



TUGAS AKHIR - TE 141599

DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA
MOTOR INDUKSI MENGGUNAKAN ANALISIS ARUS
MULA BERBASIS *HILBERT TRANSFORM*

Istiqomah
NRP 2212100027

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

BROKEN ROTOR BAR DETECTION
IN INDUCTION MOTOR USING STARTING CURRENT
ANALYSIS BASED ON HILBERT TRANSFORM

Istiqomah
NRP 2212100027

Advisor
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

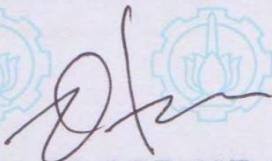
**DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA
MOTOR INDUKSI MENGGUNAKAN ANALISIS
ARUS MULA BERBASIS *HILBERT TRANSFORM***

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

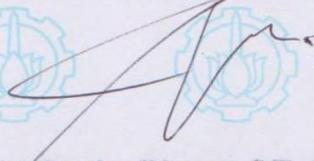
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19810905 200501 1 002

Dosen Pembimbing II



Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP 19731119 200003 1 001



DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA MOTOR INDUKSI MENGGUNAKAN ANALISIS ARUS MULA BERBASIS *HILBERT TRANSFORM*

ABSTRAK

Kerusakan batang rotor merupakan salah satu jenis kerusakan pada motor induksi yang dapat menyebabkan masalah serius. Kerusakan tersebut dapat mencapai 5% - 10% dari seluruh kasus gangguan motor induksi. Oleh karena itu, perlu adanya diagnosis awal yang mendeteksi adanya gangguan pada rotor motor induksi, agar dapat dilakukan perbaikan lebih cepat dan tanggap sebelum terjadi gangguan yang lebih besar.

Tugas Akhir ini membahas terkait teknik deteksi kerusakan batang rotor pada motor induksi dengan menggunakan analisis arus mula. Sistem yang digunakan berbasis *decomposition wavelet transform* terlebih dahulu kemudian dilanjutkan dengan analisis berbasis *hilbert transform* sebagai perangkat pengolahan sinyal sehingga mampu mendeteksi motor dalam keadaan sehat atau mengalami kerusakan.

Pengujian sistem dilakukan dalam beberapa kondisi, yaitu kondisi tanpa beban dan berbeban. Selain itu, kondisi yang diberikan adalah kecacatan mulai dari 1BRB hingga 3BRB. Hasil pengujian membuktikan bahwa *decomposition wavelet transform* dan *Hilbert transform* mampu mendeteksi perbedaan kondisi pada motor induksi normal ataupun rusak pada batang rotor.

Kata Kunci: Motor Induksi, Kerusakan Batang Rotor, *Decomposition Wavelet Transform*, *Hilbert Transform*.

BROKEN ROTOR BAR DETECTION IN INDUCTION MOTOR USING STARTING CURRENT ANALYSIS BASED ON *HILBERT TRANSFORM*

ABSTRACT

Broken rotor bars is one of broken types in induction motor that causes serious problems. Broken rotor bars could reach 5% - 10% from all cases of induction motor faults. Therefore, needed an early diagnosis to detect faults in the rotor bars, so the corrective actions can be taken faster and responsive before the greater faults.

This final thesis discuss about rotor bar breakage detection system in induction motor using the inverter output current analysis. Firstly, the system use Decomposition Wavelet Transform and then continue to the hilbert transform analysis as a signal processing device which is function to detect whether induction motor is broken or in normal condition.

System testing has been done in several condition either in load or no load condition which is combine using 1BRB (Broken Rotor Bar) until 3 BRB (Broken Rotor Bar) of disablement. The test results demonstrate that the decomposition wavelet transform and hilbert transform is able to detect the differences between induction motor in normal conditions or broken.

Key Words : Induction motor, Broken Rotor Bar, Decomposition Wavelet Transform, Hilbert Transform.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi	3
1.5.1 TahapPerancangan Sistem.....	3
1.5.2 TahapPengujian Sistem.....	3
1.5.3 TahapAnalisis	3
1.5.4 Kesimpulan	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
1.6 RelevansiatauManfaat.....	4
BAB 2 DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR MOTOR	
INDUKSI	5
2.1 Motor Induksi Tiga Fasa	5
2.2 Kerusakan Batang Rotor pada Motor Induksi	9
2.3 Deteksi Kerusakan Rotor Pada Motor Induksi	11
2.4 <i>Wavelet</i>	12
2.5 <i>Hilbert Transform</i>	14
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM DETEKSI	15
3.1 Konfigurasi Sistem	15
3.2 Pengkondisian Kerusakan Batang Rotor Motor Induksi	19
3.3 Pembebanan Mekanis dan Elektris	21
3.4 Akuisisi Data.....	22
3.5 <i>Listing Decomposition Wavelet Transform</i>	23

3.6	<i>Listing Hilbert Transform</i>	26
BAB 4	PENGUJIAN DAN ANALISIS KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA MOTOR INDUKSI	29
4.1	Akuisisi Data.....	30
4.2	Pengolahan Sinyal Arus Stator ke dalam Bentuk Dekomposisi Menggunakan Metode Wavelet.....	31
4.3	Perumusan Variabel Deteksi Sinyal $d7$ pada <i>Decomposition Wavelet Transform</i>	39
4.3.1	Motor Induksi Tanpa Beban.....	39
4.3.2	Daya Input Motor Induksi 900Watt(Berbeban).....	42
4.3.3	Daya Input Motor Induksi 1.100Watt(Berbeban 300W Bohlam)	44
4.3.4	Daya Input Motor Induksi 1.300Watt(Berbeban 600W Bohlam)	47
4.3.5	Daya Input Motor Induksi 1.500Watt(Berbeban 900W Bohlam)	50
4.4	Pengolahan Sinyal Hasil Dekomposisi pada Sinyal $a7$ Menggunakan Metode <i>Hilbert Transform</i>	53
4.4.1	Motor Induksi Tanpa Beban.....	55
4.4.2	Daya Input Motor Induksi 900Watt(Berbeban).....	58
4.4.3	Daya Input Motor Induksi 1.100Watt(Berbeban 300W Bohlam)	61
4.4.4	Daya Input Motor Induksi 1.300Watt(Berbeban 600W Bohlam)	64
4.4.5	Daya Input Motor Induksi 1.500Watt(Berbeban 900W Bohlam)	67
4.5	Pengaruh Pembebanan pada Arus Stator Motor Induksi	70
BAB 5	PENUTUP	73
5.1	Kesimpulan	73
5.2	Saran.....	74
	DAFTAR PUSTAKA	75
	LAMPIRAN	77
	RIWAYAT HIDUP	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Motor induksi tiga fasa [1]	5
Gambar 2.2.	Rangkaian Ekuivalensi Motor Induksi [3].....	5
Gambar 2.3.	Konstruksi motor induksi sangkar tupai [3].....	6
Gambar 2.4.	Laminasi rotor motor induksi [4].....	7
Gambar 2.5.	Karakteristik torsi vs kecepatan pada berbagai kelas motor induksi [5]	8
Gambar 2.6.	Kerusakan Batang Rotor[3].....	10
Gambar 2.7	Wavelet Tree dengan tiga levev dekomposisi [4]	13
Gambar 2.8	Klasifikasi dalam wavelet tiga level dekomposisi[4] ...	13
Gambar 3.1	Gambaran sistem pada tugas akhir	15
Gambar 3.2.	Peralatan yang dibutuhkan.....	19
Gambar 3.3.	Bentuk pengkondisian kerusakan rotor bar.....	20
Gambar 3.4.	Skema pembebanan mekanis dan elektris pada Tugas Akhir	21
Gambar 3.5.	Diagram alur akuisisi data	23
Gambar 3.6.	Diagram alur decomposition wavelet transfer	25
Gambar 3.7.	Diagram alur hilbert transform.....	27
Gambar 4.1.	Waveform sinyal arus stator	31
Gambar 4.2.	Decomposition wavelet transform pada motor kondisi normal tanpa beban	32
Gambar 4.3.	Decomposition wavelet transform pada motor induksi kondisi 1 BRB 3mm tanpa beban.....	33
Gambar 4.4.	Decomposition wavelet transform pada motor induksi kondisi 1 BRB 7mm tanpa beban.....	34
Gambar 4.5.	Decomposition wavelet transform pada motor induksi kondisi 2 BRB sedalam 7mm dan 3mm tanpa beban ..	35
Gambar 4.6.	Decomposition wavelet transform pada motor induksi kondisi 2 BRB sedalam 7mm dan 7mm	36
Gambar 4.7.	Decomposition wavelet transform pada motor kondisi 3 BRB sedalam 7mm, 7mm dan 3mm	37
Gambar 4.8.	Decomposition wavelet transform pada motor induksi kondisi 3 BRB sedalam 7mm, 7mm dan 7mm	38
Gambar 4.9.	Cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat tanpa beban (a)	39
Gambar 4.10.	Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat tanpa beban (b)-(e)	40

Gambar 4.11.	Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat tanpa beban (f)-(g)	41
Gambar 4.12.	Cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat terkopel generator(a)-(b).....	42
Gambar 4.13.	Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat terkopel generator(c)-(f)	43
Gambar 4.14.	Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat terkopel generator(g).....	44
Gambar 4.15.	Cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 300W bohlam (a)-(d).....	45
Gambar 4.16.	Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 300W bohlam (e)-(g).....	46
Gambar 4.17.	Cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 600W bohlam (a)	47
Gambar 4.18.	Cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 600W bohlam (b)-(e).....	48
Gambar 4.19.	Cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 600W bohlam (f)-(g)	49
Gambar 4.20.	Cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 900W bohlam (a)	50
Gambar 4.21.	Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 900W bohlam (b)-(e).....	50
Gambar 4.22.	Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 900W bohlam (f)-(g).....	50
Gambar 4.23.	Cuplikan sinyal a7dan penyederhanaanya pada decomposition wavelet transform saat tanpa beban(a).	53
Gambar 4.24.	Lanjutan cuplikan sinyal a7dan penyederhanaanya pada decomposition wavelet transform saat tanpa beban (b)-(c)	54
Gambar 4.25.	Cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat tanpa beban (a)-(c).....	55
Gambar 4.26.	Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat tanpa beban (d)-(f).....	56
Gambar 4.27.	Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat tanpa beban (g)-(h).....	57

Gambar 4.28.	Cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat terkopel generator(a)-(c)	58
Gambar 4.29.	Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat terkopel generator(d)-(f)	59
Gambar 4.30.	Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat terkopel generator(g)-(h).....	60
Gambar 4.31.	Cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 300W bohlam(a)-(b)..	61
Gambar 4.32.	Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 300W bohlam (c)-(e).....	62
Gambar 4.33.	Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 300W bohlam (f)-(h)	63
Gambar 4.34.	Cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 600W bohlam (a).....	64
Gambar 4.35.	Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 600W bohlam (b)-(e).....	65
Gambar 4.36.	Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 600W bohlam (f)-(h)	66
Gambar 4.37.	Cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 900W bohlam (a).....	67
Gambar 4.38.	Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 900W bohlam (b)-(e).....	68
Gambar 4.39.	Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada decomposition wavelet transform saat dibebani 900W bohlam (f)-(h)	69

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Data motor induksi tiga fasa.....	16
Tabel 3.2. Data generator sinkron tiga fasa.....	16
Tabel 3.3. Data cDaq-9171[8].....	17
Tabel 3.4. Data NI 9215[9].....	17
Tabel 3.5. Spesifikasi wavelet.....	24
Tabel 4.1. Perbandingan daya beban bohlam dengan daya input motor induksi.....	30
Tabel 4.2. Daya rata-rata sinyal d7 saat kondisi tanpa beban.....	41
Tabel 4.3. Daya rata-rata sinyal d7 saat terkopel generator	44
Tabel 4.4. Daya rata-rata sinyal d7 saat terbebani 300W bohla	47
Tabel 4.5. Daya rata-rata sinyal d7 saat tebebani 600W bohlam.....	50
Tabel 4.6. Daya rata-rata sinyal d7 saat terbebani 900W bohlam	52
Tabel 4.7. Nilai puncak sinyal a7 saat kondisi tanpa beban	57
Tabel 4.8. Nilai puncak sinyal a7 saat terkopel generator.....	61
Tabel 4.9. Nilai puncak sinyal a7 saat terbebani 1.100W	64
Tabel 4.10. Nilai puncak sinyal a7 saat terbebani 1.300W	67
Tabel 4.11. Nilai puncak sinyal a7 saat terbebani 1.500W	70
Tabel 4.12. Daya rata-rata sinyal pada sinyal d7 dengan berbagai tingkatan beban.....	71
Tabel 4.13. Nilai variabel deteksi pada penyederhanaan sinyal a7 dengan berbagai tingkatan beban	72

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor induksi merupakan peralatan yang sering digunakan pada proses operasi di industri. Hal ini disebabkan oleh motor induksi memiliki banyak keunggulan. Adapun kelebihan motor induksi adalah konstruksi yang lebih sederhana, kehandalan yang lebih tinggi, biaya yang relatif lebih murah dibandingkan motor jenis lain, perawatannya mudah, tidak memerlukan motor lain untuk *starting* awal. Tetapi disamping itu, motor induksi juga memiliki kekurangan, diantaranya adalah sulitnya pengaturan putaran motor agar mempunyai kecepatan dan frekuensi yang konstan dan memiliki arus *starting* yang cukup tinggi sekitar lima sampai enam kali arus nominal motor. Disamping hal tersebut, motor induksi adakalanya mengalami kerusakan sehingga menyebabkan operasi harus dihentikan. Hal ini tentu saja dapat merugikan perusahaan dalam bentuk finansial, tenaga dan waktu dikarenakan akan mempengaruhi proses produksi industri tersebut. Beberapa gangguan yang sering merusak motor induksi rotor antara lain, kerusakan *bearing*, gangguan pada *air gap*, dan patah atau terkikisnya batang rotor.

Kerusakan batang rotor motor induksi mencapai 5% - 10% dari seluruh kasus gangguan motor induksi [1]. Beberapa hal yang dapat menyebabkan kerusakan batang rotor motor induksi antara lain : adanya tingkat pemanasan yang sangat parah, adanya gesekan dan benturan saat proses perawatan motor, proses manufaktur motor yang kurang sempurna, dan lain sebagainya [2]. Gangguan ini tentunya akan merugikan industri. Selain itu arus mula yang cukup besar ketika awal mula motor induksi beroperasi dapat pula sebagai penyebab kerusakan motor induksi. Oleh karena itu, perlu adanya diagnosa awal yang mendeteksi adanya gangguan pada rotor motor induksi, agar langkah perbaikan lebih cepat dan tanggap sebelum terjadi gangguan yang lebih besar.

Pedektesian kerusakan batang rotor motor induksi telah banyak dilakukan dengan beberapa cara, antara lain: tingkat vibrasi motor, temperature mesin, adanya arus urutan nol, serta perubahan daya dan faktor daya secara cepat. Namun dari beberapa cara yang

telah ada membutuhkan biaya yang cukup besar. Dalam tugas akhir ini akan membahas mengenai sistem deteksi kerusakan batang rotor motor induksi dengan analisis arus mula berbasis *Hilbert Transform*. Pada pengerjaan tugas akhir ini akan dilakukan proses dekomposisi pada transformasi *wavelet* untuk selanjutnya hasil sinyal tersebut dapat dilihat perbedaan kondisi dalam keadaan batang rotor sehat maupun rusak dengan melihat jumlah ripple yang dihasilkan. Selain itu, untuk metode transformasi *hilbert*, yaitu dilakukan penyederhanaan sinyal dengan sistem interpolasi pada salah satu sinyal hasil dekomposisi untuk dapat melihat hasil perbedaan nilai puncak pada kondisi batang rotor dalam keadaan normal atau mengalami kerusakan.

1.2 Permasalahan

Adapun fokus permasalahan yang terdapat pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut

1. Kerusakan batang rotor pada motor induksi mempengaruhi performa motor induksi yang berdampak pada kegagalan produksi suatu industri, sehingga diperlukan teknik deteksi dan identifikasi kerusakan batang rotor tersebut
2. Teknik atau cara mendeteksi kerusakan batang rotor motor induksi berbasis *Hilbert Transform*
3. Perlu variasi pembebanan untuk masing-masing kondisi motor induksi agar metode pendektasian dapat diaplikasikan untuk seluruh keadaan

1.3 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk dapat membedakan keadaan pada batang rotor motor induksi dalam keadaan sehat atau mengalami kerusakan. Selain itu, tugas akhir ini juga bertujuan untuk mengaplikasikan metode *decomposition wavelet transform* dan *Hilbert transform* untuk mendeteksi kerusakan pada batang rotor motor induksi.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang akan diuraikan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Motor induksi yang digunakan merupakan motor induksi tiga fasa tipe rotor sangkar tupai
2. Objek yang dideteksi adalah pada saat batang rotor pada motor induksi dalam keadaan sehat dan rusak
3. Proses pengambilan data dan analisis mengenai arus dilakukan dalam keadaan arus mula (*starting*)
4. Pengolahan sinyal yang dilakukan berbasis *decomposition wavelet transform* dan *hilbert transform*.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan pada tugas akhir ini, terbagi dalam beberapa tahapan. Keterangan mengenai masing-masing tahapan yang dilakukan dalam tugas akhir adalah sebagai berikut:

1.5.1 Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem dilakukan dengan beberapa eksperimen, diantaranya adalah konfigurasi peralatan pengujian, melakukan pengondisian kerusakan pada batang rotor motor induksi dengan diameter dan tingkat kedalaman tertentu pada setiap lubang, serta pemberian variasi beban elektrik dan mekanis. Pemberian variasi beban dilakukan untuk mendapatkan kondisi sinyal arus yang bervariasi. Pada tahap ini juga dilakukan perancangan *listing* pengolahan sinyal berbasis *Hilbert Transform* dengan menggunakan software MATLAB untuk mendapatkan klasifikasi antar kondisi motor. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan sistem pengolahan sinyal yang sesuai.

1.5.2 Pengujian Sistem

Pada tahap ini dilakukan setelah perancangan *listing* pengolahan sinyal telah selesai, maka selanjutnya akan dilakukan pengujian teknik deteksi kerusakan pada batang rotor motor induksi. Pada tahap ini pengambilan data arus dilakukan pada saat kondisi arus mula.

1.5.3 Analisis Data

Tahap ini dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan. Analisa dilakukan pada tiap kondisi pengukuran sinyal saat pembebanan yang bervariasi dan kondisi kerusakan yang berbeda.

1.5.4 Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan penyimpulan dari penelitian deteksi kerusakan pada batang rotor motor induksi berbasis *Hilbert Transform* yang telah dilakukan pada tugas akhir ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini terdiri dalam lima bab. Adapun susunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB 1. Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi penelitian, sistematika penulisan serta relevansi atau manfaat laporan tugas akhir.

BAB 2. Dasar Teori

Bab ini berisi teori-teori penunjang yang berhubungan dengan permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini. Teori ini digunakan sebagai dasar dalam penulisan tugas akhir.

BAB 3. Perancangan Sistem Deteksi Kerusakan Batang Rotor Motor Induksi Menggunakan Analisis Arus Mula Berbasis *Hilbert Transform*

Bab ini berisi tentang rancangan sistem pendeteksian dan klasifikasi kondisi motor induksi diuji.

BAB 4. Pengujian Sistem dan Analisis Data

Bab ini berisi tentang pengolahan data-data yang diperoleh dari pengujian sistem deteksi BRB yang telah dirancang beserta analisisnya.

BAB 5. Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang dapat diambil dari hasil pengujian yang telah dilakukan dan saran untuk kedepannya.

1.7 Relevansi dan Manfaat

Tugas akhir ini diharapkan dapat diaplikasikan sebagai metode pendeteksian kerusakan batang rotor menggunakan analisis arus mula pada motor induksi yang lebih akurat, serta dapat menginspirasi untuk penelitian selanjutnya yang lebih dalam.

BAB 2

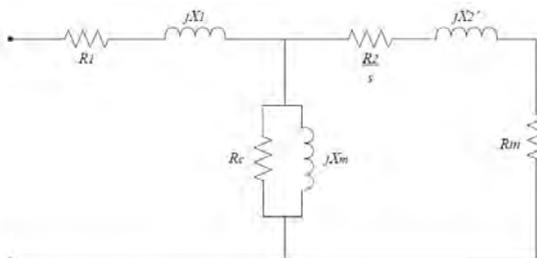
DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR MOTOR INDUKSI

2.1 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi merupakan suatu jenis motor listrik yang mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik. Arus listrik yang dihasilkan merupakan arus bolak balik (AC) yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, namun arus yang dihasilkan terinduksi akibat adanya perbedaan relative antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. Belitan stator yang dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron ($n_s = 120f/2p$). Medan putar yang dihasilkan pada stator, akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus. Perbedaan putaran relative antara stator dan rotor disebut dengan slip. Ketika beban ditambahkan pada saat motor induksi dijalankan akan memperbesar kopel motor, maka dapat memperbesar pula arus induksi pada rotor. Sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar.



Gambar 2.1. Motor Induksi tiga Fasa [1]



Gambar 2.2. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi [3]

Dengan:

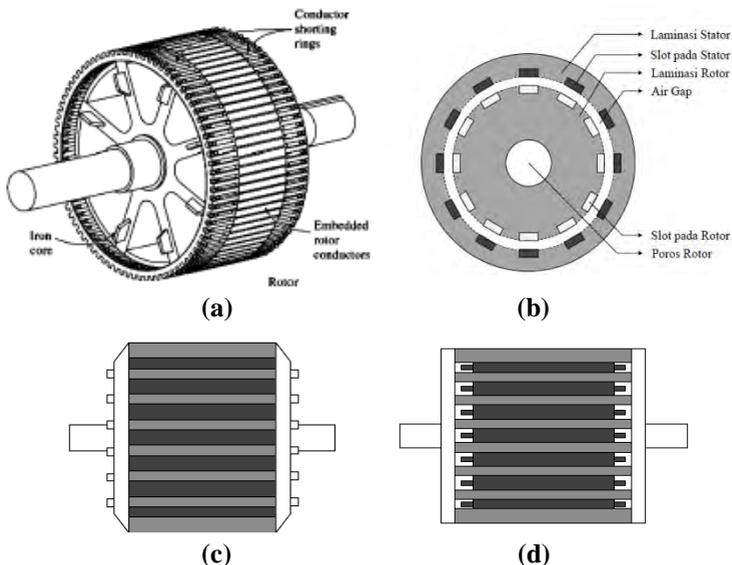
R_1 dan jX_1 : Tahanan dan reaktansi stator (*stator copper losses*)

R_2 dan jX_2 : Tahanan dan reaktansi rotor yang dibawa ke sisi primer (*rotor copper losses*)

R_c dan X_m : Rangkaian magnetisasi (*core losses*)

R_m : Beban mekanik motor induksi

Berdasarkan tipe rotornya, motor induksi terbagi menjadi dua tipe, yaitu motor induksi tipe rotor belit dan motor induksi tipe rotor sangkar bajing. Motor induksi sangkar tupai lebih banyak digunakan dibandingkan dengan jenis rotor belit, karena rotor sangkar bajing memiliki bentuk dan pengoperasian yang lebih sederhana. Dinamakan dengan rotor sangkar tupai, karena bila dilihat tanpa inti rotor, maka batang rotornya akan terlihat seperti sangkar tupai.



Gambar 2.3. Konstruksi motor sangkar induksi [3]

(a) Sketsa rotor sangkar tupai, (b) Bentuk stator dan rotor motor induksi, (c) Rotor *Die-cast* (d) rotor dengan *end-ring*

Rotor motor induksi tersusun atas laminasi besi yang memiliki slot dengan batang dari aluminium maupun tembaga. Letak laminasi besi tersebut melingkar dengan terikat erat pada poros. Pada rotor sangkar baji, terdapat dua jenis bentuk rotor berdasarkan kapasitas motor. Pada motor induksi kapasitas kecil, konstruksi rotor dibentuk secara padat atau *die-cast*, sedangkan motor induksi kapasitas besar, yaitu ratusan mega watt dibentuk dengan merekatkan tiap konduktor bar dengan *end-ring*. Kedua jenis rotor tersebut diberikn untuk mengurangi rugi-rugi pada rotor. Sedangkan, untuk penggunaan tembaga pada batang konduktor dan cincin rotor pada motor induksi merupakan salah satu usaha peningkatan efisiensi energi terhadap reduksi dari rugi-rugi yang signifikan.

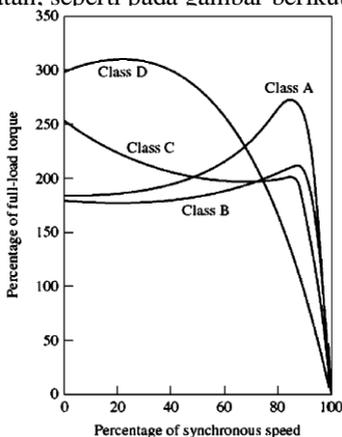
Rotor sangkar tupai pada motor induksi memiliki resistansi rotor yang besarnya tetap, arus starting tinggi dan torsi starting rendah, sehingga lemah dalam mengatasi beban dengan torsi awal yang besar. Permasalahan tersebut dapat diselesaikan dengan mendesain bentuk rotor bar sehingga dapat diperoleh motor induksi dengan karakteristik torsi awal yang tinggi dengan arus *start* yang rendah. *National Electric Manufacturers Association* (NEMA) menetapkan kelas pada motor induksi terbagi atas 4 kelas, yakni kelas A, B, C, dan D disesuaikan dengan desain rotor yang ditetapkan. Berikut ini adalah desain batang rotor berdasarkan NEMA:



Gambar 2.4. Laminasi rotor motor induksi [5]

(a) Kelas A – batang rotor lebar dan dekat dengan permukaan, (b) Kelas B – batang rotor lebar dan dalam, (c) Kelas C – desain *double-cage* rotor, (d) Kelas D – batang rotor kecil yang dekat dengan permukaan

Desain batang rotor yang dibedakan menjadi beberapa kelas ini dapat digunakan sesuai dengan kebutuhan beban pada motor induksi. Pada klasifikasi motor kelas A, motor didesain dengan standar, yaitu torsi awal normal dan slip rendah. Torsi dan kecepatan berbanding lurus sampai pada kecepatan tertentu hingga motor mencapai beban penuh, ketika kecepatan motor ditingkatkan, maka torsi akan kembali turun sampai nol. Untuk kelas B, torsi awal yang dihasilkan normal, arus rendah dan slip rendah. Torsi awal motor pada kelas B sama dengan kelas A, hanya saja arus yang dihasilkan berkurang. Desain ini memiliki torsi beban penuh yang lebih rendah dibandingkan dengan desain A, namun memiliki torsi mula yang lebih tinggi. Pada kelas C, memiliki torsi awal yang tinggi dengan arus awal rendah dan slip rendah pula. Tipe motor ini didesain dengan *double-cage* rotor, sehingga harganya lebih murah daripada motor kelas sebelumnya. Sedangkan untuk desain kelas D, memiliki torsi awal yang paling tinggi diantara kelas lainnya, yaitu 275% atau lebih dari rating torsiya dan arus awal yang rendah, serta slip yang tinggi. Tipe kelas ini cocok untuk aplikasi dengan perubahan beban dan kecepatan secara mendadak, seperti crane dan elevator. Karakteristik motor induksi digambarkan dalam kurva torsi beban penuh vs kecepatan, seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.5. Karakteristik torsi vs kecepatan pada berbagai kelas motor induksi [5]

Berdasarkan klasifikasi kelas yang telah dipaparkan, dapat menentukan tingkat kesesuaian motor induksi dalam mengatasi beban yang diberikan. Sehingga dapat diketahui jenis motor induksi yang sesuai untuk beban yang bervariasi.

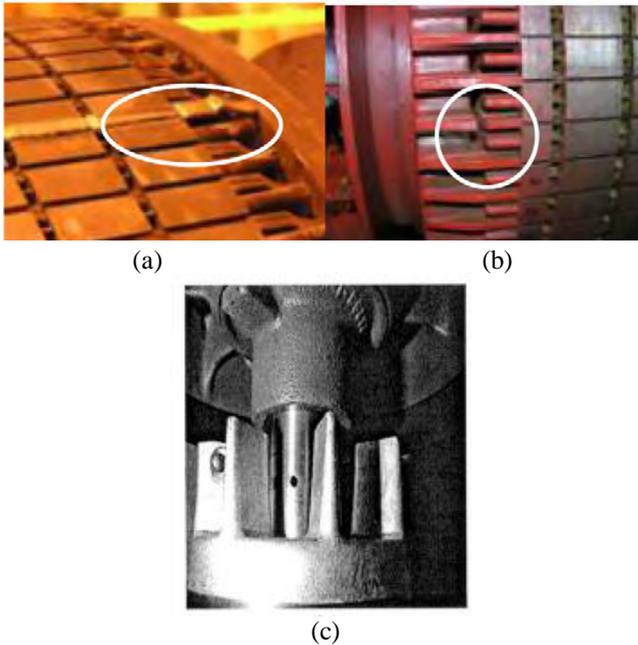
2.2 Kerusakan Batang Rotor Pada Motor Induksi

Motor induksi merupakan peralatan industri yang peranannya sangatlah dibutuhkan, karena keandalannya cukup tinggi disbanding dengan peralatan elektromekanikal yang lain. Namun, bukan berarti motor induksi tidak memiliki gangguan yang akan menimbulkan kerusakan. Kerusakan yang sering terjadi pada motor induksi terletak pada bagian stator ataupun rotornya. Sebuah survei yang telah dilakukan oleh *Electrical Power Research Institute* (EPRI), menyatakan bahwa sekitar 8% dari total 6312 kasus kerusakan motor induksi diakibatkan karena masalah pada rotor [2]. Jumlah ini diperkuat oleh data dari IEEE-IAS yang juga melakukan survei dan menemukan sekitar 9% dari 1141 kasus kerusakan motor diakibatkan karena kerusakan pada rotornya [2]. Jumlah ini mungkin terlihat lebih sedikit bila disbanding dengan kerusakan *bearing*, namun masalah ini juga dapat menimbulkan masalah yang serius jika tidak segera diatasi.

Saat motor induksi beroperasi, stator pada motor induksi akan menghasilkan medan putar dengan frekuensi sumbernya. Selanjutnya terjadi induksi tegangan menghasilkan aliran arus pada kumparan rotor yang memiliki jumlah kutub yang sama dengan kutub stator. Saat batang rotor pada motor induksi mengalami kerusakan, maka konduktor batang rotor akan mengalami penurunan kemampuan mengalirkan arus yang kemudian dibebankan pada konduktor batang rotor yang lain. Beberapa hal yang dapat menyebabkan kerusakan pada batang rotor motor induksi antara lain adalah sebagai berikut:[4]

1. Adanya tingkat pemanasan yang sangat parah, sehingga menyebabkan rusaknya laminasi dan mencairnya sambungan antara bagian batang rotor dan *end ring* motor induksi.
2. Pecahnya batang rotor karena gesekan ataupun benturan yang dimungkinkan terjadi saat maintenance.
3. Gaya sentrifugal yang besar sehingga mengakibatkan terangkatnya batang rotor dari slotnya

4. Rusaknya batang rotor, karena pengaruh *electrical arcing* pada motor induksi



Gambar 2.6. Kerusakan Batang Rotor [3]

(a) Terangkatnya batang rotor, (b) Pecahnya sambungan antara batang rotor dan *end ring*, (c) Batang rotor yang berlubang

Pada saat motor mulai dinyalakan atau dapat disebut dengan kondisi *starting*, arus rotor yang dihasilkan pada motor induksi lebih tinggi lima sampai enam kali dibandingkan dengan arus normal pada keadaan tunak, khususnya pada pengguna *Direct On-Line (DOL) starter*. Pada kondisi tersebut, kerusakan pada batang rotor menjadi terlihat lebih jelas disbandingkan dengan saat motor induksi telah mencapai kondisi *steady state*. Namun, kekurangan yang terjadi dari analisis yang dilakukan pada kondisi ini adalah kecepatan motor yang masih mudah berubah, sehingga dapat mempengaruhi besar amplitude tegangan dan frekuensi, serta

periode yang dibutuhkan untuk mengamati efek kerusakan berlangsung sangat cepat.

Apabila terjadi kerusakan batang rotor pada motor induksi yang cukup signifikan, dapat menyebabkan operasi pada industri tidak bekerja, karena tidak mampu membangkitkan torsi percepatan yang cukup. Oleh karena itu, sangatlah penting untuk dapat mendeteksi kerusakan pada batang rotor motor induksi selagi masih dini.

2.3 Deteksi Kerusakan Rotor Pada Motor Induksi

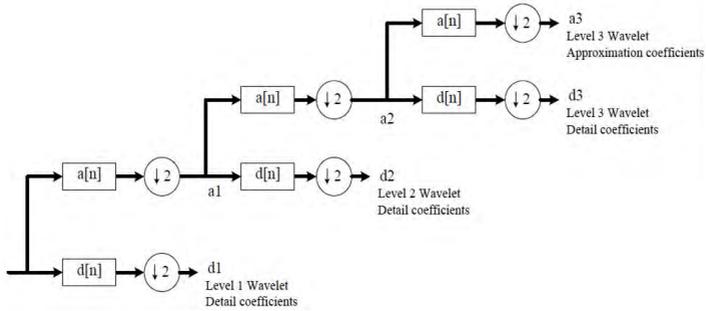
Kerusakan yang terjadi pada batang rotor motor induksi akan menghasilkan karakteristik frekuensi harmonisa yang spesifik. Hal ini berhubungan dengan harmonisa orde tinggi pada arus stator yang didapatkan dengan menggunakan metode-metode pengolahan sinyal. Beberapa teknik deteksi kerusakan motor induksi yang telah diketahui adalah *motor current signature analysis* (MCSA) dan *vibration monitoring*. MCSA merupakan proses pembacaan arus motor dicatat dan dianalisis dalam domain frekuensi. Teknik MCSA dapat mendeteksi kerusakan mekanik hanya dengan menggunakan sensor arus. Sinyal lain yang dapat dimonitoring adalah tegangan stator, vibrasi *shaft*, *stray flux*, torsi elektromagnetik, temperature, noise dan kecepatan. Teknik ini banyak digunakan dengan berbasis *Fast Fourier Transform* (FFT). FFT merupakan algoritma sederhana yang efisien untuk menghitung *Discrete Fourier Transform* (DFT). Teknik ini menyatakan bahwa adanya perbedaan signifikan pada spectrum harmonisa antara arus stator motor induksi dalam keadaan sehat dan rusak. Namun, teknik ini memiliki keterbatasan, yaitu tidak dapat mendeteksi kerusakan ketika motor di operasikan dalam kondisi tanpa beban atau dalam pembebanan yang rendah. Pada proses monitoring vibrasi, sinyal ini diukur dengan menggunakan sensor vibrasi yang dipasang pada rangka stator dan spectrum dihitung menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT). Kelemahan dari teknik metode ini adalah dari segi biaya, dimana sensor vibrasi yang digunakan, yaitu *accelerometer* memiliki harga yang cukup tinggi.

Dari keterbatasan teknik yang telah diuraikan diatas, dikembangkanlah metode *wavelet* dan *hilbert transform*. Sebagai solusi dari penyelesaian proses deteksi pada kerusakan batang rotor motor induksi.

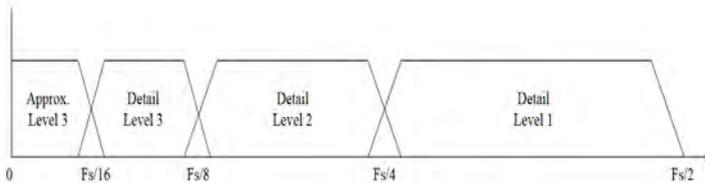
2.4 Wavelet

Transformasi wavelet adalah sebuah transformasi matematika yang digunakan untuk menganalisis sinyal bergerak. Metode Transformasi berbasis wavelet merupakan salah satu cara untuk dapat digunakan untuk menganalisis sinyal-sinyal non-stasioner. Metode ini juga digunakan untuk mendeteksi kejadian-kejadian tertentu serta dapat digunakan untuk pemampatan data [4]. Selain itu, Transformasi wavelet juga dapat digunakan untuk analisis sinyal-sinyal non-stasioner (yaitu sinyal yang kandungan frekuensi bervariasi terhadap waktu), karena berkaitan dengan kemampuannya untuk memisah-misahkan berbagai macam karakteristik pada berbagai skala [4]. Kelebihan dari analisis sinyal menggunakan wavelet adalah bahwa dapat dipelajari karakteristik sinyal secara lokal dan detail, sesuai dengan skala yang dimiliki.

Transformasi ini hampir menyerupai transformasi fourier, yaitu membentuk pengklasifian sinyal menjadi bentuk sinusoidal dengan berbagai macam frekuensi. Discrete Wavelet Transform (DWT) merupakan seri pengembangan transformasi wavelet. DWT digunakan untuk menganalisis sinyal pada frekuensi yang berbeda dengan resolusi yang berbeda melalui dekomposisi sinyal. DWT bekerja pada dua kumpulan fungsi, yaitu fungsi penskalaan dan fungsi pergeseran parameter. DWT dapat mengubah sinyal sumber menjadi dua klasifikasi sinyal, yaitu sinyal dengan frekuensi tinggi dengan resolusi waktu yang tinggi dan frekuensi rendah dengan resolusi waktu yang tinggi. Sinyal ini bekerja pada dua filterisasi DWT, yaitu *highpass filter* dan *lowpass filter* agar frekuensi dari sinyal tersebut dapat dianalisis. Setelah melewati proses filterisasi, dilanjutkan dengan operasi sub-sampling dengan mengambil masing-masing setengah dari keluaran filter. Proses tersebut disebut dengan proses dekomposisi. Proses dekomposisi dapat dilakukan secara berlanjut dengan memperhatikan level yang digunakan, hingga menghasilkan tingkatan dekomposisi yang sesuai.



Gambar 2.7. Wavelet Tree dengan tiga level dekomposisi [4]



Gambar 2.8. Klasifikasi dalam wavelet tiga level dekomposisi [4]

Proses dekomposisi ini dapat melalui satu atau lebih dalam tingkatan. Dekomposisi dengan rumus pada persamaan 1 dan 2 dapat digunakan pada masing-masing tingkatan.

$$y_{tinggi}[k] = \sum_n x[n]h[2k - n] \quad (2)$$

$$y_{rendah}[k] = \sum_n x[n]g[2k - n] \quad (3)$$

$y_{tinggi}[k]$ dan $y_{rendah}[k]$ adalah hasil dari *highpass filter* dan *lowpass filter*, $x[n]$ merupakan sinyal asal, $h[n]$ adalah *highpass filter* dan $g[n]$ adalah *lowpass filter*. DWT dapat dikatakan lebih sensitive dalam menunjukkan perubahan bentuk sinyal pada rentang frekuensi tertentu dan mampu mendeteksi tren dan kemiripan dari beberapa sinyal yang sedang diproses.

2.5 Hilbert Transform

Dalam teknik analisis data telah ditemukan suatu metode oleh N.E Huang, yaitu transformasi Hilbert. Berbeda dengan transformasi fourier, transformasi Hilbert lebih berupa algoritma (pendekatan empiris) yang dapat diaplikasikan ke kumpulan data. Transformasi Hilbert merupakan fungsi yang menggeser fase pada suatu sinyal sebesar $\pm\pi/2$. Transformasi Hilbert dapat pula disebut sebagai *all pass filter*. Transformasi Hilbert hanya menggeser fase sinyal dan tidak mengubah spectrum amplitude dari sinyal. Tujuan dari transformasi ini adalah untuk menghasilkan sinyal imajiner dari sinyal nyata. Sinyal nyata, yaitu $i(t)$ dapat ditunjukkan pada *instantaneous amplitude* (IA) adalah sebagai berikut:

$$i(t) = A(t) \cdot \cos(\emptyset(t))$$

Dengan nilai $A(t)$ dan $\emptyset(t)$, yaitu

$$A(t) = [x^2(t) + y^2(t)]^{1/2} \quad \emptyset(t) = \arctan x(t)/y(t)$$

Nilai $A(t)$ merupakan nilai nilai *envelope* atau disebut juga nilai amplitude sesaat (*instantaneous amplitude*), sedangkan untuk $\emptyset(t)$ disebut dengan fase sesaat (*instantaneous phase*) yang merupakan sudut yang terbentuk antara komponen riil dan imajiner.

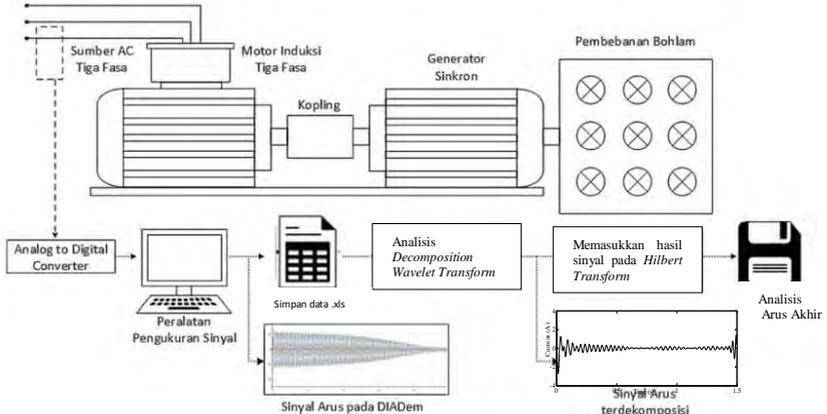
Pada *instantaneous amplitude* dapat dilakukan beberapa langkah untuk dapat mengklasifikasikan fungsi tersebut. Salah satu langkah yang dapat menjelaskan algoritma ini adalah dengan menggunakan interpolasi antara minimal (rep. maxima) dan berakhir dengan beberapa envelope. Interpolasi disini menghasilkan titik-titik data baru dalam suatu jangkauan dari suatu kumpulan data yang telah diketahui. Fungsi ini digunakan untuk mempermudah pengelompokan sinyal dalam kondisi motor sehat maupun rusak. Dari hasil interpolasi akan menghasilkan pendekatan sinyal hingga menjadi fungsi sederhana. Dalam hal ini, hasil pendekatan yang dihasilkan akan terlihat perbedaan nilai puncak pada kondisi rotor pada motor induksi dalam keadaan sehat ataupun mengalami kerusakan.

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM DETEKSI KERUSAKAN BATANG ROTOR MOTOR INDUKSI MENGGUNAKAN ANALISIS ARUS MULA BERBASIS *HILBERT TRANSFORM*

3.1 Konfigurasi Sistem

Sistem pada tugas akhir ini menggunakan analisis arus mula berbasis *Hilbert Transform*. Pengujian yang dilakukan berdasarkan pada pengambilan arus mula (*starting*) pada batang rotor motor induksi. Pengujian sistem ini membutuhkan beberapa peralatan, antara lain adalah motor induksi tiga-fasa, generator sinkron, beberapa buah lampu, *Analog to Digital Converter* berupa suatu *module* yang terdiri dari cDAQ-9171 dan NI 9215, *power analyzer*, mesin bor, kunci, obeng, palu, tang, serta seperangkat *listing* pengolahan sinyal dalam sebuah *software* terprogram. Gambaran sistem deteksi kerusakan batang rotor pada motor induksi berbasis *Hilbert Transform* pada Tugas Akhir ini secara sederhana ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Gambaran Sistem Pada Tugas Akhir

Pada Tugas Akhir ini digunakan motor induksi tiga-fasa dengan kapasitas sebesar 2HP atau setara dengan 1.492 kW. Motor induksi disusun dengan koneksi bintang (Y) sehingga memiliki tegangan

rating sebesar $V_L = 380$ V dan arus rating sebesar $I_L = 3,44$ Ampere. Pembebanan mekanis yang digunakan pada pengujian ini berupa generator sinkron yang terkopel dengan motor. Kemudian generator sinkron dibebani elektrik secara bervariasi dengan tiga jenis, yaitu 300, 600 dan 900 Watt. Berikut ini merupakan data parameter dari motor induksi tiga-fasa, generator sinkron dan data akuisitor:

Tabel 3.1. Data Motor Induksi Tiga-Fasa

Parameter	Nilai
Merk	Tatung
Model	R330
Frame	
Daya Rating	1.5 kW / 2 HP
Jumlah Pole	4
Tegangan Rating	220 / 380 V
Arus Rating	3.94 / 3.44 A
Frekuensi	50 Hz
Isolasi	F
Kecepatan Rating	1380 rpm
Jumlah Konduktor Rotor	28
Ambient	40°C
F.L. Efisiensi	78.6%
F.L. Input	1.91 kW
IP	55

Tabel 3.2. Data Generator Sinkron Tiga-Fasa

Parameter	Nilai
Merk	Shantol
Tipe	GTR-5-TH
No.	929
Daya Rating	5 kW
Jumlah Pole	4
Tegangan Rating	400 V
Arus Rating	9.02 A
Frekuensi	50 Hz
Kecepatan Rating	1500 rpm
Faktor Daya	0.8
Tipe Isolasi	E/B

Tabel 3.3. Data cDAQ-9171 [8]

Parameter	Nilai
Merk	National Instruments
TipeProduk	Chassis
Part Number	781425-01
Jumlah Slot	1
Total Daya	2.6 W
RangeTegangan Input	4.75 V 5.25 V
Counters	4
Resolusi	32 bit

Tabel 3.4. Data NI 9246 [9]

Parameter	Nilai
Merk	National Instruments
Deskripsi	Continuous Analog Input Module
Interval Pengukuran	AC 22Arms Continuous $\pm 30A$ peak input 50/60 Hz
Isolasi	300 Vrms V_{LN} 480 Vrms V_{LL} CAT II (screw terminal)
Sampling per channel	50kS/s
Resolusi	24 Bit
Temperatur	-40°C to 70°C

Pada Tugas Akhir ini pengambilan data dilakukan pada frekuensi sampling sebesar 5 kHz dengan jumlah data 25.000 samples selama 5 sekon. Kemudian data yang dihasilkan disimpan dalam format file TDMS (*Technical Data Management Streaming*). Setelah data tersebut didapatkan, dilakukan pemotongan sinyal dengan *software* diAdem dan menghasilkan data sekitar 5000 samples selama 1 sekon.

Penetapan nilai parameter sampling dilakukan berdasarkan persamaan (3.1) dan (3.2), sebagai berikut :

$$fs = \frac{n}{t} \quad (3.1)$$

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (3.2)$$

Dengan:

f_s = Frekuensi sampling

n = Banyak data

t = Waktu total yang dibutuhkan

T_s = Periode sampling

Hasil sampling ini ditampilkan dalam bentuk data numerik dan grafis. Data numerik merupakan data yang berupa angka sebagai posisi bersebaran titik yang membentuk gelombang sinyal. Sedangkan data grafis adalah data yang mensajikan bentuk gelombang sinyal dalam gambar. Data sinyal arus yang telah dipotong, kemudian disimpan dalam format file xls. Data keluaran arus tersebut menjadi data masukan pada proses pengolahan sinyal berbasis *decomposition wavelet transform* dan *Hilbert transform* menggunakan software MATLAB.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 3.2. Peralatan yang dibutuhkan:

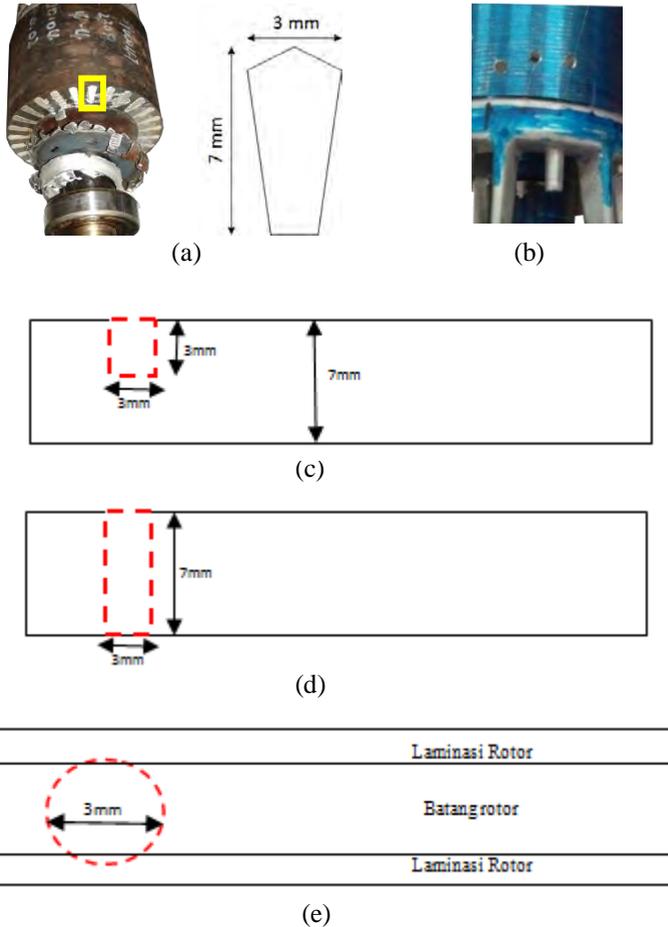
(a) Motor induksi 3 fasa 2HP, (b) cDAQ-9171 dan NI 9215, (c) Generator sinkron
(d) Power analyzer dan (e) Load bank

Perancangan sistem deteksi kerusakan batang roto pada motor induksi ini difokuskan berdasarkan kondisi arus motor. Data yang diambil pada saat pengujian adalah data tiga fasa (R-S-T), namun data yang digunakan adalah data arus salah satu fasa dari motor induksi tiga-fasa.

3.2 Pengondisian Kerusakan Batang Rotor pada Motor Induksi

Pengondisian kerusakan batang rotor pada motor induksi dilakukan dengan memberikan kecacatan berupa lubang. Rekonstruksi kerusakan pada pengujian dilakukan dengan melubangi batatang rotor dengan mesin bor. Sistematis melubangi batang rotor pada motor induksi dengan cara bertahap. Pertama, batang rotor dilubangi sedalam 3mm dengan diameter 3mm (1BRB 3mm). Kedua, lubang pertama yang telah ada, dilubangi lebih dalam hingga kedalaman menjadi 7mm dengan diameter 3mm (1BRB 7mm). Ketiga, lubang ditambah satu dengan kedalaman 3mm dan diameter 3mm (2BRB 7mm dan 3mm). Keempat, lubang kedua ditambah kedalamannya hingga menjadi 7mm dengan diameter 3mm (2BRB 7mm dan 7mm). Kelima, lubang ditambah satu kembali dengan kedalaman 3mm dan diameter 3mm (3BRB 7mm, 7mm dan 3mm). Keenam, lubang terakhir ditambah kedalamannya hingga menjadi 7mm dengan diameter 3mm (3BRB 7mm, 7mm dan 7mm). Pemilihan kedalaman dan diameter lubang pada batang rotor disesuaikan agar tidak merusak bagian laminasi dalam rotor. Hal tersebut agar kerusakan dari batang rotor tidak terlalu parah, karena bila terlalu parah dapat menimbulkan bunga api yang berdampak pada

rusaknya komponen motor induksi yang lain. Pelubangan diberikan pada konduktor batang rotor dengan tujuan agar batang rotor tersebut patah.

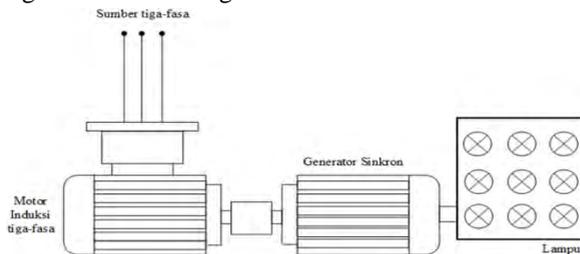


Gambar 3.3. (a) Bentuk penampang batang rotor, (b) BRB dengan kedalaman 3mm tampak samping. Bentuk pengondisian kerusakan bar rotor tampak samping: (c) Kerusakan sedalam separuh dari kedalaman total, (d) Kerusakan sedalam kedalaman total, (e) Seluruh kerusakan berdiameter 3 mm dari tampak atas

Pada kenyataan yang berada di lapangan, kerusakan batang rotor pada motor induksi yang terjadi kemungkinan dengan besaran yang tidak sama dan tidak dapat ditentukan.

3.3 Pembebanan Mekanis dan Elektris

Pengujian yang dilakukan untuk mengambil data arus motor induksi tidak hanya dilakukan dengan memberikan kecacatan berupa lubang yang berbeda pada batang rotor motor induksi, namun perlu adanya variasi pembebanan pada motor. Pembebanan yang bervariasi diperlukan untuk menghasilkan data arus input motor induksi dengan kerusakan batang rotor pada setiap kondisi pembebanan yang berbeda. Besar pembebanan yang diberikan dapat mempengaruhi magnitudo dan bentuk sinyal arus dari motor induksi tersebut. Dalam Tugas Akhir ini, pembebanan mekanis yang digunakan adalah generator sinkron. Motor induksi dikopel dengan generator sinkron yang dibeban oleh rangkaian bola lampu dengan daya masing-masing sebesar 100 Watt. Pembebanan dengan lampu disebut dengan pembebanan elektris. Sistem kerja yang dibangun adalah generator sinkron akan memberikan torsi lawan pada motor induksi sehingga akan terjadi proses pengereman pada motor induksi. Skema pembebanan mekanis dan elektris pada motor induksi digambarkan dalam gambar 3.4 berikut:



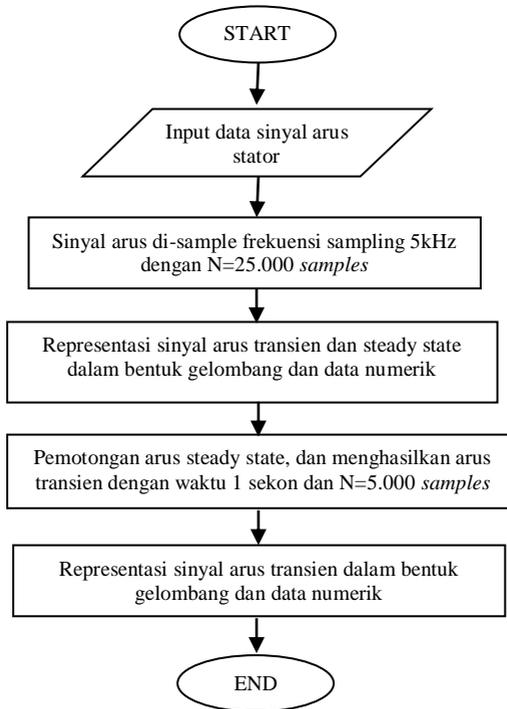
Gambar 3.4. Skema pembebanan mekanis dan elektris

Daya rating yang dimiliki oleh motor induksi sebesar 1,5 kW atau setara dengan 2HP. Oleh karena itu, total beban yang dapat diberikan maksimal 1.500 Watt atau setara dengan total daya keluaran maupun input motor. Variasi beban yang diberikan pada saat pengujian dilakukan secara bertahap. Ketika motor induksi terkopel dengan generator dilakukan pembebanan dengan 4 tahapan, yaitu saat keadaan tanpa beban atau 0 Watt, 3 buah bohlam atau 300 Watt, 6 buah bohlam atau 600 Watt dan 9 buah bohlam atau 900 Watt.

Proses pembebanan mekanis yang diberikan pada motor induksi dapat mengakibatkan mechanical stress yang ditimbulkan oleh vibrasi atau getaran, karena beban mekanis bersifat *pulsating*. Vibrasi atau getaran pada generator ataupun motor induksi yang sedang beroperasi. Hal yang ditimbulkan dapat membuat arus yang mengalir kedalam motor induksi menjadi semakin besar dan tidak konstan. Akibat dari hal ini adalah adanya kemungkinan kesalahan dalam pengukuran sehingga menyebabkan error yang mungkin akan terjadi. Sehingga pendeteksian kerusakan batang rotor pada motor induksi dapat menjadi kurang akurat. Oleh karena itu, mekanisme *coupling* antara generator sinkron dengan motor induksi harus dapat diperhatikan dengan benar

3.4 Akuisisi Data

Pada Tugas Akhir ini A/D *converter* yang digunakan untuk data akuisisi adalah cDAQ-9171 dan NI 9215. Frekuensi sampling yang digunakan adalah 5kHz, maka dalam satu sekon terdapat 5.000 data dengan periode 0,2ms. Sinyal arus mula akan di *sample* pada frekuensi 5.000Hz yang kemudian diubah menjadi sinyal digital. Pengambilan data sinyal arus ini dilakukan selama 5 sekon, sehingga total jumlah data adalah 25.000 *samples*. Pengaturan frekuensi sampling, periode dan jumlah data dilakukan dengan menggunakan software LabView. Hasil sinyal arus akan ditampilkan pada Labview dalam bentuk gelombang arus transien dan steady statenya serta terdapat pula data numeriknya. Bentuk gelombang transien dan data numerik sinyal arus tersebut disimpan dalam format .tdms yang dapat dilihat didalam *software* diAdem. Dari data sinyal arus tersebut, dilakukan pemotongan arus hingga diambil hanya bagian transiennya saja. Sinyal arus mula tersebut dipotong hingga waktu 1 detik, maka jumlah data adalah 5.000 *samples*. Kemudian data numeric yang diperoleh disimpan dalam format .xls agar data numerik tersebut dapat digunakan pada *software* MATLAB. Adapun proses akuisisi data akan dijelaskan pada diagram berikut:



Gambar 3.5. Diagram alur akuisisi data

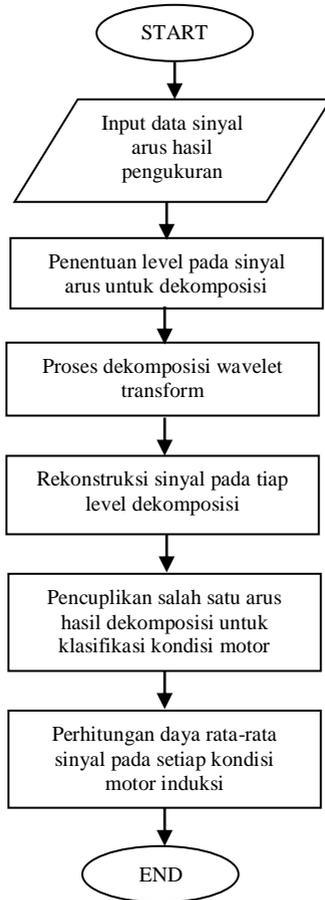
3.5 Listing Decomposition Wavelet Transform

Pada Tugas Akhir *listing decomposition wavelet transform* diperlukan untuk mengolah sinyal arus hasil pengukuran sehingga nantinya mampu dideteksi kondisi batang rotor pada motor induksi dalam keadaan sehat atau mengalami kerusakan. Discrete wavelet transform akan berusaha mendapatkan fungsi waktu dan skala melalui proses sampling dan penggunaan filter digital atau dinamakan dekomposisi. Secara garis besar proses pemecahan sinyal dengan menggunakan fungsi *highpass* dan *lowpass filter*, modifikasi sinyal berdasarkan fungsi skala dan waktu, rekonstruksi sinyal pada setiap level koefisiennya. Proses ini dinamakan dengan proses dekomposisi. Adapun spesifikasi dekomposisi yang digunakan dalam tugas akhir ini dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.5. Spesifikasi wavelet

Spesifikasi	
Jenis	Deubaches (db)
Orde	29
Level Dekomposisi	7
Frekuensi sampling	5 kHz

Pada tugas akhir ini listing discrete wavelet transform dilakukan dengan menggunakan wavelet berjenis Deubaches. Wavelet jenis ini dipilih karena dapat digunakan untuk mengolah sinyal arus hasil pengukuran yang bersifat asimetri. Pemilihan jenis wavelet yang salah akan menyebabkan error pada proses pengolahan sinyal. Orde wavelet dipilih 29 untuk meminimalisir adanya *overlapping* dalam proses klasifikasi frekuensi. Adanya *overlapping* akan menyebabkan error dalam pengolahan sinyal sehingga akan susah dalam proses analisis. Selain itu, *overlapping* dapat merusak band frekuensi yang berada pada masing-masing level dekomposisi. Seluruh proses ini dilakukan dengan melibatkan *software* terprogram untuk memudahkan proses pengolahan sinyal. Bentuk *listing decomposition wavelet transform* berada pada lampiran 2.

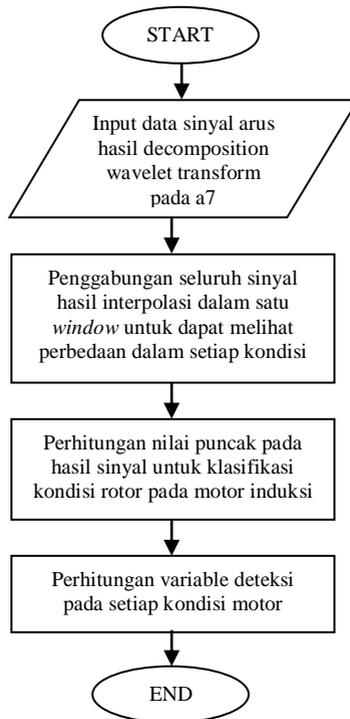


Gambar 3.6. Diagram alur *Decomposition Wavelet Transform*

3.6 Listing Hilbert Transform

Pada Tugas Akhir ini, selain metode *wavelet* terdapat metode lanjutan yang digunakan untuk pendeteksian kerusakan batang rotor pada motor induksi untuk lebih akurat, yaitu metode transformasi *Hilbert*. Metode ini digunakan karena dapat melihat perbedaan pada kondisi rotor sehat maupun rusak dengan menggunakan sistem pendekatan titik-titik sinyal. Metode ini merupakan lanjutan dari proses *wavelet* yang selanjutnya sinyal yang telah dihasilkan akan dilakukan pendekatan nilai hingga menghasilkan sinyal baru untuk dapat terlihat lebih jelas grafik sinyal pada kondisi motor.

Analisis transformasi Hilbert dilakukan dengan menggunakan *software* pengolahan sinyal terprogram MATLAB, setelah dilakukan pengambilan data arus mula pada rotor motor induksi. Alur metode ini dilakukan setelah sinyal dari metode *decomposition wavelet transform* telah diolah. Sinyal dari hasil dekomposisi tersebut, ditentukan nilai *extrema* dan diidentifikasi untuk mencari nilai *local minima* dan *maxima*. Kedua nilai tersebut kemudian diolah menggunakan interpolasi untuk mendapatkan bentuk *upper envelope* dan *lower envelope*. Hasil interpolasi merupakan pendekatan nilai asli untuk menghasilkan sinyal arus yang lebih sederhana. Sinyal sederhana ini digunakan untuk dapat mengklasifikasikan sinyal pada kondisi batang rotor motor induksi. Selanjutnya dilakukan analisis dengan melihat nilai puncak pada masing-masing grafik sinyal yang telah diperoleh. Dari puncak yang dihasilkan dapat dibedakan kondisi batang rotor pada motor induksi dalam keadaan sehat atau rusak. Bentuk *listing Hilbert Transform* berada pada lampiran 3. Secara garis besar metode ini dapat dijelaskan dengan alur sebagai berikut :



Gambar 3.7. Diagram alur *Hilbert Transform*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS KERUSAKAN BATANG ROTOR PADA MOTOR INDUKSI BERBASIS *HILBERT TRANSFORM*

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil pengujian sistem deteksi kerusakan batang rotor pada motor induksi yang telah dibuat dan dilakukan analisis mengenai data-data yang diperoleh dari pengujian tersebut. Sistem yang diterapkan bekerja pada motor dalam kondisi on-line atau beroperasi, sehingga data yang dihasilkan *real-time* serta menghasilkan arus transien. Sistem tersebut ditunjang dengan peralatan pencuplikan arus pencuplikan arus dan beberapa jenis *software* terprogram. Proses pensamplingan arus motor ini dilakukan dengan menggunakan cDAQ National Instrument yang diatur menggunakan *software* LabVIEW.

Pada pengujian yang dilakukan, frekuensi sampling yang digunakan adalah 5kHz dengan jumlah data 25.000 *samples* selama 5 sekon. Terdapat tujuh jenis kondisi yang diberikan pada batang rotor motor induksi. Tujuh kondisi tersebut, yaitu saat batang rotor masih dalam kondisi normal, kemudian rotor diberi satu cacat lubang (1BRB) sedalam 3mm, selanjutnya kedalaman pada satu lubang tersebut ditambah hingga 7mm, dilanjutkan penambahan satu cacat lubang kembali sedalam 3mm (2BRB), kemudian kedalaman pada lubang tersebut ditambah hingga 7mm, dilanjutkan penambahan satu cacat lubang kembali dengan kedalaman 3mm (3BRB), kemudian kedalaman pada lubang tersebut ditambah hingga 7mm. selain itu, sistem juga dilakukan pada lima tingkatan pembebanan pada motor, yakni ketika motor beroperasi tanpa kopel generator dan motor beroperasi dengan terkopel generator dengan dibebani oleh rangkaian bohlam dengan variasi daya sebesar 0 Watt, 300 Watt, 600 Watt dan 900 Watt. Terkopelnya rotor generator dan rotor motor menyebabkan peningkatan induksi elektromagnetik yang terjadi antara stator dengan rotor pada motor induksi. Sehingga perubahan beban bohlam pada generator dapat pula mengubah kondisi arus yang dihasilkan oleh motor. Meskipun motor induksi yang digunakan memiliki rating daya input dan output masing-masing sebesar 1.500 Watt, terdapat pula rugi-rugi yang terjadi pada motor maupun pada generator. Hal ini membuat daya yang dihasilkan oleh motor berbeda dengan daya pada beban generator.

Pengukuran daya yang dihasilkan tersebut menggunakan *power analyzer*. Berikut ini adalah hasil yang diperoleh dari pengukuran, sebagai berikut:

Tabel 4.1. Perbandingan daya beban berupa bohlam dengan dayainput motor

Hubungan dengan Generator	Jumlah Bohlam	Daya Bohlam (W)	Daya Input Motor (W)
Tidak Terkoppel	-	-	100
Terkoppel	0	0	900
Terkoppel	3	300	1.100
Terkoppel	6	600	1.300
Terkoppel	9	900	1.500

Pengujian sistem deteksi ini berfokus pada analisis *Hilbert transform* yang diaplikasikan pada sinyal arus dalam kondisi transien. Pengujian ini akan membandingkan kondisi motor dalam keadaan normal dan dalam keadaan rusak pada batang rotor motor induksi.

4.1 Akuisisi Data

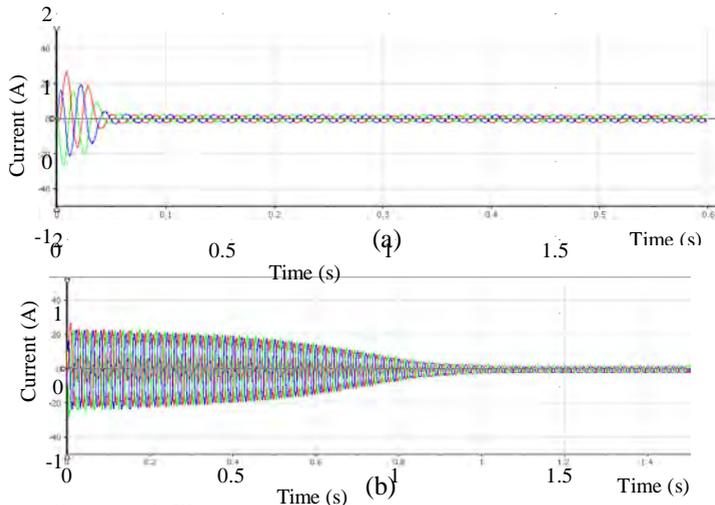
Pada tugas akhir ini akuisisi data yang digunakan melibatkan program LabView dan DiAdem dengan module cDAQ-9171 dan NI 9215 sebagai A/D Converter. Diagram blok sistem dibuat dalam *software* LabView (terlampir). Data yang diinginkan adalah data sinyal arus stator motor induksi dalam keadaan transien (*starting*) dengan frekuensi sampling 5kHz. Pemilihan frekuensi yang tinggi didasarkan oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu kapasitas motor lebih dari 1 HP sehingga dibutuhkan frekuensi sampling yang tinggi pula, dan semakin tinggi frekuensi sampling yang digunakan, maka resolusi akan semakin bagus, sehingga data yang dihasilkan akan semakin akurat.

Perubahan amplitude arus akan terus berubah seiring dengan tingkat pembebanan yang diberikan. Semakin tinggi pembebanan, maka torsi yang dihasilkan semakin besar pula, sehingga amplitude arus yang terbaca semakin tinggi pula. Pernyataan tersebut sesuai dengan rumus sebagai berikut:

$$T = k \cdot \Phi \cdot I_a$$

dimana, T = Torsi, k = konstanta motor induksi, Φ = Fluks, I_a = arus motor

Berikut ini merupakan salah satu bentuk gelombang transien arus stator yang tersample.



Gambar 4.1. *Waveform* sinyal arus stator
 (a) Sinyal arus stator saat starting dengan kondisi tanpa beban
 (b) Sinyal arus stator saat starting dengan kondisi berbeban

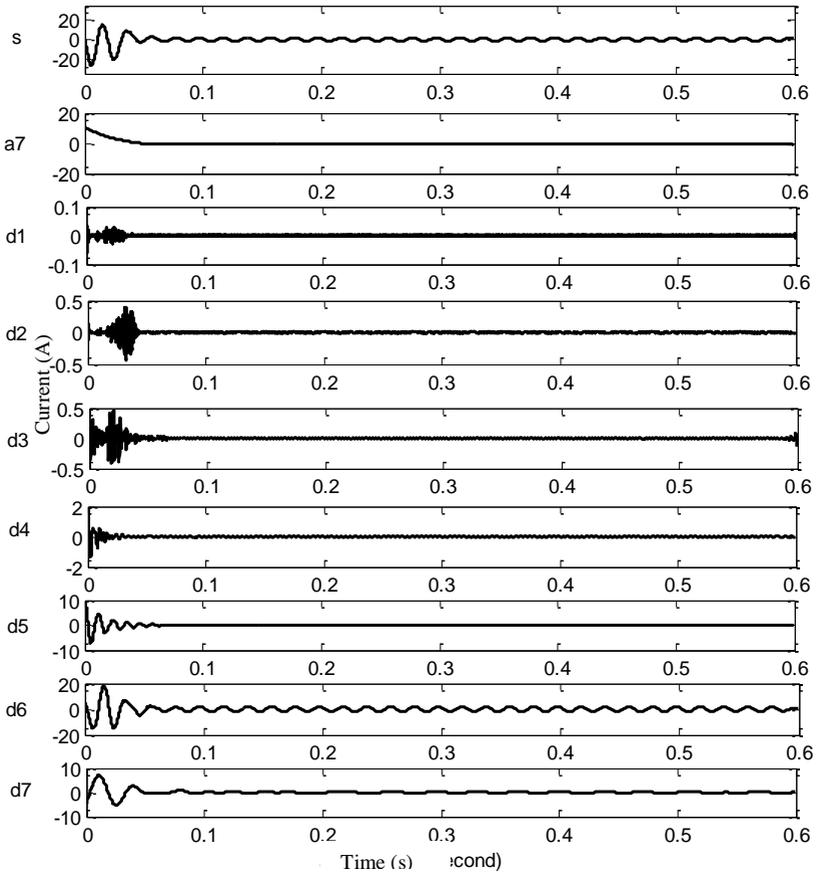
Gelombang transien yang dihasilkan diatas menunjukkan sinyal dengan tiga fasa. Data sinyal arus stator tersebut kemudian akan diolah dengan analisis *decomposition wavelet transform* dan *Hilbert transform*. Pada tugas akhir ini, untuk mendeteksi kerusakan batang rotor motor induksi, sinyal yang akan diolah hanya salah satu fasa saja.

4.2 Pengolahan Sinyal Arus Stator ke dalam Bentuk Dekomposisi Menggunakan Metode Wavelet

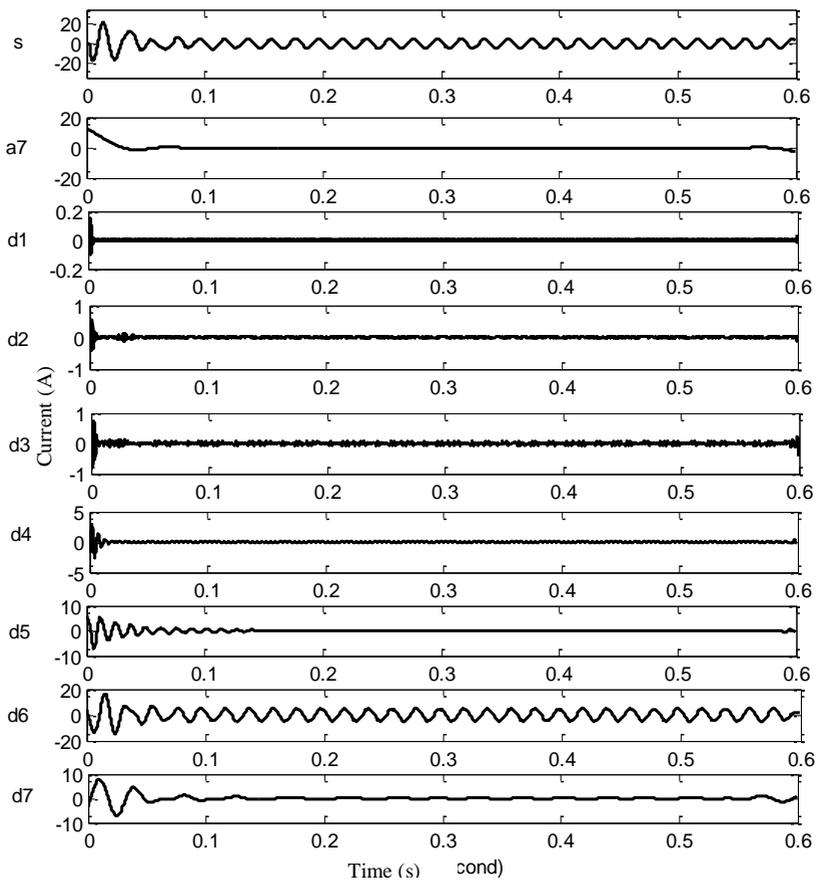
Pengolahan sinyal arus stator dilakukan dengan menggunakan *listing* program *decomposition wavelet transform*. Penguraian ini menerapkan penelusuran titik-titik data dari bentuk gelombang sinyal. Dekomposisi ini dilakukan untuk mengetahui nilai-nilai dan bentuk intrinsik sinyal arus yang ada untuk selanjutnya diproses sebagai klasifikasi kondisi motor.

Decomposition wavelet transform ini menguraikan sinyal arus utama menjadi beberapa model sesuai dengan level yang ditentukan. Level yang digunakan pada dekomposisi kali ini

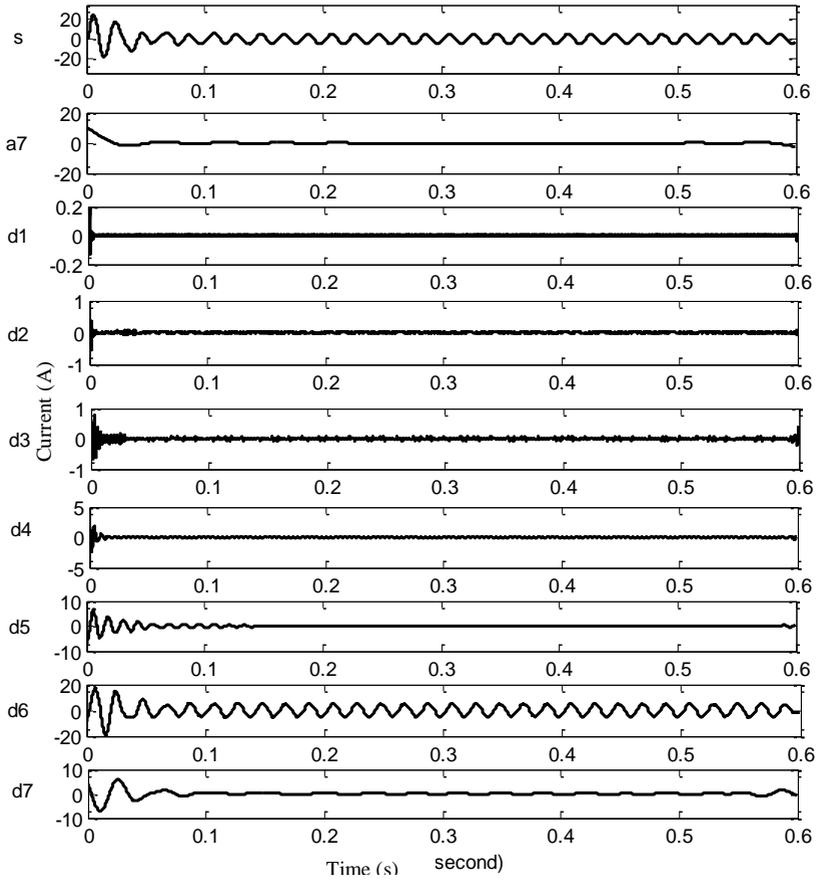
adalah level 7 dengan orde 29. Sedangkan jenis yang digunakan adalah deubaches (db). Berikut ini adalah hasil dekomposisi pada setiap kondisi.



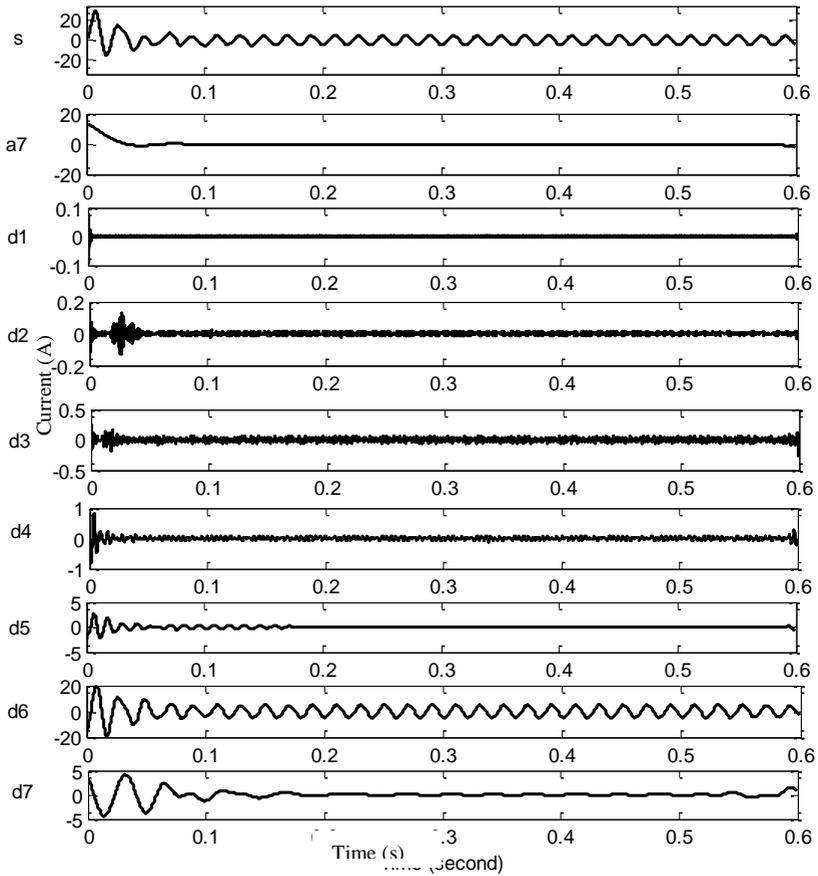
Gambar 4.2. *Decomposition Wavelet Transform* pada motor kondisi normal tanpa beban



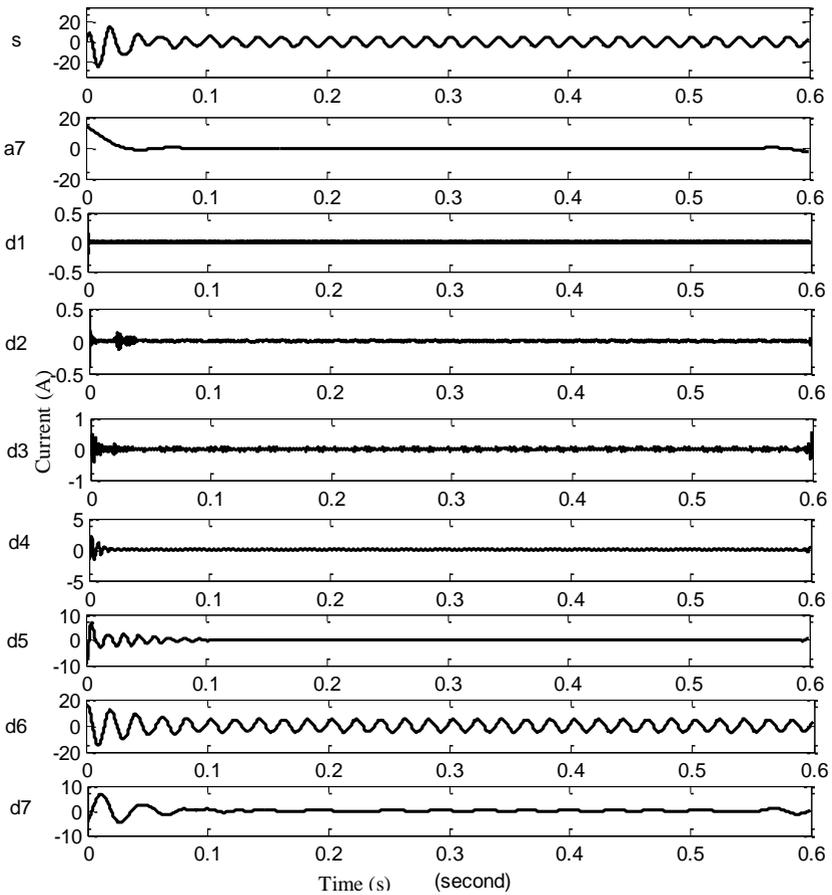
Gambar 4.3. *Decomposition Wavelet Transform* pada motor kondisi 1 *Broken Rotor Bar (BRB)* sedalam 3 mm tanpa beban



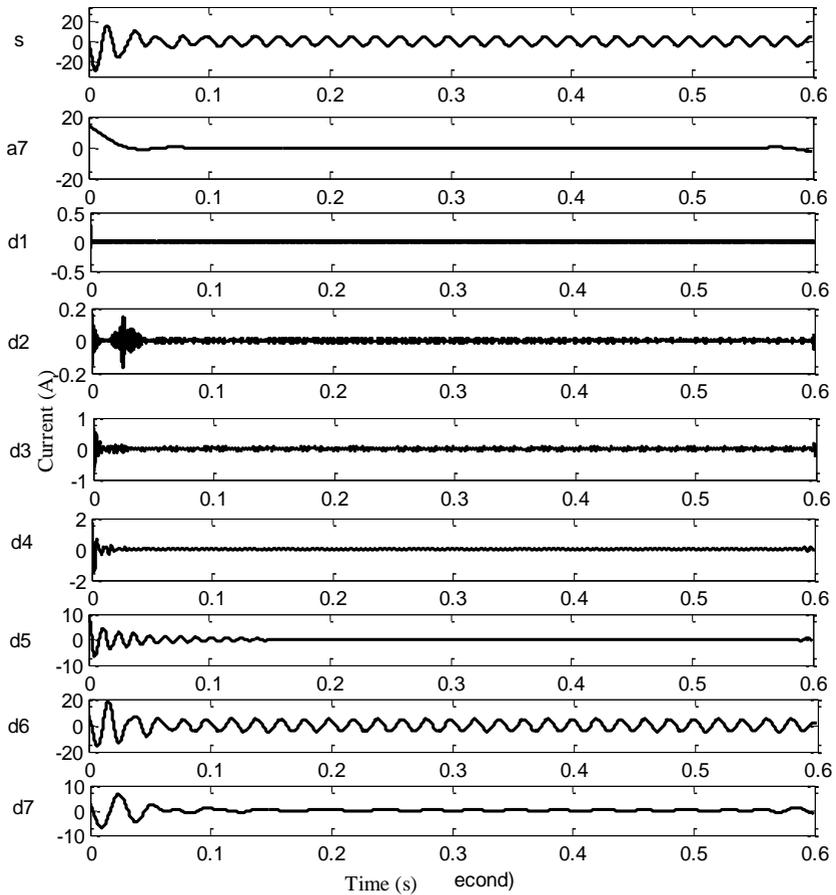
Gambar 4.4. *Decomposition Wavelet Transform* pada motor kondisi 1 *Broken Rotor Bar (BRB)* sedalam 7 mm tanpa beban



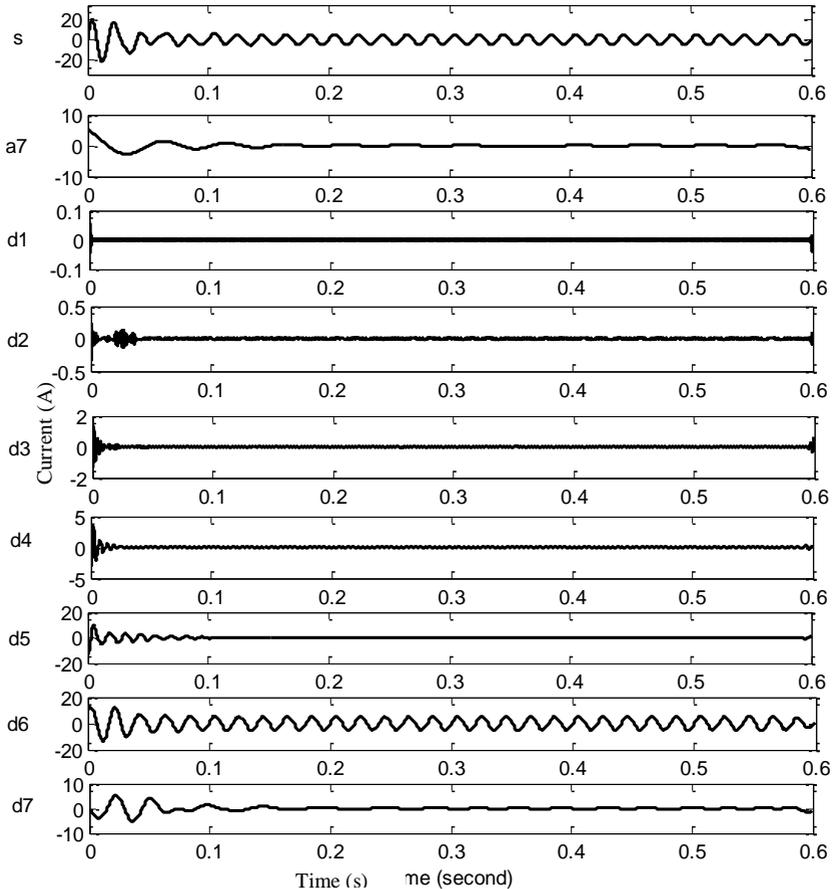
Gambar 4.5. *Decomposition Wavelet Transform* pada motor kondisi 2 *Broken Rotor Bar* (BRB) sedalam 7 mm dan 3mm tanpa beban



Gambar 4.6. *Decomposition Wavelet Transform* pada motor kondisi 2 Broken Rotor Bar (BRB) sedalam 7 mm dan 7mm tanpa beban



Gambar 4.7. *Decomposition Wavelet Transform* pada motor kondisi 3 *Broken Rotor Bar (BRB)* sedalam 7 mm, 7mm dan 3mm tanpa beban



Gambar 4.8. *Decomposition Wavelet Transform* pada motor kondisi 3 *Broken Rotor Bar (BRB)* sedalam 7 mm, 7mm dan 7mm tanpa beban

Dari gambar dekomposisi yang telah dihasilkan, tidak terlihat dengan jelas perbedaan arus yang dihasilkan dalam setiap kondisi. Maka, harus terdapat pencuplikan salah satu grafik sinyal arus untuk kemudian dapat dibedakan batang rotor pada motor induksi dalam kondisi sehat atau rusak.

4.3 Perumusan Variabel Deteksi Sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform*

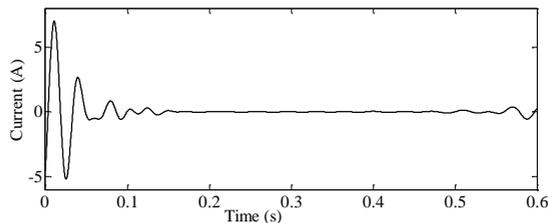
Pada tahap ini dilakukan pencuplikan salah satu sinyal arus hasil dari *decomposition wavelet transform* yang telah dijabarkan diatas. Pencuplikan diambil pada kondisi sinyal d7. Pencuplikan ini dilakukan, agar sinyal yang dihasilkan lebih terlihat jelas dan dapat membedakan hasil pada setiap kondisi. Perbedaan pada setiap kondisi dapat dilakukan dengan melihat jumlah ripple yang akan dihasilkan pada setiap grafik. Kondisi yang akan diberikan tidak hanya dalam berupa kerusakan batang rotor pada motor induksi, namun pengaruh pembebanan akan disajikan pula pada pembahasan kali ini. Perhitungan jumlah *ripple* pada suatu sinyal akan terlihat jelas ketika dilakukan perhitungan. Perhitungan tersebut menggunakan rumus :

$$\text{Daya rata-rata } d7 = \sum_0^n \frac{d(t)^2}{n} \quad (4.1)$$

dengan, n: jumlah data d(t) : nilai arus terhadap waktu

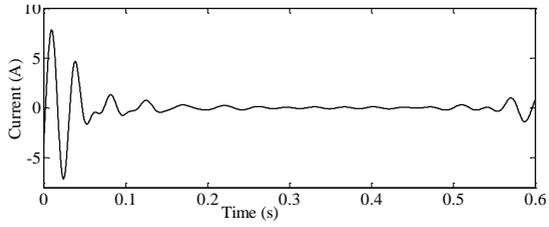
4.3.1 Motor Induksi Tanpa Beban

Pengujian sistem deteksi kerusakan batang rotor pada motor induksi dilakukan pada saat motor induksi dalam keadaan tanpa beban. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan pada kondisi tanpa beban, sinyal arus stator yang telah didekomposisi dengan menggunakan metode *wavelet* tidak terlihat signifikan perbedaannya. Maka dilakukan pencuplikan pada salah satu sinyal, yaitu d7 untuk mengetahui lebih jelas perbedaan *ripple* yang terjadi. Berikut ini merupakan hasil pencuplikan sinyal pada d7 pada *decomposition wavelet transform*:

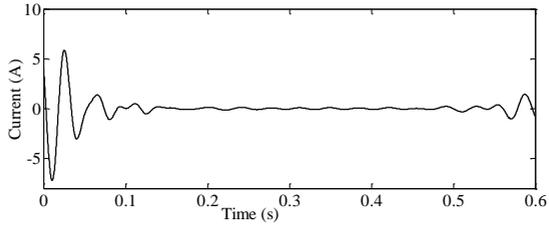


(a)

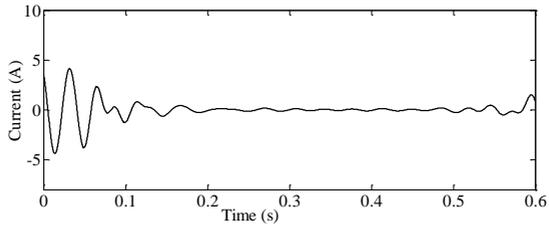
Gambar 4.9. Cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat tanpa beban: (a) Kondisi normal



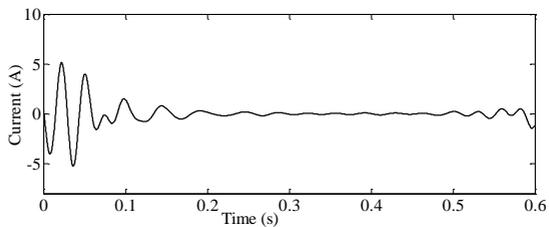
(b)



(c)

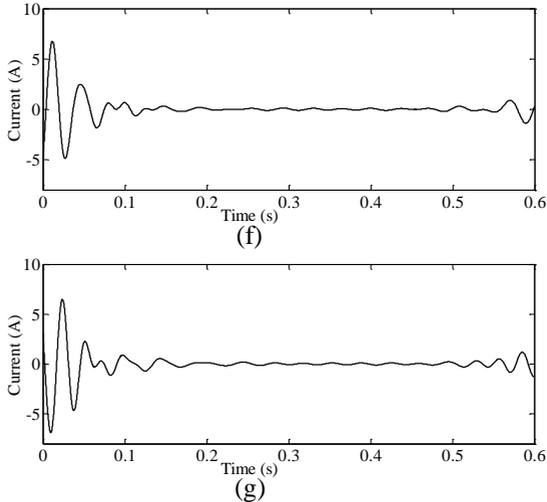


(d)



(e)

Gambar 4.10. Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat tanpa beban: (b) Kondisi 1BRB 3mm, (c) Kondisi 1BRB 7mm, (d) Kondisi 2BRB 7mm dan 3mm, (e) Kondisi 2BRB 7mm dan 7mm,



Gambar 4.11. Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat tanpa beban: (f) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm dan 3mm, (g) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm

Berdasarkan sinyal yang dihasilkan pada gambar 4.9, 4.10 dan 4.11 dapat dilihat adanya perubahan jumlah *ripple* antara batang rotor dalam kondisi normal dan batang rotor dalam kondisi rusak. Namun perubahan tersebut kurang signifikan, maka dilakukan perhitungan nilai daya rata-rata sinyal pada masing-masing sinyal. Perhitungan di konsistenkan pada waktu 0-0.2 sekon. Karena perubahan *ripple* pada grafik terlihat lebih signifikan pada waktu tersebut. Berikut ini merupakan tabel perhitungan nilai daya rata-rata sinyal d7:

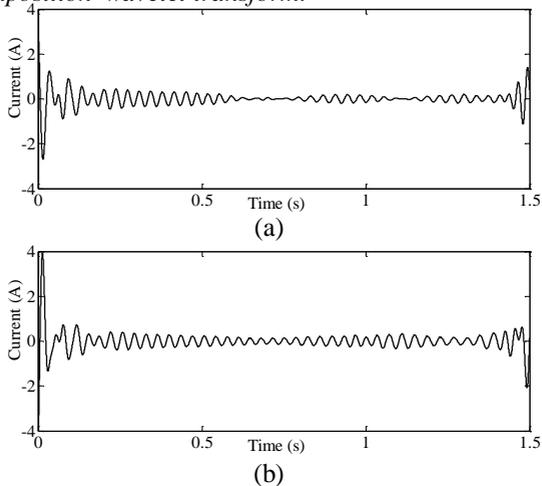
Tabel 4.2. Daya rata-rata sinyal pada d7 saat kondisi tanpa beban

Parameter Kerusakan	Daya Rata-rata
Normal	7,965
1BRB 3mm	8,007
1BRB 7mm	8,159
2BRB 7mm dan 3mm	9,175
2BRB 7mm dan 7mm	9,782
3BRB 7mm, 7mm dan 3mm	9,869
3BRB 7mm, 7mm dan 7mm	10,375

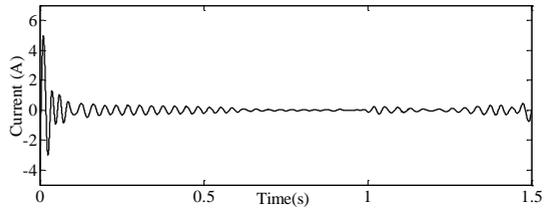
Pada tabel 4.2 diatas menunjukkan adanya kenaikan tingkat nilai daya rata-rata sinyal dari masing-masing kondisi motor. Pada motor dengan batang rotor yang rusak lebih banyak dan lebih dalam memiliki nilai daya rata-rata sinyal yang lebih tinggi.

4.3.2 Daya Input Motor Induksi 900 Watt (Berbeban)

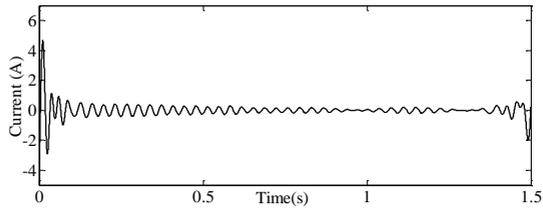
Pengujian pada sistem deteksi kerusakan batang rotor selanjutnya dilakukan pada saat motor induksi telah dikopel dengan generator sebagai beban mekanis. Pada kondisi ini motor induksi telah dibebani dengan daya 900W. Saat motor induksi mengalami kerusakan batang rotor, arus yang dihasilkan dari proses induksi medan stator yang mengalir pada rotor tidak terdistribusi sama rata pada seluruh batang rotor. Batang rotor yang mengalami kerusakan akan terjadi penurunan kemampuan dalam mengalirkan arus, sehingga arus akan dibebankan pada aliran rotor lain yang masih dalam kondisi sehat. Hal ini pun berlaku pada saat motor memiliki daya input 1.100W, 1.300W dan saat full load, yaitu 1.500W. Berikut ini merupakan hasil cuplikan sinyal d7 pada *decomposition wavelet transform*:



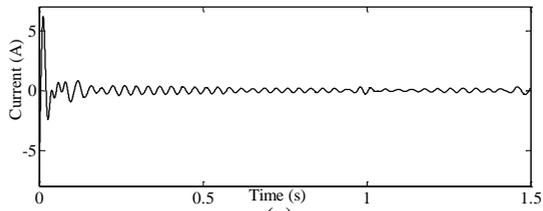
Gambar 4.12. Cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat terkopel generator: (a) Kondisi normal, (b) Kondisi 1BRB 3mm,



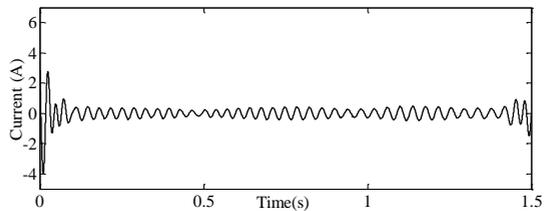
(c)



(d)

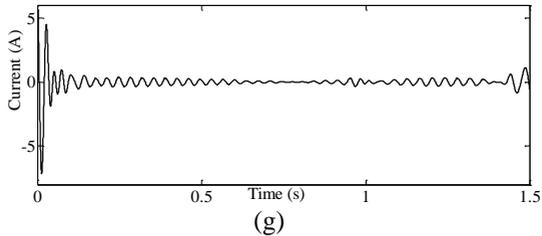


(e)



(f)

Gambar 4.13. Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat terkopel generator: (c) Kondisi 1BRB 7mm, (d) Kondisi 2BRB 7mm dan 3mm, (e) Kondisi 2BRB 7mm dan 7mm, (f) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm dan 3mm



Gambar 4.14. Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat terkopel generator: (g) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm

Berdasarkan sinyal yang dihasilkan pada gambar 4.12, 4.13 dan 4.14 dapat dilihat terdapat perbedaan jumlah *ripple* antara batang rotor dalam kondisi sehat maupun dalam kondisi mengalami kerusakan. Dari gambar dapat dilihat semakin parah tingkat kerusakan batang rotor, maka jumlah *ripple* yang dihasilkan semakin besar pula. Namun, dikarenakan tidak terlalu signifikan perubahan jumlah *ripple*, maka dilakukan perhitungan nilai daya rata-rata sinyal pada range waktu 0-0.2 sekon. Berikut ini merupakan tabel perhitungan nilai daya rata-rata pada sinyal d7:

Tabel 4.3. Daya rata-rata sinyal pada d7 saat kondisi terkopel generator

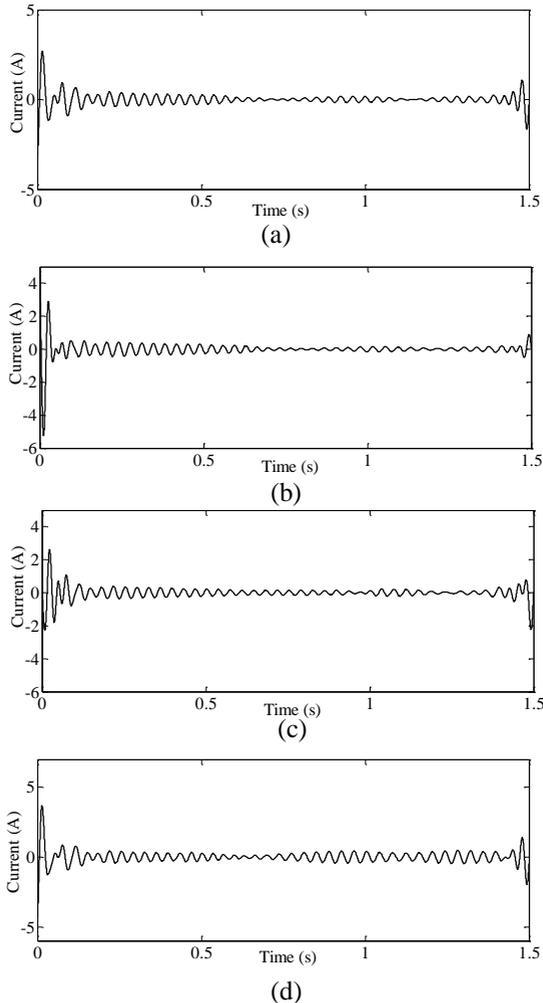
Parameter Kerusakan	Daya Rata-rata
Normal	3,869
1BRB 3mm	4,523
1BRB 7mm	4,741
2BRB 7mm dan 3mm	4,775
2BRB 7mm dan 7mm	4,903
3BRB 7mm, 7mm dan 3mm	5,497
3BRB 7mm, 7mm dan 7mm	5,725

Pada tabel 4.3 diatas saat motor terkopel generator, menunjukkan adanya kenaikan tingkat jumlah *ripple* dari masing-masing kondisi kerusakan motor. Pada motor dengan batang rotor yang rusak lebih banyak dan lebih dalam memiliki jumlah *ripple* yang lebih tinggi.

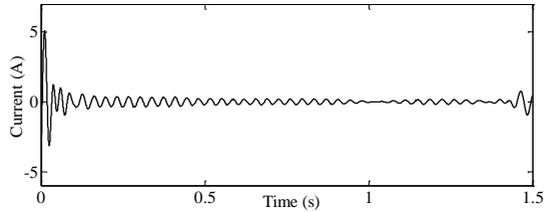
4.3.3 Daya Input Motor Induksi 1.100 Watt (Berbeban 300 Watt Bohlam)

Pengujian yang dilakukan selanjutnya, yaitu motor induksi dibebani dengan beban elektrik, yaitu generator sinkron terhubung

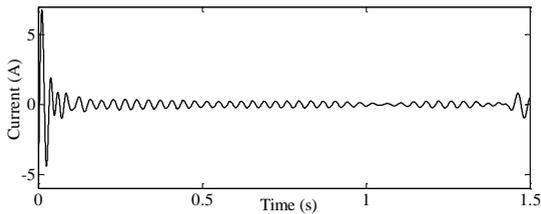
dengan 3 buah bohlam dengan satu buah bohlam memiliki daya 100W. Maka, jumlah total daya yang membebani adalah 1.100W. Berikut ini merupakan hasil cuplikan sinyal d7 pada *decomposition wavelet transform*:



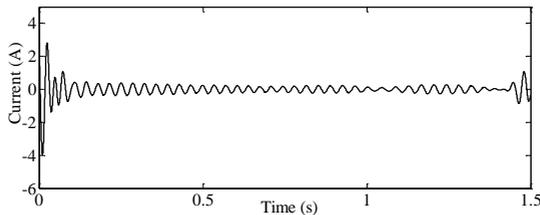
Gambar 4.15. Cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 300W bohlam: (a) Kondisi normal, (b) Kondisi 1BRB 3mm, (c) Kondisi 1BRB 7mm, (d) Kondisi 2BRB 7mm dan 3mm



(e)



(f)



(g)

Gambar 4.16. Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 300W bohlam.: (e) Kondisi 2BRB 7mm dan 7mm, (f) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm dan 3mm, (g) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm

Berdasarkan sinyal yang dihasilkan pada gambar 4.15 dan 4.16 dapat dilihat adanya perubahan jumlah *ripple* antara batang rotor dalam kondisi normal dan batang rotor dalam kondisi rusak. Dapat dijelaskan bahwa semakin parah tingkat kerusakan batang rotor baik dari segi kedalaman perlubangan rotor maupun jumlah cacat lubang, maka jumlah *ripple* yang dihasilkan akan semakin tinggi pula. Namun, karena jumlah tidak terlihat secara signifikan, maka dilakukan perhitungan nilai daya rata-rata pada masing-masing grafik. Sama halnya dengan kondisi sebelumnya, nilai daya rata-rata yang dihitung berada pada kisaran waktu 0-0.2 sekon. Berikut ini merupakan tabel perhitungan nilai daya rata-rata pada sinyal d7:

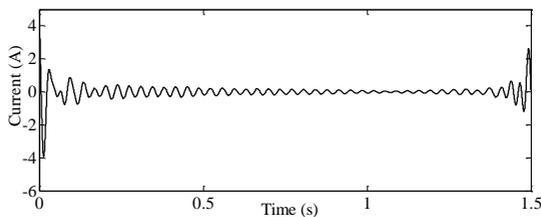
Tabel 4.4. Daya rata-rata sinyal pada d7 saat kondisi terbebani 300W bohlam

Parameter Kerusakan	Daya Rata-rata
Normal	3,772
1BRB 3mm	3,873
1BRB 7mm	4,292
2BRB 7mm dan 3mm	4,620
2BRB 7mm dan 7mm	4,926
3BRB 7mm, 7mm dan 3mm	5,474
3BRB 7mm, 7mm dan 7mm	5,789

Pada tabel 4.4 diatas saat motor terkople generator dan terhubung dengan 3 buah bohlam, maka daya input total yang membebani adalah 1.100W. Kondisi ini menunjukkan adanya kenaikan tingkat nilai daya rata-rata dari masing-masing kondisi kerusakan motor. Pada motor dengan batang rotor yang rusak lebih banyak dan lebih dalam memiliki nilai daya rata-rata yang lebih tinggi.

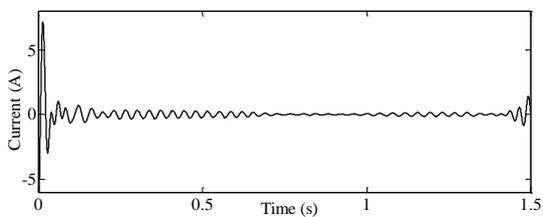
4.3.4 Daya Input Motor Induksi 1.300 Watt (Berbeban 600 Watt Bohlam)

Pada saat motor induksi dibebani 1.300W, motor induksi terkopel dengan generator sinkron dimana generator sinkron ini terhubung dengan lampu sebagai beban elektris. Pada kondisi ini, lampu yang dinyalakan sebanyak 6 buah. Berikut ini merupakan hasil cuplikan sinyal d7 pada *decomposition wavelet transform*:

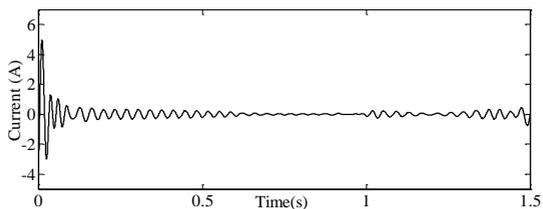


(a)

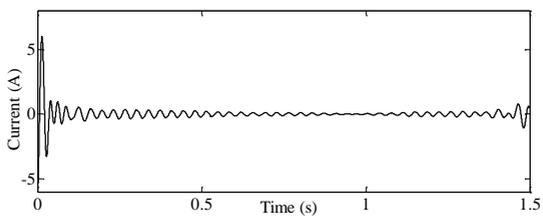
Gambar 4.17. Cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 600W bohlam: (a) Kondisi normal



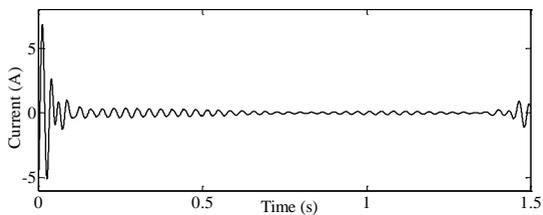
(b)



(c)

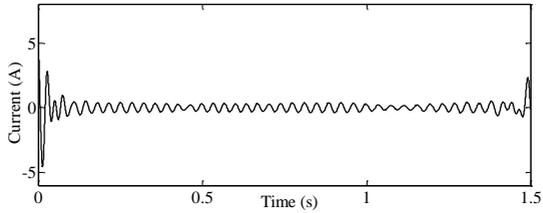


(d)

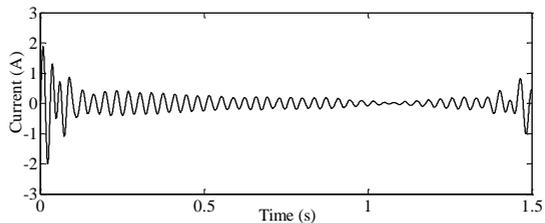


(e)

Gambar 4.18. Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 600W bohlam: (c) Kondisi 1BRB 7mm (d) Kondisi 2BRB 7mm dan 3mm (e) Kondisi 2BRB 7mm dan 7mm



(f)



(g)

Gambar 4.19. Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 600W bohlam: (f) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm dan 3mm (g) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm

Berdasarkan sinyal yang dihasilkan pada gambar 4.17, 4.18 dan 4.19 terdapat perubahan jumlah *ripple* antara batang rotor dalam kondisi normal dan batang rotor dalam kondisi rusak. Dapat dijelaskan bahwa semakin parah tingkat kerusakan batang rotor baik dari segi kedalaman perlubangan rotor maupun jumlah cacat lubang, maka jumlah *ripple* yang dihasilkan akan semakin tinggi pula. Namun, karna jumlah *ripple* tidak terlihat secara signifikan, maka dilakukan perhitungan nilai daya rata-rata pada masing-masing grafik. Sama halnya dengan kondisi sebelumnya, nilai daya rata-rata yang dihitung berada pada range waktu 0-0.2 sekon. Berikut ini merupakan tabel perhitungan nilai daya rata-rata pada sinyal d7:

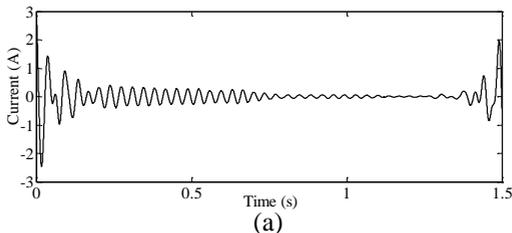
Tabel 4.5. Daya rata-rata sinyal pada d7 saat kondisi terbebani 600W bohlam

Parameter Kerusakan	Daya Rata-rata
Normal	4,359
1BRB 3mm	4,432
1BRB 7mm	4,561
2BRB 7mm dan 3mm	4,672
2BRB 7mm dan 7mm	5,131
3BRB 7mm, 7mm dan 3mm	5,203
3BRB 7mm, 7mm dan 7mm	5,347

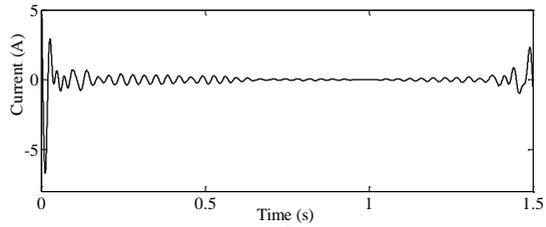
Pada tabel 4.5 diatas saat motor terkople generator dan terhubung dengan 6 buah bohlam, maka daya total yang membebani adalah 1.300W. Kondisi ini menunjukkan adanya kenaikan tingkat nilai daya rata-rata dari masing-masing kondisi kerusakan motor. Pada motor dengan batang rotor yang rusak lebih banyak dan kedalaman yang lebih tinggi memiliki nilai daya rata-rata yang lebih tinggi.

4.3.5 Daya Input Motor Induksi 1.500 Watt (Berbeban 900 Watt Bohlam)

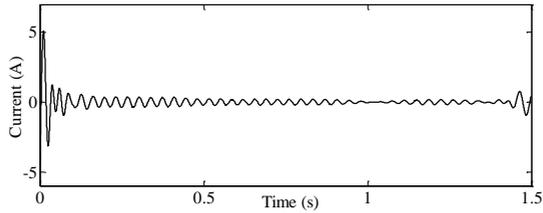
Pengujian ini dilakukan pada saat motor induksi dibebani sesuai oleh rating dayanya yaitu 1.500W. Motor induksi terkopel dengan generator sinkron, dimana generator sinkron ini terhubung dengan lampu sebagai beban elektris. Pada pengujian ini, lampu dipasang sebanyak 9 buah. Saat motor induksi telah dibebani pada rating *full-load*, sinyal arus stator dalam bentuk gelombang transien antara rotor motor induksi saat dalam keadaan normal dan mengalami kerusakan, tetap tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Maka tetap diberlakukan pencuplikan sinyal d7 pada *decomposition wavelet transform*. Berikut ini merupakan hasil cuplikan sinyal d7 pada *decomposition wavelet transform*:



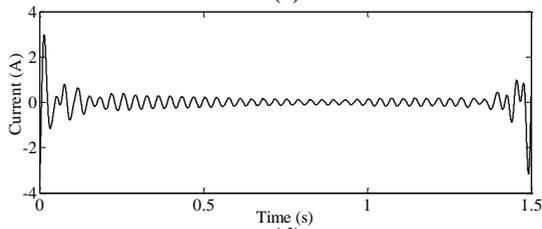
Gambar 4.20. Cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 900W bohlam: (a) Kondisi normal



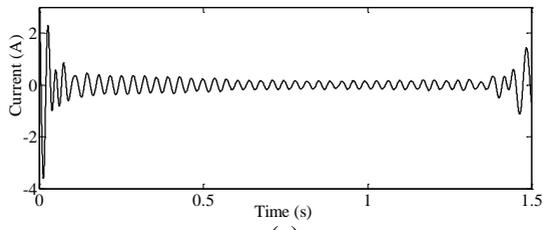
(b)



(c)

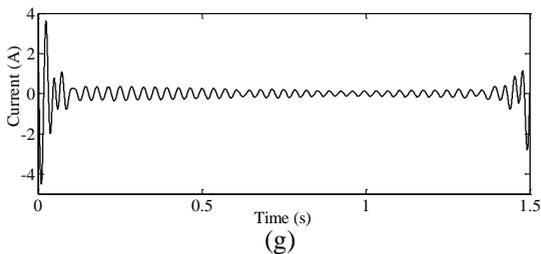
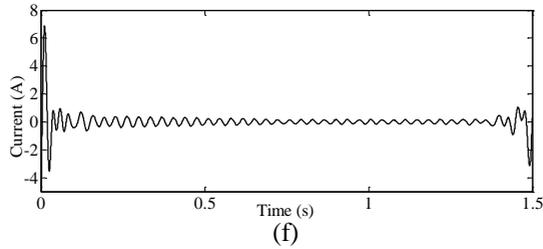


(d)



(e)

Gambar 4.21. Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saatdibebani 900W bohlam: (b) Kondisi 1BRB 3mm, (c) Kondisi 1BRB7mm, (d) Kondisi 2BRB 7mm dan 3mm, (e) Kondisi 2BRB 7mm dan 7mm



Gambar 4.22. Lanjutan cuplikan sinyal d7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 900W bohlam: (f) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm dan 3mm, (g) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm

Berdasarkan sinyal yang dihasilkan pada gambar 4.20, 4.21 dan 4.22 terdapat perubahan jumlah *ripple* antara batang rotor dalam kondisi normal dan batang rotor dalam kondisi rusak. Dapat dijelaskan bahwa semakin dalam tingkat perlubangan rotor dan jumlah cacat lubang rotor atau dapat disebut semakin parah tingkat kerusakan batang rotor, maka jumlah *ripple* yang dihasilkan akan semakin tinggi pula. Namun, karna jumlah *ripple* tidak terlihat secara signifikan, maka dilakukan perhitungan daya rata-rata pada masing-masing grafik. Sama halnya dengan kondisi sebelumnya, nilai daya rata-rata yang dihitung berada pada range waktu 0-0.2 sekon.

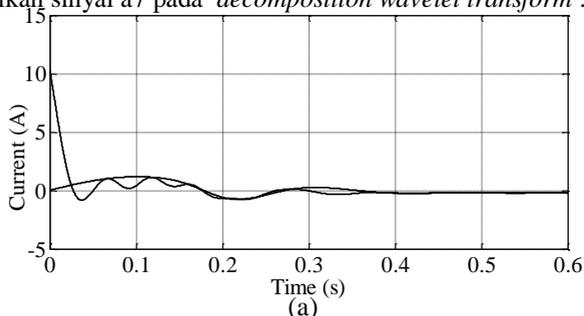
Pada tabel 4.6 dibawah saat motor terkopel generator dan terhubung dengan 9 buah bohlam, maka daya input yang dihasilkan adalah 1.500W atau dapat dikatakan dalam kondisi full load. Kondisi ini menunjukkan adanya kenaikan tingkat nilai daya rata-rata dari masing-masing kondisi kerusakan motor. Pada motor dengan batang rotor yang rusak lebih banyak dan kedalaman yang lebih tinggi memiliki daya rata-rata yang lebih tinggi.

Tabel 4.6. Daya rata-rata sinyal pada d7 saat kondisi terbebani 900W bohlam

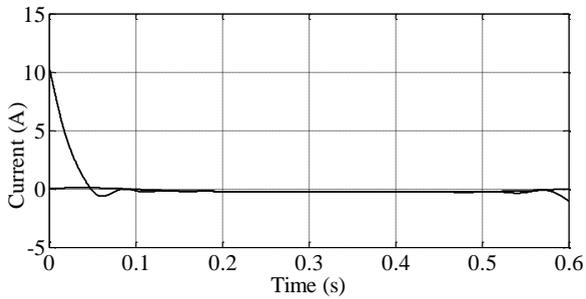
Parameter Kerusakan	Daya Rata-rata
Normal	4,237
1BRB 3mm	4,331
1BRB 7mm	4,4
2BRB 7mm dan 3mm	4,468
2BRB 7mm dan 7mm	4,651
3BRB 7mm, 7mm dan 3mm	4,813
3BRB 7mm, 7mm dan 7mm	5,009

4.4 Pengolahan Sinyal Hasil Dekomposisi pada Sinyal a7 Menggunakan Metode *Hilbert Transform*

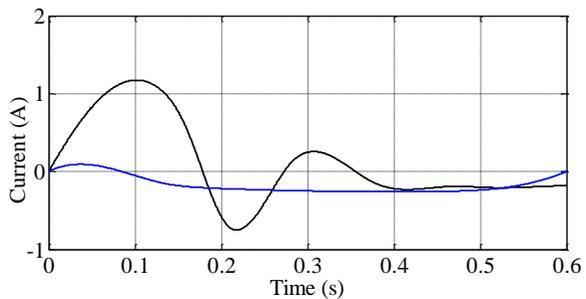
Tahap akhir dari pengujian sistem deteksi kerusakan batang rotor pada motor induksi menggunakan metode *hilbert transform*, yaitu pencarian nilai puncak pada fungsi interpolasi. Pendekatan sinyal yang dilakukan adalah dengan mencuplik sinyal hasil *decomposition wavelet transform*. Sinyal yang akan dicuplik merupakan sinyal a7. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, salah satu langka dari *Instantaneous Amplitude* (IA) adalah dengan penyederhanaan sinyal dengan sistem interpolasi. Hasil penyederhanaan sinyal pada sinyal a7 ini nantinya akan terlihat perbedaan nilai puncak pada masing-masing kondisi. Tidak hanya pada kondisi batang rotor dalam keadaan sehat ataupun rusak, namun pada kondisi tanpa beban hingga beban penuh dapat terlihat perbedaan hasil puncak yang akan disajikan. Berikut ini bentuk pencuplikan sinyal a7 pada *decomposition wavelet transform* :



Gambar 4.23. Cuplikan sinyal a7 dan penyederhanaannya pada *Decomposition Wavelet Transform* saat tanpa beban: (a) Kondisi normal



(b)

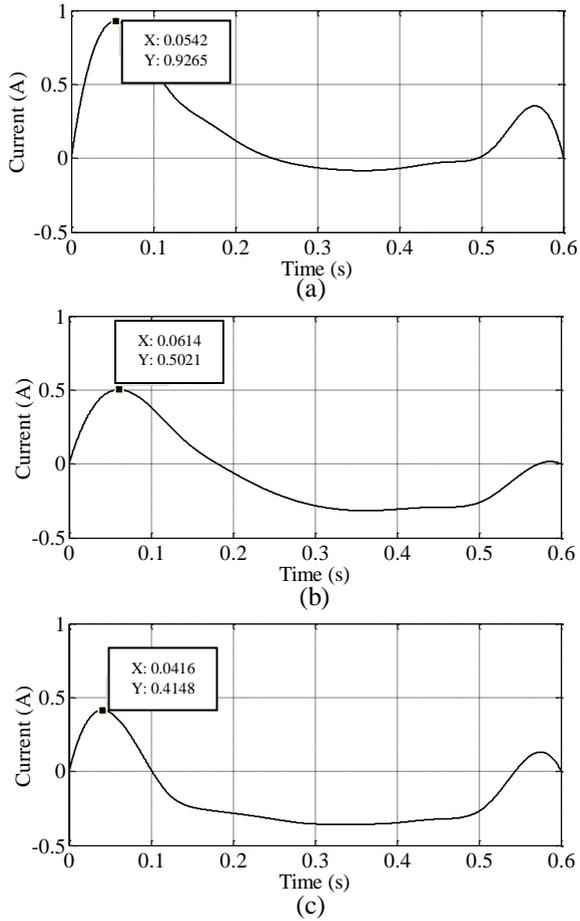


(c)

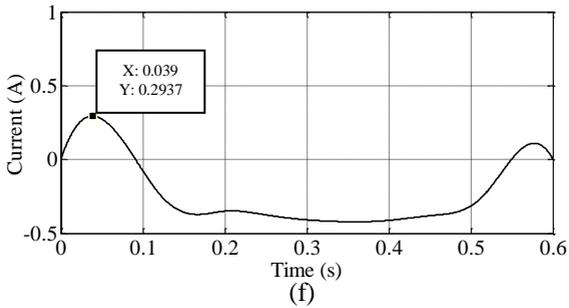
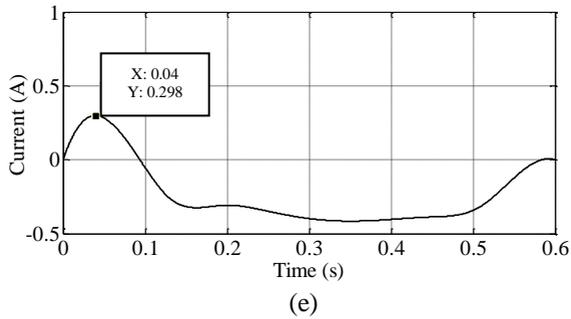
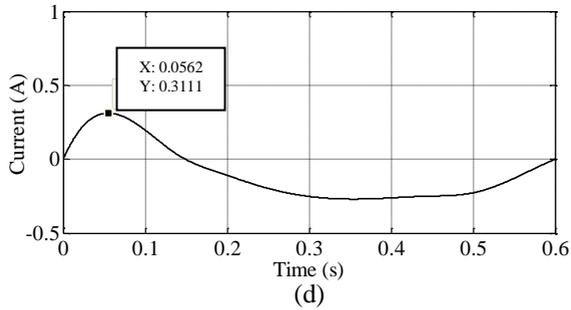
Gambar 4.24. Lanjutan cuplikan sinyal a_7 dan penyederhanaannya pada *Decomposition Wavelet Transform* saat tanpa beban: (b) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm, (c) Pencuplikan hasil penyederhanaan sinyal a_7 pada kondisi normal dan Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm

Dari gambar grafik sinyal yang diberikan dapat terlihat perbedaan nilai puncak yang dihasilkan pada saat batang rotor motor induksi dalam keadaan normal maupun dalam keadaan mengalami kecacatan.

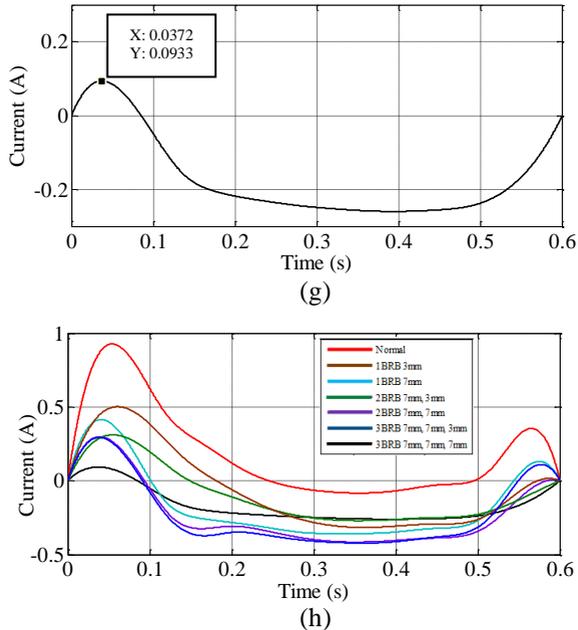
4.4.1 Motor Induksi Tanpa Beban



Gambar 4.25. Cuplikan penyederhanaan sinyal a_7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat tanpa beban: (a) Kondisi normal, (b) Kondisi 1BRB 3mm, (c) Kondisi 1BRB 7mm,



Gambar 4.26. Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a_7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat tanpa beban: (d) Kondisi 2BRB 7mm dan 3mm, (e) Kondisi 2BRB 7mm dan 7mm, (f) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm dan 3mm,



Gambar 4.27. Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat tanpa beban: (g) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm, (h) Seluruh kondisi pada batang rotor dengan tanpa beban

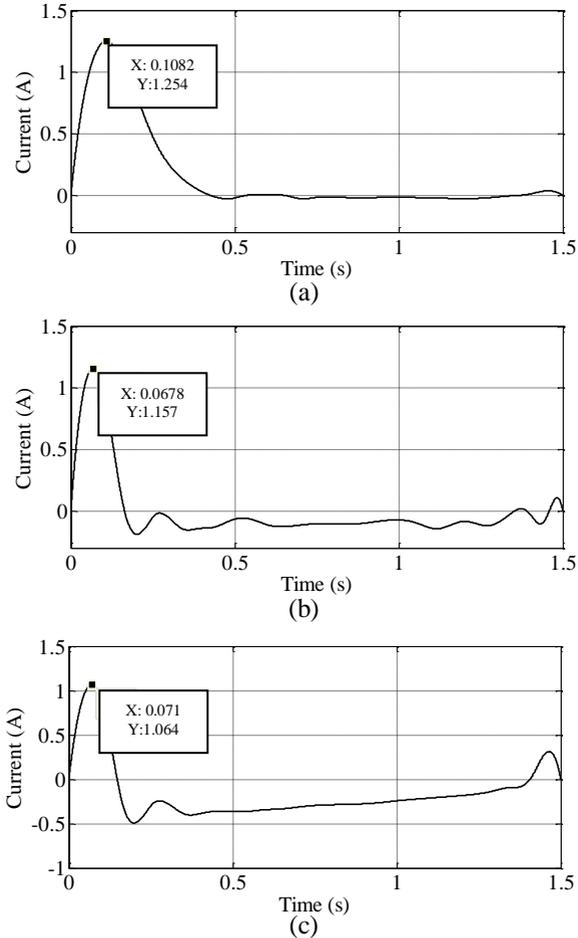
Tabel 4.7. Nilai puncak sinyal pada a7 saat kondisi tanpa beban

Parameter Kerusakan	Nilai Puncak
Normal	0,9258
1BRB 3mm	0,502
1BRB 7mm	0,4135
2BRB 7mm dan 3mm	0,3111
2BRB 7mm dan 7mm	0,298
3BRB 7mm, 7mm dan 3mm	0,2937
3BRB 7mm, 7mm dan 7mm	0,09339

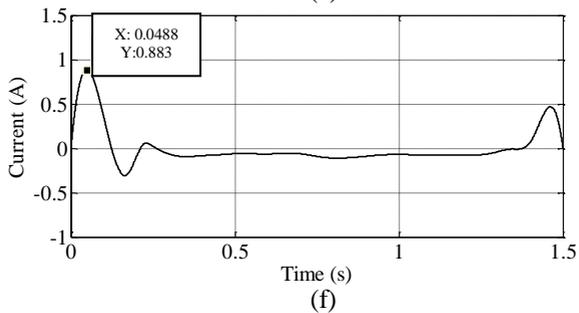
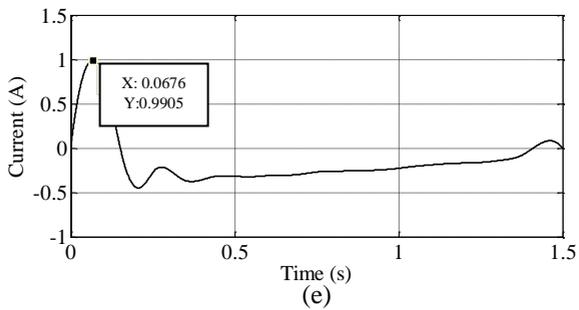
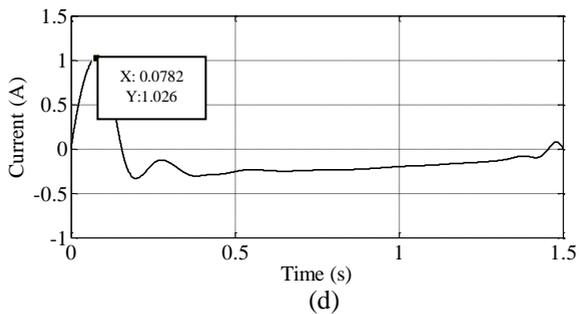
Berdasarkan hasil sinyal pada gambar 4.25, 4.26, 4.27 dan tabel 4.7 dapat dilihat terdapat perubahan nilai puncak antara batang rotor pada motor induksi dalam kondisi normal dan mengalami kerusakan. Dari hasil yang didapatkan dapat dijelaskan bahwa semakin parah

tingkat kerusakan batang rotor pada motor induksi dari sisi kedalaman lubang maupun jumlah kecacatan lubang, nilai puncak yang dihasilkan semakin rendah.

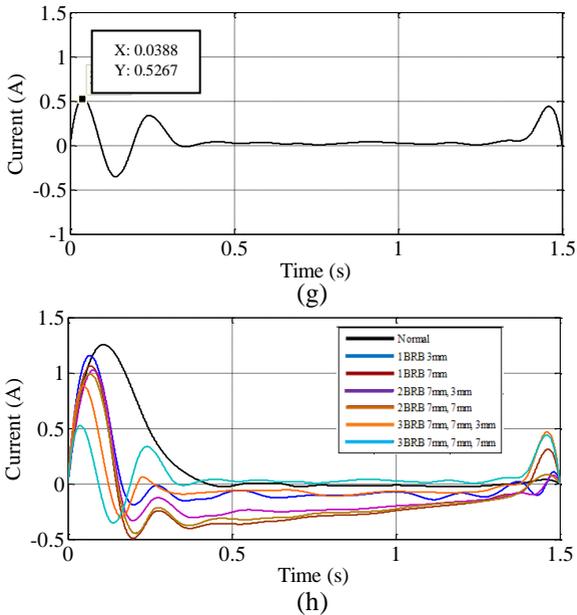
4.4.2 Daya Input Motor Induksi 900 Watt (Berbeban)



Gambar 4.28. Cuplikan penyederhanaan sinyal a_7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat terkopel generator: (a) Kondisi normal, (b) Kondisi 1BRB 3mm, (c) Kondisi 1BRB 7mm,



Gambar 4.29. Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat terkopel generator: (d) Kondisi 2BRB 7mm dan 3mm, (e) Kondisi 2BRB 7mm dan 7mm, (f) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm dan 3mm,



Gambar 4.30. Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat terkopel generator: (g) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm, (h) Seluruh kondisi pada batang rotor dengan terkopel generator

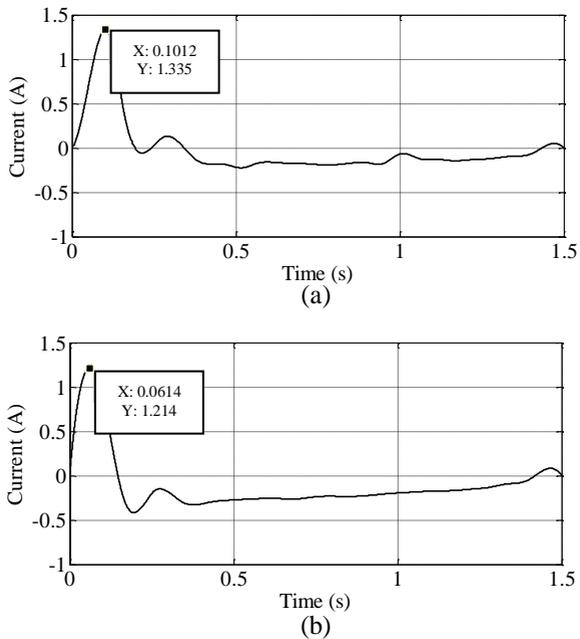
Tabel 4.8. Nilai puncak sinyal pada a7 saat kondisi terkopel generator

Parameter Kerusakan	Nilai Puncak
Normal	1,175
1BRB 3mm	1,153
1BRB 7mm	1,095
2BRB 7mm dan 3mm	1,056
2BRB 7mm dan 7mm	0,9904
3BRB 7mm, 7mm dan 3mm	0,8828
3BRB 7mm, 7mm dan 7mm	0,7523

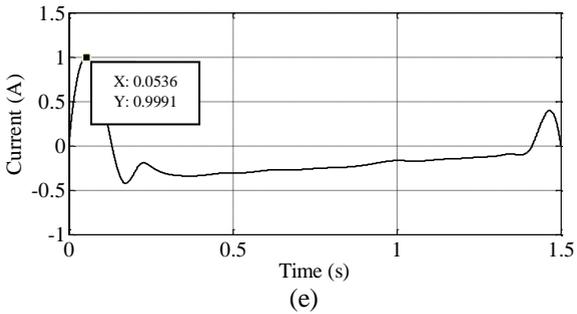
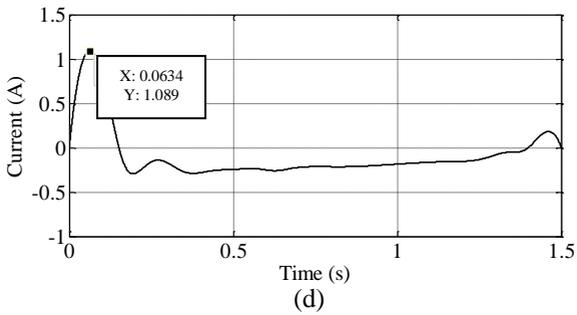
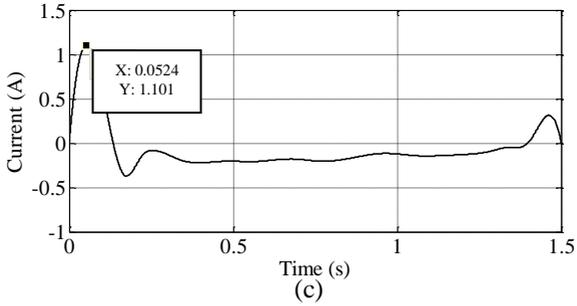
Berdasarkan hasil sinyal pada gambar 4.28, 4.29, 4.30 dan tabel 4.8 dapat dilihat terdapat perubahan nilai puncak antara batang rotor pada motor induksi dalam kondisi normal dan mengalami kerusakan. Dari hasil yang didapatkan dapat dijelaskan bahwa semakin parah

tingkat kerusakan batang rotor pada motor induksi dari sisi kedalaman lubang maupun jumlah kecacatan lubang, nilai puncak yang dihasilkan semakin rendah. Dan pada grafik akhir, ketika seluruh sinyal dalam beberapa kondisi tersebut digabung menjadi satu, sangat dapat terlihat perbedaan bentuk sinyal dalam kondisi sehat dan kondisi rusak. Sinyal berwarna hitam mengindikasikan batang rotor dalam keadaan sehat. Dan sinyal selain warna hitam, mengindikasikan rotor dalam keadaan mengalami kecacatan.

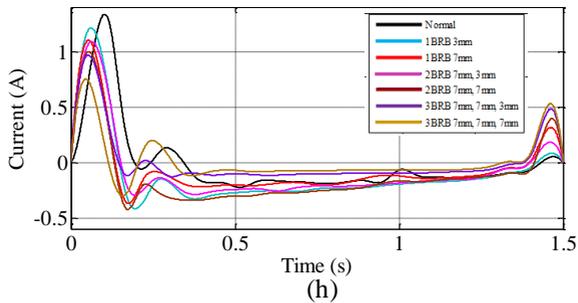
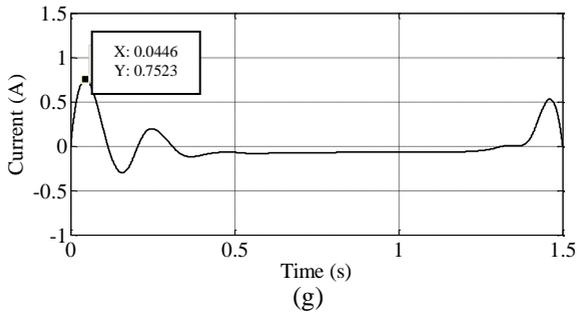
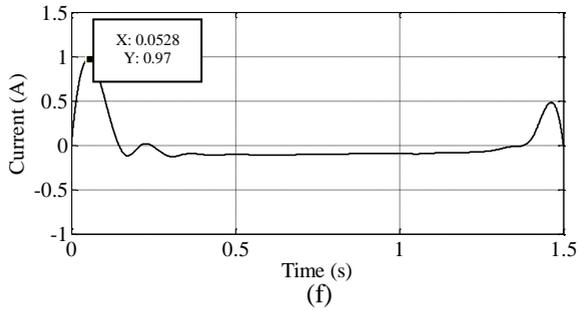
4.4.3 Daya rata-rata Motor 1.100 Watt (Berbeban 300 Watt Bohlam)



Gambar 4.31. Cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 300W bohlam: (a) Kondisi normal, (b) Kondisi 1BRB 3mm



Gambar 4.32. Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a_7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 300W bohlam: (c) Kondisi 1BRB 7mm, (d) Kondisi 2BRB 7mm dan 3mm, (e) Kondisi 2BRB 7mm dan 7mm



Gambar 4.33. Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 300W bohlam: (f) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm dan 3mm, (g) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm, (h) Seluruh kondisi pada batang rotor dengan daya input 1.100W

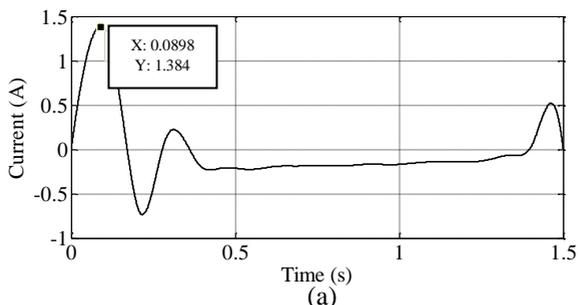
Berdasarkan hasil sinyal pada gambar 4.31, 4.32, 4.33 dan tabel 4.9 dapat dilihat pada daya input 1.100W, terdapat perubahan nilai puncak antara batang rotor pada motor induksi dalam kondisi normal dan mengalami kerusakan. Dari hasil yang didapatkan dapat dijelaskan bahwa semakin parah tingkat kerusakan batang rotor pada motor induksi

dari sisi kedalaman cacat lubang maupun jumlah kecacatan lubang, nilai puncak yang dihasilkan semakin rendah. Dan pada grafik akhir, ketika seluruh sinyal dalam beberapa kondisi tersebut digabung menjadi satu, sangat dapat terlihat perbedaan bentuk sinyal dalam kondisi sehat dan kondisi rusak. Sinyal berwarna hitam mengindikasikan batang rotor dalam keadaan sehat. Dan sinyal selain warna hitam, mengindikasikan rotor dalam keadaan mengalami kecacatan. Berikut ini tabel hasil nilai puncak pada setiap kondisi:

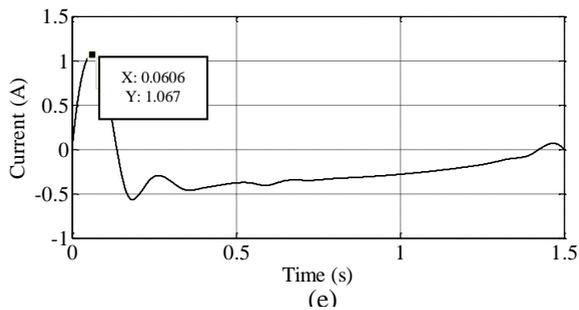
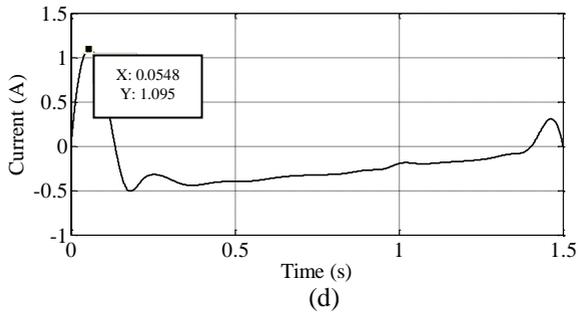
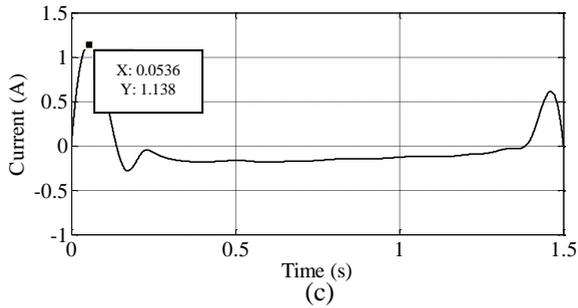
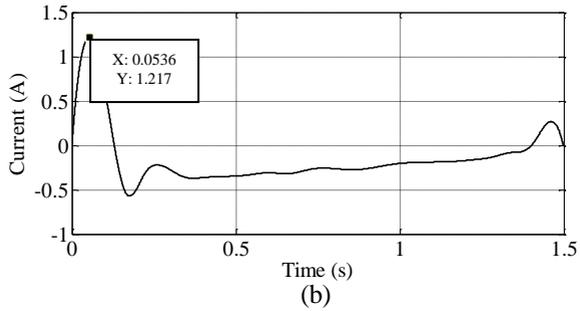
Tabel 4.9. Nilai puncak sinyal pada a7 saat kondisi terbebani 300 W bohlam

Parameter Kerusakan	Nilai Puncak
Normal	1,24
1BRB 3mm	1,157
1BRB 7mm	1,012
2BRB 7mm dan 3mm	1,089
2BRB 7mm dan 7mm	1,018
3BRB 7mm, 7mm dan 3mm	0,9698
3BRB 7mm, 7mm dan 7mm	0,7524

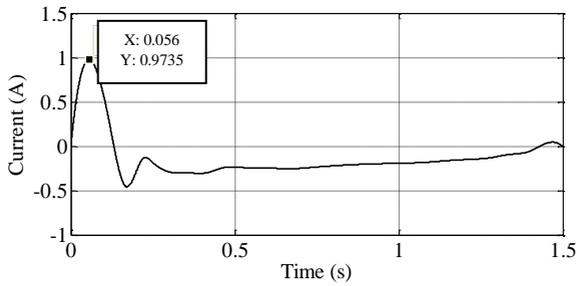
4.4.4 Sistem Deteksi Kerusakan Batang Rotor pada Motor Induksi Berbeban 1.300 Watt (600 Watt Bohlam)



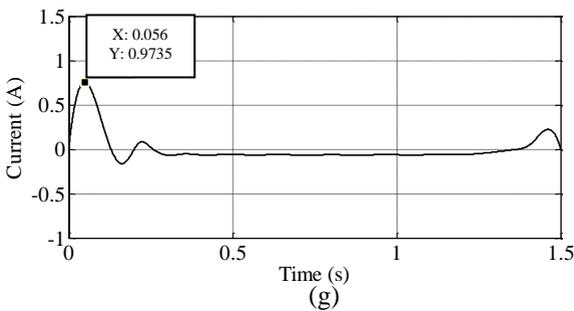
Gambar 4.34. Cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 600W bohlam. (a) Kondisi normal



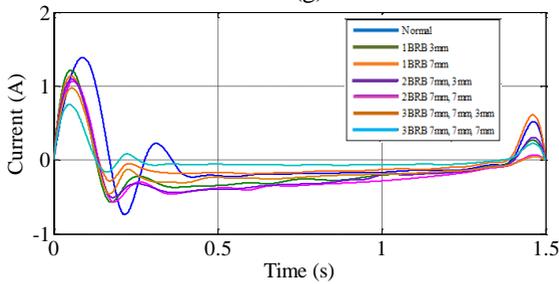
Gambar 4.35. Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a_7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 600W bohlam: (b) Kondisi 1BRB 3mm, (c) Kondisi 1BRB 7mm, (d) Kondisi 2BRB 7mm dan 3mm, (e) Kondisi 2BRB 7mm dan 7mm



(f)



(g)



(h)

Gambar 4.36. Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada *Decomposition Wavelet Transform* saat dibebani 600W bohlam: (f) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm dan 3mm, (g) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm, (h) Seluruh kondisi pada batang rotor dengan daya input 1.300W

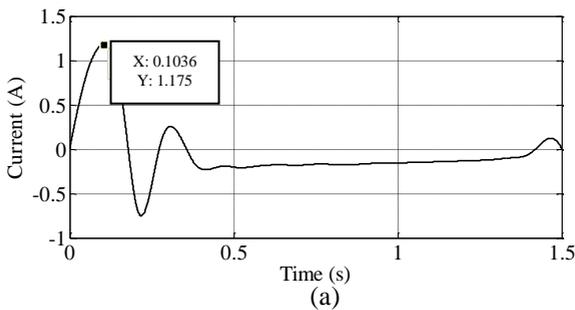
Berdasarkan hasil sinyal pada gambar 4.34, 4.35, 4.36 dan tabel 4.10 dapat dilihat pada daya input 1.300W dengan jumlah lampu 6 buah, terdapat perubahan nilai puncak antara batang rotor pada motor induksi dalam kondisi normal dan mengalami kerusakan. Dari hasil yang didapatkan dapat dijelaskan bahwa semakin parah tingkat kerusakan

batang rotor pada motor induksi dari sisi kedalaman cacat lubang maupun jumlah kecacatan lubang, nilai puncak yang dihasilkan semakin rendah. Dan pada grafik akhir, ketika seluruh sinyal dalam beberapa kondisi tersebut digabung menjadi satu, sangat dapat terlihat perbedaan bentuk sinyal dalam kondisi sehat dan kondisi rusak. Sinyal berwarna hitam mengindikasikan batang rotor dalam keadaan sehat. Dan sinyal selain warna hitam, mengindikasikan rotor dalam keadaan mengalami kecacatan. Berikut ini tabel hasil nilai puncak pada setiap kondisi:

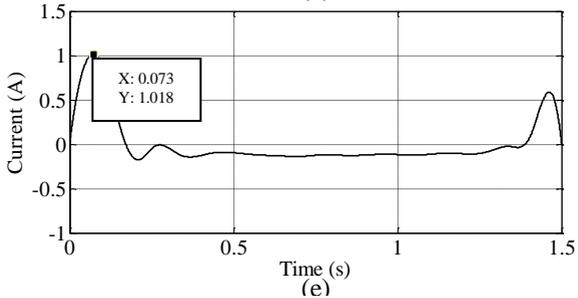
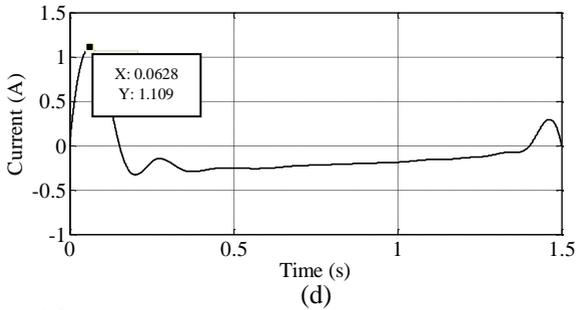
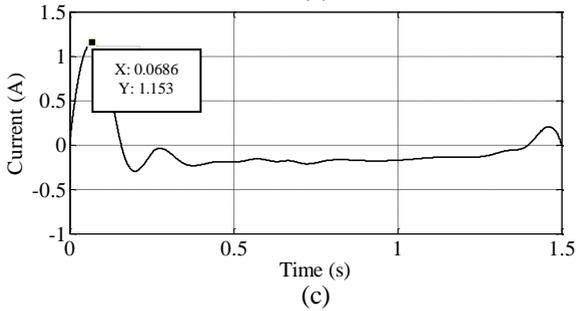
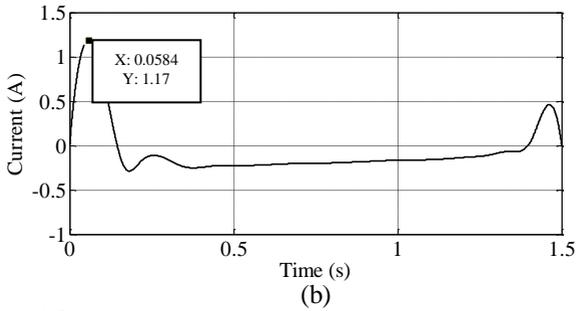
Tabel 4.10 Nilai puncak sinyal pada a7 saat kondisi terbebani 1.300W

Parameter Kerusakan	Nilai Puncak
Normal	1,335
1BRB 3mm	1,211
1BRB 7mm	1,109
2BRB 7mm dan 3mm	1,093
2BRB 7mm dan 7mm	1,025
3BRB 7mm, 7mm dan 3mm	0,9991
3BRB 7mm, 7mm dan 7mm	0,936

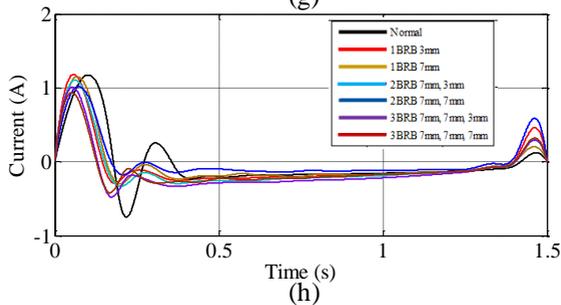
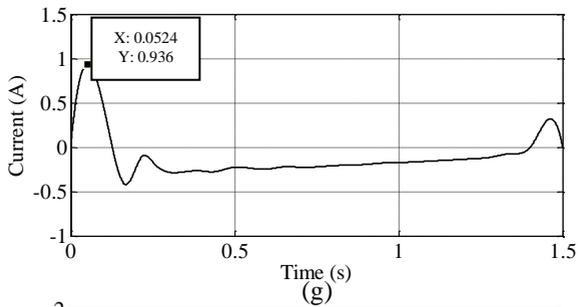
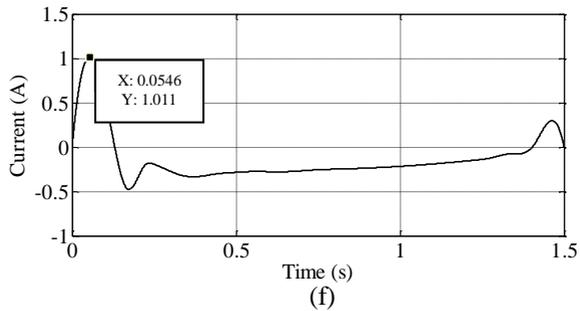
4.4.5 Daya Input Motor Induksi 1.500 Watt (Berbeban 900 Watt Bohlam)



Gambar 4.37. Cuplikan penyederhanaan sinyal a7 pada *Decomposition Wavelet Transform* dibebani 900W bohlam. (a) Kondisi normal,



Gambar 4.38. Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a_7 pada *Decomposition Wavelet Transform* dibebani 900W bohlam. (b) Kondisi 1BRB 3mm, (c) Kondisi 1BRB 7mm, (d) Kondisi 2BRB 7mm dan 3mm, (e) Kondisi 2BRB 7mm dan 7mm



Gambar 4.39. Lanjutan cuplikan penyederhanaan sinyal a_7 pada *Decomposition Wavelet Transform* dibebani 900W bohlam: (f) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm dan 3mm, (g) Kondisi 3BRB 7mm, 7mm, dan 7mm (h)Seluruh kondisi pada batang rotor dengan daya input 1.500W

Berdasarkan hasil sinyal pada gambar 4.37, 4.38, 4.39 dan tabel 4.11 dibawah dapat dilihat pada daya input 1.500W atau dapat dikatakan *full-load* dengan jumlah lampu 9 buah, terdapat perubahan nilai puncak antara batang rotor pada motor induksi dalam kondisi normal dan

mengalami kerusakan. Dari hasil yang didapatkan dapat dijelaskan bahwa semakin parah tingkat kerusakan batang rotor pada motor induksi dari sisi kedalaman cacat lubang maupun jumlah kecacatan lubang, nilai puncak yang dihasilkan semakin rendah. Dan pada grafik akhir, ketika seluruh sinyal dalam beberapa kondisi tersebut digabung menjadi satu, sangat dapat terlihat perbedaan bentuk sinyal dalam kondisi sehat dan kondisi rusak. Sinyal berwarna hitam mengindikasikan batang rotor dalam keadaan sehat. Dan sinyal selain warna hitam, mengindikasikan rotor dalam keadaan mengalami kecacatan. Berikut ini tabel hasil nilai puncak pada setiap kondisi:

Tabel 4.11. Nilai puncak sinyal pada a7 saat kondisi terbebani 900W bohlam

Parameter Kerusakan	Nilai Puncak
Normal	1,384
1BRB 3mm	1,217
1BRB 7mm	1,138
2BRB 7mm dan 3mm	1,095
2BRB 7mm dan 7mm	1,066
3BRB 7mm, 7mm dan 3mm	1,011
3BRB 7mm, 7mm dan 7mm	0,9736

4.5 Pengaruh Pembebanan Terhadap Sistem Deteksi Kerusakan Batang Rotor pada Motor Induksi

Pada sub bab kali ini akan menjelaskan pengaruh variasi pembebanan terhadap sistem deteksi kerusakan batang rotor pada motor induksi. Adanya perbedaan tingkat pembebanan dapat mempengaruhi kualitas dan bentuk gelombang dari keluaran arus stator motor induksi. Besar daya keluaran untuk menyuplai beban sebanding dengan besar tegangan dan arus stator pada motor induksi. Peningkatan beban sebanding dengan tinggi daya keluaran, sehingga dapat meningkatkan baik nilai tegangan maupun arus untuk menyuplainya. Namun, pada pengujian ini, tegangan motor dibuat stabil sehingga hal ini dapat mempengaruhi besar amplitud dari arus tersebut.

Pengaruh level pembebanan pada hasil analisis dengan metode *decomposition wavelet transform* dan *Hilbert transform* akan dijelaskan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.12. Daya rata-rata sinyal pada sinyal d7 dengan berbagai tingkatan beban

Parameter Kerusakan	DAYA INPUT				
	No Load	900W	1.100W	1.300W	1.500W
Normal	7,965	3,869	3,772	4,359	4,237
1BRB 3mm	8,007	4,523	3,873	4,432	4,331
1BRB 7mm	8,159	4,741	4,292	4,561	4,4
2BRB 7mm 3mm	9,175	4,775	4,620	4,672	4,468
2BRB 7mm 7mm	9,782	4,903	4,926	5,131	4,651
3BRB 7mm 7mm 3mm	9,869	5,497	5,474	5,203	4,813
3BRB 7mm 7mm 7mm	10,375	5,725	5,789	5,347	5,009

Dari hasil tabel 4.12 dapat terlihat bahwa semakin parah kerusakan batang rotor pada jumlah cacat lubang atau kedalaman cacat lubang tersebut, maka semakin tinggi pula daya rata-rata sinyal yang dihasilkan. Namun, pada pengujian ini tidak berlaku pada level pembebanan yang diberikan. Karna dapat dilihat pada tabel, saat motor dalam kondisi tanpa beban nilai daya rata-rata yang dihasilkan lebih besar bila dibandingkan dengan saat motor dibebani oleh daya yang lebih tinggi. Dalam hal ini, arus mula (*starting*) tidak berpengaruh pada level pembebanan. Karna nilai arus mula dalam keadaan tanpa beban atau dibebani, tetap akan menghasilkan enam kali arus nominal.

Pada hasil *hilbert transform*, nilai puncak yang telah didapatkan dengan penyederhanaan sinyal pada a7, dilakukan validasi deteksi dimana melibatkan arus rms pada sinyal *steady state* yang dihasilkan. Rumus untuk mencari validasi deteksi adalah sebagai berikut:

$$I_{RMSsteady\ state} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_0^n I(t)^2} \quad (4.2)$$

$$vd = \frac{P_{HT}}{I_{RMS \text{ steady state}}} \quad (4.3)$$

dengan,

vd: variable deteksi, $I_{RMS \text{ steady state}}$: Arus RMS saat steady state, n: jumlah data, $I(t)$: nilai arus terhadap waktu, P_{HT} : nilai puncak pada sinyal a7 (puncak *Hilbert Transform*)

Tabel 4.13. Nilai variabel deteksi pada penyederhanaan sinyal a7 dengan berbagai tingkatan beban

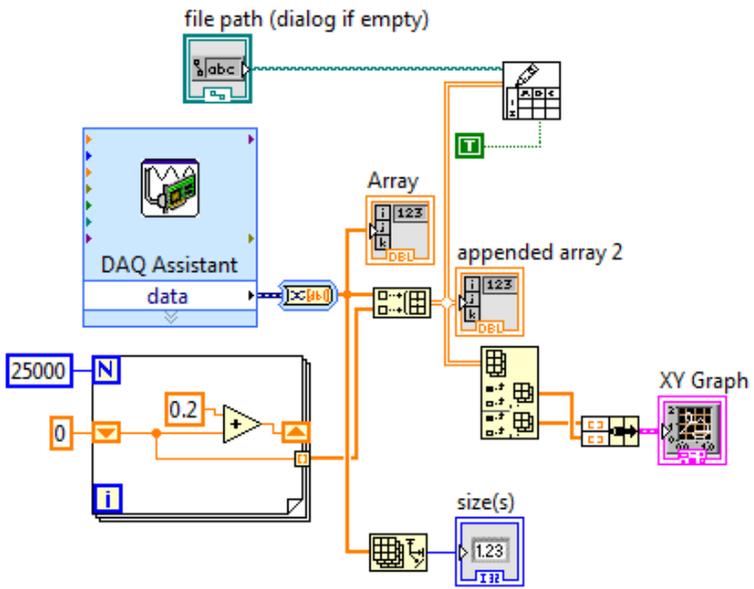
Parameter Kerusakan	DAYA INPUT				
	No Load	900W	1.100W	1.300W	1.500W
Normal	0,687	0,835	0,852	0,606	0,416
1BRB 3mm	0,152	0,351	0,357	0,361	0,338
1BRB 7mm	0,125	0,317	0,323	0,269	0,279
2BRB 7mm 3mm	0,094	0,305	0,314	0,254	0,201
2BRB 7mm 7mm	0,088	0,292	0,294	0,246	0,192
3BRB 7mm 7mm 3mm	0,087	0,259	0,279	0,22	0,175
3BRB 7mm 7mm 7mm	0,027	0,149	0,211	0,165	0,162

Pada hasil tabel 4.13 dapat terlihat, bahwa semakin parah kerusakan jumlah cacat lubang ataupun kedalaman cacat lubang yang terjadi pada batang rotor motor induksi, maka tinggi nilai yang dihasilkan dengan level pembebanan yang lebih tinggi pula. Namun, pada level pembebanan tidak terlihat perbedaan yang terjadi. Pada metode ini setelah dilakukan variable deteksi dapat dilihat bahwa motor akan dikatakan mengalami kerusakan, bila nilai variable deteksi <0.4 .

LAMPIRAN

Lampiran 1

Diagram Blok Pensamplingan Data



Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 2

Listing *decomposition wavelet transform*

```
%dwt
filename= '(nama file)'
c05 = xlsread (filename,1);
% c05 = c05';
% samp05c = c05(:24);
  z05 = c05(:,2);
time=c05(:,1);

%WAVELET TRANSFORM
[C,L] = wavedec (z05,7, 'db29' );
z05A7 = wrcoef( 'a' ,C,L, 'db29' ,7);
z05D1 = wrcoef( 'd' ,C,L, 'db29' ,1);
z05D2 = wrcoef( 'd' ,C,L, 'db29' ,2);
z05D3 = wrcoef( 'd' ,C,L, 'db29' ,3);
z05D4 = wrcoef( 'd' ,C,L, 'db29' ,4);
z05D5 = wrcoef( 'd' ,C,L, 'db29' ,5);
z05D6 = wrcoef( 'd' ,C,L, 'db29' ,6);
z05D7 = wrcoef( 'd' ,C,L, 'db29' ,7);
% z05D8 = wrcoef( 'd' ,C,L, 'db29' ,8);
% z05D9 = wrcoef( 'd' ,C,L, 'db29' ,9);

subplot(9,1,1), plot(time,z05);
subplot(9,1,2), plot(time,z05A7);
subplot(9,1,3), plot(time,z05D1);
subplot(9,1,4), plot(time,z05D2);
subplot(9,1,5), plot(time,z05D3);
subplot(9,1,6), plot(time,z05D4);
subplot(9,1,7), plot(time,z05D5);
subplot(9,1,8), plot(time,z05D6);
subplot(9,1,9), plot(time,z05D7);
% % AXIS([0 1.4 -25 25])
```

```
%  
% dataabs=abs(z05A7(1:1000));  
% waktuabs=time(1:1000);  
  
% plot(waktuabs,dataabs);  
  
% par=sum(dataabs)
```

Lampiran 3

Listing *Hilbert Transform*

```
function s = getspline(x)
clc
x = transpose(x(:));
N = length(x);
time= [];
for i=1:length(x)
    time(i)=i/5000;
end
[n,l] = findpeaks(x);
s = spline([0 1 N+1],[0 n 0],1:N);
plot(time,s, 'LineWidth',2, 'Color',[1 0 0])
grid on
hold on
plot(time,x')
```

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang telah didapatkan melalui proses pengujian dan analisis data mengenai sistem deteksi kerusakan batang rotor pada motor induksi menggunakan analisis arus mula berbasis *Hilbert Transform* yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Kerusakan batang rotor pada motor induksi menyebabkan munculnya frekuensi harmonisa yang dapat mengganggu bentuk dan kualitas dari gelombang sinyal arus stator motor.
2. *Decomposition wavelet transform* mampu mendeteksi kerusakan batang rotor pada motor induksi dengan mendekomposisi pada sinyal dan orde tertentu, kemudian menghitung daya rata-rata sinyal yang terjadi pada setiap kondisi yang diberikan.
3. Sistem deteksi kerusakan batang rotor menggunakan analisis arus mula berbasis transformasi Hilbert dapat menggunakan penyederhanaan sinyal dari hasil dekomposisi, yaitu pada sinyal a7 dan dengan melihat puncak dari penyederhanaan sinyal tersebut. Pada motor dengan kondisi normal, nilai puncak yang dihasilkan lebih tinggi, sedangkan nilai pucak untuk motor yang mengalami kerusakan batang rotor memiliki nilai puncak yang cenderung semakin menurun.
4. Pada hasil pada metode *hilbert transform* nilai puncak yang dihasilkan dihitung kembali nilai variable deteksi dengan

rumus $vd = \frac{P_{HT}}{I_{RMS \text{ steady state}}}$, maka dihasilkan bila nilai

variable deteksi menghasilkan nilai <0.4 , maka dapat dikatakan batang rotor pada motor induksi mengalami kerusakan.

5. Variasi level pembebanan pada arus mula (*starting*) tidak memengaruhi pendeteksian secara signifikan, namun dapat meningkatkan amplitudo arus stator motor.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengaplikasian sistem deteksi kerusakan batang rotor pada motor induksi dengan berbasis *decomposition wavelet transform* dan *hilbert transform* dapat diterapkan untuk jenis kerusakan komponen lain seperti pada bearing, dan juga dapat digunakan dalam kondisi arus steady state.
2. Metode ini akan lebih akurat dalam sistem deteksi kerusakan untuk motor induksi dengan kapasitas yang lebih besar dan dalam frekuensi sampling yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Valles-Novo, J. Rangel-Magdaleno, J. Ramirez-Cortes, H. Peregrina-Barreto, R. Morales-Carporal, "Empirical Mode Decomposition Analysis for Broken-Bar Detection on Squirrel Cage Induction Motors", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Desember, 2014.
- [2] Ardhana, Nabila "Deteksi Kerusakan Batang Rotor pada Motor Induksi Sangkar Bajing Menggunakan Metode Standart Deviasi Berbasis Analisis Empirical Mode Decomposition", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya, Januari, 2016.
- [3] Rabbani, Insan, "Deteksi Kerusakan Rotor Bar Motor Induksi Menggunakan Analisis Bi-spectrum, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya, Juli, 2016.
- [4] Swasetyasakti, Rifaldy, "Deteksi Kerusakan Batang Rotor pada Motor Induksi Tiga-Fasa dengan Menggunakan Analisis Arus Keluaran Inverter berbasis Wavelet", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya, Januari, 2013.
- [5] Chapman, Stephen J., "Electric Machinery Fundamentals Fourth Edition", McGraw-Hill, New York, 2005.
- [6] Manuel Pineda, Martin Riera, Jose Alfonso Antonio, Jose Roger "Instantaneous Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient: A New Method for Diagnosis of Broken Bar" IEEE, 2009.
- [7] Neelam Mehala, Ratna Dahiya, "Motor Current Signature Analysis and Its Application in Induction Motor Fault Diagnosis", International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Volume 2 Issue 1, India, 2007.
- [8] Manual Guide, "NI cDAQ-9171 Overview and Specifications", National Instrument Corporation, 2012.
- [9] Manual Guide, "NI9246 Getting Started Guide", National Instrument Corporation, 2015.
- [10] N. E. Huang, Zheng Shen, Steven R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Quanan Zheng, Nai-Chyuan Yen, C. C. Tung, H. H. Liu, "The Empirical Mode Decomposition and The Hilbert Spectrum for

- Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis”, The Royal Society, Proc. R. Soc. Lond. A 454, 903-995, Ingggris, 1998.
- [11] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, “*Numerical Methods for Engineer*”, McGraw-Hill, New York, 2010.
 - [12] J.A Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J Roger-Folch, and R.B Perez, “An Analytysical comparison between DWT and Hilbert-Huang Based Methodes for the Diagnosis of Rotor Asymmetrics in induction machines, Conference IEEE IAS Annu. Meeting, 2007
 - [13] Chang Gao, Haifeng Li, Lin Ma, “An Intrinsic Mode Function Basis Dictionary for Auditory Signal Processing”, IEEE-ICALIP, 2014.
 - [14] Jinjiang Wang, Robert X. Gao, Ruqiang Yan, “Broken-Rotor Bar Diagnosis for Induction Motors”, 9th International Conference on Damage Assesment of Structures, Journal of Physics: Conference Series 305, 2011.
 - [15] F. Briz, M. W. Degner, P. Gracia, and D. BBragado, “ Broken Rotor Bar Detection in line-fed induction machines using complex wavelet analysis of startup transient, IEEE, 2008.

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Surabaya pada tanggal 24 Juni 1994 dengan nama lengkap Istiqomah, dari orang tua Ir. Imam Syafril, M.T. dan Yuliati. Penulis menamatkan pendidikan dasar di SDN Kalisari I/242 Surabaya (tahun 2006), pendidikan menengah di SMPN 18 Surabaya (tahun 2009) dan SMAN 2 Sumenep (tahun 2012). Saat ini penulis berusia 21 tahun dan sedang menempuh studi tingkat strata 1 di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga sebagai fokus studinya. Selama kuliah penulis aktif dalam berbagai kegiatan akademis maupun non akademis. Penulis bergabung dengan HIMATEKTRO ITS sebagai staf departemen keprofesian dan kesejahteraan mahasiswa serta steering comitee (sc) kaderisasi (tahun 2013-2014), sebagai Wakil Ketua Himpunan (tahun 2014-2015) dan sebagai Dewan Perwakilan Angkatan (tahun 2015-2016). Penulis dapat dihubungi melalui email: istiqomah1227@gmail.com.