

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas tentang analisis hasil pengujian getaran pada prototipe *fan* industri. Pengujian dilakukan dengan kondisi roda gigi normal dan roda gigi cacat. Jenis cacat yang diteliti adalah cacat sebagian berupa adanya pitting dengan diameter ( $\emptyset$ ) 1,5 mm dan cacat penuh berupa satu mata gigi hilang. Data dari kondisi roda gigi cacat sebagian diberi nama Cacat Level 1, sedangkan pada cacat penuh diberi nama Cacat Level 2. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini berupa plot grafik domain waktu, plot grafik domain frekuensi (*Spectrum*), dan plot *spectrogram Continouos Wavelet Transform (CWT)*.

#### 4.1. Data Penelitian

Data penelitian diperoleh dari pengujian getaran pada roda gigi kondisi normal dan kondisi cacat menggunakan data akuisisi dengan input sinyal getaran dari sensor accelerometer dan ditambah sinyal kecepatan poros dari sensor proximity. Kedua variabel sinyal input tersebut disimpan dalam file MATLAB yang berekstensi mat. Jenis roda gigi yang digunakan dalam penelitian ini adalah roda gigi tipe spur *gear* dengan kriteria sebagai berikut:

Jumlah gigi <i>gear</i>	= 33
Kec. Putar poros <i>gear</i>	= 1357 rpm
Jumlah gigi <i>pinion</i>	= 15
Kec. Putar poros <i>pinion</i>	= 2985 rpm

Rincian dimensi ukuran roda gigi dapat dilihat pada Tabel 3.1. Proses pengambilan data dilakukan dengan menggunakan *sampling rate* 17066 Hz dan waktu perekaman 10 detik. Berdasarkan uraian tersebut maka dapat dicari parameter frekuensi yang terjadi pada pasangan roda gigi tersebut. Hasil perhitungan nilai parameter frekuensi dapat dilihat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4. 1** Hasil perhitungan paramater frekuensi pasangan roda gigi

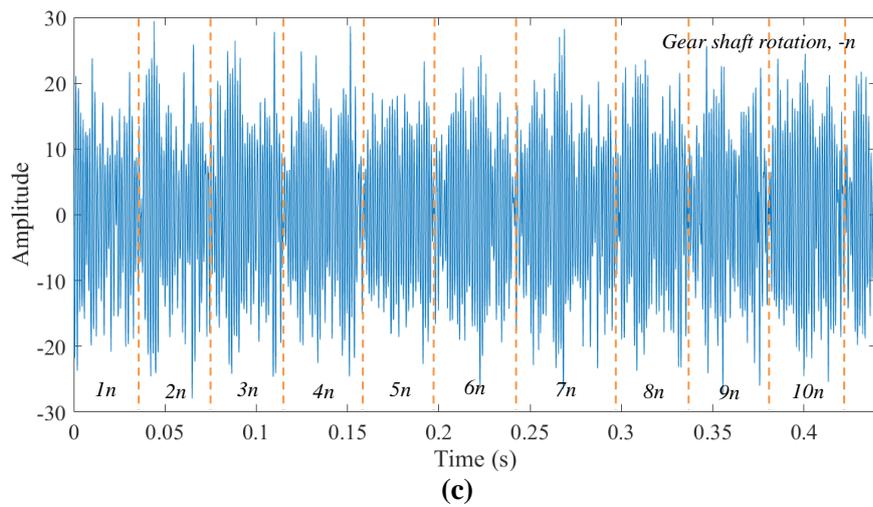
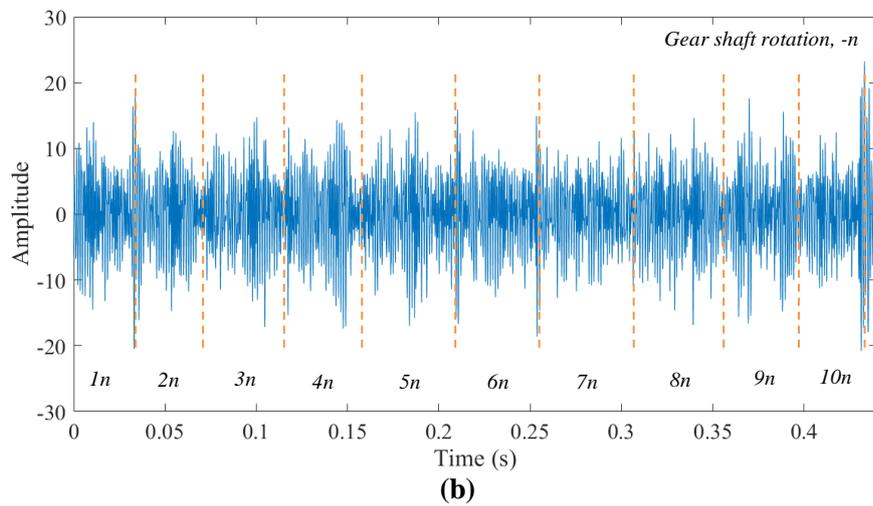
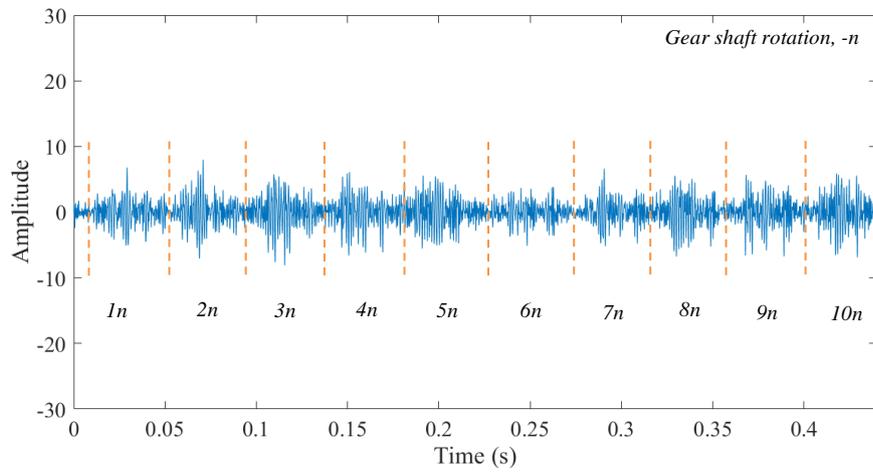
Parameter	Hasil Perhitungan
Frekuensi Putar Poros <i>Gear</i> ( $f_g$ )	22,6 Hz
Frekuensi Putar Poros <i>Pinion</i> ( $f_p$ )	49,75 Hz
<i>Gear Mesh Frequency (GMF)</i>	746,35 Hz

Hasil frekuensi putar poros *gear* maupun *pinion* diperoleh dari konversi kecepatan putar poros per menit (rpm) yang sebelumnya telah diambil menggunakan digital tachometer ke kecepatan putar poros per detik (Hz). Sedangkan untuk nilai *GMF* didapatkan dari hasil perkalian frekuensi poros dengan jumlah gigi pada roda gigi. Menurut Fernandez (2017), nilai amplitudo pada *GMF* efektif digunakan untuk mengidentifikasi kerusakan pada roda gigi. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan nilai amplitudo pada *GMF* untuk menganalisis kerusakan roda gigi pada prototipe *fan* industri.

#### 4.2. Plot Domain Waktu

Data getaran yang berasal dari accelerometer kemudian diolah menggunakan *software* MATLAB. Plot domain waktu pada tiga kondisi roda gigi yang ditampilkan pada Gambar 4.1.

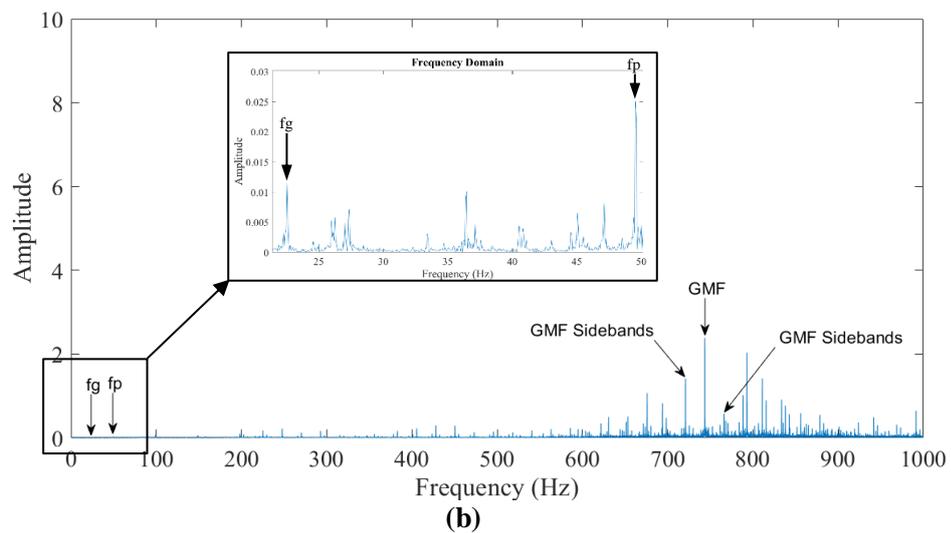
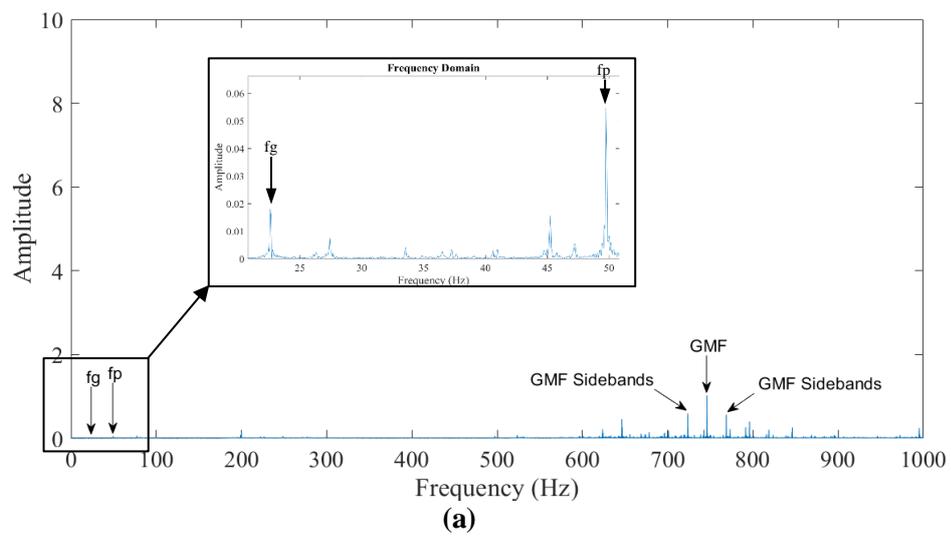
Plot yang ditampilkan pada Gambar 4.1 merupakan sinyal getaran pada 10 kali putaran poros roda gigi *gear*. Perekaman 10 kali putaran poros terjadi selama 0,44 detik dengan 1 putaran poros ditempuh selama 0,044 detik. Dari ketiga hasil plot terlihat bahwa amplitudo impuls akibat impak gigi meningkat seiring dengan bertambahnya level cacat pada roda gigi. Plot domain waktu hanya didapatkan informasi mengenai kenaikan amplitudo impuls dari kondisi normal ke kondisi cacat. Informasi tentang nilai frekuensi belum didapatkan pada plot domain waktu ini.

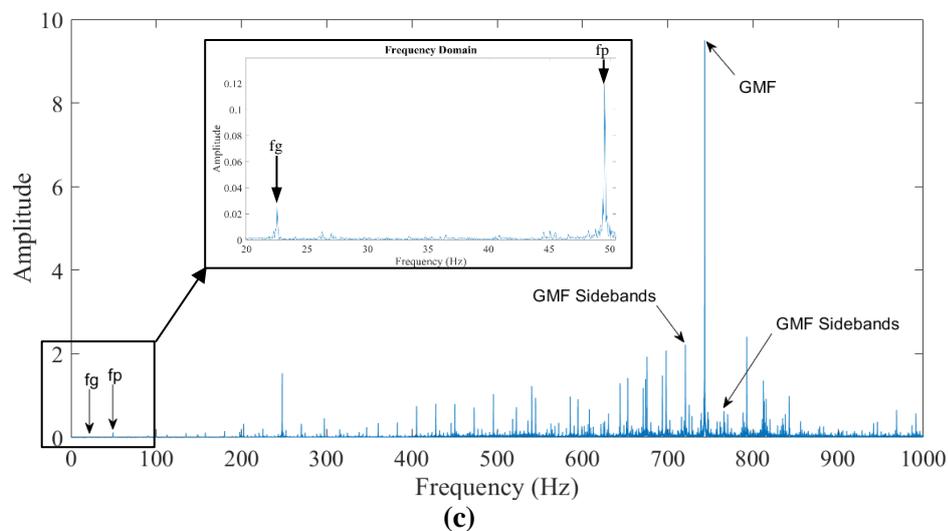


**Gambar 4. 1** Plot Domain Waktu. (a) Kondisi Normal (b) Kondisi Cacat Level 1. (c) Kondisi Cacat Level 2.

### 4.3. Plot Domain Frekuensi

Kurangnya informasi yang ditampilkan pada plot domain waktu, maka diperlukan plot domain frekuensi untuk mengetahui frekuensi apa saja yang muncul pada data getaran tersebut. Nilai frekuensi ini sangat dibutuhkan untuk mengidentifikasi ada-tidaknya kerusakan pada suatu komponen, termasuk pada roda gigi. Plot domain frekuensi dengan tiga kondisi roda gigi ditampilkan pada Gambar 4.2.





**Gambar 4. 2** Plot Domain Frekuensi. (a) Kondisi Normal. (b) Kondisi Cacat Level 1. (c) Kondisi Cacat Level 2.

Berdasarkan ketiga grafik tersebut diperoleh empat frekuensi yang perlu diperhatikan. Frekuensi tersebut merupakan frekuensi putar poros *gear* (*fg*), frekuensi putar poros *pinion* (*fp*), *Gear Mesh Frequency* (*GMF*), dan *GMF Sidebands*. Untuk mempermudah pembacaan plot tersebut, maka hasil data dari nilai frekuensi beserta nilai amplitudonya ditampilkan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 2** Nilai Frekuensi Tiga Kondisi Roda Gigi

Normal					
Frekuensi (Hz)	<i>fg</i>	<i>Fp</i>	<i>GMF</i>	<i>GMF Sidebands</i>	
	22,5903	49,7376	746,325	723,7347	768,9804
Amplitudo (mV)	0,018	0,055	1,0233	0,5936	0,5674
Cacat Level 1					
Frekuensi (Hz)	<i>fg</i>	<i>Fp</i>	<i>GMF</i>	<i>GMF Sidebands</i>	
	22,5252	49,5423	743,5256	721,0005	766,0508
Amplitudo (mV)	0,0114	0,0255	2,3511	1,4115	0,594
Cacat Level 2					
Frekuensi (Hz)	<i>fg</i>	<i>Fp</i>	<i>GMF</i>	<i>GMF Sidebands</i>	
	22,5252	49,5423	743,4605	720,9354	765,9857
Amplitudo (mV)	0,0252	0,119	9,4971	2,2173	0,6288

Berdasarkan Tabel 4.2, nilai *fg* dan *fp* pada kondisi cacat mengalami penurunan terhadap nilai *fp* dan *fg* pada roda gigi normal. Penurunan ini bisa diakibatkan karena kekakuan dari poros berkurang karena adanya cacat pada roda gigi. Nilai amplitudo dari *fg* dan *fp* bervariasi pada setiap kondisi roda gigi. Pada roda gigi cacat level 1, nilai amplitudo dari *fp* dan *fg* mengalami penurunan terhadap nilai amplitudo dari *fp* dan *fg* pada roda gigi normal. Penurunan ini juga telah dijelaskan oleh Jaiswal (2013) dalam penelitiannya yang melibatkan roda gigi cacat berupa adanya *pitting* pada *pitch* gigi. Pada roda gigi cacat level 2, nilai amplitudo dari *fp* dan *fg* cenderung naik terhadap nilai amplitudo dari *fp* dan *fg* pada roda gigi normal. Proses naik-turunnya amplitudo poros dimungkinkan karena adanya pergeseran kontak gigi ketika poros tersebut berputar.

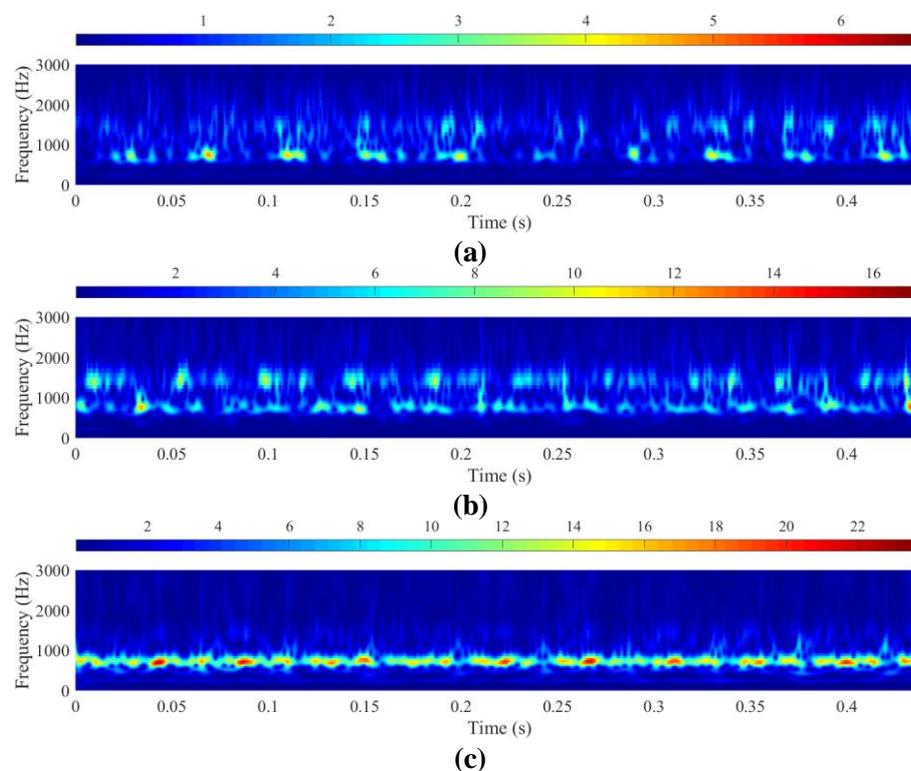
Pada Tabel 4.2, diketahui nilai *GMF* mengalami pergeseran yang diikuti dengan adanya eskalasi/peningkatan pada nilai amplitudo *GMF*. Fenomena ini menunjukkan semakin parahnya cacat pada komponen roda gigi sesuai dengan hal yang dikemukakan oleh Sirajudin (2010). Pada kondisi roda gigi cacat level 1, nilai amplitudo *GMF* meningkat sebesar 1,3278 milivolt terhadap kondisi normal. Hal ini selaras dengan pernyataan Jaiswal (2013) yang menyatakan bahwa adanya peningkatan nilai amplitudo *GMF* yang terjadi pada kerusakan *pitting*. Pada kondisi cacat level 2, nilai amplitudo *GMF* juga meningkat sebesar 8,4738 milivolt terhadap kondisi normal dan meningkat sebesar 7,146 milivolt terhadap kondisi cacat level 1. Merangkum tiga kondisi roda gigi tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa semakin parahnya kerusakan yang terjadi pada roda gigi mengakibatkan semakin meningkatnya nilai amplitudo *GMF*. Hal ini juga sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Pribadi, dkk (2014).

Disamping munculnya *GMF*, terdapat frekuensi lain dengan amplitudo tinggi yang muncul disekitar *GMF*. Frekuensi ini merupakan *GMF sidebands*. Jarak antara *GMF* dan *GMF Sidebands* relatif sama terhadap nilai kecepatan poros roda gigi yang bermasalah. *Sidebands* merupakan salah satu indikator kerusakan yang baik selain *GMF*. Berdasarkan tabel diatas, diperlihatkan bahwa jarak antara frekuensi *sideband* dan *GMF* sama dengan frekuensi putar poros *gear* yaitu

sebesar 22,5 Hz. Hal tersebut menunjukkan bahwa adanya masalah pada poros *gear*. Masalah ini berupa kerusakan roda gigi yang ada pada poros *gear* tersebut. Seiring dengan tingginya amplitudo pada *sidebands*, identik dengan bertambahnya kerusakan pada roda gigi tersebut.

#### 1.4. Plot *Spectrogram Continuous Wavelet Transform (CWT)*

Pada plot domain waktu dihasilkan sebuah grafik dengan perbandingan antara waktu dan amplitudo. Kelemahannya, identifikasi frekuensi pada plot domain waktu sulit untuk diketahui karena jarak impak setiap putaran roda gigi sulit untuk diidentifikasi. Sedangkan pada plot domain frekuensi dihasilkan sebuah grafik dengan perbandingan antara amplitudo dan frekuensi tanpa diketahui kapan frekuensi itu terjadi. Plot *spectrogram CWT* dapat mengatasi kelemahan dari kedua metode sebelumnya. Plot tersebut dapat menampilkan nilai frekuensi yang terjadi selama waktu tertentu dan besar amplitudo yang terjadi. Plot *spectrogram CWT* dari tiga kondisi roda gigi dapat dilihat pada Gambar 4.3.



**Gambar 4. 3** Plot *Spectrogram CWT*. (a) Kondisi Normal. (b) Kondisi Cacat Level 1. (c) Kondisi Cacat Level 2.

Plot *Spectrogram CWT* yang ditampilkan pada Gambar 4.3 merupakan hasil dari perekaman data getaran selama 10 detik yang diolah menggunakan *script CWT* kemudian plot yang diperoleh dibatasi pada 10 kali putaran poros. *Colorbar* yang ditunjukkan pada plot *CWT* merupakan tingkatan nilai amplitudo getaran. Tingginya nilai amplitudo getaran, diilustrasikan dengan *colorbar* yang menuju ke warna merah. Pada plot kondisi normal, nilai amplitudo tertinggi terlihat pada angka 6,6 mV. Terdapat gradasi warna yang memusat pada frekuensi 752,2 Hz dengan nilai amplitudo 5 mV yang identik dengan nilai dari *GMF*. Frekuensi ini terlihat setiap 0,044 detik. Hal ini menunjukkan bahwa *GMF* muncul setiap satu kali putaran poros *gear*. Pada frekuensi disekitar 1504 Hz juga muncul gradasi warna yang menunjukkan angka 2,5 milivolt. Munculnya gradasi warna ini dimungkinkan adalah  $2 \times GMF$ .

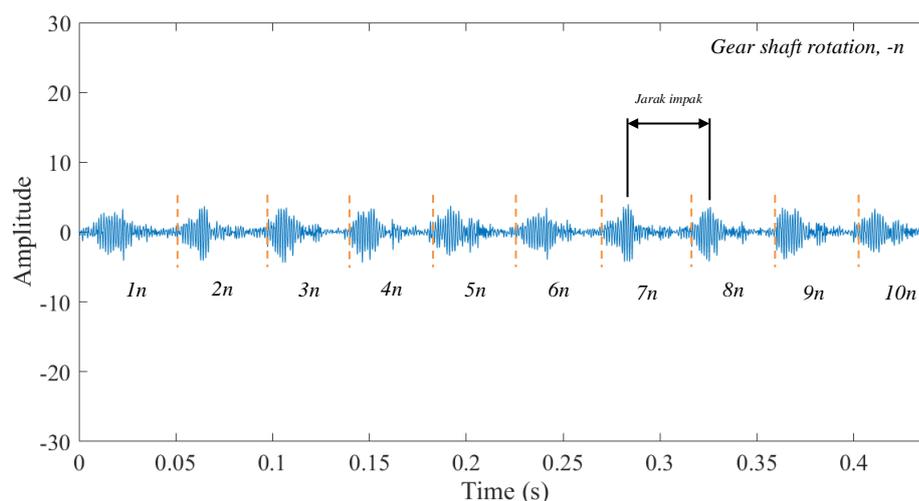
Pada kondisi roda gigi cacat level 1, nilai amplitudo tertinggi terlihat pada 17 mV. Angka ini naik 2,5 kali terhadap kondisi normal. Terdapat gradasi warna yang muncul pada frekuensi 752,2 Hz dengan nilai amplitudo 13,5 milivolt yang menunjukkan nilai *GMF*, akan tetapi kapan *GMF* itu terjadi masih sulit untuk diidentifikasi karena titik gradasi warna yang masih menyebar. Pada plot tersebut juga terdapat frekuensi lain yang muncul disekitar angka 1504 Hz dengan nilai amplitudo 10 mV. Frekuensi ini identik dengan  $2 \times GMF$ .

Pada kondisi roda gigi cacat level 2, nilai amplitudo tertinggi terlihat pada 24 mV. Hal ini menunjukkan bahwa semakin parahnya cacat maka akan berakibat meningkatnya nilai amplitudo yang ditunjukkan pada nilai *colorbar* yang semakin bertambah. Pada plot *spectrogram* kondisi cacat level 2, nilai *GMF* muncul pada frekuensi 752,2 Hz akan tetapi waktu kapan terjadinya *GMF* masih sulit untuk diidentifikasi. Merangkum dari tiga hasil tersebut, letak *GMF* pada *spectrogram* dapat terlihat, akan tetapi dikarenakan gradasi warna yang menunjukkan nilai *GMF* masih belum terpusat pada satu titik, maka identifikasi terhadap waktu terjadinya *GMF* masih sulit untuk dilakukan.

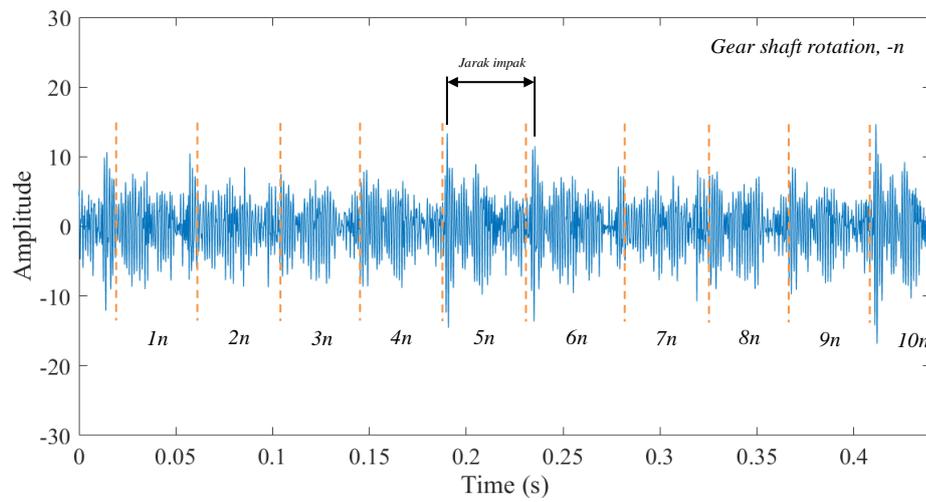
### 1.5. Plot Domain Waktu Setelah TSA

Plot domain waktu yang sebelumnya diperlihatkan pada Gambar 4.1 menunjukkan bahwa amplitudo impuls akibat impact gigi meningkat seiring meningkatnya level cacat. Akan tetapi, jarak impact setiap putaran roda gigi masih sulit untuk diidentifikasi. Hal ini dimungkinkan karena adanya *noise* yang mengakibatkan frekuensi dari roda gigi tidak dapat terlihat dengan jelas. Oleh karena itu, maka perlu dilakukan proses *denoising signal* menggunakan *Time Synchronous Averaging (TSA)* untuk mengeliminir frekuensi apa saja yang tidak sinkron terhadap frekuensi roda gigi. Plot domain waktu setelah dilakukan TSA ditampilkan pada Gambar 4.4.

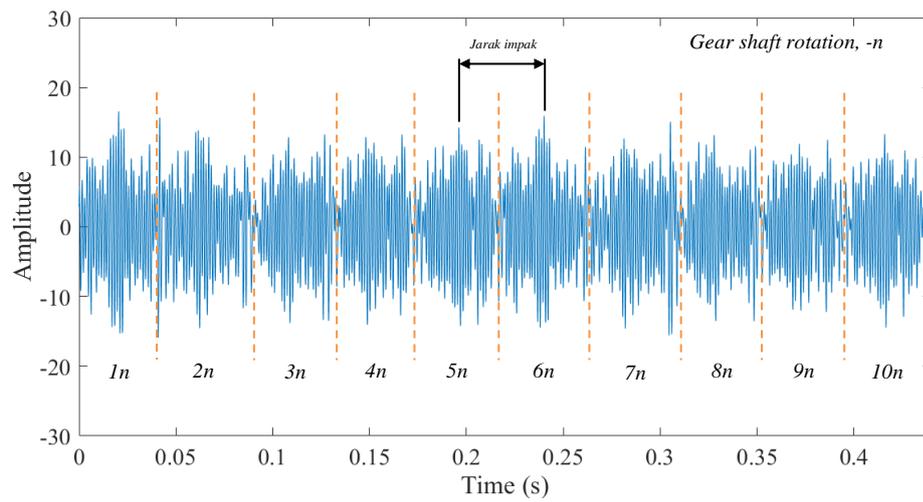
Setelah dilakukannya TSA seperti yang tampak pada Gambar 4.4, sinyal getaran yang berasal dari roda gigi beserta harmoniknya dapat terlihat lebih jelas. Sedangkan sinyal yang tidak sinkron dengan roda gigi telah hilang saat dieliminasi. Pada plot domain waktu setelah TSA juga diperlihatkan adanya kenaikan amplitudo impuls akibat impact gigi seiring dengan meningkatnya level cacat. Amplitudo impuls tertinggi identik dengan *GMF*. Jarak impact terjadi setiap 0,044 detik. Angka ini merupakan waktu satu kali putaran poros *gear*. Jadi dapat disimpulkan *GMF* terjadi setiap satu kali putaran poros *gear*.



(a)



(b)

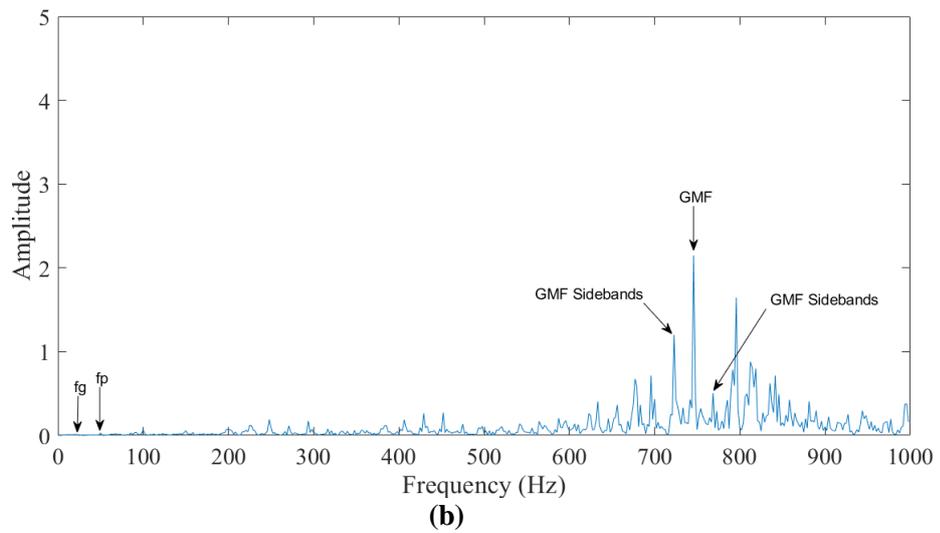
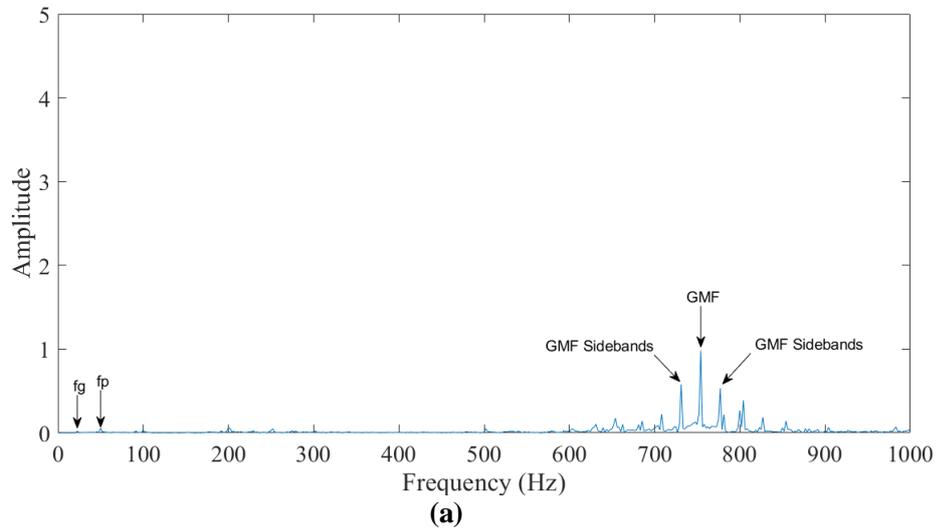


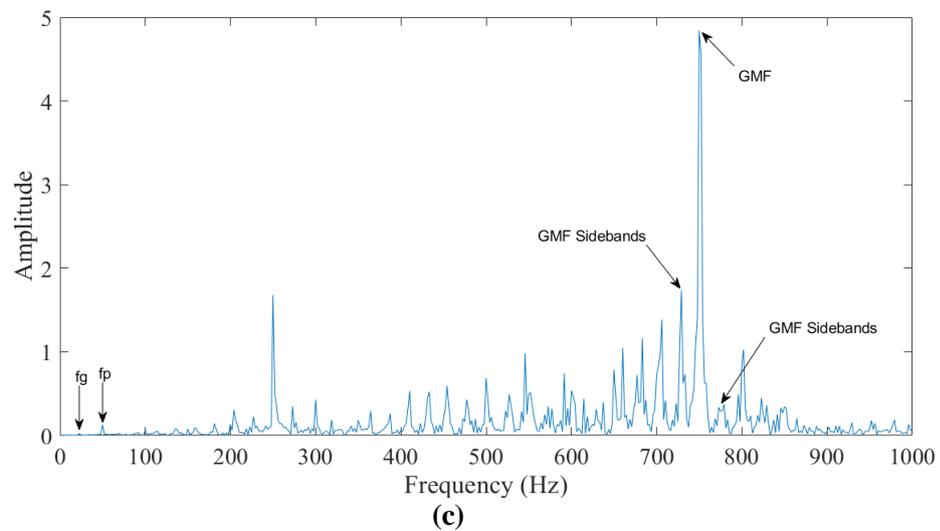
(c)

**Gambar 4. 4** Plot Domain Waktu Setelah TSA. (a) Kondisi Normal. (b) Kondisi Cacat Level 1. (c) Kondisi Cacat Level 2.

### 1.6. Plot Domain Frekuensi Setelah TSA

Berikut ini merupakan plot domain frekuensi setelah dilakukannya *TSA* yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.





**Gambar 4. 5** Plot Domain Frekuensi Setelah TSA. (a) Kondisi Normal. (b) Kondisi Cacat Level 1. (c) Kondisi Cacat Level 2.

Proses *denoising signal* akan mengakibatkan berubahnya nilai frekuensi beserta nilai amplitudonya. Nilai frekuensi yang muncul setelah dilakukannya TSA disajikan pada Tabel 4.3

**Tabel 4. 3** Nilai Frekuensi Roda Gigi Setelah TSA

Normal					
Frekuensi (Hz)	fg	fp	GMF	GMF Sidebands	
	22,9158	49,998	754,1372	731,2214	777,053
Amplitudo (mV)	0,0206	0,0564	0,9817	0,5796	0,5334
Cacat Level 1					
Frekuensi (Hz)	fg	fp	GMF	GMF Sidebands	
	22,9158	49,998	745,8042	722,8884	768,72
Amplitudo (mV)	0,0084	0,0301	2,1471	1,2001	0,5040
Cacat Level 2					
Frekuensi (Hz)	fg	fp	GMF	GMF Sidebands	
	22,9158	49,998	749,9707	729,1382	772,8865
Amplitudo (mV)	0,0248	0,1277	4,843	1,7348	0,33711

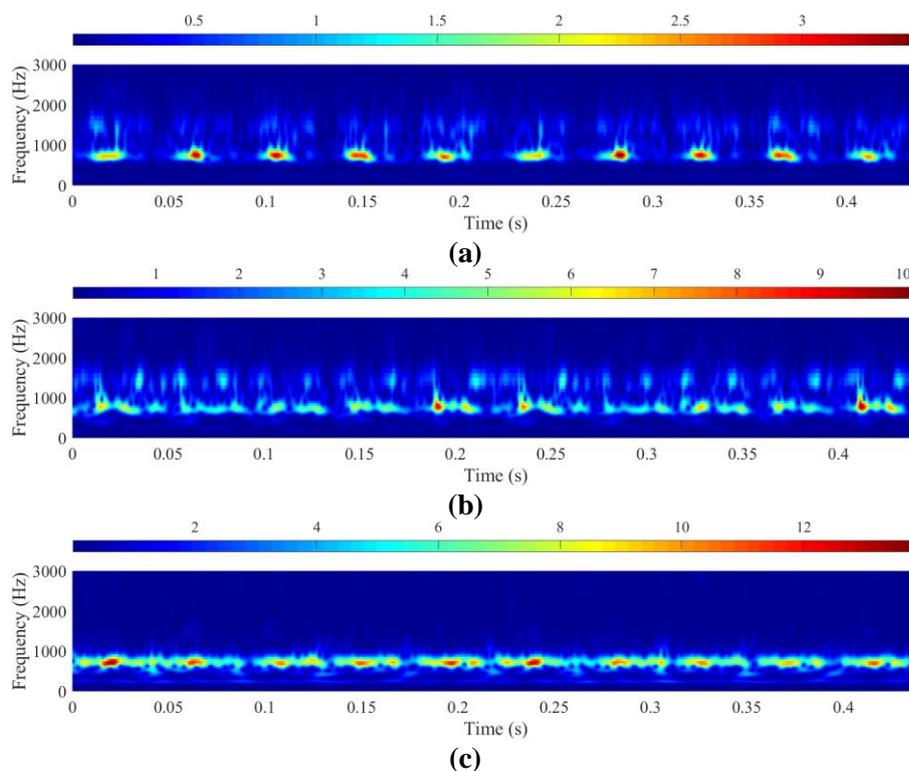
Setelah dilakukannya *TSA*, nilai *fg* dan *fp* pada setiap kondisi roda giginya cenderung sama. Nilai *fg* muncul pada frekuensi 22,9158 Hz, sedangkan nilai *fp* muncul pada frekuensi 49,998 Hz. Jika dibandingkan dengan kondisi sebelum *TSA*, kedua nilai frekuensi tersebut mengalami peningkatan. Pada kondisi cacat level 1, nilai amplitudo *fg* dan *fp* mengalami penurunan terhadap kondisi normal. Hal ini juga telah dijelaskan sebelumnya pada pembahasan plot domain frekuensi sebelum *TSA*. Pada kondisi cacat level 2, nilai amplitudo *fg* dan *fp* mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan kondisi normal dan kondisi cacat level 1. Proses naik-turunnya amplitudo ini dimungkinkan karena adanya pergeseran kontak gigi ketika poros berputar.

Munculnya Nilai *GMF* setelah dilakukannya *TSA* cenderung bervariasi pada setiap kondisi roda gigi. Pada kondisi roda gigi normal setelah *TSA*, nilai frekuensinya cenderung lebih tinggi daripada cacat level 1 dan cacat level 2 setelah *TSA*. Proses *denoising signal* ini mengakibatkan pergeseran nilai frekuensi dari *GMF*. Nilai amplitudo *GMF* setelah dilakukannya *TSA* tampak mengalami peningkatan pada setiap kondisi roda gigi. Pada kondisi cacat level 1, nilai amplitudo *GMF* naik sebesar 1,1654 mV terhadap nilai amplitudo *GMF* kondisi normal. Sedangkan pada kondisi cacat level 2, nilai amplitudo *GMF* naik sebesar 3,8613 mV terhadap kondisi normal dan 2,6959 mV terhadap kondisi cacat level 1.

Hasil *GMF sidebands* yang diperoleh setelah proses *TSA* juga bervariasi. Nilai frekuensi *GMF sidebands* yang tampak pada kondisi normal cenderung lebih tinggi jika dibandingkan dengan kondisi cacat level 1 dan cacat level 2. Amplitudo yang dihasilkan juga bervariasi pada setiap kondisi roda giginya. Proses *TSA* ini sangat berpengaruh terhadap nilai frekuensi dan nilai amplitudo yang terjadi.

### 1.7. Plot *Spectrogram Continuous Wavelet Transform (CWT) Setelah TSA*

Berikut ini merupakan plot *spectrogram CWT* setelah dilakukanya *TSA* yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



**Gambar 4. 6** Plot *Spectrogram CWT* Setelah *TSA*. (a) Kondisi Normal. (b) Kondisi Cacat Level 1. (c) Kondisi Cacat Level 2.

Gambar 4.6 merupakan plot *CWT* setelah dilakukannya *TSA* yang menampilkan getaran pada 10 kali putaran poros. Pada plot kondisi normal, terdapat gradasi warna yang memusat pada frekuensi 752,2 Hz dengan nilai amplitudo 3,5 mV yang identik dengan munculnya *GMF*. Gradasi warna ini muncul setiap 0,044 detik. Hal ini berkorelasi dengan hasil plot domain waktu setelah *TSA* yang menunjukkan *GMF* muncul pada setiap putaran poros *gear*. Pada plot *spectrogram CWT* kondisi normal setelah *TSA*, gradasi warna pada frekuensi 1504 Hz yang sebelumnya terlihat pada plot *spectrogram CWT* sebelum *TSA* sudah tidak begitu terlihat.

Pada kondisi roda gigi cacat level 1 setelah *TSA*, terdapat gradasi warna yang menunjukkan munculnya *GMF* pada frekuensi 752,2 Hz. Nilai amplitudo tertinggi terlihat pada 9 mV. Angka ini naik 2,5 kali terhadap kondisi normal

setelah *TSA*. Gradasi warna ini juga muncul setiap 0,044 detik. Pada plot setelah *TSA* kondisi cacat level 1, masih terdapat frekuensi lain yang muncul disekitar angka 1504 Hz yang diidentikan dengan  $2xGMF$ .

Pada kondisi roda gigi cacat level 2 setelah *TSA*, terdapat gradasi warna yang menunjukkan munculnya *GMF* pada frekuensi 752,2 Hz. Nilai amplitudo tertinggi terlihat pada 14 mV. Angka ini naik 4 kali terhadap kondisi normal dan 1,5 kali terhadap kondisi cacat level 1 setelah *TSA*. Gradasi warna ini juga muncul setiap 0,044 detik. Gradasi warna yang muncul pada frekuensi 1504 Hz di kondisi normal dan cacat level 1 tidak muncul pada plot CWT kondisi cacat level 2.

Berdasarkan plot *spectrogram* tersebut, semakin meningkatnya level cacat mengakibatkan semakin tingginya nilai amplitudo serta jarak penyebaran data amplitudo tinggi yang semakin meningkat. Meningkatnya penyebaran data amplitudo tinggi ini diakibatkan karena naiknya nilai amplitudo pada *GMF sidebands*.