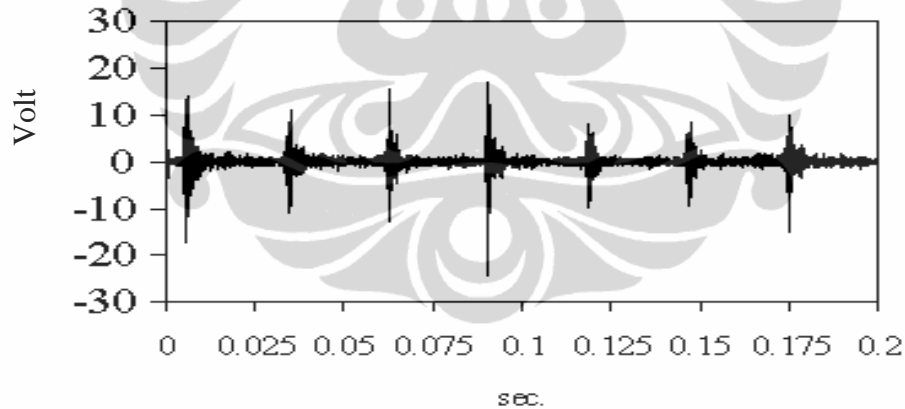
Penjelasan dari hasil ini adalah bahwa metode *EVA equalizer* bekerja berdasarkan asumsi kanal sistem adalah *quasi-time-invariance* yang idealnya adalah untuk menghilangkan sinyal latar pengotor yang periodik atau harmonik.

Selanjutnya untuk dapat mensimulasikan situasi yang sangat mendekati permasalahan nyata, sinyal bantalan rusak dikubur dalam dalam beberapa sinyal latar pengotor yang berbeda. Sinyal bantalan rusak tertutup oleh serial dari 5 gelombang sinusoidal sebagai sinyal latar pengotor (*noise*) yang mensimulasikan *noise* dari mesin mesin putar. Hasil penutupan sinyalnya dengan *noise* tersebut diatas adalah seperti pada gambar 4.10. di halaman berikut. Sinyal bantalan rusak terkubur habis didalam sinyal sinyal latar pengotor dan gambarannya sangat mendekati kondisi nyata yang sebenarnya.



Gambar 4. 10. Sinyal bantalan yang sengaja dirusak tertutup oleh 5 frekuensi gelombang harmonik sinusoidal sebagai *noise*

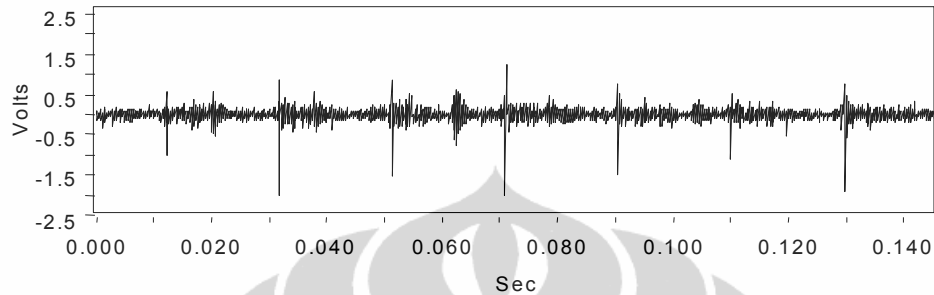
Hasil keluaran dari pemrosesan sinyal adalah seperti gambar pada gambar 4.11. di bawah ini. Terlihat jelas bahwa teknik *equalizer* dalam metode *Blind Deconvolution* berhasil sukses menghilangkan semua sinyal latar pengotor yang periodik sehingga sinyal asli bantalan yang sengaja dirusak dapat direkonstruksi kembali.



Gambar 4. 11. Hasil rekonstruksi sinyal bantalan yang sengaja dirusak yang berhasil menampakkan kembali sinyal asli

Percobaan simulasi komputer berikutnya adalah dengan penggabungan percobaan pada test rig dengan simulasi komputer. Pada suatu rig eksperimen yang sengaja dibangun dipasang dan dioperasikan satu bantalan gelinding yang sudah mempunyai kerusakan yang tertentu dan disengaja sehingga memberikan sinyal getaran pada test rig. Data sinyal dari bantalan rusak tersebut telah dipunyai, yaitu BPFO = 45 Hz (*impact rate* = 0,022 sec), tingkat energi sinyal (RMS) = 0.023 (V-RMS)², *Crest Factor* = 13,635. Kemudian pada tes rig dipasang pula aktuator

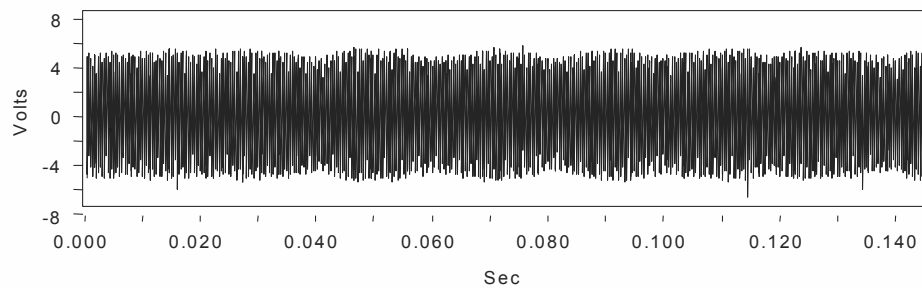
PZT yang dihubungkan dengan peralatan *signal generator* untuk memberikan simulasi sinyal latar pengotor. Sinyal getaran bantalan rusak yang telah tertutup oleh sinyal pengotor ditangkap oleh sensor dan melalui peralatan DAQ disimpan dalam komputer PC untuk diproses dengan metode *Blind Deconvolution*.



Gambar 4.12. Sinyal asli bantalan yang sengaja dirusak

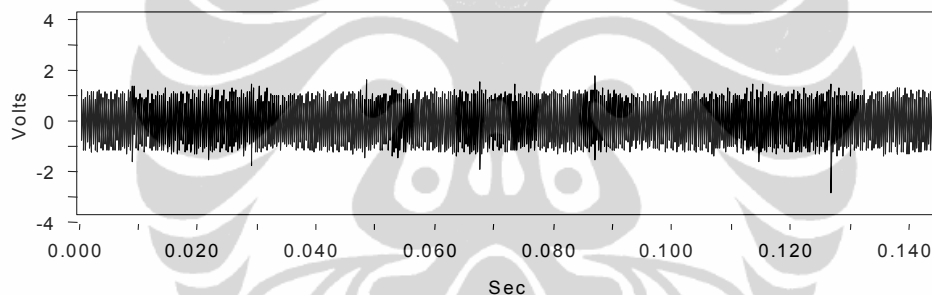
Pada gambar 4.12. diatas dapat dilihat sinyal asli dari bantalan yang sengaja dirusak. Dengan peralatan *signal generator* dan dengan menggunakan aktuator PZT dibangkitkan sinyal pengotor pada sistem sehingga sinyal asli bantalan tersebut diatas terkubur di dalam sinyal pengotor. Kecepatan sistem adalah 990 rpm sehingga frekuensi sinyal asli bantalan rusaknya adalah sekitar 45 Hz. Sinyal pengotor dibangkitkan pada frekuensi tinggi yaitu sekitar 13000 Hz agar sinyal asli benar-benar tertutup pada arah sumbu waktu. Sedangkan daya sinyal pengotor diatur untuk 2 (dua) percobaan yaitu untuk keadaan sinyal asli benar benar terkubur habis oleh *noise* yang besar yaitu pada nilai SNR (*signal to noise ratio*) = 0,262 dan sekedar tertutup *noise* yang kecil yaitu pada nilai SNR = 0,738.

Gambar 4.13. di halaman berikut adalah sinyal bantalan yang sengaja dirusak tertutup sama sekali oleh *noise* besar sehingga nilai SNR = 0,262. Sedangkan gambar 4.14. berikutnya adalah sinyal bantalan yang sengaja dirusak tertutup sekedarnya oleh *noise* kecil sehingga nilai SNR = 0,738. Kemudian kedua sinyal tersebut diproses dengan metode *Blind Deconvolution* untuk merekonstruksi kembali sinyal asli dari bantalan yang sengaja dirusak tersebut.



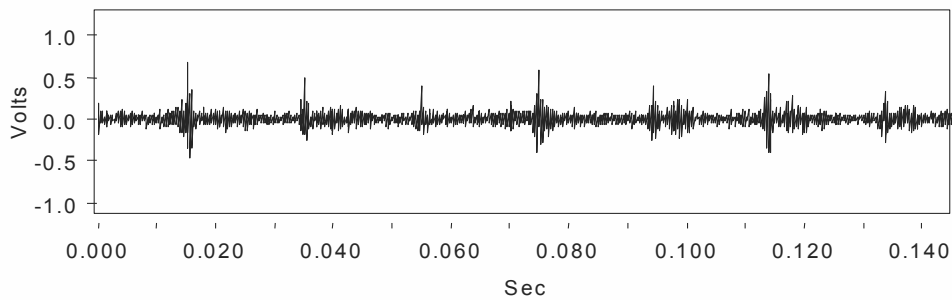
Gambar 4. 13. Sinyal bantalan rusak yang tertutup *noise* besar dengan SNR = 0,262

Gambar berikutnya dibawah ini adalah dari percobaan selanjutnya yaitu pada SNR = 0,738 dimana daya dari sinyal pengotor sekedar menutupi sinyal asli dari bantalan rusak.



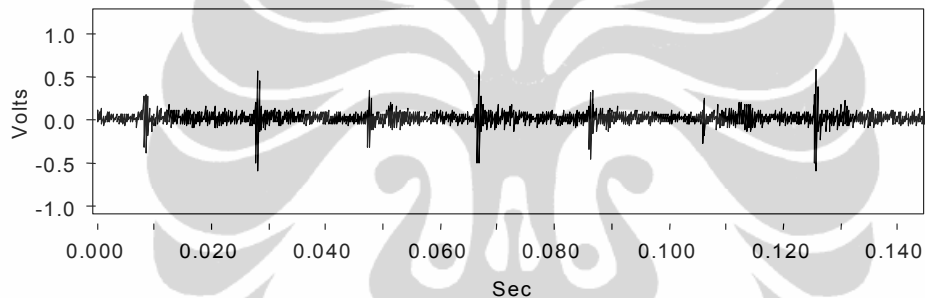
Gambar 4. 14. Sinyal bantalan rusak yang tertutup *noise* sekedarnya dengan SNR = 0,738

Dari gambar 4.12. di muka yang menunjukkan bentuk sinyal asli dari bantalan rusak, dijadikan sinyal yang terkubur oleh sinyal pengotor dengan SNR = 0,262 yang ditunjukkan oleh gambar 4.13. dan sinyal yang terkubur oleh sinyal pengotor dengan SNR = 0,738 yang ditunjukkan oleh gambar 4.14. Hasil pengukuran kedua sinyal tersebut dirubah menjadi data digital, dan kemudian algoritma *Blind Deconvolution* yang telah dimodifikasi dan dioptimasi dijalankan untuk memproses data-data digital dari kedua sinyal tersebut. Hasil proses sinyal digitalnya kemudian diplot kembali seperti semula. Hasil rekonstruksinya adalah seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.15. dan gambar 4.16. di halaman berikut ini.



Gambar 4. 15. Sinyal bantalan rusak hasil rekonstruksi dari SNR = 0,262

Gambar 4.16. berikutnya dibawah ini adalah sinyal hasil rekonstruksi dari sinyal dengan SNR = 0,738.



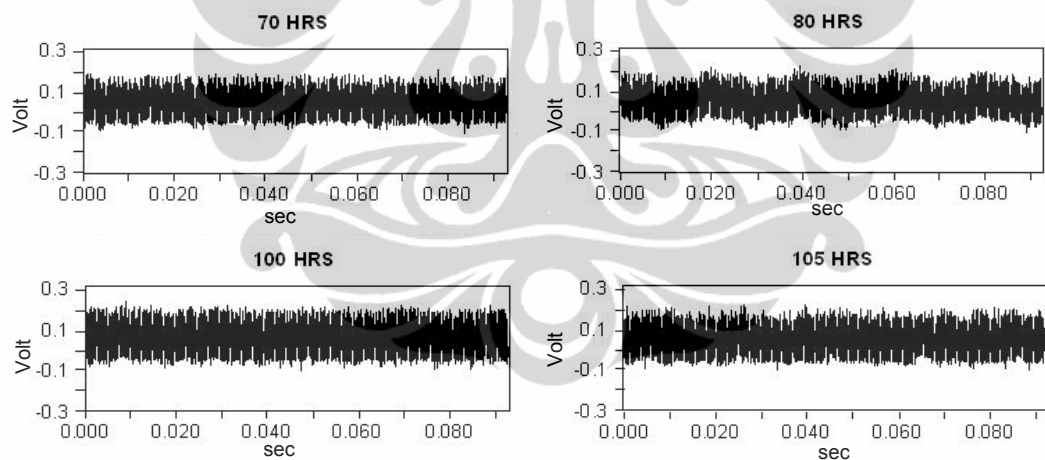
Gambar 4. 16. Sinyal bantalan rusak hasil rekonstruksi dari SNR = 0,738

Dari percobaan percobaan simulasi seperti dijelaskan dimuka dapat dinyatakan bahwa metode pemroses sinyal digital *Blind Deconvolution* ini efektif, cukup baik dan handal, karena ternyata hasil rekonstruksinya adalah sangat baik, dan tidak menunjukkan perbedaan yang bermakna dengan sinyal asli asal mulanya.

4.3. Kinerja Teknik Deteksi Kerusakan Dini Komponen Mesin Dinamis dengan Deteksi Gelombang Tegangan atau AE (*Acoustic Emissions*)

Untuk eksperimen yang lebih mendekati keadaan praktis/nyata ini, satu rig eksperimen khusus lainnya telah dibangun. Rig ini terdiri dari satu alat tekan hidrolik yang menekan bantalan gelinding yang ditest didalam suatu rumah bantalan khusus dengan alat alat sensor AE dan getaran. Satu bantalan gelinding yang baru dipakai sebagai bahan eksperimen dipasang pada poros keluaran motor,

kemudian diberi beban radial yang ekstrim dari alat tekan hidrolik tersebut sambil diputar oleh motor listrik dengan kecepatan normal. Bantalan baru sebagai bahan percobaan adalah dari model *deep groove ball bearing* #16005 (*max. dynamic load* 7610 N), putaran 1320 rpm, BPFO = 108 Hz, BPFI = 153 Hz, dengan pembebanan ekstrim sebesar 4000 N, kecepatan pengambilan data dengan *sampling rates* 800 kHz. Dengan perhitungan kinerja dan pembebanan bantalan yang prosedurnya ada dalam buku manual bantalan, telah dapat diperhitungkan umur kerja bantalan test tersebut akan mencapai 117 jam dalam kondisi kerja dan pembebanan ekstrim seperti itu [26]. Dengan pengamatan setiap waktu dan pemrosesan sinyal hasil pengukuran secara *offline* maka kondisi kerja bantalan gelinding tersebut dipantau dan dianalisa setiap jam. Sinyal hasil pengukuran tersebut langsung direkonstruksi secara *offline* dalam computer dengan metode *Blind Deconvolution* yang telah dimodifikasi dan dioptimasi ditulis dalam bahasa pemrograman Matlab. Gambar 4.17. dibawah menunjukkan sinyal sinyal yang telah direkonstruksi dari sinyal yang diukur pada jam ke 70, 80, 100 dan 105.



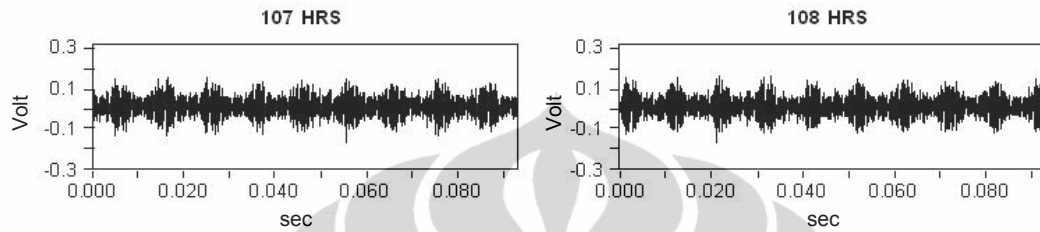
Gambar 4. 17. Hasil rekonstruksi sinyal pengukuran pada 70, 80, 100, 105 jam. Sinyal dari komponen uji yang telah direkonstruksi terlihat hanya berupa *noise* yang merata

Terlihat jelas sekali pada jam-jam pertama pengoperasian bantalan ini keadaan bantalan adalah baik. Akan tetapi seperti telah dijelaskan dimuka pada bab III bahwa pada dasarnya setiap material dari komponen mesin mempunyai bibit kerusakan berupa dislokasi butir (*grain*) material akibat ketidak sempurnaan dalam proses pembuatan/pembentukannya. Dislokasi tersebut bisa terdapat di mana-mana sembarang tempat. Pada saat bekerja suatu beban operasional maka

dislokasi tersebut akan terganggu dan saling bertahan serta mencari garis batas butir yang lemah dimana di daerah itu dislokasi tersebut bisa bertahan. Pada penelitian ini komponen mesin yang digunakan adalah bantalan gelinding atau sering disebut sebagai *antifriction bearing* karena bantalan ini dirancang dengan gesekan sekecil mungkin dari penggunaan bola-bola atau silinder-silinder bantalan yang menggelinding sesempurna mungkin sehingga bidang kontak hanya satu titik atau garis. Bila ada beban yang bekerja maka pada setiap bidang kontak dari setiap bola bantalan yang berupa titik akan bekerja gaya tekan yang menyebabkan tegangan kompresi pada bidang permukaan kontak pada cincin luar atau cincin dalam bantalan elemen gelinding tersebut. Sedangkan pada daerah diantara titik kontak bola-bola bantalan terjadi tegangan tarik sehingga bila elemen bantalan gelinding tersebut menggelinding dan memutar cincin bantalan maka pada permukaan cincin bantalan akan terjadi beban dinamis berupa tegangan tarik dan kompresi yang saling bergantian. Permukaan cincin luar maupun dalam bantalan gelinding dalam proses pembuatannya sudah diperkeras (*hardened*) sehingga mampu menahan beban kompresi itu. Bagian yang diperkeras itu biasanya mempunyai ketebalan sekitar 7-10 mikron. Pada percobaan ini ternyata dislokasi yang ada masih bisa bertahan sehingga belum menyebabkan separasi butir material atau kerusakan fisik walaupun telah dioperasikan dengan beban ekstrim sampai 105 jam, maka tidak ada emisi akustik atau gelombang tegangan yang terjadi sehingga tidak ada gelombang yang terdeteksi seperti pada gambar 4.17. di halaman sebelumnya.

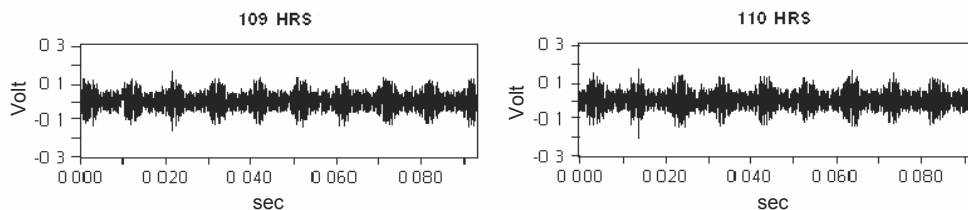
Sampai waktu sekitar menjelang 107 jam, pada hasil rekonstruksi sinyal tetap tidak terlihat adanya perubahan. Walaupun demikian pada bagian yang lemah dan sudah terdapat dislokasi seperti dijelaskan di muka, maka akan terbentuk lapisan lapisan yang disebut sebagai *Persistent Slip Bands* (PSB) akibat gaya beban dinamis yang diterimanya setiap saat berupa tegangan tarik - tekan bergantian. Setiap kali terjadi beban maka pada bagian lapisan yang lemah akan terjadi ekstrusi yaitu gerak keluar dan intrusi yaitu gerak kedalam. Kedua gerak yang berlawanan arah itu akan menimbulkan gerak relatif gesekan antara lapisan lapisan PSB tersebut walaupun belum sampai terjadi separasi. Pada saat gerak relatif gesekan itulah terjadilah pelepasan energi dalam yang kemudian menjalar

dalam bentuk emisi gelombang tegangan atau akustik kesegala arah. Emisi akustik atau gelombang tegangan itu ditangkap oleh sensor dan setelah direkonstruksi dapat dilihat sebagai gelombang pada gambar 4.18. berikut dibawah ini. Ternyata setelah bekerja 107 jam, tanda-tanda kerusakan mulai terlihat muncul pada sinyal yang direkonstruksi, walaupun pada sinyal hasil pengambilan pengukurannya tidak tampak adanya perubahan.



Gambar 4. 18. Hasil rekonstruksi sinyal pengukuran pada 107, 108 jam. Sinyal yang telah direkonstruksi telah berubah bentuk karena telah terjadi kerusakan dini

Dalam gambar 4.18. diatas terlihat perubahan bentuk dari gelombang sinyal dalam domain waktu yang telah direkonstruksi. Terlihat adanya bentuk sinyal akibat dari *burst* gelombang tegangan yang berupa gelombang frekuensi sangat tinggi termodulasi. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat 107 jam dioperasikan dengan pembebanan ekstrim, mulai terjadi kerusakan dini dengan tanda tanda timbulnya gelombang tegangan berupa bentuk *burst* (semburan) yang merupakan salah satu bentuk penalaran gelombang tegangan (AE). Selama bekerjanya beban dinamis itu maka emisi akustik akan terus terjadi seperti pada gambar 4.19. berikutnya dibawah ini. Hal ini terjadi terus seiring dengan pertumbuhan kerusakan yang terjadi.



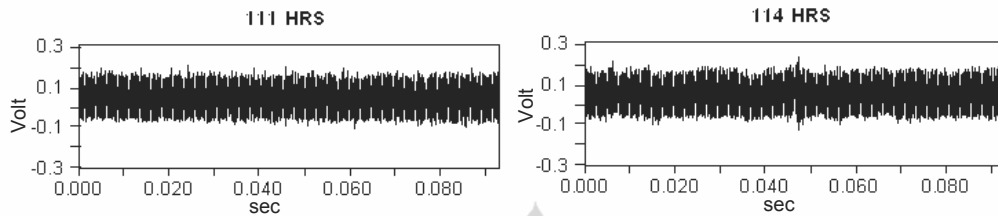
Gambar 4. 19. Hasil rekonstruksi sinyal pengukuran pada 109, 110 jam

Bila dilihat dari bentuk gelombangnya maka bentuknya adalah bentuk gelombang emisi akustik atau gelombang tegangan yaitu berbentuk semburan (*burst*) yang mengandung gelombang frekuensi tinggi. Sebagai tanda atau bukti bahwa

gelombang tersebut berasal dari kerusakan dini pada komponen bantalan gelinding yang diteliti adalah dari frekuensi kemunculan gelombang emisi akustik yang bila dihitung adalah sama dengan frekuensi gelombang *Ball Pass Frequency Outer* (BPFO) yaitu frekuensi respons getaran yang muncul bila terjadi kerusakan pada komponen cincin luar bantalan gelinding. Frekuensi tinggi gelombang tegangan atau emisi akustik yang dilepaskan dari kerusakan pada cincin luar termodulasi oleh frekuensi BPFO sehingga bentuk gelombangnya menjadi seperti pada gambar 4.18. dan 4.19. sebelumnya. Pemeriksaan fisik secara langsung pada bantalan dalam kondisi sinyal hasil rekonstruksi yang mulai berubah ini ternyata tidak menunjukkan tanda-tanda kerusakan yang kasat mata. Secara visual tampaknya bantalan uji ini belum mengalami kerusakan nyata di permukaan, walaupun dari bentuk sinyal rekonstruksinya jelas adanya pulsa yang berbentuk *burst* (semburan), yaitu salah satu bentuk dini atau adanya pertumbuhan kerusakan yang masih dalam bentuk mikroskopis, bukan pulsa tumbukan tunggal yang biasa terjadi pada bantalan rusak.

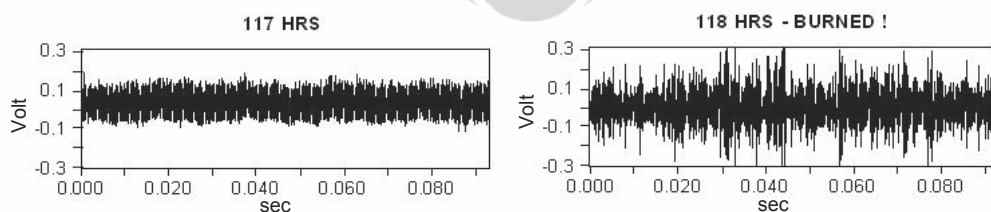
Hal tersebut diatas berlangsung sampai satu saat dimana batas kekuatannya tercapai sehingga terjadilah separasi antara lapisan PSB tersebut dan gesekan fisik terjadi. Saat inilah dikenali dan disebut sebagai inisiasi retakan kelelahan (*fatigue crack initiation*) dan separasi yang terjadi semakin besar sehingga dislokasi butir pada daerah itu menjadi semakin besar pula. Inisiasi retakan kelelahan ini biasanya terjadi pada daerah yang disebut sebagai *substructure* yaitu daerah batas antara bahan yang diperkeras (*hardened*) dengan yang tidak. Seiring dengan semakin besarnya gesekan yang terjadi, maka separasi yang terjadi juga semakin besar dan dislokasi butir yang ada juga semakin besar. Separasi yang terjadi semakin besar kemudian mulai menjadi suatu retak yang berkembang atau disebut sebagai penjaralan retakan kelelahan atau *fatigue crack propagation*. Pada saat yang sama pula seperti dijelaskan dimuka dislokasi butir menjadi semakin membesar yang mengakibatkan ketahanan material semakin kuat dan emisi akustik atau gelombang tegangan tidak timbul lagi seperti terlihat pada gambar 4.20. selanjutnya di halaman berikut ini dimana ternyata tidak terdeteksi lagi adanya emisi akustik atau gelombang tegangan. Fenomena ini biasa dikenal sebagai fenomena *Strain Hardening* pada material baja karbon rendah dimana

seakan material menjadi menguat kembali akibat dislokasi yang membesar pada garis batas butir. Fenomena tersebut ternyata dimungkinkan terjadi pula pada material bantalan gelinding yang umumnya adalah baja karbon menengah (*medium C steel*).



Gambar 4. 20. Hasil rekonstruksi sinyal pengukuran pada 111, 114 jam. Sinyal hasil rekonstruksi yang menunjukkan terjadinya Fenomena *Strain hardening*

Akan tetapi hal itu hanya akan berlangsung sampai suatu batas pertumbuhan retakan (*crack propagation*) tertentu atau batas nilai ketahanan kerusakan material (konstanta *Toughness*) tertentu. Saat batas itu dicapai maka terjadilah kerusakan fisik seperti terlihat dari gelombang yang terdeteksi pada gambar 4.21. dibawah ini dimana timbul gelombang getaran fisik yang besar yang juga sudah dapat terukur oleh *accelerometer* sebagai tanda kerusakan fisik telah terjadi. Bentuk sinyal rekonstruksi berubah total dan temperturnya naik secara dramatik. Dari bentuk gelombang sinyal domain waktu terlihat banyaknya pulsa dengan amplitudo yang cukup besar dan getarannya terdiri dari banyak getaran frekuensi tinggi. Setelah kemudian diperiksa ternyata benar bahwa bantalan yang diteliti telah menjadi rusak.

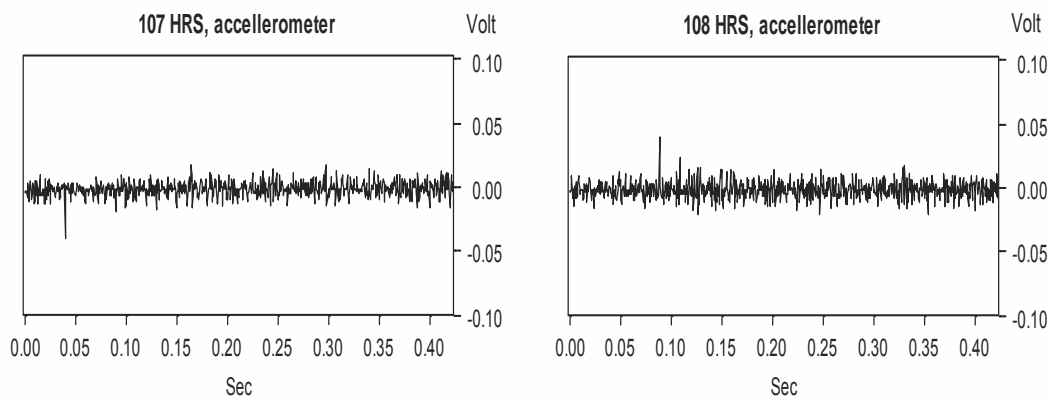


Gambar 4. 21. Hasil rekonstruksi sinyal pengukuran pada 117, 118 jam. Bantalan uji akhirnya rusak di jam operasi ke 118

Perubahan bentuk sinyal ini juga menunjukkan terjadinya perubahan bentuk kerusakan dari suatu kerusakan yang bersifat lokal menjadi kerusakan yang terdistribusi. Kerusakan yang terjadi dikenali sebagai kerusakan aus kelelahan (*fatigue wear*) yaitu berupa lepasnya sebagian material (*material flaking*) pada

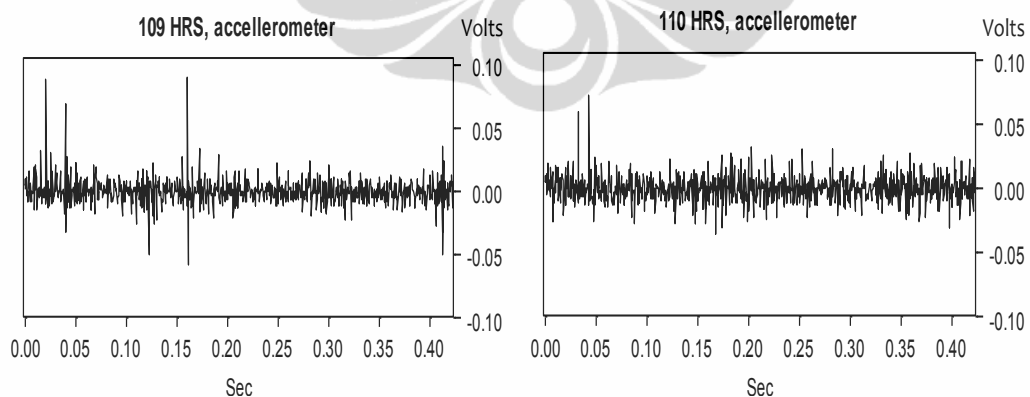
permukaan dalam cincin luar bantalan. Hal itu terjadi akibat pertumbuhan retakan kelelahan dari dalam keluar ke permukaan yang diinisiasi dengan separasi lapisan pada bagian material yang lunak yaitu di daerah *substructure* akibat beban dinamis yang diberikan dari bola-bola bantalan yang menggelinding dan memutar poros. Material permukaan yang lepas itu kemudian menghambat gerak gelinding bola bantalan sehingga menjadikannya macet dan menyebabkan abrasi yang hebat diiringi kenaikan temperatur yang besar sehingga pada akhirnya bantalan terbakar. Hasil pemeriksaan visual terhadap bantalan uji menunjukkan adanya kerusakan permukaan di cincin luar dan dalam yaitu berupa kerusakan aus kelelahan (*fatigue wear*) dimana permukaannya menjadi kasar karena material permukaan yang lepas dan baret baret akibat beban radial yang tinggi dan temperatur yang bertambah tinggi. Dengan demikian dengan berhasil dideteksinya emisi akustik atau penjalaran gelombang tegangan pada jam operasi ke 107 jam, maka kerusakan dini pada bantalan tersebut telah dapat diketahui dan ditentukan sebelum kerusakan sebenarnya terjadi pada jam operasi ke 118 jam. Kerusakan dini pada jam ke 107 tersebut terjadi sebelum inisiasi retakan kelelahan timbul akibat beban operasional dinamis pada elemen mesin bantalan gelinding yang diteliti. Kerusakan dini pada jam ke-107 terdeteksi pada saat baru terjadi ekstrusi dan intrusi pada lapisan lapisan material sehingga dilepaskannya energi dalam bentuk gelombang tegangan (*stress waves*) yang diterima sensor sebagai gelombang Emisi Akustik (*Acoustic Emission, AE*). Setelah beberapa saat kemudian baru terjadi awal keretakan (*crack initiation*) yang selanjutnya bertambah parah menjadi retak besar (*macro crack*) dan penjalaran keretakan (*crack propagation*) dan akhirnya terlepasnya material pada permukaan (*spalling*) yang disebut sebagai aus kelelahan (*fatigue wear*).

Pada saat yang bersamaan, dalam penelitian ini dipasang pula sensor *Accelerometer* yang umum digunakan untuk memantau dan mengukur getaran fisik bantalan yang terjadi. Ternyata pada jam ke 107 saat gelombang tegangan AE terdeteksi oleh sensor AE, sensor *Accelerometer* tidak mendeteksi apapun. Gambar 4.22. berikut ini menunjukkan rekonstruksi sinyal hasil pengukuran dengan *accelerometer*.



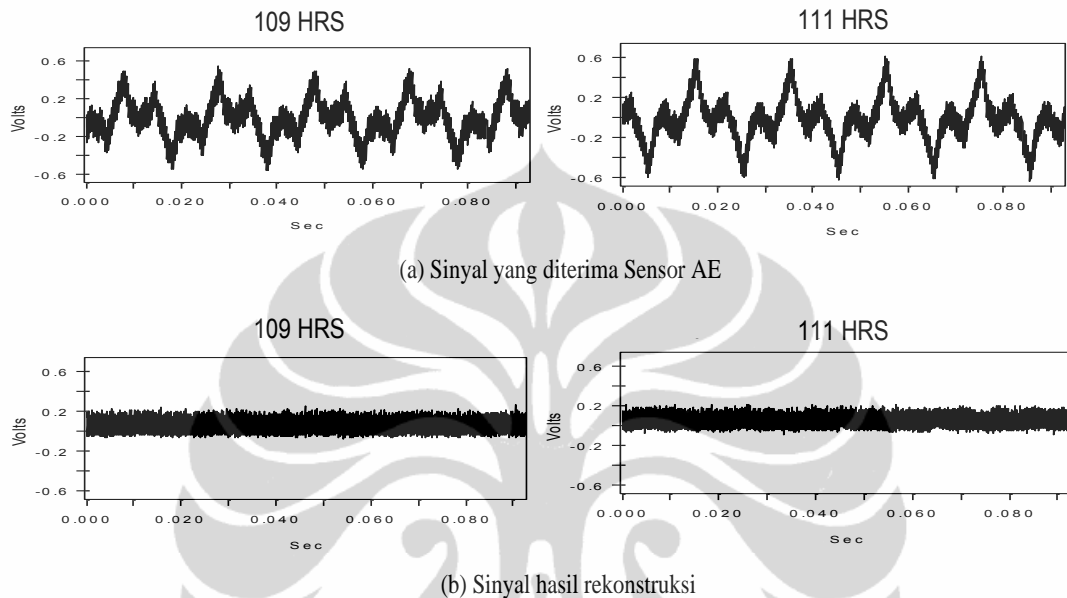
Gambar 4. 22. Hasil rekonstruksi sinyal dari pengukuran *Accelerometer* pada jam ke 107, 108

Terlihat amplitudo rata-rata hanya berkisar pada skala $\pm 0,02$ dan bentuknya random seperti terlihat pada gambar 4.22. di halaman dimuka, sedangkan amplitudo gelombang tegangan AE yang dideteksi oleh sensor AE berada pada kisaran skala $\pm 0,2$ atau 10 kali lipat dan bentuknya berupa semburan sebagai modulasi dari gelombang AE seperti pada gambar 4.18. Demikian pula yang terjadi pada pengukuran dengan *Accelerometer* pada jam-jam selanjutnya seperti ditunjukkan dalam gambar 4.23. dibawah ini sampai pada akhirnya baru dapat mengukur adanya suatu getaran yaitu pada jam ke 118 yaitu saat bantalan uji benar-benar rusak secara fisik dan bergetar.



Gambar 4. 23. Hasil rekonstruksi sinyal dari pengukuran *Accelerometer* pada jam ke 109, 110

Sejumlah percobaan terhadap beberapa bantalan yang berbeda juga telah dilakukan, dan hasilnya memang tidak mengejutkan karena mirip dan mempunyai kecenderungan yang sama dengan yang diperkirakan yaitu seperti hasil percobaan yang lalu seperti ditunjukkan hasil percobaan berikut ini.

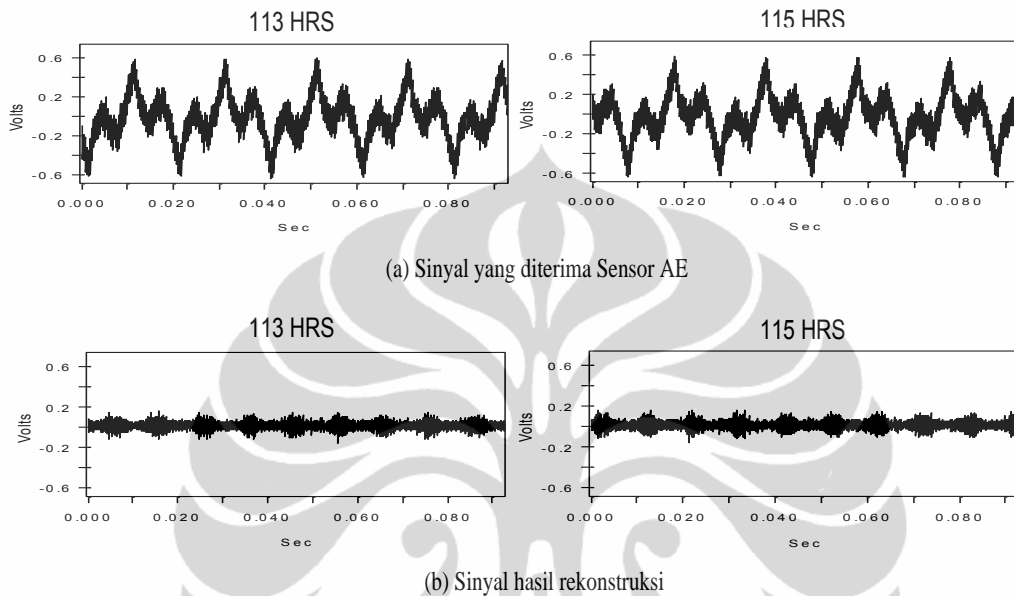


Gambar 4. 24. (a) sinyal AE yang tertutup *noise* terutama dari harmonik gelombang listrik 50 Hz (b) hasil rekonstruksi sinyal dari pengukuran (a) pada jam ke 109, 111

Bantalan berikutnya yang digunakan sebagai benda uji adalah juga *deep groove ball bearing #16005 (max. dynamic load 7610 N)*, putaran 1320 rpm, BPFO = 108 Hz, BPFI = 153 Hz, dengan pembebanan ekstrim sebesar 4000 N dan diberi pengaruh *noise* dari aliran listrik domestik 50 Hz. Pengambilan data dengan kecepatan *Sampling rates* 800 kHz. Sinyal yang direkonstruksi dapat ditampilkan kembali dari sinyal hasil pengukuran setelah sinyal tersebut selesai diproses secara *offline* dengan satu komputer untuk menjalankan program pemrosesan sinyal dengan metode *Blind Deconvolution*. Gambar 4.24. di halaman berikut menunjukkan hasil pemrosesan sinyal dari bantalan uji setelah jam ke 109 dan 111.

Sinyal hasil rekonstruksi (b) dari sinyal yang diterima sensor AE (a) belum menunjukkan adanya gelombang tegangan AE yang timbul. Gambar 4.25. selanjutnya menunjukkan sinyal hasil pengukuran setelah 113 dan 115 jam

percobaan berjalan. Terlihat bahwa sinyal asli terkubur di dalam sinyal latar pengotor termasuk gangguan dari medan listrik akibat jaringan 50 Hz. Sangat jelas bahwa semua sinyal latar pengotor, termasuk *noise* yang berasal frekuensi jaringan listrik dapat dibersihkan oleh teknik *equalization* dari metode *Blind Deconvolution*.



Gambar 4. 25. (a) sinyal AE yang tertutup *noise* terutama dari harmonik gelombang listrik 50 Hz (b) hasil rekonstruksi sinyal dari pengukuran (a) pada jam jam ke 113, 115

Sinyal rekonstruksi setelah percobaan 113 jam menunjukkan adanya *burst* gelombang tegangan sebagai tanda mulai terjadinya kerusakan dini. Pada bantalan benda uji ini, kerusakan dini mulai terjadi setelah percobaan dijalankan sampai 113 jam dimana terlihat tanda-tanda gelombang tegangan AE yang berupa *burst* mulai timbul.

BAB 5 KESIMPULAN

1. Sensor PZT yang dirancang dan dibuat dalam penelitian ini telah memberikan bukti akan efektivitasnya untuk menangkap sinyal gelombang tegangan sebagai emisi akustik. Kinerja dan hasilnya sangat memuaskan. Sensor untuk mendeteksi gelombang tegangan (AE) yang telah berhasil dirancang bangun dengan hasil yang terbaik adalah untuk model Baut M8 sebagai berikut:

- Bentuk dasar baut M 8x1,25 mm
- Panjang $L = 36$ mm
- Ujung/Tip sensor terbuat dari *stainless steel* $R = 8$ mm
- Material elemen sensor: Keramik Piezo-elektrik PZT (*Lead-Zirconate Titanate*)
- Diameter = 4 mm, tebal = 0,2 mm

2. Penerapan metode *Blind Deconvolution* sebagai alat numerik untuk memroses sinyal getaran telah sukses ditunjukkan mampu mendeteksi kerusakan dini pada komponen mesin dinamik seperti pada bantalan elemen gelinding. Metode *Blind Deconvolution* dengan pendekatan solusi algoritma *Eigen Vector* (EVA) dipilih sebagai pemrosesan sinyal dalam penelitian ini karena memiliki keunggulan dibanding dengan metode numerik lainnya yang sudah ada. Parameter operasi matematik dari metode numerik ini adalah:

- Data sampel sinyal hasil pengukuran harus dirubah dahulu menjadi nilai diskret sebagai suatu Deret Waktu bilangan (*Time Series*) yang *Newtonian* yaitu mempunyai nilai rata rata =0.
- Operasi matematik yang digunakan dalam solusi *Eigen Vector* adalah berdasarkan operasi statistik orde tinggi yaitu operasi Kurtosis silang (*Cross Curtosis*) dari kedua Kumulan silang (*Cross Cummulant*) orde 4 dari kedua keluaran filter FIR yaitu *equalizer* dan referensi.
- Jumlah data sampel optimum, yang didapat dari analisa terhadap nilai *Crest Factor* sinyal yang maksimum, adalah berkisar 20%-40% dari total jumlah data sampel sinyal pengukuran.

- Nilai panjang filter FIR atau jumlah koefisien *Equalizer* yang optimum yang digunakan adalah $l = 32$ dari nilai nilai 16, 24, 32 yang telah diuji coba.
 - Kriteria pengendali perhitungan diambil nilai maksimum iterasi adalah 120 kali proses, dari nilai nilai 120 dan 200 kali proses yang pernah diuji coba, serta nilai kesalahan minimum yang ditentukan dalam *Mean Square Error* (MSE) = 0,005 minimum yang mana dicapai terlebih dahulu.
3. Dari salah satu eksperimen uji coba sebenarnya (*real-time*) telah menunjukkan keberhasilan mendeteksi timbulnya gelombang tegangan (AE) dari pemantauan intensif terhadap benda uji bantalan gelinding #16005, dengan pembebanan 4000 N, putaran 1320 rpm selama target sekitar 120 jam menunjukkan hasil sebagai berikut:
- ☑ Sampai sekitar jam ke 105, hasil rekonstruksi sinyal asli tidak menunjukkan bentuk sinyal yang merupakan sinyal gelombang tegangan (AE). Pada sekitar jam ke 107 hasil rekonstruksi sinyal menunjukkan bentuk sinyal berupa *burst* yang periodik dengan periode sekitar $9,3 \times 10^{-3}$ detik.
 - ☑ Sinyal gelombang tegangan (AE) ini berlangsung terus sampai sekitar jam ke 110. Dari periode sinyal *burst* yang ada tersebut diatas, menunjukkan bahwa frekuensi gelombang tegangan (AE) yang timbul adalah sekitar 107,5 Hz. Dapat disimpulkan bahwa kerusakan dini ini terjadi pada elemen cincin luar bantalan karena berdasarkan data dimensi dan operasi bantalan uji nilai BPFO = 108 Hz.
 - ☑ Setelah jam ke 111 bentuk sinyal hasil rekonstruksi menunjukkan kembali ke bentuk sinyal tanpa *burst* walaupun terlihat tidak sehalus diawal saat belum terjadi kerusakan dini. Berdasarkan teori inisiasi retak kelelahan (*fatigue crack initiation*) dapat diperkirakan bahwa hal tersebut terjadi karena kemungkinan regangan akibat dislokasi mikro pada kerusakan dini segera terisi kembali oleh butir butir atom material tidak murni yang bebas terutama C dan N yang lebih kecil daripada atom Fe. Masuknya butir butir atom material tersebut memberikan ketahanan terhadap aliran elastis

sehingga ikatan antar butir-butir material tetap dapat bertahan kembali. Kejadian dan kondisi seperti itu dapat dikatakan sama dengan fenomena yang disebut sebagai *Micro Strain Hardening* yang biasa terjadi pada awal kejadian kerusakan pada material akibat pembebanan tarik.

- ☑ Fenomena *Micro Strain Hardening* terjadi pada kondisi kritis yaitu transisi antara keadaan elastis menjadi plastis yaitu beberapa saat sampai tegangan yang timbul mencapai sekitar $1/6 G$ atau $0,07 E$. Terlihat terjadinya antara jam ke 111 sampai dengan jam ke 118 dimana mulai terjadi kerusakan permanen pada bantalan uji dengan ditandai getaran yang hebat dan terukur pula oleh accelerometer sampai akhirnya bantalannya rusak.
- 4. Telah ditunjukkan bahwa kejadian timbulnya kerusakan dini pada elemen mesin dinamis yaitu dengan adanya dislokasi mikro sampai dengan terjadinya kerusakan fisik makro permanen berupa retakan, adalah sama dengan kejadian kerusakan pada material yang mengalami pembebanan dinamik tarik-tekan sampai rusak. Kerusakan dini yang terdeteksi dari adanya gelombang AE ini terjadi pada masa sebelum timbulnya inisiasi retakan kelelahan (*fatigue crack initiation*).
- 5. Dari teknik yang dikembangkan ini telah ditunjukkan bahwa kerusakan komponen mesin dinamik dapat terdeteksi dari gelombang domain waktunya saja secara langsung, yaitu melalui hasil keluaran dari proses *Blind Deconvolution*. Dengan demikian metode pemrosesan sinyal getaran dengan proses FFT untuk mendapatkan spektrum frekuensi bisa jadi dalam waktu dekat kedepan kemungkinan akan tidak harus digunakan lagi.
- 6. Dengan suksesnya teknik numerik dari metode *Blind Deconvolution* yang juga telah ditingkatkan kualitasnya dalam bentuk rutin aplikasi Matlab, bidang pemantauan kondisi elemen mesin mengalami langkah maju untuk bisa mendeteksi kerusakan dini yang tidak bisa dilakukan sebelumnya dengan teknik yang konvensional dan peralatan yang umum saat ini.

7. Teknik deteksi kerusakan dini ini merupakan suatu teknik baru yang selangkah lebih maju dari teknik-teknik analisis getaran atau deteksi kerusakan komponen mesin yang sudah umum digunakan selama ini. Teknik baru ini mampu mendeteksi suatu kerusakan dini sebelum kerusakan itu terjadi atau muncul di permukaan, sedangkan teknik yang sudah umum tersebut hanya bisa mendeteksi kerusakan yang sudah terjadi di permukaan dan badan mesinnya telah bergetar.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Azovtsev A., Barkov A. V., Yudin I. A., "Automatic Diagnostics and Condition Prediction of Rolling Element Bearing Using Enveloping Methods", presented at the 18th annual meeting of the Vibration Institute, USA, June, 1994.
- [2] Azovtsev A., Barkov A. V., Carter D. L., "Improving the Accuracy of Rolling Element Bearing Condition Assessment", presented at the 20th annual meeting of the Vibration Institute, USA, June, 1996.
- [3] Azovtsev A., Barkov A. V., "Rolling Element and Fluid Film Bearing Diagnostics Using Enveloping Methods", vol. 1997, June ed: Vibro Acoustical Systems Technologies (VAST), Inc., St. Petersburg - Russia, 1997.
- [4] Azovtsev A., Barkov A. V., Carter D. L., "Fluid Film Bearing Diagnostics Using Envelope Spectra", presented at the 21st annual meeting of Vibration Institute, USA, June, 1997.
- [5] Randall R. B., Gao Y., "Masking Effects in Digital Envelope Analysis of Faulty Bearing Signals", School of Mechanical and manufacturing Engineering, UNSW, Sydney - Australia, 1996.
- [6] _____, "Early Warning Fault Detection in Rolling Element Bearings Using Microlog Enveloping", SKF Condition Monitoring, Inc., Application Note CM3021, 1996.
- [7] Carcaterra A., Sestieri A., "Complex Envelope Displacement Analysis: A Quasy-Static Approach to Vibrations", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 201 (2), pp. 205-233, 1996.
- [8] Cardoso J. F., "Statistical Principles of Source Separation", presented at the 11th IFAC Symposium on System Identification (SYSSID), USA, 1997.
- [9] Cardoso J. F., "Blind Signal Separation: Statistical Principles", *IEEE Signal Processing*, vol. 9 (10), pp. 2009-2025, 1998.
- [10] Heng R. B., Nor M. J. M., "Statistical Analysis of Sound and Vibration Signals for Monitoring Rolling Element Bearing Condition", *ELSEVIER Applied Acoustics*, vol. 53, pp. 211-226, 1998.

- [11] Xi F., Sun Q., Krishnappa G., "Bearing Diagnostics Based on Pattern Recognition of Statistical Parameters", *Journal of Vibration and Control*, vol. 6 (3), pp. 375-392, March, 2000.
- [12] Mechefskke C. K., Mathew J., "Fault Detection and Diagnosis in Low Speed Rolling Element Bearings Using Inductive Inference Classification", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 9 (3), pp. 275-286, 1995.
- [13] Logan D., Mathew J., "Using the Correlation Dimension for Vibration Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings - 1. Basic Concepts", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 10 (3), pp. 241-250, 1996.
- [14] Ma J., Li C. J., "Detection of Localised Defects in Rolling Element Bearings via Composite Hypothesis Test", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 9 (1), pp. 63-75, 1995.
- [15] Santamaria I., Pantaleon C. J., Diaz-de-Maria F., Artes-Rodriguez A., "A New Inverse Filter Criterion for Blind Deconvolution of Spiky Signals Using Gaussian Mixtures", presented at IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Atlanta, Georgia - USA, 1996.
- [16] Santamaria I., Pantaleon C. J., Ibanez J., Artes A., "Deconvolution of Seismic Data Using Adaptive Gaussian Mixtures", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37 (2), pp. 855-858, March, 1999.
- [17] Goldman S., "Vibration Spectrum Analysis : A Practical Approach", 2nd ed. New York: Industrial Press, 1999.
- [18] Baillie D. C., Mathew J., "A Quick and Easy Tool for Bearing Fault Diagnosis", presented at the 1st Centre for Machine Condition Monitoring (CMCM) Forum, Monash Uni., Ballarat Village Conf. Center, Melbourne, Victoria-Australia, November, 1994.
- [19] Baillie D. C., Mathew J., "A Comparison of Autoregressive Modeling Techniques for Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 10 (1), pp. 1-17, 1996.
- [20] Ypma A., Ligteringen R., Frietman E. E. E., Duin W. R. P., "Recognition of Bearing Failures Using Wavelets and Neural Networks", presented at the UK Symposium on Applications of Time Frequency and Time Scale Methods, Coventry - UK, August, 1997.

- [21] Back A. D., Cichocki A., "Blind Source Separation and Deconvolution of Fast Sampled Signals", presented at the Intl. Conf. on Neural Information Processing and Intelligent Information Systems, Dunedin - New Zealand, September, 1997.
- [22] Wang Y. F., Kootsookos P. J., "Modeling of Low Shaft Speed Bearing Faults for Condition Monitoring", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 12 (3), pp. 415-426, 1998.
- [23] Tandon N., Choudhury A., "An Analytical Model for the Prediction of the Vibration Responce of Rolling Element Bearings Due To a Localized Defect", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 205 (3), pp. 275-292, 1997.
- [24] Liu T. I., Singonahalli J.H., Iyer N.R, "Detection of Roller Bearing Defects Using Expert System and Fuzzy Logic", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 10 (5), pp. 595-614, 1996.
- [25] Barkov A. V., Barkova N. A., Azovtsev A., "Peculiarities of Slow Rotating Rolling Element Bearings condition Diagnostics", vol. 1998, March ed: *Vibro Acoustical Systems Technologies (VAST), Inc., St. Petersburg - Russia*, 1998.
- [26] Barkov A., Azovtsev A., "A New Generation of Condition Monitoring and Diagnostic Systems", vol. 1998, March ed: *Vibro Acoustical Systems Technologies (VAST), Inc., St. Petersburg, Russia*, 1998.
- [27] Azovtsev A., Barkov A. V., Barkova N. A., Rogov S. N., "Application of the Generalized Vibration Spectra for Rotating Machine Condition Monitoring", vol. 1999, August ed: *Vibro Acoustical Systems Technologies (VAST), Inc., St. Petersburg - Russia*, 1999.
- [28] Li Y., Billington S., Zhang C., Kurfess T., S. Danyluk, and S. Liang, "Dynamic Prognostic Prediction of Defect Propagation on Rolling Element Bearings", *Tribology Transactions*, vol. 42 (2), pp. 385-392, , April, 1999.
- [29] Tan A. C. C., "Vibration Signal Processing for Failure Detection", *School of Mechanical and Manufacturing Engineering, QUT, Brisbane, QLD – Australia*, 1994.

- [30] Rieger N. F., McCloskey T. H., Dewey R. P., "The High Cost of Failure of Rotating Equipment", presented at the 1st Centre for Machine Condition Monitoring (CMCM) Forum, Monash Uni., Ballarat Village Conf. Center, Melbourne, Victoria-Australia, November, 1994.
- [31] Carter D. L., "Some Instrumentation Considerations in Rolling Element Bearing Condition Analysis", presented at the 17th annual meeting of the Vibration Institute, Boulder, Colorado-USA, June 1993.
- [32] Barkov A. V. and Barkova N. A., "Condition Assesment and Life Protection of Rolling Element Bearings - part 1", Sound and Vibration, June 1995.
- [33] Barkov A.V., Barkova N.A., "Condition Assesment and Life Prediction of Rolling Element Bearings - part 2", Sound and Vibration, September, 1995.
- [34] Carter D.L., "Rolling Element Bearing Condition Testing Method and Apparatus", in US Patent & Trademark Office, USA, December, 1995.
- [35] __, "Measuring Vibration", Bruel & Kjaer, Denmark, 1990
- [36] Howard I.M., Swansson N.S., "Demodulating High Frequency Resonance Signals for Bearing Fault Detection", Proceedings of the Australian Vibration and Noise Conference, Monash University, Melbourne-Australia, pp. 115-121, September, 1990.
- [37] B. Jones, "Vibrations Help Find Faulty Components," in Machine Design, 1999, 25 February, pp. 85-88.
- [38] Tan A.C.C., "Vibration Signal Analysis for Bearing Failure Detection", presented at the Intl. Conf. on Structural Dynamics, Vibration, Noise and Control, Hong Kong, 5-7 December, 1995.
- [39] Mathew J., "Standards in Condition Monitoring", presented at the 1st Centre for Machine Condition Monitoring (CMCM) Forum, Monash Uni., Ballarat Village Conf. Center, Melbourne, Victoria-Australia, November, 1994.
- [40] Chen L., Kusaka H., Kominami M., "Cumulant-Based Blind Channel Equalization", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E79-A, pp. 727-730, 1996.

- [41] Carcaterra A., Sestieri A., "Complex Envelope Displacement Analysis: A Quasy-Static Approach to Vibrations", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 201 (2), pp. 205-233, 1996.
- [42] Tiwari R., Vyas N.S., "Estimation of Non Linear Stiffness Parameters of Rolling Element Bearing from Random Response of Rotor-Bearing Systems", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 187 (2), pp. 229-239, 1995.
- [43] A. V. Barkov, "New Aspects in Practical Machine Diagnostics Using Vibration," vol. 1998, October ed: *Vibro Acoustical Systems Technologies (VAST)*, Inc., St. Petersburg - Russia, 1998.
- [44] H. Ohta and N. Sugimoto, "Vibration Characteristics of Tapered Roller Bearings," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 190 (2), pp. 137-147, 1996.
- [45] C. J. Li, J. Ma, and B. Hwang, "Bearing Condition Monitoring by Pattern Recognition Based On Bicoherence Analysis of Vibrations," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 210, pp. 277-285, 1996.
- [46] J. Altmann, M. Samai, J. Mathew, and J. S. Stecki, "The Application of Kohonen Networks in the Detection of Bearing Faults," presented at the 2nd Centre for Machine Condition Monitoring (CMCM) Forum, Melbourne, Victoria-Australia, 1995, November.
- [47] A. Ypma, D. M. J. Tax, and R. D. W. Duin, "Robust Machine Fault Detection with Independent Component Analysis and Support Vector Data Description," presented at the IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing, Piscataway, NJ - USA, 1999.
- [48] A. V. Barkov, N. A. Barkova, and J. S. Mitchell, "Assessing the Condition and Lifetime of Rolling Element Bearings From a Single Measurement," presented at the 19th annual meeting of Vibration Institute, USA, 1995, June.
- [49] V. Hale and J. Mathew, "High and Low Speed Bearings," presented at the 2nd Centre for Machine Condition Monitoring (CMCM) Forum, Melbourne, Victoria-Australia, 1995, November.
- [50] M. S. Johnson-Jr, "Vibration Tests for Bearing Wear," *ASHRAE Journal*, pp. 52-58, 2000, October.

- [51] Y. Li, C. Zhang, T. Kurfess, S. Danyluk, and S. Liang, "Diagnostics and Prognostics of Single Surface Defect on Roller Bearings," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 214 (9), pp. 1173-1185, 2000.
- [52] W. K. Yu and T. A. Harris, "A New Stress-Based Fatigue Life Model for Ball Bearings," *Tribology Transactions*, vol. 44 (1), pp. 11-18, 2001, January.
- [53] M. N. Kotzalas and T. A. Harris, "Fatigue Failure Progression in Ball Bearings," *Journal of Tribology - Transactions of the ASME*, vol. 123 (2), pp. 238-242, 2001.
- [54] C. Zhang, S. Liang, and J. Qiu, "Bearing Failure Prognostic Model Based on Damage Mechanics and Vibration Monitoring," *Tribology Transactions*, vol. 44 (4), pp. 603-608, 2001, October.
- [55] C. C. Tan and B. Dawson, "Transducer Systems for Condition Monitoring Using Adaptive Noise Cancellation," presented at Tribology Conf. The Institution of Engineers Australia, Brisbane, QLD - Australia, 1990, 3-5 December.
- [56] R. Smith, "Acoustic Detection of Defective Rolling Element Bearings," presented at the 43rd Meeting of the Mechanical Failures Prevention Group, Gaithersburg, Maryland USA, 1991.
- [57] A. C. C. Tan, "Acoustic Emission for Failure Detection," presented at Workshop on Materials and Metallurgy, Univ. of Indonesia, Jakarta - Indonesia, 1996, 26 March.
- [58] J. Shiroishi, Y. Li, S. Liang, T. Kurfess, and S. Danyluk, "Bearing Condition Diagnostics via Vibration and Acoustic Emission Measurements," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 11 (5), pp. 693-705, 1997.
- [59] I. Bashir, R. Bannister, and D. Probert, "Release of Acoustic Energy During the Fatiguing of a Rolling-Element Bearing," *ELSEVIER Applied Energy*, vol. 62, pp. 97-111, 1999.
- [60] N. Tandon and A. Choudhury, "A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings," *ELSEVIER Tribology International*, vol. 32 (8), pp. 469-480, 1999, 8 August.
- [61] A. Choudhury and N. Tandon, "Application of Acoustic Emission Technique For The Detection of Defects in Rolling Elements Bearings," *ELSEVIER Tribology International*, vol. 33, pp. 39-45, 2000.

- [62] K. Matsuoka, K. Taniguchi, and M. Nakakita, "In-Situ Wear Monitoring of Slider and Disk Using Acoustic Emission," *Journal of Tribology - Transactions of the ASME*, vol. 123 (1), pp. 175-180, 2001.
- [63] A. Mansour, A. K. Barros, and N. Ohnishi, "Blind Separation of Sources: Methods, Assumptions and Applications," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E83-A, pp. 1498-1512, 2000, August.
- [64] Widrow, et. al., "Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications", *Proceedings of the IEEE* 63, pp 1692-1716, 1975
- [65] Treichler J.R., *Transient and Convergent Behavior of The Adaptive Line Enhancer*, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing ASSP27*, pp 52-63, New York – USA, 1979
- [66] Yoshioka, et. al, *Application of Acoustic Emission Technique to Detection of Rolling Bearing Failure, Acoustic emission monitoring and analysis in manufacturing - ASME*, New York -USA, pp 55–75, 1984
- [67] Oppenheim, et. al., *Single Sensor Active Noise Cancellation Based On The EM Algorithm*, *Proceeding ICASP*, 1992
- [68] Tandon N., *A Comparison of Some Vibration Parameters for the Condition Monitoring of Rolling Element Bearings*, *Measurement Vol. 12*, pp 285-289, 1994
- [69] A. C. C. Tan and B. Dawson, "Application of Adaptive Noise Cancellation to the Condition Monitoring of Rolling Element Bearings," in *On-Line Monitoring of Continuous Process Plants*, D. D. W. Butcher, Ed. Chichester, W. Sussex - UK: Society of Chemical Industries, Ellis Horwood, Ltd., John Wiley & Sons, 1990, pp. 167-181 Chapter 12.
- [70] A. C. C. Tan, "Application of Acoustic Emission to the Detection of Bearing Failures," presented at the *Tribology Conf.*, The Institution of Engineers Australia, Brisbane, QLD - Australia, 1990, 3-5 December.
- [71] A. C. C. Tan and Y. Okada, "Detection of Rolling-Element Bearing Signal Corrupted by Noise of Similar Frequency Using Adaptive Noise Cancellations," presented at *Intl. Conf. on Information, Communications and Signal Processing, ICICS*, Singapore, 1997.

- [72] M. Johnson, "Use Vibration Analysis to Improve Equipment Reliability," in *Contracting Business*, vol. 57 (1), 2000, January, pp. 116-126
- [73] M. Deriche, "AR Parameter Estimation from Noisy Data Using the EM Algorithms," *IEEE Signal Processing*, vol. IV, pp. 69-72, 1994.
- [74] Ian Howard, A Review of Factors Affecting Bearing Vibration Monitoring, Proceedings of the Tri-annual Vibration and Noise Conference, Vol. 3 pp 163-172, Perth-Australia, 1994 May
- [75] S. Ramamurthy, C. M. Krousgrill, and F. Sadeghi, "Vibration in Grease Lubricated Bearing Systems," *Tribology Transactions*, vol. 43 (3), pp. 403-410, 2000.
- [76] J. Pineyro, A. Klemnow, and V. Lescano, "Effectiveness of New Spectral Tools in the Anomaly Detections of Rolling Element Bearings," *ELSEVIER Journal of Alloys and Compounds*, vol. 310 (1-2), pp. 276-279, 2000, 9 September.
- [77] D. L. Carter, "A New Method of Processing Rolling Element Bearing Signals", presented at the 20th annual meeting of the Vibration Institute, USA, 1996, June.
- [78] S. Luce, "Choice Criteria in Conditional Preventive Maintenance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 13 (1), pp. 163-168, 1999.
- [79] R. Norman, "Increase Equipment Efficiency with Preventive and Predictive Maintenance," in *Modern Casting*, vol. 89 (4), 1999, April, pp. 48-65
- [80] A. V. Barkov and N. A. Barkova, "The Artificial Intelligence Systems For Machine Condition Monitoring and Diagnostics by Vibration," presented at the Saint Petersburg Post-Graduate Institute of the Russian Federation Power Industry and Vibration Institute USA, Saint Petersburg - Russia, 1999.
- [81] S. S. Haykin, *Blind Deconvolution*. Englewood Cliffs, N.J: PTR Prentice Hall, 1994.
- [82] S. C. Douglas and S. Haykin, "On the Relationship Between Blind Deconvolution and Blind Source Separation," presented at ASILOMAR, Pacific Grove, California USA, 1997.

- [83] G. T. Zheng, M. A. Buckley, G. Kister, and G. F. Fernando, "Blind Deconvolution of Acoustic Emission Signals for Damage Identification in Composites," *A.I.A.A. Journal*, vol. 39 (6), pp. 1198-1205, 2001, June.
- [84] J.-Y. Lee and A. K. Nandi, "Blind Deconvolution on Impacting Signals Using Higher-Order Statistics," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 12, pp. 357-371, 1998.
- [85] W. Nirbito, A. C. C. Tan, and J. Mathew, "The Enhancement of Bearing Signals Corrupted by Noise Using Blind Deconvolution - A Feasibility Study," presented at the 2nd Asia Pacific Conf. on System Integrity and Maintenance (ACSIM), Nanjing - ROC, 2000, 23-25 August.
- [86] D. G. Manolakis, V. K. Ingle, and S. M. Kogon, *Statistical and Adaptive Signal Processing : Spectral Estimation, Signal Modeling, Adaptive Filtering, and Array Processing*. Boston London: McGraw-Hill, 2000.
- [87] A. K. Nandi, *Blind Estimation Using Higher-Order Statistics*. Boston London: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [88] A. Mansour, "The Blind Separation of Non Stationary Signals by Only Using the Second Order Statistics," presented at 5th ISSPA, Brisbane, Australia, 1999, 22-25 August.
- [89] J. Yang and C. L. Nikias, "The Blind Deconvolution of the Multi-Channel Based on the Higher Order Statistics," *Conference Record of the Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, vol. 2, pp. 1192-1196, 2000.
- [90] K. D. Kammeyer and B. Jelonck, "A New Fast Algorithm for Blind MA-System Identification Based on Higher Order Cumulants," presented at SPIE Advanced Signal Processing V: Algorithms, Architectures and Implementations, San Diego, California USA, 1994.
- [91] D. Boss and K. D. Kammeyer, "Statistical Analysis of Cumulant Estimation Errors with Regard to an Efficient Blind ARMA Identification," presented at ATHOS-94 (Advanced Topics in Higher Order Statistics), Edinburgh, Scotland - UK, 1994, 12 September.
- [92] D. Boss, B. Jelonck, and K. D. Kammeyer, "Decision-Feedback Eigenvector Approach to Blind ARMA Equalization and Identification,"

presented at the ATHOS Workshop on Higher-Order Statistics, Begur - Spain, 1995, 12-14 June.

[93] D. Boss, B. Jelonnek, and K.-D. Kammeyer, "Eigenvector Algorithm for Blind MA System Identification," *ELSEVIER Signal Processing*, vol. 66, pp. 1-28, 1998, April.

[94] K.-D. Kammeyer and B. Jelonnek, "Eigenvector Algorithm for Blind Equalization," presented at IEEE Signal Processing Workshop on Higher-Order Statistics, Lake Tahoe, California USA, 1993.

[95] B. Jelonnek and K. D. Kammeyer, "A Closed-Form Solution to Blind Equalization," *Signal Processing*, vol. 36, pp. 251-259, 1994.

[96] Kammeyer, B. Jelonnek, and D. Boss, "Generalized Eigenvector Algorithm for Blind Equalization," *ELSEVIER Signal Processing*, vol. 61, pp. 237-264, 1997.

[97] K. Bruzelius, D. Mba, An Initial Investigation on the Potential Applicability of Acoustic Emission to Rail Track Fault Detection, School of Eng. – Cranfield Univ., UK, NDT&E International, Elsevier, March 2004.

[98] F. Rauscher, Defect Detection by Acoustic Emission Examination of Metallic Pressure Vessels, Vienna Univ. of technology, Vienna – Austria, Proceeding EWGAE 2004.

[99] L. Alfayez, D. Mba, G. Dyson, Detection of Incipient Cavitation and the Best Efficiency Point of a 2.2 MW Centrifugal Pump Using Acoustic Emission, Consulting Service Dept., Saudi Aramco Oil Co., Dhahran-SA, Proceeding EWGAE 2004.

[100] C.Z. Giraldo, D. Mba, M. Smart, Acoustic Emission During Run-Up and Run-Down of a Power Generation Turbine, School of Eng. – Cranfield Univ., UK, TRIBOLOGY International, Elsevier, January 2004.

[101] S.Z. Peng, Dynamic Stress Concentration in a Ribbed Plate Using the Acoustical Wave Propagator Technique, Centre for Acoustics, Dynamics and vibration, School of Mech. Eng., The univ. of Western Australia, Australia, Elsevier, Journal of Sound and Vibration No. 279, pp 75-88, 2005.

[102] J. Shao, Y. Yan, Review of Techniques for On-line Monitoring and Inspection of laser Welding, Dept. of Electronics, Univ. of Kent at Canterbury,

UK, Journal of Physics: Conference Series no. 15, Sensors & Their application XIII, pp 101-107, 2005.

[103] L. Alfayez, D. Mba, G. Dyson, The Application of Acoustic Emission for Detecting Incipient Cavitation and the Best Efficiency Point of a 60 kW Centrifugal Pump; case study, Consulting Service Dept., Saudi Aramco Oil Co., Dhahran-SA, 2005.

[104] G. Paparov, G.P. Gregori, et.al., Acoustic Emission and Earthquake Precursors, Institute di Acustica CNR, Roma – Italy, Geophysical Research, Vol. 7, no. 3489, European Geosciences Union, 2005.

[105] P. Dyjak, R.P. Singh, Acoustic Emission Analysis of Nanoindentation-Induced Fracture Events, Mechanics of Advanced Materials Lab., Dept. of Mech. Eng., Stony Brook Univ., NY – USA, Experimental Mechanics, Publ. : Springer, Vol. 46, No. 3, pp 333-345, June 2006.

[106] L.M. Rogers, Crack Detection Using Acoustic Emission Methods, Structural and Engineering Monitoring by Acoustic Emission Methods – Fundamentals and Applications, Lloyd's Register Tech. Ass. Paper No.6, 2006.

[107] E. Gandarias, S. Dimov, et.al., New Methods for Tool Failure Detection in Micromilling, Proceedings of the Inst. of Mech. Eng., Part B: Journal of Eng. Man., Vol. 220, No. 2, pp 137-144, 2006.

[108] R. Sarathi, V. Dubey, et.al., Characterization of Partial Discharges in a Gas Insulated System Using an Acoustic Emission Technique, Indian Inst. of Tech., Madras – India, Electric Power Components and Systems, Publ. : Taylor & Francis, Vol. 34, No. 6, pp 653-669, June 2006.

[109] C.M. Harris, A.G. Piersol, Editor, "Harris' Shock and Vibration Handbook", 5th Edition, McGraw-Hill, New York USA, 2002.

[110] Wang Li-li, "Foundations of Stress Waves", Elsevier, London GB, 2007

[111] C. Hellier, "Handbook of Non Destructive Evaluation", Mc-GrawHill, New York USA, 2005.

[112] A.F. Liu, "Mechanics and Mechanism of Fracture: An Introduction, Chapter 3.2.1. Fatigue Crack Initiation", pp 128-129, ASM International, Ohio USA, 2005.

[113] J. T. Broch, "Measuring vibration", Brüel dan Kjær Handbook, [1990]

- [114] G. M. Raz and B. D. Van Veen, "Blind Equalization and Identification of Nonlinear and IIR Systems - A Least Squares Approach," IEEE Transaction on Signal Processing, vol. 48, pp. 192-200, 2000, January.
- [115] G. M. Raz and B. D. Van Veen, "Blind Equalization and Identification of Nonlinear and IIR Systems - A Least Squares Approach," IEEE Transaction on Signal Processing, vol. 48, pp. 192-200, 2000, January. [116] X. Dai, "A New Blind Separation Method of Convolutional Mixture of Regular Signal Based on Hidden Representation and System Deconvolution," ELSEVIER Signal Processing, vol. 81, pp. 173-182, 2001.
- [117] J.-Y. Lee and A. K. Nandi, "Extraction of Impacting Signals Using Blind Deconvolution," Journal of Sound and Vibration, vol. 232 (5), pp. 945-962, 2000.
- [118] Dunbabin M., Tan C.C., Magee W., "Active Control of Structures Subject to Large Temperature Variations Using Piezo ceramic Actuators, Proceeding of JSME, International Symposium on MOVIC, Tokyo-Japan, April, 1999.
- [119] A.C.C. Tan, W.Nirbito, M. Dunbabin, K. Ohtomo, "Sensor Design and Location for Optimum Vibration Detection", Asia Pacific Vibration Conference (APVC), Sapporo-Japan, June, 2000.
- [120] Boashash B., "Digital Signal Processing"., Lecture Notes/Text, QUT, Brisbane, QLD-Australia, July 1998
- [121] Strum R. D., Kirk D. E., "First Principles of Discrete Systems and Digital Signal Processing", Lecture Text: Reading Material, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts-USA, 1989
- [122] Oppenheim A.V., Schafer R.W., Buck J.R., "Discrete-Time Signal Processing 2nd edition", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey-USA, 1999
- [123] P. A. Regalia, "On the Equivalence between the Godard and Shalvi-Weinstein Schemes of Blind Equalization," ELSEVIER Signal Processing, vol. 73, pp. 185-190, 1999.
- [124] Karimi M., Tan A.C.C., Mathew J., Senadji B. "Blind Deconvolution as a notch filter in suppressing correlated noise", Proceedings on Asia Pacific Conf. on System Integrity and Maintenance (ACSIM), Brisbane-Australia, July, 2004.

- [125] Nirbito W., Tan A.C.C., Sumardi T.P., "Detecting Incipient Defect of Rolling Elements Bearing by Applying the Blind Deconvolution Method in Numerical Technique", Proceedings on 4th International Conference on Numerical Analysis in Engineering (NAE-4), Yogyakarta-Indonesia, August, 2005.
- [126] Nirbito W., Tan A.C.C., Sumardi T.P., "Improving the Enhancement of Corrupted Signal in Noise; an Optimization of Blind Deconvolution EVA Method by Reducing Samples Sizes based on Maximum Crest Factor", Padang-West Sumatra, Indonesia, September, 2007.
- [127] Baccarelli E., Cusani R., Galli S., An Approach to Blind Deconvolution Based on Second-Order 'Soft' Statistics, IEEE Signal Processing, pp. 329-333, 1998
- [128] R. Johnson and F. Gen-Kuong, "Accelerometer for High Frequency Low Noise Application with Self Test/ID Feature," presented at the Institute of Environmental Sciences Conf., USA, 1990.
- [129] S. Nakashima and T. Toyota, "Pencil-Type Vibration Checker for Rotating Machines Diagnosis," presented at the 43rd Meeting of the Mechanical Failures Prevention Group, Gaithersburg, Maryland USA, 1991.
- [130] A. P. Petropulu, "Identifiability of blind deconvolution of non-white signals," presented at Conference Record of the Asilomar Conference of Signals, Systems & Computers, 1993.
- [131] N. Ghosh and J. Mathew, "Aliasing in Vibration Signal Processing," presented at the 2nd Centre for Machine Condition Monitoring (CMCM) Forum, Melbourne, Victoria-Australia, 1995, November.
- [132] C. K. Mechefske, "Parametric Spectral Estimation for Use in Machine Condition Monitoring," presented at the 2nd Centre for Machine Condition Monitoring (CMCM) Forum, Melbourne, Victoria-Australia, 1995, November.
- [133] A. Cichocki, W. Kasprzak, and S.-I. Amari, "Adaptive Approach to Blind Source Separation with Cancellation of Additive and Convolutional Noise," presented at 3rd Int. Conf. on Signal Processing - IEEE, Beijing - ROC, 1996.

- [134] S. S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 3rd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall,, 1996.
- [135] K. J. Pope and R. E. Bogner, "Blind Signal Separation part 1: Linear, Instantaneous Combinations," *Digital Signal Processing*, vol. 6, pp. 5-16, 1996.
- [136] K. J. Pope and R. E. Bogner, "Blind Signal Separation part 2: Linear, Convolution Combinations," *Digital Signal Processing*, vol. 6, pp. 17-28, 1996.
- [137] A. Lenzen and H. Waller, "Identification Using the Algorithm of Singular Value Decomposition - An Application to the Realisation of Dynamic Systems and to Fault Detection and Localisation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 11 (3), pp. 441-457, 1997.
- [138] A. V. Barkov and N. A. Barkova, "Non-Linear Signal Models in Vibroacoustic Machine Diagnostics," presented at the 21th annual meeting of the Vibration Institute, USA, 1997, June.
- [139] T. Shelley, "Taking It To The Limit, A Technical Report on Bearings," in *Eureka*, 2000, May, pp. 41-42.
- [140] R. M. Jones, "Staying Ahead of Bearing Failure," in *Motion System Design*, 2000, March, pp. 27-30.
- [141] _____, "Rolling Bearing Damage: Recognition of Damage and Bearing Inspection," FAG Rolling Bearings OEM und Handel AG, Schweinfurt - Germany, Publication No. WL 82 102/2 EA, 1998.
- [142] O. Cappe, "dsv: A set of MATLAB functions for Blind Deconvolution of Discrete Signals," ENST Dpt. TSI / CNRS-URA 820, Paris November 12, 1998.
- [143] P. Ciblat and P. Loubaton, "Second Order Blind Equalization: The Band Limited Case," *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, vol. 6, pp. p 3401-3404, 1998.
- [144] S. S. Davis, "Vibration Analysis of Rotating Machinery Using the Spectral Distribution Function," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 214 (5), pp. 805-815, 1998.
- [145] J. P. Dron, L. Rasolofondraibe, C. Couet, and A. Pavan, "Fault Detection and Monitoring of a Ball Bearing Benchtest and a Production

Machine via Autoregressive Spectrum Analysis," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 218 (3), pp. 501-525, 1998.

[146] S. K. Lee and P. R. White, "The Enhancement of Impulsive Noise and Vibration Signals for Fault Detection in Rotating and Reciprocating Machinery," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 217 (3), pp. 485-505, 1998.

[147] A. C. McCormick, A. K. Nandi, and L. B. Jack, "Application of Periodic Time-Varying Autoregressive Models to the Detection of Bearing Faults," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 212 (6), pp. 417-428, 1998.

[148] M. Namba and Y. Ishida, "Wavelet Transform Domain Blind Deconvolution," *Signal Processing*, vol. 68, pp. 119-124, 1998.

[149] V. P. Tuzlukov, "A New Approach to Signal Detection Theory," *Digital Signal Processing*, vol. 8 (3), pp. 166-184, 1998.

[150] L. Zhang and A. Cichocki, "Blind Deconvolution/Equalization Using State-Space Models," presented at IEEE Workshop on NNSP, 1998.

[151] O. Cappe, V. Buchous, and E. Moulines, "Quasi-Newton Method for Maximum Likelihood Estimation of Hidden Markov Models," presented at IEEE International Conference on Acoustic, Speech, Signal Processing, Seattle, 1998, May.

[152] D. Kundur and D. Hatzinakos, "On the Use of Lyapunov Criteria To Analyze the Convergence of Blind Deconvolution Algorithms," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 46 (11), pp. 2918-2925, 1998, November.

[153] G. Splitt, "Piezocomposite Transducers - a Milestone for Ultrasonic Testing," in *INSIGHT: Non-Destructive Testing and Condition monitoring*, vol. 40 (11), 1998, November, pp. 760-763.

[154] S. I. Pinel, H. R. Signer, and E. V. Zaretsky, "Design and Operating Characteristics of High-Speed, Small-Bore Ball Bearings," *Tribology Transactions*, vol. 41 (4), pp. 423-434, 1998, October.

[155] L. Chen, H. Kusaka, and M. Kominami, "Blind channel equalization and phase recovery using higher order statistics and eigendecomposition," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E82-B, pp. 1048-1054, 1999.

- [156] K. Z. Mao and S. A. Billings, "Variable Selection in Non Linear Systems Modelling," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 13 (2), pp. 351-366, 1999.
- [157] M. Namba and Y. Ishida, "Speech Analysis with Blind Equalization Technique," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E82-A, pp. 564-571, 1999.
- [158] C. Y. Chi and C. C. Feng, "Blind Channel Estimation and MMSE Equalization Using Shalvi and Weinstein's Blind Deconvolution Criteria," presented at IEEE Wireless Communications and Networking, New Orleans - USA, 1999, 1 September.
- [159] K. Torkkola, "Blind Separation for Audio Signals - Are we there yet ?," presented at Workshop on Independent Component Analysis and Blind Deconvolution, Aussois, France, 1999, 11-15 January.
- [160] G. Harikumar and Y. Bresler, "Perfect Blind Restoration of Images Blurred by Multiple Filters: Theory and Efficient Algorithms," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 8 (2), pp. 202-218, 1999, February.
- [161] D. Huang and F. Gustafsson, "Sufficient Output for Identifiability in Blind Equalization," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47 (2), pp. 191-194, 1999, February.
- [162] E. Gassiat and E. Gautherat, "Speed of Convergence for the Blind Deconvolution of a Linear System," 1999, January.
- [163] A. Gorokhov, M. Kristensson, and B. Ottersten, "Robust Blind Second-Order Deconvolution," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 6, pp. 13-16, 1999, January.
- [164] C.-C. Feng and C.-Y. Chi, "Performance of Cumulant Based Inverse Filters for Blind Deconvolution," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 47 (7), pp. 1922-1935, 1999, July.
- [165] M. Kawamoto, A. K. Barros, A. Mansour, K. Matsuoka, and N. Ohnishi, "Real World Blind Separation of Convolved Non-Stationary Signals," presented at 38th SICE annual conference, Morioka - Japan, 1999, July.
- [166] Y. Inouye and T. Sato, "Iterative Algorithms Based on Multistage Criteria for Multichannel Blind Deconvolution," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 47 (6), pp. 1759-3436, 1999, June.

- [167] R. S. Cowan and W. O. Winer, "Editorial: Special Issue on Condition Monitoring," *Journal of Mechanical Engineering Science, part C*, vol. 214 (9), pp. 1-4, 2000.
- [170] [171] H. Minami and H. Sasaoka, "A Soft-Output Adaptive Equalizer for Land Mobile Communications Based on a Modified Least-Square Solution," *Electronics and Communications in Japan*, vol. 83 part 1, pp. 55-67, 2000.
- [172] A. K. Nandi and S. N. Anfinson, "Blind Equalization with Recursive Filter Structures," *Signal Processing*, vol. 80, pp. 2151-2167, 2000.
- [173] S. Cruces, A. Cichocki, and L. Castedo, "Blind Source Extraction in Gaussian Noise," presented at the Intl. Workshop on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation, Helsinki, Finland, 2000, 2 June.
- [174] D. Gesbert and P. Duhamel, "Unbiased Blind Adaptive Channel Identification and Equalization," *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 48, pp. 148-158, 2000, January.
- [175] A. Mansour, A. K. Barros, and N. Ohnishi, "Blind Separation of Sources: Methods, Assumptions and Application," *IEICE Trans. Fundamentals*, pp. 1498-1512, 2000, August.



LAMPIRAN 1

- o Perhitungan umur benda uji bantalan gelinding
- o Perhitungan nilai Ball Pass Frequency Outer (BPF0) dan Ball Pass Frequency Inner (BPF1) benda uji bantalan gelinding

Perhitungan umur benda uji bantalan gelinding

Bantalan Gelinding #16005

$$d = 25 \text{ mm}$$

$$D = 47 \text{ mm}$$

$$B = 8 \text{ mm}$$

Jumlah elemen gelinding (bola) = 6 buah

Load rating : dynamic $C = 8,06 \text{ kN}$

$$\text{static} \quad C_0 = 4,75 \text{ kN}$$

Fatigue load limit : $P_u = 0,212 \text{ kN}$

Limiting speed = 20.000 rpm

Experimental speed = 1320 rpm

Beban terkendali = *equivalent dynamic bearing load* $P = 4 \text{ kN}$

1. *Basic rating life (90% reliability)*

$$L_{10} = (C/P)^3 = (8060/4000)^3 = 8,181 \times 10^6 \text{ putaran}$$

$$L_{10h} = L_{10}/60 \times \text{rpm} = 8,181 \times 10^6 / 60 \times 1320 = 103,3 \text{ jam}$$

$$\text{Perbandingan beban lelah/beban dinamik} : P_u/P = 212/4000 = 0,053$$

$$d_m = \frac{1}{2}(d+D) = \frac{1}{2}(25+47) = 36 \text{ mm}$$

2. *Adjusted Rating Life (ISO 281:1990)*

$$L_{nmh} = a_1 \times a_{skf} \times L_{10h}$$

$$L_{10h} = 103,3 \text{ jam}$$

$$a_1 = 1,0 \text{ untuk } 90\% \text{ reliability (Tabel 1, SKF manual)}$$

a_{skf} = faktor modifikasi umur kerja bantalan, tergantung η_c faktor tingkat kontaminasi pada bantalan, perbandingan kekentalan pelumas K dan perbandingan P_u/P .

Kekentalan pelumas standar/*rated* untuk bantalan dengan $d_m = 36 \text{ mm}$ dengan putaran $n = 1320 \text{ rpm}$ adalah $\nu_1 = 16 \text{ mm}^2/\text{detik}$ (Diagram 5, SKF manual)

Kekentalan pelumas minimal $16 \text{ mm}^2/\text{detik}$ pada temperatur kerja 70° adalah pelumas ISO VG 68 yang pada temperatur standar 40° , diambil nilai $\nu = 70 \text{ mm}^2/\text{detik}$ (Tabel 3, SKF manual)

$$K = \nu/\nu_1 = 70/16 = 4,375$$

$\eta_c = 0,4$ untuk nilai tengah kondisi sedikit kontaminasi untuk bantalan yang terbuka sehingga kotoran bisa masuk atau mengkontaminasi pelumas bantalan, untuk bantalan dengan ukuran $d_m = 36$ mm (Tabel 4, SKF manual)

Table 1: Values for life adjustment factor a_1

Reliability	Failure probability n	SKF rating life L_{nm}	Factor a_1
%	%		
90	10	L_{10m}	1
95	5	L_{5m}	0,62
96	4	L_{4m}	0,53
97	3	L_{3m}	0,44
98	2	L_{2m}	0,33
99	1	L_{1m}	0,21

Table 3: Viscosity classification to ISO 3448

Viscosity grade	Kinematic viscosity at 40 °C		
	mean	min	max
-	mm ² /s		
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11,0
ISO VG 15	15	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90,0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1 000	1 000	900	1 100
ISO VG 1 500	1 500	1 350	1 650

Diagram 5: Estimation of the minimum kinematic viscosity at operating temperature

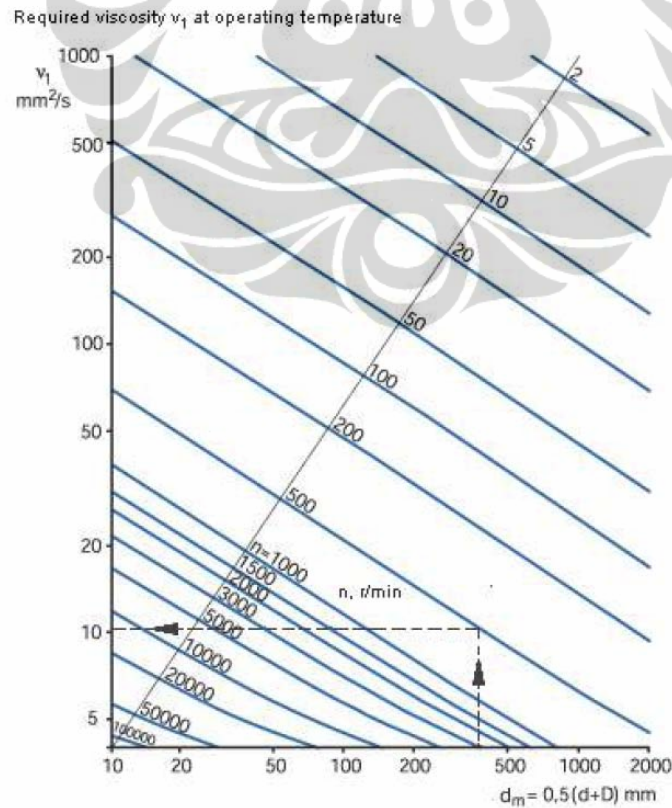
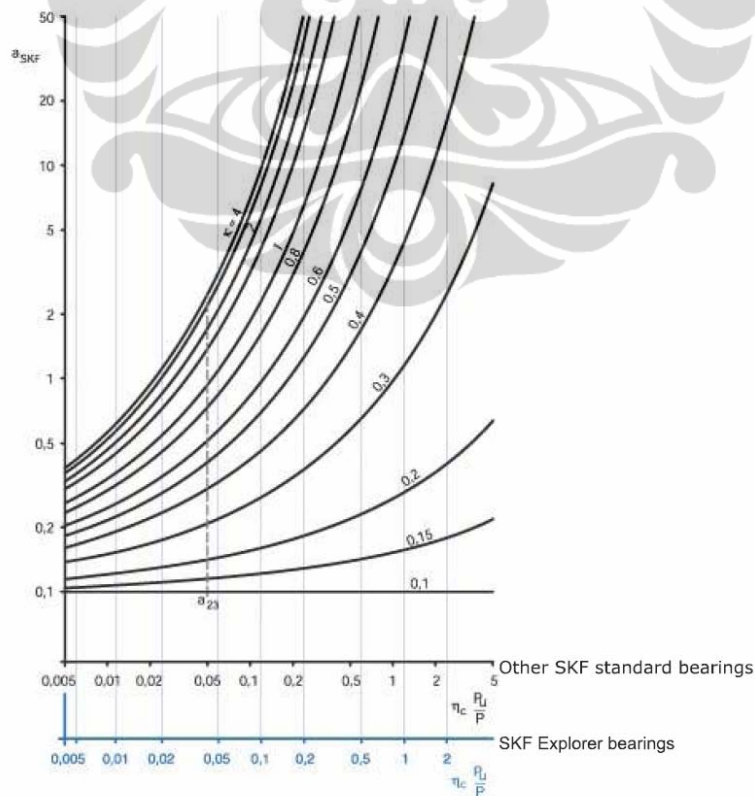


Table 4: Guideline values for factor η_c for different level of contamination

Condition	Factor η_c ¹⁾	
	for bearings with diameter $d_m < 100$	$d_m \geq 100$ mm
Extreme cleanliness Particle size of the order of the lubricant film thickness Laboratory conditions	1	1
High cleanliness Oil filtered through an extremely fine filter Conditions typical of bearings greased for life and sealed	0,8 ... 0,6	0,9 ... 0,8
Normal cleanliness Oil filtered through a fine filter Conditions typical of bearings greased for life and shielded	0,6 ... 0,5	0,8 ... 0,6
Slight contamination Slight contamination of the lubricant	0,5 ... 0,3	0,6 ... 0,4
Typical contamination Conditions typical of bearings without integral seals, coarse filtering, wear particles, and ingress from surroundings	0,3 ... 0,1	0,4 ... 0,2
Severe contamination Bearing environment heavily contaminated and bearing arrangement with inadequate sealing	0,1 ... 0	0,1 ... 0
Very severe contamination Under extreme contamination, values of η_c can be outside the scale resulting in a more severe reduction of life than predicted by the equation for L_{nm}	0	0

¹⁾ The scale for η_c refers only to typical solid contaminants. Contamination by water or other fluids detrimental to bearing life is not included. In case of very heavy contamination ($\eta_c = 0$), failure will be caused by wear, the useful life of the bearing can be below the rated life.

Diagram 1: Factor a_{SKF} for radial ball bearings



If $\kappa > 4$, use curve for $\kappa = 4$
As the value of $\eta_c (P_u / P)$ tends to zero, a_{SKF} tends to 0,1 for all values of κ
The dotted line marks the position of the old $a_{23}(\kappa)$ scale where $a_{SKF} = a_{23}$

Nilai $\eta_c \times (Pu/P) = 0,4 \times 0,053 = 0,0212$ memotong nilai kurva $K = 4$ memberikan nilai $a_{skf} = 1,125$ (Diagram 1, SKF *manual*)

Dengan demikian umur kerja bantalan yang terkondisi untuk eksperimen waktu nyata (*real time experiment*) dapat diprediksi sepanjang :

$$L_{nmh} = a_1 \times a_{skf} \times L_{10h} = 1,0 \times 1,125 \times 103,3 = 116,212 \text{ jam} \approx \pm 117 \text{ jam}$$



Perhitungan frekuensi respons getaran terhadap cincin luar/dalam bantalan gelinding

Ball Pass Frequency, Outer :

$$\text{BPFO} = N \{ 1 - (B d \cos\phi / P d) \} n / 60 = 6 \{ 1 - (8 \times 25 \times 0,85 / 36 \times 25) \} 1320 / 60 = 107,71 \text{ Hz}$$

$$\text{BPFO} \approx \mathbf{108 \text{ Hz}}$$

Ball Pas Frequency, Inner :

$$\text{BPFI} = N \{ 1 + (B d \cos\phi / P d) \} n / 60 = 6 \{ 1 + (8 \times 25 \times 0,85 / 36 \times 25) \} 1320 / 60 = 156,28 \text{ Hz}$$

$$\text{BPFI} \approx \mathbf{156 \text{ Hz}}$$

