



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN ANALISIS MODAL UNTUK
MENGUJI KARAKTERISTIK MODUS GETAR PADA
RANGKA RAKET TENIS**

**DIMAS ANGGA PRADIGA
NRP 2109 100 090**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ing. Suhardjono, M Sc.**

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2015**



FINAL PROJECT - TM 141585

**EXPERIMENTAL STUDY OF MODAL ANALYSIS TO
TEST THE MODE SHAPE CHARACTERISTICS OF
TENNIS RACKET FRAME**

**DIMAS ANGGA PRADIGA
NRP 2109 100 090**

**Supervisor
Prof. Dr. Ing. Suhardjono, M Sc.**

**Mechanical Engineering Department
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2015**

**STUDI EKSPERIMEN ANALISIS MODAL UNTUK
MENGUJI KARAKTERISTIK MODUS GETAR
PADA RANGKA RAKET TENIS**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Manufaktur
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

DIMAS ANGGA PRADIGA
NRP. 2109 100 090

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ing. Suhardjono, M.Sc. (Pembimbing)
(NIP. 196206041987011001)
2. Prof. Dr-Ing. Ir. I M London B, ME (Penguji I)
(NIP. 19581106 1986011002)
3. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA (Penguji II)
(NIP. 19650810 1991021001)
4. Ir. Sampurno, MT (Penguji III)
(NIP. 196504041989031002)

SURABAYA
Januari, 2015

STUDI EKSPERIMEN ANALISIS MODAL UNTUK MENGUJI KARAKTERISTIK MODUS GETAR PADA RANGKA RAKET TENIS

Nama Mahasiswa : Dimas Angga Pradiga
NRP : 2109 100 090
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ing. Suhardjono, M Sc.

ABSTRAK

Tenis merupakan salah satu olahraga yang cukup banyak diminati saat ini. Olahraga ini banyak mengalami perkembangan dalam segi teknologi, termasuk raket yang digunakan untuk tenis itu sendiri. Pemilihan raket sangat penting untuk menunjang performa pemain selama berlatih maupun bertanding. Getaran raket tenis yang diteruskan ke tangan pemain dan dapat menyebabkan sakit pada lengan maupun bahu sehingga mengganggu dan mengurangi kenyamanan dalam bermain. Selain daripada itu getaran raket yang besar juga mempengaruhi akurasi arah lintasan bola yang dipukul.

Salah satu kriteria pemilihan raket adalah getaran yang minimal saat terjadi tumbukan/benturan (impulse) dengan bola. Kemampuan raket tenis untuk bisa meredam getaran akibat tumbukan dengan bola sangat penting karena berpengaruh langsung pada kenyamanan tangan pemain saat menggenggam gagang raket. Besarnya getaran yang terjadi pada suatu benda erat kaitannya dengan modus getar yang terjadi. Oleh karena itu dilakukan studi eksperimen dengan menggunakan analisis modus getar yang terjadi pada rangka raket. Studi eksperimen dilakukan dengan menguji karakteristik modus getar rangka (frame) raket tenis merek Puma Boris Becker Winner yang diproduksi tahun 1984 dan menjadi the best racquet dan top 10 best seller racquet di eranya dan membandingkan dengan dua raket tenis merek Wilson.

Dari hasil eksperimen didapatkan fungsi transfer berupa compliance yaitu rasio deformasi per satuan gaya (m/N) dalam domain frekuensi (Hertz), serta modus getar yang didapat dari masing-masing frekuensi natural. Hasilnya menunjukkan bahwa pada raket Puma Boris Becker Winner terdapat 4 modus getar yaitu pada frekuensi 116 Hz bending mode, 210 Hz saddle mode, 297 Hz torsional mode, dan 321 Hz torsional mode. Pada raket Wilson Hyper Pro Staff terdapat 3 modus getar yaitu pada frekuensi 145.78 Hz bending mode, 347.48 Hz torsional mode, dan 417.37 Hz saddle mode. Pada raket Wilson Hyper Hammer terdapat 4 modus getar yaitu pada frekuensi 158.76 Hz bending mode, 397.4 Hz saddle mode, 433.35 Hz saddle mode, dan 488.27 Hz torsional mode.

Kata Kunci: rangka raket tenis, fungsi transfer, frekuensi natural, modus getar.

EXPERIMENTAL STUDY OF MODAL ANALYSIS TO TEST THE MODE SHAPE CHARACTERISTICS OF TENNIS RACKET FRAME

Name : Dimas Angga Pradiga
NRP : 2109 100 090
Department : Mechanical Engineering
Supervisor : Prof. Dr. Ing. Suhardjono, M Sc.

ABSTRACT

Tennis is one sport that is pretty much in demand nowadays. This kind of sport had developed much time on technology, included the racket of the game itself. Choice in tennis racket is very important for support player performance along training or competition. Tennis racket vibration transmitted to players hand potentially injured the elbow or arm, it can disturb and decrease the games comfort. Beside of that, the vibration of racket also affect on ball shooting accuracy.

One of the criteria of choosing racket is the minimal vibration when the string collide with the ball. Tennis racket ability to damp the vibration caused of collision with the ball is very important because it affect directly on the comfort when the hand hold the grip. Vibration magnitude of the system well related to the mode shapes. Because of that, using experimental modal analysis suitable to find mode shapes of the racket. Experimental study performed with test on racket tennis frame Puma Boris Becker Winner brand produced in 1984 that be the best racquet and top 10 best seller racquet in the to compare with two Wilson brand tennis rackets.

From the experiment, transfer function obtained by compliance or deflection per unit of force (m/N) on frequency domain (Hertz), and mode shapes obtained by the natural frequency. The result show that Puma Boris Becker Winner racket has 4 mode shapes on 116 Hz bending mode, 210 Hz saddle mode, 297 Hz torsional mode, and 321 Hz 2nd torsional

mode. In Wilson Hyper Pro Staff there was 3 modes i.e. on 145.78 Hz bending mode, 347.48 Hz torsional mode, and 417.37 Hz saddle mode. In Wilson Hyper Hammer there was 4 modes i.e. on 158.76 Hz bending mode, 397.4 Hz saddle mode, 433.35 Hz 2nd saddle mode, and 488.27 Hz torsional mode.

Keywords: tennis racket frame, transfer function, natural frequency, mode shapes.



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir strata (S1). Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan kelulusan pendidikan sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis juga ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sangat dalam kepada semua pihak yang telah banyak membantu dan berperan penting pada penyelesaian tugas akhir ini, yaitu:

1. **Allah SWT** yang selalu memberi nikmat kesehatan, rizky dan hidayah sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. **Prof. Dr. Ing. Suhardjono, M Sc.** yang sudi meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk tidak henti-hentinya membimbing dan mendidik penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
3. **Nur Urifah dan Risdianto**, kedua orang tua penulis yang tak pernah lelah mendoakan, mendidik serta selalu mendukung penulis hingga saat ini
4. Adik penulis **Risyal Septana Putra** yang selalu ada dan membantu penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
5. Keluarga besar dari kakek, nenek, opa dan oma penulis yang banyak membantu penulis.
6. **Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng, Ph.D** selaku ketua jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
7. **Prof. Dr-Ing. Ir. I Made Londen Batan, ME, Dr. Agus Sigit Pramono, DEA**, dan **Ir. Sampurno, MT** selaku dosen penguji dalam sidang tugas akhir penulis yang telah memberikan saran, kritik, dan masukan pada laporan tugas akhir ini.
8. **Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST, M Eng** yang pernah membimbing penulis dalam kesempatan tugas akhir



sebelumnya di Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis dan tidak bosan mengingatkan penulis untuk menyelesaikan studinya dengan baik.

9. **Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT, dan Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST, M Eng.** selaku Dosen Wali penulis.
10. Seluruh Staff, Dosen dan Karyawan Teknik Mesin ITS: **Mbah No, Pak Mul, Cak Ghofur, Pak Sarosa, Mas Danny, Mas Yuli, Pak Endang, Pak Gatot, Pak Gianto, Pak Nur,** dan karyawan lainnya yang telah banyak membantu penulis selama menjadi mahasiswa, terima kasih atas dedikasinya yang luar biasa.
11. **Dina Anggraini Nur Cahyani,** yang tidak henti-hentinya mengingatkan, menyemangati, dan memotivasi penulis untuk menyelesaikan tugas-tugas kuliah maupun tugas akhir, serta tidak sungkan memarahi penulis disaat lalai dan malas dalam perkuliahan, mau menjadi pendengar yang baik, dan sabar menghadapi tingkah laku penulis terimakasih dan semoga hal baik yang sudah dibangun dapat berlanjut kemudian.
12. Saudara, teman, rekan, serta sahabat seperjuangan Teknik Mesin **angkatan M-52** yang selalu memberi banyak dukungan kepada penulis dalam berbagai cara, semoga silaturahmi ini terjaga hingga tutup usia.
13. Rekan-rekan BPH HMM 2011-2012: **Deni, Anis “Pentol”, Firdaus “I-Pink”, “Okeng”, Enggar, Fatchur, Irfan “CakGun”, Dwi “Ucep”, Senna** yang tidak pernah lelah dengan tingkah sesama BPH.
14. Kakak-kakak senior penulis: **M-51, M-50, M-49, M-48** dst, terutama **SC POROS 2009 Tanto, Alfian, Najih M-48, Kriska, Andra, Rijal, Niga, Agung M-49, Mehmed, Arif, Rama, Alief, Fa’i, Ika M-50,** serta seluruh IC dan OC yang bertugas.
15. Rekan-rekan Laboratorium **Vibrasi, Otomotif, dan Mekanika Benda Padat: Enggar, Tomi, Jatmiko “Sujat”, Irfan “CakGun”, Karina, Nana, Afin, Agung, Hadid, Theduard, Rasya “Kemong”, Mahendra “Jegong”,**



- Adam, Dewi, Ryan “Gosilink”, Nava, Dhaffi**, dan rekan-rekan yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
16. Adik-adik angkatan **M-53** terutama **Nava, Dhaffi, Aufar, Dewi, Danu, Annas, Endry, Irvan “Bobo”, Nanda Tito, Cinthya, Galang, Budhita, Yodi, Atik, Fitri, Supri, Arfi Rizky “Acol”, Reza “Pam-Pam”**.
 17. Adik-adik angkatan **M-54** terutama **Fey, Azhar, Daris, Khosmin, Muchlis, Daus, Ajeng, Warida, Bobby, Cahyaning “Ateng”, Cemet, Prasetyo “Hellboy”, Listy**.
 18. Adik-adik angkatan **M-55** terutama **Rizky Akbar “Oji”, Doni “Inod”, Vrista, Fitroh “Jokobrow”, Deva “Buceng”, Amri, Radit “Lentik”, Andrian “Andur”, Hilman, Satrio “Rambo”, Rifqi “Peleh”, Muhtadi, Fian, Dwi Jo, Tria, Yunnida, Rissa, Eden, Nico**, dan semua pada umumnya yang menjadi salah satu motivasi penulis untuk tetap bersemangat menjalani masa kuliah dan menyelesaikan tugas akhir ini.
 19. Kelompok 11 POROS 2012 : **Rahma, Dewi “Iwed”, Deva “Buceng”, Doni, Rizkia “Pocong”, Anson, Oxi, Hilman, Fadli, Aldy “Jagang”, Ilman** yang selalu memberi dukungan moral kepada penulis.
 20. Adik-adik **M-56** dan **M-57** yang baru saja menjadi keluarga besar SMRM.
 21. **Segenap guru dan karyawan SMAN 2 Kota Mojoketo, SMPN 1 Kota Mojokerto, Serta SDN Purwotengah 1** yang menjadi langkah awal penulis hingga dapat menikmati pendidikan hingga saat ini.
 22. Guru-guru **SMAN 2 Kota Mojokerto** yang banyak memberi dukungan, terutama **Ibu Wiwik Windarti, Ibu Erna Widyastuti, Bapak Utono, Ibu Dety, Ibu Wiwik Andayani**.
 23. Teman-teman **SMAN 2 Kota Mojoketo, Ghozali, Mahendra, Agung, Mahilda, Veni, Anik, Gaby, Naim, Ericko, Hany, Ayu, Riska, Linda**.



-
24. Rekan-rekan Saka Dirgantara Mojokerto, **Bos Mad, Bang Kodim, Cak Vidi, Cak Ta'in, Kimput, Emprit** yang banyak menyemangati penulis dari basecamp Fun Fly.
 25. Seluruh pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Besar harapan agar tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kehidupan dan siapa saja yang membutuhkan. Penulis menyadari masih banyaknya kekurangan dalam tugas akhir ini, oleh sebab itu penulis memohon maaf sebesar-besarnya, sekaligus tak henti-hentinya menunggu kritik dan saran untuk memperbaiki lagi.
Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, Januari 2015

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	x
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2 PENDAHULUAN	
2.1 Dasar Teori	7
2.1.1 Getaran Harmonik	7
2.1.2 Sistem Getaran Satu Derajat Kebebasan	8
2.1.3 Sistem Getaran Dua Derajat Kebebasan	15
2.1.4 Sistem Getaran Multi Derajat Kebebasan	21
2.1.5 Kekakuan Statik dan Dinamik	22
2.1.6 Analisis Modal	24
2.1.7 Analisis Modus Getar Secara Eksperimen	25
2.2 Penelitian Terdahulu	27
2.2.1 Miles A. Buechler dkk (2003)	27
2.2.2 Yao-Dong Gu (2006)	29
2.2.3 P. K. Chidambaram (2014)	30
BAB 3 METODE PENELITIAN	
3.1 Langkah-langkah Penelitian	33
3.2 Diagram Alir Penelitian	35
3.3 Alat Bantu Percobaan	36
3.4 Set-up Peralatan Uji Eksitasi	39
3.5 Langkah Kerja Eksperimen	40
3.6 Spesifikasi Spesimen	44



BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Raket Puma Boris Becker Winner	47
4.1.1 Modus Getar pada Frekuensi Natural 116 Hz	47
4.1.2 Modus Getar pada Frekuensi Natural 210 Hz	48
4.1.3 Modus Getar pada Frekuensi Natural 297 Hz	50
4.1.4 Modus Getar pada Frekuensi Natural 321 Hz	51
4.2 Raket Wilson Hyper Pro Staff Extreme 6.7	53
4.2.1 Modus Getar pada Frekuensi Natural 145.78 Hz	53
4.2.2 Modus Getar pada Frekuensi Natural 347.48 Hz	54
4.2.3 Modus Getar pada Frekuensi Natural 417.37 Hz	56
4.3 Raket Wilson Hyper Hammer 4.0	57
4.3.1 Modus Getar pada Frekuensi Natural 158.76 Hz	57
4.3.2 Modus Getar pada Frekuensi Natural 397.4 Hz	59
4.3.3 Modus Getar pada Frekuensi Natural 433.35 Hz	60
4.3.4 Modus Getar pada Frekuensi Natural 488.27 Hz	62
4.4 Perbandingan Harga <i>Compliance</i> Maksimum Spesimen	63
4.5 Perbandingan Harga <i>Compliance</i> Rata-rata Spesimen	65

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran dan Rekomendasi	68

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1.	<i>Compliance</i> dan sudut fase raket Puma pada modus getar pertama	48
Tabel 4.2.	<i>Compliance</i> dan sudut fase raket Puma pada modus getar kedua	50
Tabel 4.3.	<i>Compliance</i> dan sudut fase raket Puma pada modus getar ketiga	51
Tabel 4.4.	<i>Compliance</i> dan sudut fase raket Puma pada modus getar keempat	53
Tabel 4.5.	<i>Compliance</i> dan sudut fase raket Wilson Hyper 6.7 pada modus getar pertama	54
Tabel 4.6.	<i>Compliance</i> dan sudut fase raket Wilson Hyper 6.7 pada modus getar kedua	55
Tabel 4.7.	<i>Compliance</i> dan sudut fase raket Wilson Hyper 6.7 pada modus getar ketiga	57
Tabel 4.8.	<i>Compliance</i> dan sudut fase raket Wilson Hyper 4.0 pada modus getar pertama	58
Tabel 4.9.	<i>Compliance</i> dan sudut fase raket Wilson Hyper 4.0 pada modus getar kedua	60
Tabel 4.10.	<i>Compliance</i> dan sudut fase raket Wilson Hyper 4.0 pada modus getar ketiga	61
Tabel 4.11.	<i>Compliance</i> dan sudut fase raket Wilson Hyper 4.0 pada modus getar keempat	63
Tabel 5.1.	Perbandingan karakteristik modus getar	67



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Raket Puma Boris Becker Winner (atas) dan Boris Becker Super (bawah)	2
Gambar 1.2.	Efek pantulan dari bola ke raket tenis	3
Gambar 2.1.	Gerakan periodik harmonik atau getaran dalam domain waktu	7
Gambar 2.2.	Ilustrasi getaran pada pegas	8
Gambar 2.3.	Sistem getaran satu derajat kebebasan	8
Gambar 2.4.	Gambar diagram benda bebas sistem getaran satu derajat kebebasan	9
Gambar 2.5.	Sistem representasi analisis getaran	10
Gambar 2.6.	Gambar grafik komponen real dari suatu fungsi transfer	13
Gambar 2.7.	Gambar grafik komponen imajiner dari suatu fungsi transfer	14
Gambar 2.8.	Gambar grafik karakteristik penguatan amplitudo getaran satu derajat kebebasan	15
Gambar 2.9.	Gambar grafik karakteristik penguatan dengan beberapa macam redaman	15
Gambar 2.10.	Sistem getaran dua derajat kebebasan	16
Gambar 2.11.	Diagram benda bebas sistem getaran dua derajat kebebasan	16
Gambar 2.12.	Gambar grafik karakteristik penguatan amplitudo getaran dua derajat kebebasan	19
Gambar 2.13.	Sistem getaran multi derajat kebebasan	21
Gambar 2.14.	Elemen luasan dalam bidang kartesian x dan y	23
Gambar 2.15.	Eksperimen analisis modal dengan free-free condition	26
Gambar 2.16.	Representasi sinyal getaran	26
Gambar 2.17.	Lokasi penempatan accelerometer	28
Gambar 2.18.	Hasil eksperimen dari kondisi undamped	29
Gambar 2.19.	Modus getar rangka raket Yao-dong	30
Gambar 2.20.	Animasi string raket pada frekuensi natural pertama	30



Gambar 2.21.	Visualisasi PRO/ENGINEER untuk raket dan bola	31
Gambar 2.22.	Titik uji raket dalam pemodelan Chidambaram	31
Gambar 2.23.	Perbedaan bending mode shape pada titik uji	32
Gambar 3.1.	Titik uji pada rangka raket dalam visualisasi AutoCAD 3D	34
Gambar 3.2.	Diagram alir penelitian	36
Gambar 3.3.	Gambar Impulse Hammer Tipe IH 101-1K Omega	37
Gambar 3.4.	Gambar Power Supply Tipe ACC-PS1 Omega	38
Gambar 3.5.	Gambar Analog to Digital Converter Tipe	38
Gambar 3.6.	General Purpose Accelerometer Omega	39
Gambar 3.7.	Gambar skema set-up peralatan percobaan uji eksitasi	39
Gambar 3.8.	Konfigurasi data pada software PicoScope	41
Gambar 3.9.	Pengujian eksitasi dengan Impulse Hammer	41
Gambar 3.10.	Contoh output getaran dalam software PicoScope	42
Gambar 3.11.	Hasil olah data (compliance dan sudut fase) dalam software Mathcad	42
Gambar 3.12.	Diagram alir eksperimen	43
Gambar 3.13.	Raket Puma Boris Becker Winner	44
Gambar 3.14.	Raket Wilson Pro Staff Extreme 6.7	44
Gambar 3.15.	Raket Wilson Hammer 4.0	45
Gambar 4.1.	Modus getar raket Puma Boris Becker pada frekuensi natural pertama	47
Gambar 4.2.	Modus getar raket Puma Boris Becker pada frekuensi natural kedua	49
Gambar 4.3.	Modus getar raket Puma Boris Becker pada frekuensi natural ketiga	50
Gambar 4.4.	Modus getar raket Puma Boris Becker pada frekuensi natural keempat	52
Gambar 4.5.	Modus getar raket Wilson Hyper Pro Staff pada frekuensi natural pertama	53



Gambar 4.6.	Modus getar raket Wilson Hyper Pro Staff pada frekuensi natural kedua	55
Gambar 4.7.	Modus getar raket Wilson Hyper Pro Staff pada frekuensi natural ketiga	56
Gambar 4.8.	Modus getar raket Wilson Hyper Hammer pada frekuensi natural pertama	58
Gambar 4.9.	Modus getar raket Wilson Hyper Hammer pada frekuensi natural kedua	59
Gambar 4.10.	Modus getar raket Wilson Hyper Hammer pada frekuensi natural ketiga	61
Gambar 4.11.	Modus getar raket Wilson Hyper Hammer pada frekuensi natural keempat	62
Gambar 4.12.	Grafik compliance rata-rata pada <i>grip</i> ketiga raket	63
Gambar 4.13.	Grafik compliance rata-rata pada <i>head</i> ketiga raket	65
Gambar 4.14.	Grafik kekakuan dinamik rata-rata pada <i>head</i> ketiga raket	66



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tenis adalah salah satu cabang olahraga olimpiade dan dimainkan pada semua tingkat masyarakat di segala usia. Olahraga ini dapat dimainkan oleh siapa saja, termasuk orang-orang yang menggunakan kursi roda. Permainan tenis modern berasal dari Birmingham, Inggris pada akhir abad ke-19 yang dinamakan sebagai "*lawn tennis*" atau tenis lapangan rumput. Pada awalnya permainan tersebut dilakukan dengan memukul bola menggunakan telapak tangan. Louis X dari Perancis adalah salah satu penggemar permainan *jeu de paume*, ("permainan telapak tangan"), yang akhirnya berkembang menjadi tenis, dan ia tercatat menjadi orang yang membangun lapangan tenis di dalam ruangan menurut gaya modern. Raket bersenar diperkenalkan pertama kali pada abad ke-15 oleh Antonio da Scalo, seorang pastur berbangsa Italia. Ia menulis aturan umum bagi semua permainan yang menggunakan bola, termasuk tenis. Raket mulai digunakan pada abad ke-16 dan permainan ini mulai disebut "tenis", yang berasal dari istilah dalam bahasa Perancis lama *tenez*, yang dapat diartikan "tahan!", "terima!", atau "ambil!". Majalah Inggris "Sporting Magazine" menamakan permainan ini sebagai 'tenis lapangan' (*lawn tennis*). Dalam buku "*Book of Games And Sports*", yang diterbitkan dalam tahun 1801, disebut sebagai "tenis panjang" [1].

Seiring berkembangnya teknologi dan bahan-bahan baru yang ditemukan, raket tenis secara signifikan berubah. Berkembangnya bahan dan teknologi dalam pembuatan raket tenis membuat desainer saat ini harus secara tepat menetapkan tujuan serta mengidentifikasi parameter mekanis untuk mencapai tujuan tersebut [2]. Pada tahun 1984 diproduksi raket tenis merek Puma yang dibuat dalam dua tipe yaitu Boris Becker Super dan Boris Becker Winner (gambar 1.1) yang sekaligus dipakai oleh sang atlit yaitu Boris Becker. Namun raket tersebut mengalami



peningkatan penjualan sejak 1985 yaitu setelah kemenangan Boris Becker pada Wimbledon dari 15,000 per tahun menjadi 150,000 per tahun dan dimuat di majalah *Tennis Magazin* Oktober 1989. Raket Puma Boris Becker Winner pertama yang dipakai Boris sendiri adalah versi yang dibuat dengan bahan 50 persen grafit, sedangkan yang dijual di pasaran saat itu mengandung 30 persen grafit.

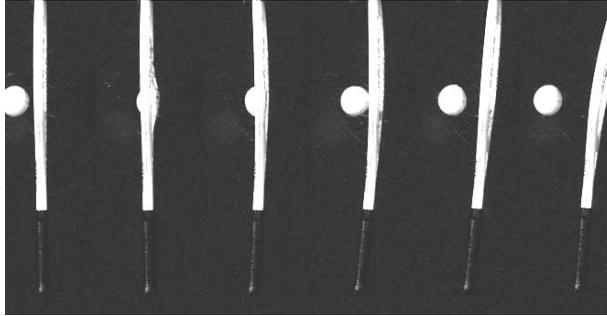


Gambar 1.1 Raket Puma Boris Becker Winner (atas) dan Boris Becker Super (bawah)^[3]

Pemilihan raket sangat penting dalam permainan tenis mengingat raket tenis adalah salah satu *equipment* utama dalam permainan ini. Tentunya banyak pertimbangan yang diperhatikan seperti kenyamanan dalam memakai ataupun dalam hal getaran yang disalurkan ke tangan saat memukul bola. Dalam sebuah riset yang dilakukan oleh Blackwell & Knudson menyebutkan bahwa bola yang dipukul balik menyebabkan gaya impuls pada *string* yang kemudian diteruskan oleh frame hingga sampai ke tangan yang memegang *grip*. Gaya ini menghentikan putaran pada pergelangan tangan dan dalam kondisi repetitif atau berulang-ulang dapat menyebabkan cedera [4]. Efek gaya yang ditimbulkan



bola ini juga direkam dalam sebuah visualisasi seperti ditunjukkan gambar 1.2



Gambar 1.2 Efek pantulan dari bola ke raket tenis^[4]

Dalam penelitian lain di bidang biomekanik juga dilakukan Edwald M. Hennig dengan menguji pengaruh dari propertis raket terhadap cedera dan performa pemain. Hennig menguji dengan memvariasikan gaya pada *grip* dan posisi pemukulan untuk mendapatkan *shock* dan getaran minimum pada lengan. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil berupa perubahan efek *shock* dan getaran dapat dilihat dengan mengubah posisi pemukulan bola pada raket [5].

Maka dari itu banyak perusahaan raket tenis berlomba-lomba mengembangkan raket tenis produksinya, tidak ketinggalan pula *The Wilson Sporting Goods Company USA* yang bergerak di bidang peralatan olahraga terus mengembangkan raket tenis buatannya. Hingga saat ini Wilson mampu membuat raket tenis untuk professional dengan bahan 20 hingga 80 persen grafit dengan berat tidak lebih dari 300 gram untuk raket pria, dan kisaran 200 gram untuk raket wanita [6]. Saat ini (2014) Wilson menempati peringkat pertama untuk *best seller tennis racquets* dan disusul pesaingnya yaitu Head dan Prince. Wilson Hyper Pro Staff Extreme 6.7 dan Wilson Hyper Hammer 4.0 merupakan salah satu produk unggulan dari merek Wilson yang dibuat di tahun 2002 dengan dimensi yang lebih besar dari raket Puma



Boris Becker (1984) namun dengan massa yang lebih ringan yaitu ± 275 gram.

1.2 Perumusan Penelitian

Getaran yang terjadi pada sebuah struktur erat kaitannya dengan modus getar yang dimiliki struktur tersebut. Maka perlu diketahui pula bagaimana fungsi transfer dan berapa frekuensi natural dari rangka raket, sehingga dapat diketahui bagaimana karakteristik modus getar yang ada pada raket tersebut untuk nantinya dianalisa lebih lanjut. Serta bagaimana pula perbandingan karakteristik getaran dari raket Puma Boris Becker Winner yang mempunyai profil penampang *rectangular*, raket Wilson Hyper Pro Staff Extreme 6.7 dengan profil penampang *oval* dan raket Wilson Hyper Hammer 4.0 dengan profil penampang gabungan antara *oval* dan *rectangular*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari eksperimen ini adalah mendapatkan modus getar pada raket sesuai dengan fungsi transfer dan frekuensi natural serta menganalisa karakteristik masing-masing modus getar yang ada pada raket Puma Boris Becker Winner, raket Wilson Hyper Pro Staff Extreme 6.7 dan raket Wilson Hyper Hammer 4.0 sehingga dapat diketahui perbandingan karakteristik dinamik ketiga raket.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan masalah diperlukan dalam eksperimen guna membuat hasil penelitian ini lebih terfokus dan tidak meluas, yaitu diterapkannya *free-free boundary condition* dengan menggantung raket menggunakan tali berjarak 20cm terhadap gantungan yang dianggap statis sehingga frekuensi natural yang terjadi murni dari raket [7]. Lalu pengambilan data dilakukan pada hari yang sama tanpa memindah posisi serta tidak mengubah dimensi dan propertis raket untuk menghindari kesalahan data.



Kemudian getaran akibat gesekan dengan udara sekitar sangat kecil dan dianggap tidak berpengaruh pada eksperimen ini.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil eksperimen ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai karakteristik modus getar pada raket tenis Puma Boris Becker Winner, raket tenis Wilson Hyper Pro Staff Extreme 6.7 dan raket Wilson Hyper Hammer 4.0, sehingga dapat menjadi pertimbangan dalam pemilihan raket untuk para pemain tenis. Diharapkan pula dari eksperimen ini dapat dijadikan referensi mengenai modus getar serta dapat dijadikan acuan untuk melakukan penelitian-penelitian selanjutnya.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



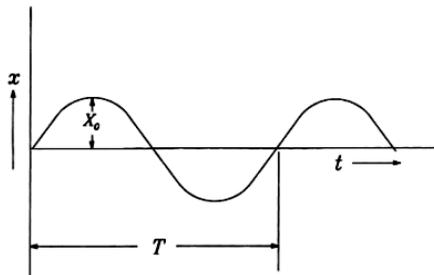
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

Dasar teori merupakan landasan awal yang digunakan penulis sebagai dasar pemikiran diadakannya penelitian serta membantu dalam analisa yang berkaitan dengan penelitian ini. Untuk itulah ditulis beberapa dasar teori mengenai hal-hal yang terkait penelitian modus getar seperti yang tertulis berikut ini.

2.1.1 Getaran Harmonik

Getaran adalah suatu gerakan periodik atau gerak yang berulang dalam suatu interval waktu tertentu (periode/T). Bila diterapkan di mesin maka getaran pada mesin adalah gerakan suatu bagian mesin maju dan mundur (bolak-balik) dari keadaan diam/netral. Ilustrasi gerakan periodik harmonik dalam domain waktu ditunjukkan pada Gambar 2.1 dibawah ini. Perpindahan jarak (*displacement*) diGambarkan pada arah vertikal sedangkan waktu diGambarkan pada arah horizontal.

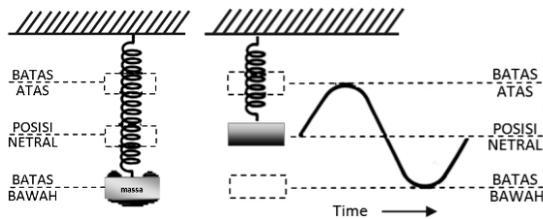


Gambar 2.1 Gerakan periodik harmonik atau getaran dalam domain waktu ^[8]

Gambar 2.1 menunjukkan bahwa nilai maksimum *displacement* adalah X_0 . Nilai ini disebut amplitudo. Periode T biasanya diukur dalam satuan second. Setiap atau satu kali



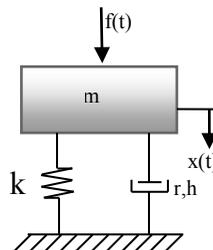
gelombang naik dan turun dinamakan osilasi sedangkan gelombang bolak balik dalam satu periode T disebut frekuensi getaran (f) yang besarnya diukur dalam satuan *cycles per second* (cps) atau Hertz (Hz). Secara matematis nilai frekuensi getaran adalah satu per periode $f=1/T$. Ilustrasi sederhana untuk menunjukkan suatu getaran adalah pada gerakan pegas. Pegas akan bergerak/bergetar setelah diberikan gaya. Setelah gaya tarik (F) yang diberikan dilepas dari pegas maka pegas akan bergetar dan bergerak bolak-balik disekitar posisi netralnya. Gambar ilustrasi getaran ditunjukkan pada Gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Ilustrasi getaran pada pegas^[9]

2.1.2 Sistem Getaran Satu Derajat Kebebasan

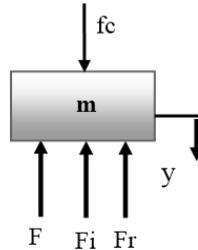
Sistem getaran dengan derajat kebebasan tunggal teredam terdiri dari massa, pegas, dan redaman. Gambar model sistem getaran dengan derajat kebebasan tunggal teredam ditunjukkan pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Sistem getaran satu derajat kebebasan^[10]



Diagram benda bebas dari Gambar sistem getaran 1 D.O.F dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.4 berikut ini.



Gambar 2.4 Diagram benda bebas sistem getaran satu derajat kebebasan

Pada Gambar 2.4 diatas terdapat simbol-simbol yang penjelasannya adalah sebagai berikut:

F_k = Gaya pegas

F_i = Gaya inersia

F_r = Gaya redaman

F_c = Gaya eksitasi

y = arah gerak bendakerja

Kesetimbangan gaya-gaya pada Gambar 2.4 diatas adalah $\Sigma F = 0$ sedangkan bendakerja bergerak kearah y , maka Gaya Inersia (F_i) adalah massa dikali dengan percepatan ($m\ddot{y}$) dengan arah yang berlawanan dengan arah y . Sehingga untuk analisa sistem getarannya adalah sebagai berikut:

Getaran paksa teredam syaratnya adalah gaya dan redaman tidak boleh sama dengan nol ($F \neq 0$ dan $c \neq 0$) [10].

$$F_i + F_r + F_k - F_c = 0 \quad (2.1)$$

$$m\ddot{y} + r\dot{y} + ky = F_c \quad (2.2)$$

Jika diasumsikan bahwa gaya eksitasi merupakan gaya harmonik serta sesuai dengan fungsi euler maka:

$$F(t) = \tilde{F}e^{i\Omega t} \quad (2.3)$$



\hat{F} adalah amplitudo gaya serta Ω adalah frekuensi angular. Dengan demikian respon getaran yang terjadi juga diasumsikan harmonik sehingga reaksi getaran tersebut adalah sebagai berikut:

$$Y = y(t) = \hat{y} e^{i\Omega t} \quad (2.4)$$

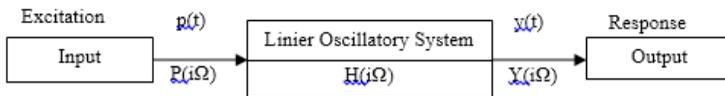
$$\dot{Y} = \frac{dy}{dt} = i\Omega \hat{y} e^{i\Omega t} \quad (2.5)$$

$$\ddot{Y} = \frac{d^2y}{dt^2} = i^2 \Omega^2 \hat{y} e^{i\Omega t} = -\Omega^2 \hat{y} e^{i\Omega t} \quad (2.6)$$

Selanjutnya dilakukan substitusi persamaan (2.2) dengan persamaan (2.3) hingga persamaan (2.6) sehingga menghasilkan persamaan :

$$(-m\Omega^2 + ir\Omega + k)\hat{Y} = \hat{F} \quad (2.7)$$

Karakteristik dinamik sistem getaran ditentukan dari hubungan input - output sebagai fungsi frekuensi dari fungsi transfer (*Frequency Response Function*) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut ini.



Gambar 2.5 Sistem representasi analisis getaran ^[11]

Fungsi respon frekuensi adalah rasio output (respon getaran) dengan input (gaya eksitasi) sebagai karakteristik penguatan amplitudo getaran sehingga perbandingan amplitudo getaran dan gaya F dapat ditulis seperti persamaan 2.8,

$$H(i\Omega) = \frac{\hat{Y} e^{i\Omega t}}{\hat{F} e^{i\Omega t}} = \frac{\hat{Y}}{\hat{F}} \quad (2.8)$$



Dengan demikian maka fungsi transfer persamaan (2.8) antara getaran dan gaya eksitasi adalah sebagai berikut :

$$H(i\Omega) = \frac{\ddot{Y}}{\ddot{F}} = \frac{1}{k - m\Omega^2 + ir\Omega} \quad (2.9)$$

Selanjutnya pada fungsi transfer persamaan (2.9) semua komponen dikali $1/m$, sehingga persamaan menjadi:

$$H(i\Omega) = \frac{1/m}{\omega_0^2 - \Omega^2 + i2\zeta\omega_0\Omega} \quad (2.10)$$

Persamaan *angular natural frequency* :

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (2.11)$$

$$\frac{r}{m} = 2\zeta\omega_0 \quad (2.12)$$

ζ adalah rasio redaman dengan persamaan:

$$\zeta = \frac{r}{rc} \quad (2.13)$$

$rc = \text{critical damping}$

Sedangkan rasio redaman (ζ) saat $\omega = \omega_0$ seperti yang dijelaskan [11] dapat ditentukan menggunakan persamaan:

$$\zeta = \frac{1}{2 \cdot a \cdot k} \quad (2.14)$$

Rasio redaman (ζ) dapat ditentukan pula menggunakan persamaan 2.15,

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f_r} \quad (2.15)$$



Nilai f_1 dan f_2 didapat dari perpotongan grafik pada daerah frekuensi pribadi dengan nilai :

$$\frac{1}{2}\sqrt{2}.a \quad (2.16)$$

Nilai a adalah amplitudo frekuensi pribadi sistem.
Nilai redaman ditentukan menggunakan persamaan:

$$r = 2\zeta\sqrt{km} \quad (2.17)$$

Nilai redaman sistem dapat pula ditentukan dengan persamaan:

$$r = 2.\zeta.\omega_0.m \quad (2.18)$$

Frekuensi pribadi sistem saat teredam (ω_0) dapat ditentukan menggunakan persamaan:

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\sqrt{1-\zeta}} \quad (2.19)$$

Jika $\eta = \frac{\Omega}{\omega_0}$ maka persamaan (2.10) menjadi:

$$H(i\Omega) = \frac{1/k}{1-\eta^2+i2\zeta\eta} \quad (2.20)$$

Bilangan imajiner (i) sama dengan $\sqrt{-1}$ atau $i^2 = -1$, sehingga persamaan (2.20) menjadi :

$$H(i\Omega) = \frac{1/k(1-\eta^2)-i1/k(2\zeta\eta)}{(1-\eta^2)^2+4\zeta^2\eta^2}$$

atau

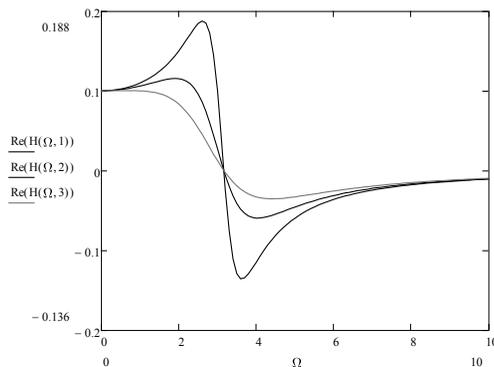


$$H(i\Omega) = \frac{1}{k} \left(\frac{1 - \eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4\zeta^2 \eta^2} \right) - i \frac{1}{k} \left(\frac{2\zeta\eta}{(1 - \eta^2)^2 + 4\zeta^2 \eta^2} \right)$$

Dengan demikian komponen real dari fungsi transfer tersebut adalah :

$$\text{Re}\{H(i\Omega)\} = \frac{1}{k} \left(\frac{1 - \eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4\zeta^2 \eta^2} \right) \quad (2.21)$$

Contoh gambar grafik komponen real dari fungsi transfer ditunjukkan pada gambar 2.6 dibawah ini.

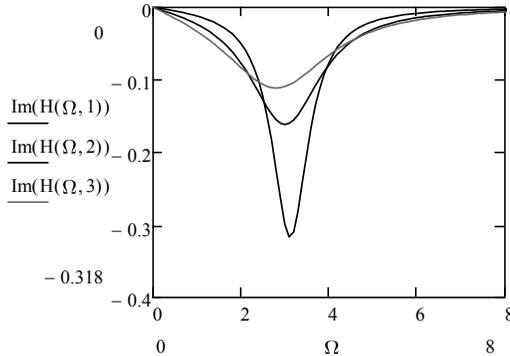


Gambar 2.6 Grafik komponen real dari suatu fungsi transfer

Sedangkan komponen imajiner dari fungsi transfer adalah sebagai berikut:

$$\text{Im}\{H(i\Omega)\} = \frac{1}{k} \left(\frac{-2D\eta}{(1 - \eta^2)^2 + 4\zeta^2 \eta^2} \right) \quad (2.22)$$

Gambar grafik komponen imajiner dari fungsi transfer ditunjukkan pada gambar 2.7,



Gambar 2.7 Grafik komponen imajiner dari suatu fungsi transfer

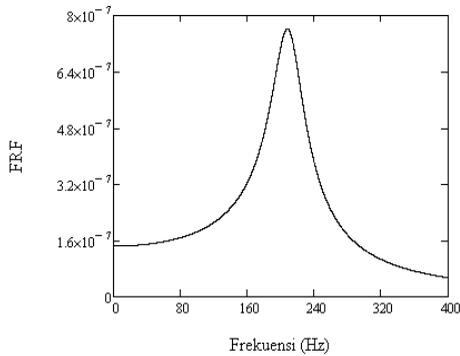
Untuk harga absolut dari fungsi transfer memiliki persamaan umum sebagai berikut:

$$|H(i\Omega)| = \sqrt{[\text{Re}\{H(i\Omega)\}]^2 + [\text{Im}\{H(i\Omega)\}]^2} \quad (2.23)$$

Sehingga dengan mensubstitusikan persamaan (2.21) dan (2.22) ke persamaan (2.23) maka didapatkan persamaan berikut ini:

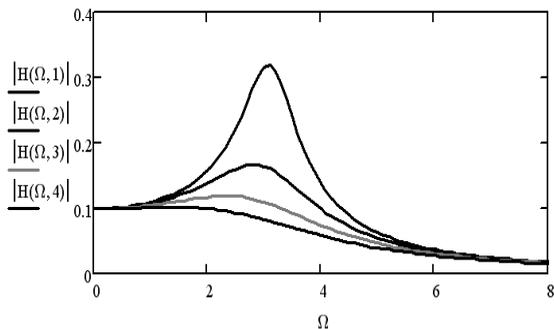
$$|H(i\Omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2\zeta\eta)^2}} \quad (2.24)$$

Contoh grafik fungsi transfer yang merupakan karakteristik penguatan amplitudo getaran satu derajat kebebasan ditunjukkan pada gambar 2.8,



Gambar 2.8 Grafik karakteristik penguatan amplitudo getaran satu derajat kebebasan

Sedangkan contoh grafik karakteristik penguatan dengan beberapa redaman ditunjukkan pada gambar 2.9 berikut ini.



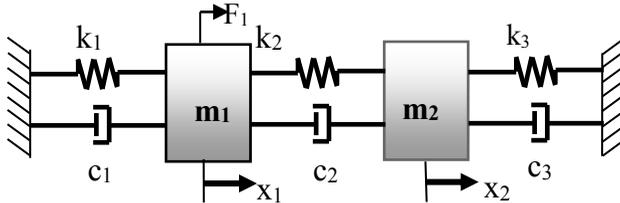
Gambar 2.9 Grafik karakteristik penguatan dengan beberapa macam redaman

2.1.3 Sistem Getaran Dua Derajat Kebebasan

Sistem getaran mesin dengan dua derajat kebebasan adalah sistem yang digunakan untuk menentukan kedudukan massa dalam ruang yang membutuhkan dua arah koordinat bebas.

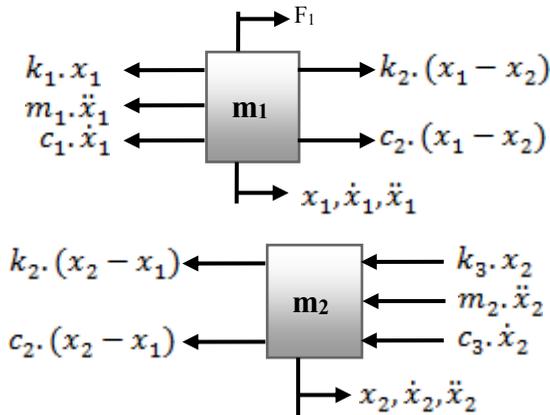


Sistem getaran tersebut dapat diGambarkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10 berikut ini.



Gambar 2.10 Sistem getaran dua derajat kebebasan ^[13]

Model dua derajat kebebasan pada gambar 2.10 bila dibuat diagram benda bebas akan menjadi seperti yang diGambarkan pada gambar 2.11 berikut ini.



Gambar 2.11 Diagram benda bebas sistem getaran dua derajat kebebasan

Persamaan gerak sistem untuk massa 1 pada gambar 2.11 dapat ditulis seperti persamaan 2.25,

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = F_1$$



$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + c_2\dot{x}_1 - c_2\dot{x}_2 + k_1x_1 + k_2x_1 - k_2x_2 = F_1 \quad (2.25)$$

Sedangkan persamaan gerak sistem untuk massa 2 dapat ditulis seperti berikut:

$$m_2\ddot{x}_2 - c_2\dot{x}_1 + (c_2 + c_3)\dot{x}_2 - k_2x_1 + (k_2 + k_3)x_2 = 0$$
$$m_2\ddot{x}_2 - c_2\dot{x}_1 + (c_2 + c_3)\dot{x}_2 - k_2x_1 + (k_2 + k_3)x_2 = 0 \quad (2.26)$$

Persamaan gerak sistem untuk dua derajat kebebasan diatas dapat dituliskan menggunakan matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.27)$$

dengan:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} = \text{Matriks massa}; \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} = \text{Matriks percepatan};$$

$$\begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} = \text{Matriks redaman}; \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} \\ = \text{Matriks kecepatan}$$

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} = \text{Matriks kekakuan}; \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \\ = \text{Matriks displacement}$$

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ 0 \end{Bmatrix} = \text{Matriks gaya}$$



Dengan asumsi bahwa getaran yang terjadi adalah harmonik, dengan gaya $F = \hat{F} e^{i\Omega t}$, maka respon getarannya dapat ditulis dalam persamaan 2.28,

$$\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}} e^{i\Omega t}; \dot{\mathbf{x}} = i \Omega \hat{\mathbf{x}} e^{i\Omega t}; \ddot{\mathbf{x}} = -\Omega^2 \hat{\mathbf{x}} e^{i\Omega t} \quad (2.28)$$

Persamaan (2.28) disubstitusi dengan persamaan (2.27) sehingga persamaan menjadi :

$$\begin{bmatrix} -m_1\Omega^2 + i\Omega(c_1 + c_2) + (k_1 + k_2) & -i\Omega c_2 - k_2 \\ -i\Omega c_2 - k_2 & -m_2\Omega^2 + i\Omega(c_2 + c_3) + (k_2 + k_3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{F}_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.29)$$

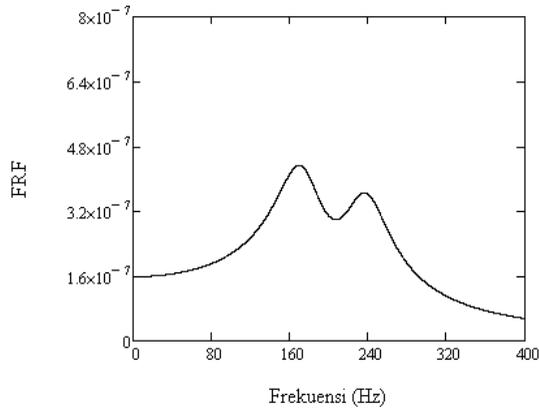
Agar sistem dapat bergetar maka persamaan (2.29) harus memiliki syarat $e^{i\Omega t} \neq 0; x_1 \neq 0; x_2 \neq 0; \hat{F}_1 \neq 0$ sehingga untuk solusi \hat{x}_1 adalah:

$$\hat{x}_1 = \frac{\hat{F}_1(-m_2\Omega^2 + i\Omega(c_2 + c_3) + (k_2 + k_3)) - 0(i\Omega c_2 - k_2)}{|\underline{\Delta}|} \quad (2.30)$$

Dengan menggunakan fungsi transfer dapat diketahui besar penguatan amplitudo massa 1 dan gaya pada massa 1 dari solusi \hat{x}_1 diatas seperti berikut ini:

$$H_{11}(\Omega) = \frac{\hat{x}_1}{\hat{F}_1} = \frac{-m_2\Omega^2 + i\Omega(c_2 + c_3) + (k_2 + k_3)}{|\underline{\Delta}|} \quad (2.31)$$

Contoh grafik fungsi transfer yang merupakan karakteristik penguatan amplitudo getaran dua derajat kebebasan ditunjukkan pada gambar 2.12,



Gambar 2.12 Grafik karakteristik penguatan amplitudo getaran dua derajat kebebasan^[11]

Sedangkan untuk solusi \hat{x}_2 pada persamaan (2.29) adalah:

$$\hat{x}_2 = \frac{-\ddot{F}_1(-i\Omega c_2 - k_2)}{|\underline{\Delta}|} \quad (2.32)$$

Sehingga besar penguatan amplitudo massa 2 dari solusi \hat{x}_2 diatas yang diakibatkan oleh gaya eksitasi pada massa 1 sebagai berikut:

$$H_{21}(\Omega) = \frac{\hat{x}_2}{\ddot{F}_1} = \frac{i\Omega c_2 + k_2}{|\underline{\Delta}|} \quad (2.33)$$

Dengan :

$$|\underline{\Delta}| = (-m_1\Omega^2 + i\Omega(c_1 + c_2) + (k_1 + k_2))(-m_2\Omega^2 + i\Omega(c_2 + c_3) + (k_2 + k_3)) - (-i\Omega c_2 - k_2)^2$$



Untuk sistem getaran bebas teredam, maka gaya eksitasi $F(t)$ harus sama dengan nol, sehingga persamaan (2.29) ditulis sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} -m_1\Omega^2 + i\Omega(c_1 + c_2) + (k_1 + k_2) & -i\Omega c_2 - k_2 \\ -i\Omega c_2 - k_2 & -m_2\Omega^2 + i\Omega(c_2 + c_3) + (k_2 + k_3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.34)$$

Untuk menyelesaikan persamaan tersebut maka determinan matrik karakteristik harus sama dengan nol sehingga penyelesaiannya dapat ditulis sebagai berikut :

$$(-m_1\Omega^2 + i\Omega(c_1 + c_2) + (k_1 + k_2))(-m_2\Omega^2 + i\Omega(c_2 + c_3) + (k_2 + k_3)) - (-i\Omega c_2 - k_2)^2 = 0 \quad (2.35)$$

Untuk menentukan frekuensi pribadi dan bentuk mode pribadi (*natural mode shape*) sistem, maka sistem harus dalam keadaan getaran bebas tak teredam.

$$[m]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = 0 \quad (2.36)$$

dengan:

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix}$$

Dengan asumsi bahwa getaran yang terjadi adalah harmonik dengan $\ddot{x} = -\lambda_i x_i$ dan $\lambda = \omega^2$ maka persamaan 2.36 menjadi :

$$[[m]^{-1}[k] - \lambda[1]]\{u\} = 0 \quad (2.37)$$



dengan:

$[\mathbf{m}]^{-1}[\mathbf{k}]$ disebut sebagai matrik dinamik;

$[\mathbf{m}]^{-1}[\mathbf{m}] = [\mathbf{1}]$ disebut matrik unit;

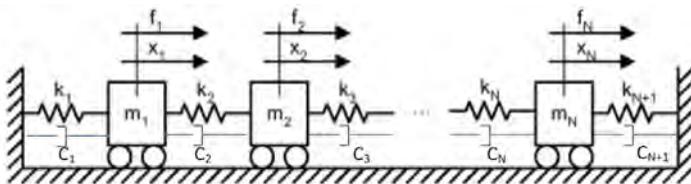
Untuk solusi $\{\mathbf{u}\} = \mathbf{0}$ maka determinan dari persamaan 2.37 harus sama dengan nol.

$$|[\mathbf{m}]^{-1}[\mathbf{k}] - \lambda[\mathbf{1}]| = 0 \quad (2.38)$$

Akar-akar λ_i persamaan karakteristik disebut sebagai *eigenvalue* dan frekuensi pribadi tidak teredam sistem ditentukan oleh $\lambda_i = \omega^2$. Dengan mensubstitusikan nilai λ_i ke persamaan 2.38 maka akan didapatkan bentuk mode pribadi (*natural mode shape*) yang dinamakan sebagai *eigenvector*.

2.1.4 Sistem Getaran Multi Derajat Kebebasan

Sistem getaran mesin dengan multi derajat kebebasan (MDOF) adalah sistem yang digunakan untuk menentukan kedudukan massa dalam ruang yang membutuhkan banyak (n) arah koordinat bebas. Sistem getaran tersebut dapat digambarkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13 berikut ini.



Gambar 2.13 Sistem getaran multi derajat kebebasan^[12]

Seperti halnya 2 DOF, multi derajat kebebasan dapat dianalisa menggunakan matriks persamaan dengan jumlah ruang koordinat sebanyak n . atau dapat ditulis seperti persamaan 2.39,



$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = \{F\} \quad (2.39)$$

dengan M mewakili matriks massa, K matriks kekakuan dan C matriks redaman yang mempunyai jumlah baris dan kolom yang sama yaitu n. Persamaan karakteristik dari MDOF ini juga dapat dianalisa dengan cara yang sama seperti 2 DOF sebagai berikut,

$$|[M]\lambda + [K]| = 0 \quad (2.40)$$

Persamaan 2.40 ini disebut sebagai persamaan karakteristik sistem dan dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + a_2\lambda^{n-2} + \dots + a_n = 0 \quad (2.41)$$

Akar-akar λ_i persamaan karakteristik disebut sebagai *eigenvalue* dan frekuensi pribadi tidak teredam sistem ditentukan oleh $\lambda_i = \omega^2$. Dengan mensubstitusikan nilai λ_i ke persamaan 2.40 maka akan didapatkan bentuk modus getar pribadi (*natural mode shape*) yang dinamakan sebagai *eigenvector* [7].

2.1.5 Kekakuan Statik dan Dinamik

Kekakuan statik adalah ketahanan suatu struktur menahan beban/gaya statik yang dinyatakan dalam persamaan 2.42

$$k_{st} = \frac{P_{st}}{y_{st}} \quad (2.42)$$

dimana k_{st} kekakuan statik, P_{st} gaya statik dan y_{st} adalah deformasi statik [11].

Kekakuan dinamik adalah ketahanan suatu struktur menahan gaya dinamik yang merupakan domain frekuensi yang dinyatakan dalam persamaan 2.43

$$k = \frac{P(f)}{Y(f)} \quad (2.43)$$



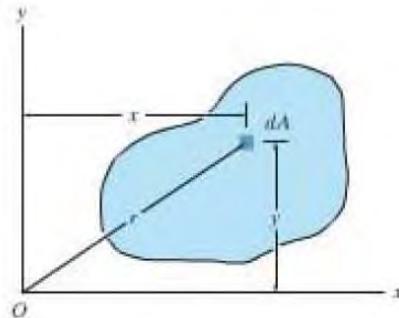
dimana k kekakuan dinamik, $P(f)$ gaya dinamik dalam domain frekuensi dan $y(f)$ adalah deformasi yang berupa getaran.

Namun untuk mempermudah dalam analisis getaran sering dinyatakan dengan *compliance* c yang merupakan kebalikan dari kekakuan, sehingga

$$c = \frac{1}{k} \quad (2.44)$$

dimana *compliance* juga merupakan fungsi transfer antara getaran dalam bentuk perpindahan (*displacement*) sebagai reaksi/*output* dan gaya dinamik sebagai aksi/*input*.

Dalam teorinya, kekakuan juga dipengaruhi oleh bahan penyusun serta geometri pada penampang. Geometri penampang yang berbeda memiliki nilai momen inersia luasan yang berbeda pula, hal inilah yang menyebabkan ketahanan suatu struktur terhadap beban bending maupun torsi berbeda pula. Momen inersia luasan dapat dianalisa berdasarkan sumbu kartesian x dan y sebagai berikut [14],



Gambar 2.14 Elemen luasan dalam bidang kartesian x dan y

$$I_x = \int y^2 dA \quad (2.45)$$

$$I_y = \int x^2 dA \quad (2.46)$$



Formulasi momen inersia tersebut dapat digunakan dalam perhitungan kekakuan suatu struktur untuk menahan beban bending tergantung pada sumbu acuan pembebanan. Sedangkan untuk beban puntir atau torsi dapat digunakan momen inersia polar. Momen inersia polar dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$J_0 = \int r^2 dA = I_x + I_y \quad (2.47)$$

2.1.6 Analisis Modal

Secara umum fungsi transfer untuk sistem satu derajat kebebasan (1 DOF) dan ditulis sebagai berikut,

$$H(if) = \frac{Y(if)}{P(if)} \quad (2.48)$$

dimana $H(if)$ fungsi transfer kompleks, $Y(if)$ respon getaran kompleks bisa dalam bentuk perpindahan, kecepatan, percepatan atau dimensi lainnya dan $P(if)$ gaya eksitasi harmonik kompleks.

Untuk banyak derajat kebebasan (MDOF = *Multi Degrees of Freedom*) ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut,

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_k \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdot & H_{1l} & \cdot & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdot & H_{2l} & \cdot & H_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ H_{k1} & H_{k2} & \cdot & H_{kl} & \cdot & H_{kn} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdot & H_{nl} & \cdot & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_l \\ \vdots \\ P_n \end{pmatrix} \quad (2.49)$$

Y_k , H_{kl} dan P_l adalah kompleks dan seharusnya ditulis $Y_k(if)$, $H_{kl}(if)$ dan $P_l(if)$. H_{kl} fungsi transfer kompleks dari respon getaran pada titik k akibat gaya eksitasi pada titik l dengan $k=1,2,\dots,n$ dan $l=1,2,\dots,n$. [10].



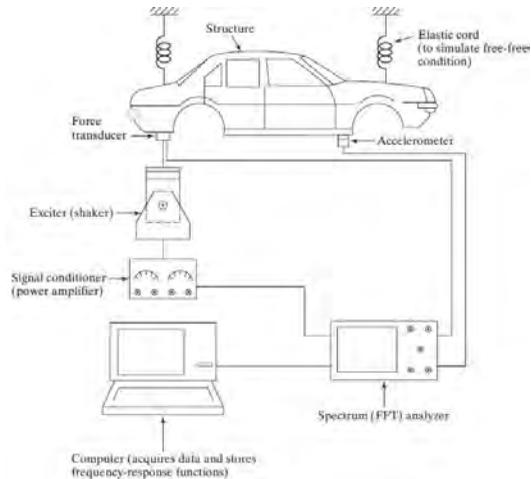
2.1.7 Analisis Modus Getar Secara Eksperimen

Experimental modal analysis, juga dikenal sebagai analisis modal atau tes modal, yang berhubungan dengan determinasi frekuensi natural, rasio redaman, dan mode shape atau modus getar [7]. Dua hal yang mendasari metode ini adalah:

1. Ketika sebuah struktur, mesin, atau sistem lainnya dieksitasi, responnya menampilkan puncak yang tajam saat beresonansi dan frekuensi gaya eksitasi bernilai sama dengan frekuensi natural sistem dan redaman tidak terlalu besar.
2. Sudut fase respon getaran pun berubah 180° ketika gaya eksitasi melewati frekuensi natural struktur atau mesin tersebut, dan sudut fase akan mendekati atau sama dengan 90° pada saat resonansi.

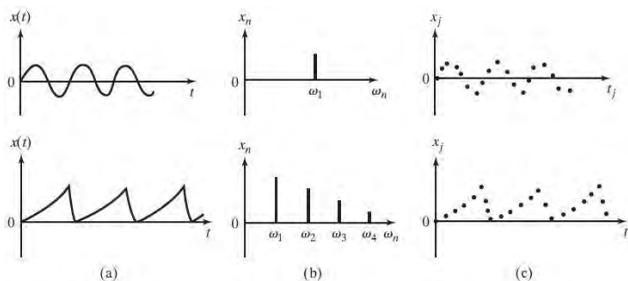
Dalam analisis modal secara eksperimen, diperlukan peralatan sebagai berikut:

1. *Exciter* atau sumber getaran untuk memberikan gaya *input* yang terukur ke struktur atau mesin.
2. *Transducer* untuk mengkonversi respon getaran dari mesin atau struktur menjadi suatu sinyal listrik.
3. *Signal conditioning amplifier* untuk mengubah sinyal dari *transducer* sesuai dengan input sinyal ke komponen pengolah data atau sinyal.
4. *Analyzer* untuk menampilkan sinyal digital yang diolah ke *display* sesuai kebutuhan.



Gambar 2.15 Eksperimen analisis modal dengan free-free condition^[7]

Dari pengukuran secara eksperimen tersebut, data diproses oleh *Analyzer* untuk mengubah data dari domain waktu menjadi domain frekuensi menggunakan pendekatan dengan bantuan deret Fourier. Dalam hal ini, data yang dihasilkan oleh *Analog-to-Digital converter* atau ADC merupakan data diskrit dalam fungsi waktu tertentu sesuai konfigurasi *Analyzer*. Bentuk data domain waktu dan domain frekuensi ditunjukkan gambar 2.16



Gambar 2.16 Representasi sinyal getaran: (a) domain waktu, (b) domain frekuensi, (c) domain waktu dalam bentuk diskrit.



Modus getar suatu struktur dapat dicari dengan cara mengukur getaran pada banyak titik pengukuran dan membandingkannya dengan hasil pengukuran getaran dari titik referensi yang dipilih. Matriks modulus getar pada frekuensi natural ke m dan titik 1 sebagai referensi dapat ditulis

$$\Phi_m = \begin{pmatrix} 1 \\ Y_2(f_m)/Y_1(f_m) \\ Y_3(f_m)/Y_1(f_m) \\ \vdots \\ Y_n(f_m)/Y_1(f_m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11}(f_m)/H_{11}(f_m) \\ H_{21}(f_m)/H_{11}(f_m) \\ H_{31}(f_m)/H_{11}(f_m) \\ \vdots \\ H_{n1}(f_m)/H_{11}(f_m) \end{pmatrix} \quad (2.50)$$

sedangkan beda sudut fase untuk menentukan arah getaran masing-masing titik dihitung dari harga real dan imajiner

$$\varphi(f_m) = \arctan \frac{\text{Im}\{H_{ki}(if_m)\}}{\text{Re}\{H_{ki}(if_m)\}} \quad (2.51)$$

Beda sudut fasa sebesar 0° berarti getaran antara titik referensi dengan titik yang diukur sefasa atau arah getarannya sama, sedangkan beda fasa sebesar 180° menunjukkan arah getaran berlawanan arah [13].

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu penting dalam menunjang penelitian yang dilakukan penulis, karena penulis tentunya membutuhkan referensi penelitian sebelumnya yang berkaitan dan dapat membantu untuk penelitian yang sedang dilakukan.

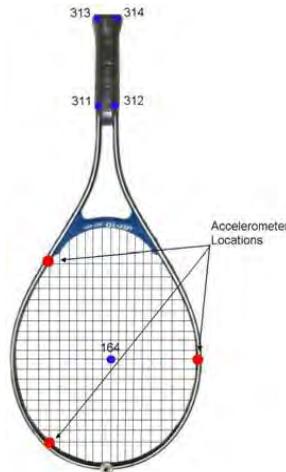
2.2.1 Miles A. Buechler dkk (2003)

Penelitian mengenai raket tenis pernah dilakukan Miles bersama rekan-rekannya pada tahun 2003 dan dimuat dengan



judul *Vibration Modeling and Suppression in Tennis Racquets*. Dalam penelitiannya, Miles menguji “*sweet spot*” pada raket tenis yang dapat meningkatkan performa pemain tenis, selain itu *sweet spot* juga menjadi area yang mentransmisikan getaran pada kondisi minimum akibat pemukulan bola. Miles menguji kemampuan *sweet spot* dalam meredam getaran dengan dan tanpa menggunakan peredam tambahan pada *string* yang dibagi menjadi 2, yaitu tipe yang umum di pasaran dan tipe modifikasi. Kemudian hasil dari eksperimen akan dibandingkan dengan hasil *Finite Element Analysis*.

Metode eksperimen dilakukan dengan menggantung raket menggunakan tali dengan jarak 1 meter terhadap gantungan. Karena uji eksitasi dilakukan hanya di titik *sweet spot* pada raket, maka penempatan *accelerometer* divariasikan sebanyak 3 titik untuk menambah kepresisian data seperti pada gambar 2.17.

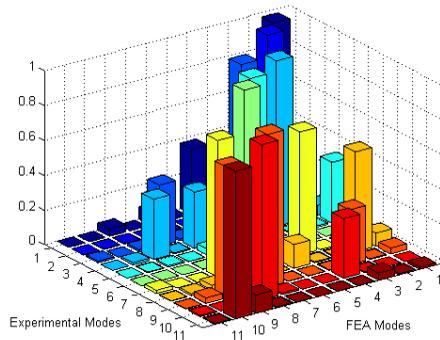


Gambar 2.17 Lokasi penempatan *accelerometer*^[15]

Dari eksperimen yang dilakukan, didapatkan 5 modus getar yaitu *frame bending*, *string percussion*, *frame torsion*, *saddle*, dan *2nd frame torsion* dalam range 600 Hz untuk kondisi undamped.



Kemudian pada pengujian dengan peredam modifikasi didapatkan 6 modus getar yaitu *frame bending*, *damper percussion*, *string percussion*, *frame torsion*, *saddle*, dan *2nd frame torsion* dengan peningkatan rasio redaman yang sangat signifikan yaitu lebih dari 2 kali kondisi undamped, lalu pada pengujian dengan peredam yang umum di pasaran didapatkan modus getar dengan jumlah 7 yaitu *frame bending*, *string percussion*, *damper torsion*, *frame torsion*, *saddle*, dan *2nd frame torsion* dan rasio redaman 1.25 kali dari kondisi undamped.

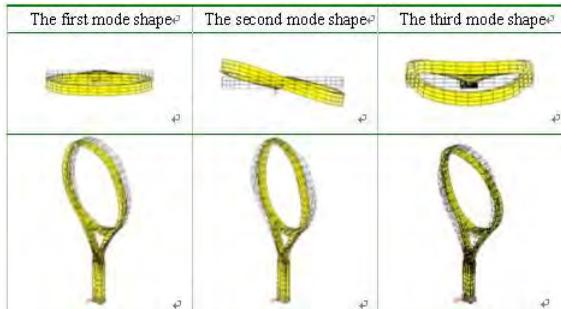


Gambar 2.18 Hasil eksperimen dan finite element analysis^[15]

2.2.2 Yao-dong Gu (2006)

Penelitian yang lain dilakukan oleh Yao-dong Gu dan Jian-she Li pada tahun 2006 di Ningbo University, China. Yao-dong melakukan penelitian dengan mensimulasikan raket tenis dengan metode elemen hingga (FEM). Uji eksitasi dilakukan dengan memodelkan *impact* dari bola sebagai eksitasi berupa gaya impuls. Rangka raket dimodelkan sebagai struktur homogen dengan density uniform yaitu 1140kg/m^3 dan modulus young 2.5 GPa. Boundary condition yang diterapkan yaitu grip yang dicekam atau *fixed*.

Dari simulasi rangka didapatkan hasil yaitu modus getar 3 buah pada 80 Hz, 220 Hz, dan 470 Hz untuk range 0-500 Hz dengan mode seperti pada Gambar 2.19



Gambar 2.19 Modus getar rangka raket Yao-dong

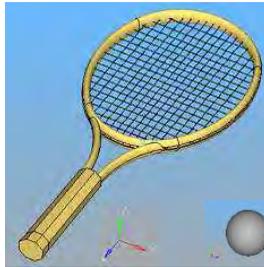
Kemudian pemodelan juga dilakukan pada string dan dihasilkan 6 modus getar yaitu 246 Hz, 739 Hz, 1237 Hz, 1741 Hz, 2255 Hz, 2782 Hz dan pada frekuensi natural pertama dianimasika seperti pada Gambar 2.20 berikut



Gambar 2.20 Animasi modus getar string raket pada frekuensi natural pertama

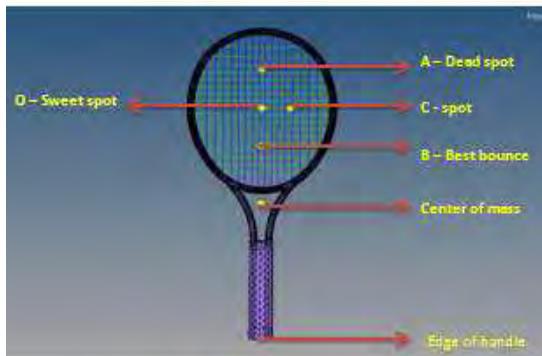
2.2.3 P. K. Chidambaram (2014)

Chidambaram meneliti pengaruh impact, tegangan string dan menganalisa getaran pada raket tenis dengan bahan berbasis *nanocomposite*. Penelitian yang dilakukan dengan pemodelan ini memodelkan raket tenis dan bola dengan bantuan software berbasis sistem dinamis yaitu LS-DYNA. Sebelum diproses ke LS-DYNA, bola dan raket diGambar secara 3D menggunakan software PRO/ENGINEER yang mengintegrasikan CAD/CAM/CAE [16]. Raket dan bola ditunjukkan oleh gambar 2.21,



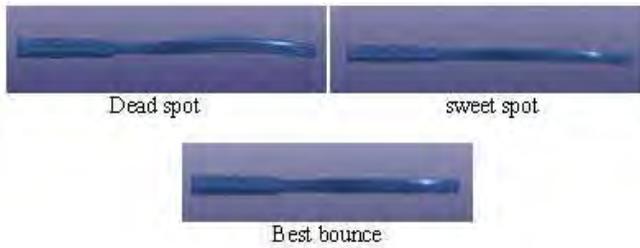
Gambar 2.21 Visualisasi PRO/ENGINEER untuk raket dan bola

Kemudian raket dimodelkan sebagai struktur homogen dengan modulus young 11952 MPa, poisson ratio 0.28 dan *density* 1110kg/m³. Bola tenis dimodelkan cangkang dengan bahan *rubber* (MAT 024). Kemudian titik uji ditunjukkan gambar 2.22 Sebagai berikut



Gambar 2.22 Titik uji raket dalam pemodelan Chidambaram

Dari hasil percobaan yang dilakukan diperoleh tegangan string 177 N untuk kecepatan pantul bola 8.45 m/s, 267 N untuk 8.32 m/s, dan 377 N untuk 8.2 m/s dengan kecepatan awal bola yang dibuat sama yaitu 10.15 m/s [16]. Kemudian pemukulan untuk beberapa titik yang berbeda menghasilkan *mode shape* yang berbeda dalam satu frekuensi seperti pada gambar 2.23,



Gambar 2.23 Perbedaan bending mode shape pada titik uji



BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Langkah-langkah Penelitian

Suatu penelitian harus memiliki tahapan atau metodologi logis agar tujuan yang ingin dicapai dapat dipertanggung jawabkan secara ilmiah. Dalam penelitian ini langkah logis yang digunakan untuk mencapai tujuannya adalah:

1. Studi literatur dan lapangan

Studi literatur merupakan langkah awal dalam penelitian ini. Tujuannya antara lain adalah untuk membantu penulis dalam merumuskan masalah serta menentukan hal-hal yang perlu dilakukan agar tidak terjadi duplikasi penelitian atau karya di masa lalu yang sudah pernah dilakukan oleh peneliti lain. Sumber yang digunakan dalam studi literatur ini adalah abstrak hasil penelitian, jurnal, dan buku referensi.

Studi lapangan dilakukan untuk membantu dalam menentukan rancangan yang akan dilakukan sehingga mengurangi resiko kesalahan dalam menetapkan geometri rancangan.

2. Perumusan Masalah

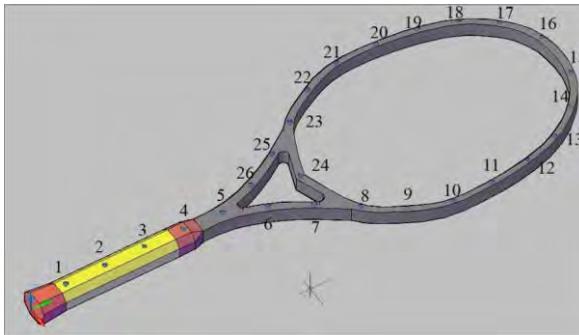
Dari studi lapangan yang dilakukan dengan didukung studi literatur dari berbagai referensi sebagai dasar pemikiran dalam penelitian, maka dirumuskan beberapa permasalahan yang nantinya menjadi inti dalam penelitian yang akan dilakukan.

3. Persiapan Spesimen

Persiapan spesimen dilakukan dengan melakukan pengukuran pada raket merek Puma Boris Becker Winner dengan memberi tanda pada 26 titik seperti Gambar 3.1 yang akan dieksitasi kemudian menyiapkan alat penunjang eksperimen. Setelah siap, spesimen digantung pada gantungan yang statis. Hal yang sama juga akan diberlakukan pada raket Wilson Hyper Pro



Staff Extreme 6.7 dan Hyper Hammer 4.0 namun dengan jumlah yang berbeda, hal ini dikarenakan dimensi raket Wilson yang berukuran lebih besar dibandingkan raket Puma yaitu memiliki perimeter atau keliling lebih besar 10 cm dari raket puma. Maka dalam pengujian raket Wilson diberi 28 titik uji.



Gambar 3.1 Titik uji pada rangka raket dalam visualisasi AutoCAD 3D

4. Persiapan Alat Uji

Alat uji berupa *Impulse Hammer* dan *accelerometer* dikoneksikan ke *power supply* untuk menguatkan sinyal sebelum dimasukkan ke ADC, dari ADC kemudian dikoneksikan ke *Personal Computer* atau *Laptop* untuk membaca sinyal dalam bentuk digital yang nantinya digunakan untuk keperluan pengolahan data. Setting pada *software* PicoScope 6 juga disesuaikan dengan kebutuhan data.

5. Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan memberikan eksitasi berupa gaya impuls yang melalui *Impulse Hammer* untuk mendapatkan respon. Kemudian respon getaran pada raket dibaca oleh *accelerometer* dalam bentuk respon percepatan. Pemberian gaya eksitasi dilakukan berulang-ulang hingga data mencukupi, kemudian *record* data disimpan dalam bentuk .txt untuk nantinya



diolah secara matematis dengan bantuan *software* Mathcad. Pengujian tersebut diulang untuk semua titik hingga selesai.

6. Pengolahan Data Eksperimen

Pengolahan data dilakukan dengan bantuan *software* Mathcad untuk mempermudah perhitungan, data yang diperoleh dari uji eksitasi diubah kedalam bentuk *frequency domain*. Dari pengolahan diperoleh data berupa fungsi transfer (*compliance*), sudut fase, dan koherensi yang kemudian dipilah berdasarkan frekuensi natural yang terlihat. Hasil pemilahan data kemudian diplot ke Gambar rangka raket yang telah diGambarkan dengan bantuan *software* AutoCAD 3D , sehingga didapatkan hasil berupa *mode shape* atau modus getar untuk tiap frekuensi natural yang dikehendaki.

7. Analisa Hasil Eksperimen

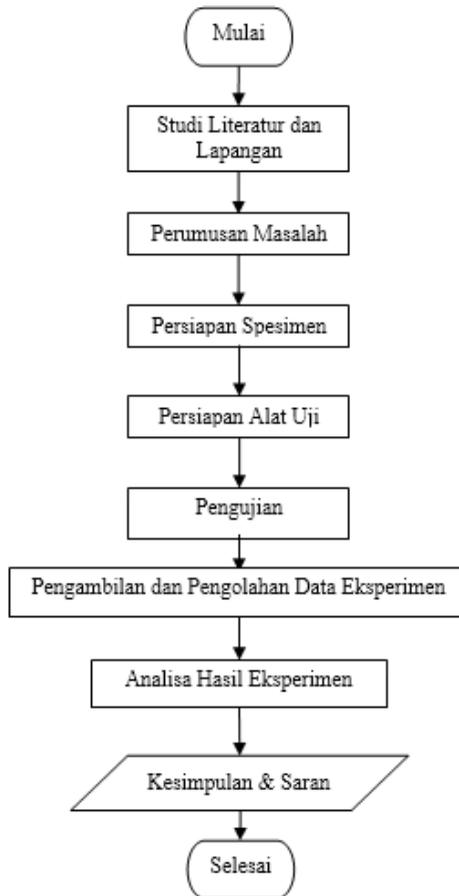
Dari pengolahan data, hasil yang telah didapat kemudian dianalisa dan dipelajari dengan mengaitkan berdasarkan landasan teori yang telah diperoleh dari studi literatur. Analisa yang telah dilakukan kemudian diterjemahkan ke dalam tulisan untuk memperoleh kesimpulan.

8. Kesimpulan, Saran dan Rekomendasi

Setelah analisa dan pembahasan hasil eksperimen telah dilakukan, maka kesimpulan dan saran dari penelitian dibuat untuk merangkum hasil dari keseluruhan penelitian yang telah dilakukan dengan menambahkan rekomendasi untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian dan penyusunan tugas akhir dapat diGambarkan dalam diagram alir seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2,



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

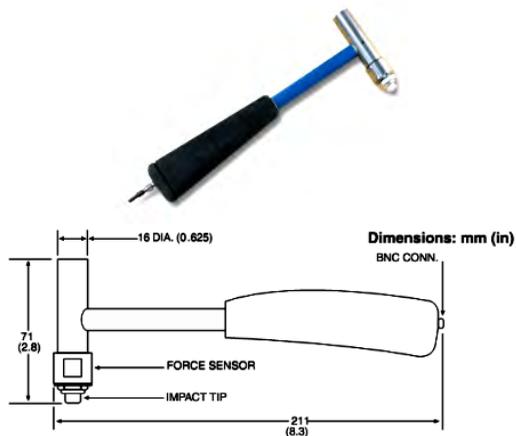
3.3 Alat Bantu Percobaan

Alat bantu percobaan dalam penelitian ini adalah alat bantu pengujian eksitasi untuk menentukan frekuensi natural dan *mode shape* raket. Adapun alat-alat tersebut adalah : *impulse hammer*, *power supply*, *analog to digital converter*, serta *accelerometer*.



1. *Impulse Hammer* Tipe IH 101-1K Omega

Alat ini berfungsi memberikan gaya eksitasi yang secara langsung diukur oleh suatu transduser. Transduser adalah suatu piranti elektronika yang berfungsi mengubah suatu energi ke bentuk energi lainnya. Dalam hal ini, energi eksitasi diubah ke energi (signal) listrik yang masih bersifat *analog*. Transduser pada *impulse hammer* berada didalam *hammer* itu sendiri. gambar 3.3 merupakan gambar dan skema *impulse hammer*.



Gambar 3.3 *Impulse Hammer* Tipe IH 101-1K Omega

2. *Power Supply* ACC – PS1 Omega

Unit *power supply* berfungsi sebagai sumber arus sensor dinamik seperti transduser pada *impulse hammer*. *Power supply* ini mampu memberikan arus sebesar 2mA dengan tegangan +18 VDC. Arus dan tegangan pada *power supply* ini tidak dapat diatur atau bersifat konstan. Sumber energi *power supply* didapatkan dari dua buah baterai tipe-AA. Pada panel depan *power supply* terdapat sebuah *voltmeter* untuk memantau tegangan operasi sensor dan untuk memeriksa konektor kabel dalam kondisi *open* atau *short*. gambar 3.4 merupakan gambar *power supply* tipe ACC-PS1 yang digunakan dalam pengujian ini [11].



Gambar 3.4 Power Supply Tipe ACC-PS1 Omega

3. *Analog to Digital Converter* tipe ADC-216 Pico-Technology
 ADC ini merupakan suatu unit interface yang berfungsi untuk mengubah sinyal analog ke sinyal digital. ADC-216 memiliki dua *channel input* sehingga mampu mengelola dua sinyal secara bersamaan. Luaran dari alat ini merupakan sinyal digital yang kemudian diolah didalam *Personal Computer* menggunakan bantuan perangkat lunak PicoScope. ADC-216 digunakan pula sebagai *PC-based oscilloscopes / spectrum analysers* dengan bantuan perangkat lunak PicoScope. Pada panel depan terdapat soket yang bertanda A dan B merupakan *channel operation* sedangkan soket yang bertanda E adalah *external trigger input*. ADC-216 ini dioperasikan menggunakan tegangan 12 VDC melalui adaptor yang disertakan. gambar 3.5 berikut ini adalah gambar *Analog to Digital Converter* [11].



Gambar 3.5 Analog to Digital Converter Tipe 216

4. *General Purpose Accelerometer* tipe Omega
Accelerometer ini berfungsi untuk mengukur respon getaran berupa akselerasi yang terjadi pada arah dan satu tempat



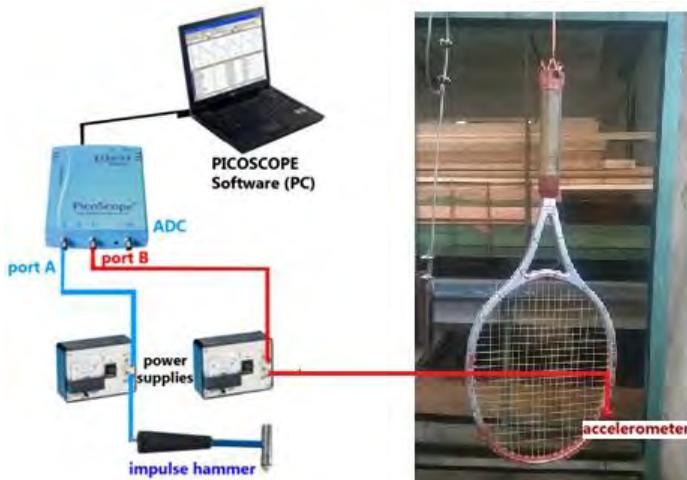
yang tetap. *Accelerometer* tipe ini memiliki satu buah output untuk mengukur respon getaran dari satu arah saja. *Accelerometer* ini memiliki sensitifitas 100 mV/g. Gambar 3.6 dibawah ini adalah gambar *general purpose accelerometer* [11].



Gambar 3.6 General Purpose Accelerometer Omega

3.4 Set-up Peralatan Uji Eksitasi

Skema set-up peralatan percobaan pada uji eksitasi yang dilakukan adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7 berikut ini.



Gambar 3.7 Skema Set-up peralatan percobaan uji eksitasi^[7]



Skema peralatan percobaan diatas memiliki prinsip kerja sebagai berikut:

Energi eksitasi berasal dari gaya *impulse hammer* yang diberikan ke rangka raket. Sementara itu *power supply* memberikan arus ke *force sensor*. *Force sensor* yang berada didalam *impulse hammer* akan mengidentifikasi besar gaya yang dikeluarkan oleh *impulse hammer*.

Signal analog yang dikeluarkan *force sensor* dikirim ke unit *analog to digital converter* melalui *power supply*. Bersamaan dengan itu, setelah gaya *impulse hammer* diberikan ke raket, *accelerometer* akan mengukur respon getaran yang terjadi pada bendakerja. *Signal analog* dari *accelerometer* dikirim ke *power supply* untuk diperkuat. *Signal analog* yang telah diperkuat dikirim ke unit *analog to digital converter* dan bersama dengan signal dari *force sensor*, kedua sinyal analog diubah menjadi sinyal digital. Kedua sinyal digital dari unit ADC dikirim ke PC.

Dengan bantuan *software* PicoScope sebagai *spectrum analyser*, kedua signal tersebut diubah menjadi spektrum gelombang yang dapat dibaca melalui monitor PC. Melalui *software* PicoScope tersebut, gaya eksitasi maupun respon getaran dapat disimpan kedalam file basic text formating (txt file).

3.5 Langkah Kerja Eksperimen

Dalam eksperimen, diperlukan prosedur yang pasti untuk menjaga keakuratan data serta dapat dijadikan referensi dan bahan evaluasi pada penelitian yang selanjutnya. Langkah pengambilan data dijabarkan sebagai berikut.

1. Pemasangan Spesimen dan Set-up Peralatan Uji

Pada langkah ini spesimen uji dipersiapkan sekaligus set-up alat uji sebagaimana telah dibahas pada subbab set-up peralatan uji eksitasi. Untuk ketiga raket yang akan diuji diberiperlakukan yang sama untuk menghindari kesalahan analisa. Set up dilakukan pada software PicoScope 6 seperti gambar 3.8,



Gambar 3.8 Konfigurasi data pada software PicoScope 6

2. Uji Eksitasi

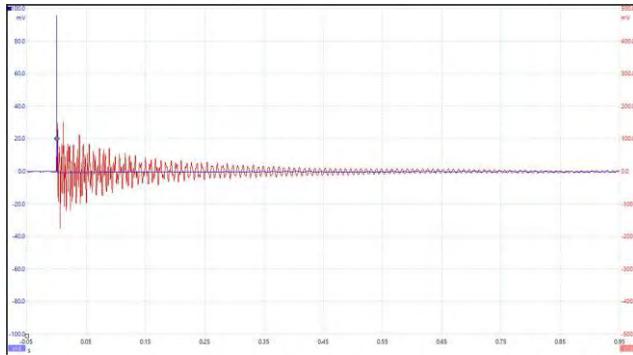
Uji eksitasi dilakukan dengan memukul spesimen uji pada titik yang telah dibuat dengan jumlah 26 titik. Untuk setiap titik yang diuji diberi pukulan sebanyak 30 kali untuk mendapatkan 30 data tiap titiknya, hal ini dilakukan untuk mencegah kurangnya data akibat human error. Pengambilan data sebanyak 30 kali tersebut juga dimaksudkan untuk memudahkan pemilihan data yang lebih koheren.



Gambar 3.9 Pengujian eksitasi dengan Impulse Hammer

3. Penyimpanan Data

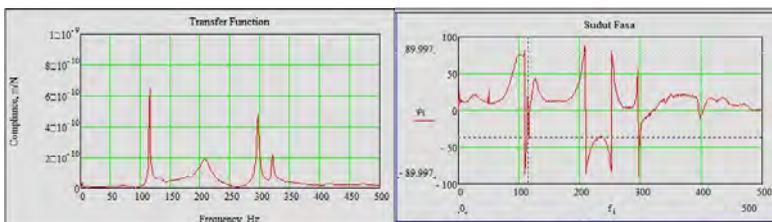
Data yang telah diperoleh dari PicoScope kemudian disimpan dalam 2 bentuk yaitu PicoScope file dan *text file* (.txt) untuk selanjutnya dibaca oleh Mathcad guna keperluan olah data. Penyimpanan dilakukan secara terpisah, setiap titik disimpan dalam *folder* yang berbeda agar tidak tercampur.



Gambar 3.10 Contoh output getaran dalam *software* PicoScope

4. Olah Data

Olah data dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* Mathcad, data yang diolah nantinya berupa grafik percepatan dan gaya eksitasi dalam domain waktu yang kemudian oleh Mathcad diubah kedalam domain frekuensi untuk mendapatkan frekuensi natural, *compliance*, dan sudut fasa.



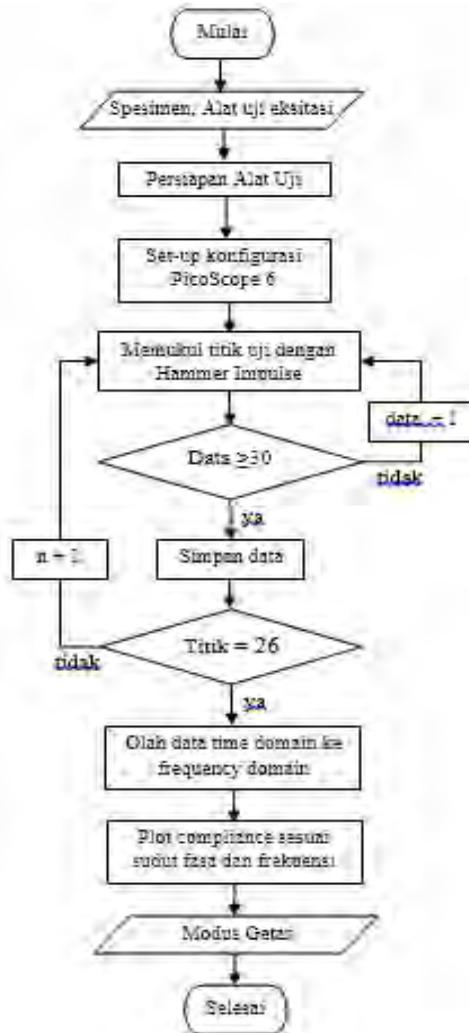
Gambar 3.11 Hasil olah data (*compliance* dan sudut fasa) dalam *software* Mathcad

5. Plot Data

Dari hasil olah data, *compliance* dan sudut fasa pada frekuensi natural diplot pada Gambar raket yang telah dibuat untuk berikutnya didapatkan modus getar yang dibutuhkan.



Dari langkah-langkah eksperimen yang telah dijabarkan dapat digambarkan lebih detail dengan diagram alir sebagai berikut.



Gambar 3.12 Diagram alir eksperimen



3.6 Spesifikasi Spesimen

3.6.1 Puma Boris Becker Winner



Gambar 3.13 Raket Puma Boris Becker Winner

Material	: <i>Fiber Glass – Carbon (30% graphite)</i>
	<i>Pejal</i>
Massa total	: 375 gram
Panjang total	: 665 mm
Lebar head	: 255 mm

3.6.2 Wilson Hyper Pro Staff Extreme 6.7



Gambar 3.14 Raket Wilson Pro Staff Extreme 6.7

Material	: <i>Fiber Glass – Carbon (80% graphite)</i>
	<i>Tubed</i>
Massa total	: 265 gram
Panjang total	: 675 mm
Lebar head	: 280 mm



3.6.3 Wilson Hyper Hammer 4.0



Gambar 3.15 Raket Wilson Hammer 4.0

Material	: <i>Fiber Glass – Carbon (80% graphite)</i> <i>Tubed</i>
Massa total	: 270 gram
Panjang total	: 680 mm
Lebar head	: 275 mm



(halaman ini sengaja dikosongkan)



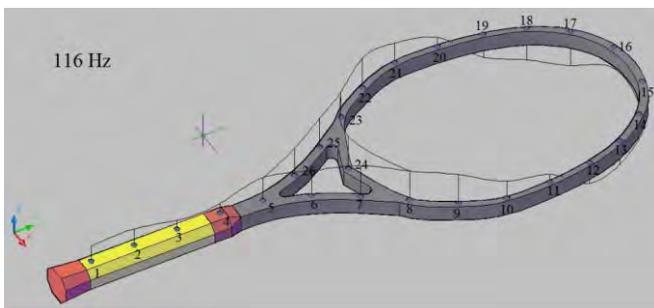
BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas dan dianalisa hasil eksperimen tentang modus getar pada rangka raket tenis Puma Boris Becker Winner, Wilson Hyper Pro Staff Extreme 6.7 dan Wilson Hyper Hammer 4.0. Pembahasan dimulai dengan hasil modus getar yang didapatkan pada setiap frekuensi natural untuk masing-masing raket. Kemudian membandingkan keterkaitan dan karakteristik dinamik yang dihasilkan ketiga raket tersebut. Dari data yang didapat pada eksperimen, dapat dianalisa nilai *displacement* atau amplitudo tiap Newton gaya yang dieksitasikan pada rangka raket. Lalu dari hasil analisa dapat disusun *mode shape* berdasarkan titik yang telah ditentukan.

4.1 Raket Puma Boris Becker Winner

4.1.1 Modus Getar Pada Frekuensi Natural 116 Hertz

Pada frekuensi natural pertama didapatkan modus getar dengan bentuk *bending mode shape* seperti ditunjukkan Gambar 4.1. Perbedaan besar nilai compliance (X/F) disebabkan oleh geometri dan kekakuan yang berbeda-beda pada tiap bagian rangka (frame).



Gambar 4.1 Modus getar raket Puma Boris Becker pada frekuensi natural pertama



Kecenderungan ini juga tidak lepas dari batasan yang dipakai yaitu *free-free boundary condition* pada *frame* sehingga modus getar dan frekuensi natural yang terjadi adalah murni dari *frame* raket. Dalam hal ini, modus getar yang terjadi sama halnya dengan penelitian yang dilakukan Miles dan Yao-dong dengan hasil modus getar pertamanya yaitu *frame bending*. Secara teoritis pada sistem banyak derajat kebebasan, nilai compliance bergantung pada elemen massa, kekakuan dan redaman sistem pada masing-masing derajat kebebasan. Sehingga perbedaan compliance yang terjadi pada tiap titik rangka raket tentu dipengaruhi dimensi dan bentuk raket itu sendiri, sehingga massa ekuivalen dan kekakuan ekuivalen pada tiap titik pun berbeda-beda.

Pada modus getar pertama ini didapatkan nilai *compliance* maksimum pada titik 22 yaitu sebesar $109.894 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dan nilai *compliance* minimum pada titik 3 (*grip*) yaitu sebesar $20.249 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dengan rincian *compliance* dan sudut fase (ϕ) pada masing-masing titik ditunjukkan tabel 4.1,

Tabel 4.1 Compliance dan sudut fase raket Puma pada frekuensi natural pertama

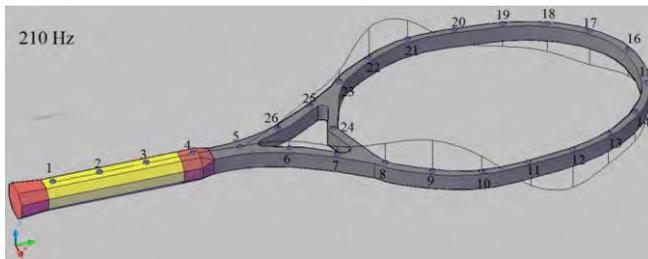
Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)	Node	Compliance	Sudut Fase (°)
1	46.017×10^{-11}	54	14	62.266×10^{-11}	-37
2	46.660×10^{-11}	57	15	87.058×10^{-11}	-36
3	20.249×10^{-11}	45	16	56.669×10^{-11}	-39
4	27.482×10^{-11}	53	17	89.976×10^{-11}	-40
5	48.839×10^{-11}	40	18	53.703×10^{-11}	-32
6	64.688×10^{-11}	41	19	47.777×10^{-11}	-17
7	70.381×10^{-11}	39	20	54.267×10^{-11}	57
8	86.060×10^{-11}	36	21	73.781×10^{-11}	31
9	79.094×10^{-11}	41	22	109.894×10^{-11}	10
10	41.732×10^{-11}	36	23	62.174×10^{-11}	39
11	48.233×10^{-11}	30	24	92.477×10^{-11}	45
12	46.062×10^{-11}	-46	25	78.706×10^{-11}	49
13	54.438×10^{-11}	-56	26	74.894×10^{-11}	46

4.1.2 Modus Getar Pada Frekuensi Natural 210 Hertz

Pada frekuensi natural kedua didapatkan modus getar dengan bentuk *saddle mode shape* seperti ditunjukkan gambar 4.2



dengan sudut fasa yang sama untuk ujung grip hingga setengah bagian *head*. Bagian *grip* pada frekuensi natural kedua ini mengalami amplitudo getaran yang relatif kecil. Kecenderungan modulus getar tersebut juga tidak lepas dari kekakuan dinamik yang meningkat pada frekuensi ini. Selain itu, pada sistem banyak derajat kebebasan juga mulai menunjukkan perbedaan sudut fasa untuk frekuensi natural kedua dan selanjutnya sehingga seperti dapat dilihat pada rangka raket tersebut terdapat perbedaan arah *compliance*.



Gambar 4.2 Modus getar raket Puma Boris Becker pada frekuensi natural kedua

Hal ini sedikit berbeda dengan hasil penelitian yang dilakukan Miles dan Yao-dong yang mulai menunjukkan modus getar *saddle* di frekuensi sekitar 310 Hertz. Hal ini dikarenakan Raket Puma Boris Becker buatan tahun 1985 memiliki dimensi, profile dan material penyusun yang berbeda dengan kebanyakan raket di tahun 2000an, sehingga modus getar dan *compliance* yang terjadi berbeda [2].

Pada modus getar kedua didapatkan nilai *compliance* maksimum pada titik 9 yaitu sebesar $81.377 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dan *compliance* minimum pada titik 1 atau ujung grip yaitu $1.007 \times 10^{-11} \text{m/N}$, namun nilai *compliance* pada keseluruhan *grip* pun tidak terpaut jauh dengan ujungnya (titik 1) dan jika dibandingkan dengan titik lainnya akan menghasilkan perbandingan yang sangat signifikan. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh pengaruh damper dan bahan/material grip yang berbeda dengan bagian head

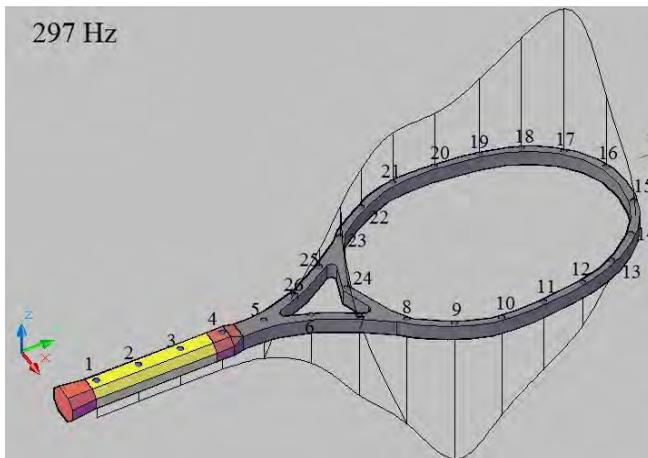


untuk frekuensi ini. Rincian *compliance* dan sudut fase (ϕ) pada masing-masing titik ditunjukkan tabel 4.2 berikut

Tabel 4.2 Compliance dan sudut fase raket Puma pada frekuensi natural kedua

Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)	Node	Compliance	Sudut Fase (°)
1	1.007×10^{-11}	10	14	53.960×10^{-11}	-85
2	3.089×10^{-11}	-51	15	40.898×10^{-11}	-66
3	1.195×10^{-11}	-23	16	41.283×10^{-11}	-78
4	5.618×10^{-11}	0.5	17	57.573×10^{-11}	-68
5	2.846×10^{-11}	28	18	28.483×10^{-11}	-15
6	18.565×10^{-11}	38	19	35.861×10^{-11}	-30
7	22.722×10^{-11}	30	20	4.263×10^{-11}	-17
8	18.869×10^{-11}	12	21	50.539×10^{-11}	40
9	81.377×10^{-11}	42	22	67.373×10^{-11}	2
10	50.660×10^{-11}	80	23	24.566×10^{-11}	51
11	21.880×10^{-11}	-38	24	29.119×10^{-11}	48
12	69.862×10^{-11}	-17	25	25.920×10^{-11}	6
13	41.073×10^{-11}	-38	26	14.524×10^{-11}	8

4.1.3 Modus Getar Pada Frekuensi Natural 297 Hertz



Gambar 4.3 Modus getar raket Puma Boris Becker pada frekuensi natural ketiga



Pada frekuensi natural ketiga didapatkan modus getar dengan bentuk *torsional mode shape* dengan kondisi *asymmetry* seperti ditunjukkan gambar 4.3. Bagian *grip* pada frekuensi natural ketiga ini mengalami amplitudo getaran seperti modus getar pertama namun dengan nilai *compliance* yang lebih besar.

Pada bagian *head* rangka jelas terlihat modus *torsional* dengan *compliance* yang lebih besar dibanding modus getar pertama dan kedua. Hal ini pula yang terjadi pada penelitian Miles dengan modus getar *torsional* yang terjadi pada frekuensi 307 Hertz.

Pada modus getar ketiga ini didapatkan nilai *compliance* maksimum pada titik 17 yaitu sebesar $459.812 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dan *compliance* minimum pada titik 14 yaitu $1.007 \times 10^{-11} \text{m/N}$, dimana pada titik ini terjadi peralihan sudut fase dari titik 13 ke titik 15 atau dari sudut fase negatif ke sudut fase positif dengan rincian *compliance* dan sudut fase (ϕ) pada masing-masing titik ditunjukkan tabel 4.3 berikut

Tabel 4.3 *Compliance dan sudut fase raket Puma pada frekuensi natural ketiga*

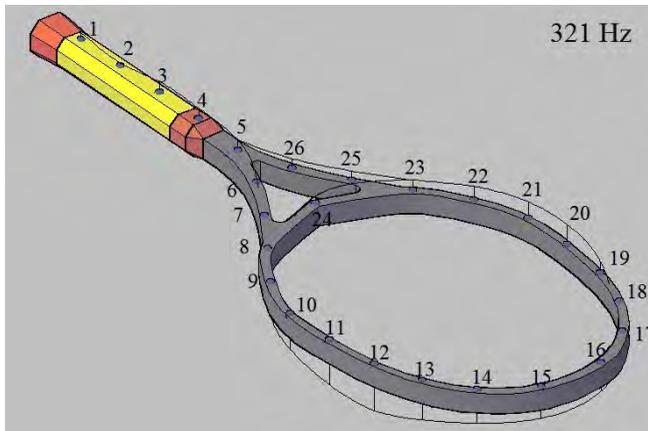
Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)	Node	Compliance	Sudut Fase (°)
1	64.841×10^{-11}	-85	14	18.029×10^{-11}	-90
2	77.659×10^{-11}	-54	15	43.819×10^{-11}	78
3	76.904×10^{-11}	-77	16	134.078×10^{-11}	46
4	74.871×10^{-11}	-87	17	459.812×10^{-11}	60
5	70.554×10^{-11}	-82	18	343.117×10^{-11}	77
6	98.322×10^{-11}	-80	19	247.44×10^{-11}	87
7	220.756×10^{-11}	-88	20	178.048×10^{-11}	88
8	292.296×10^{-11}	-74	21	175.205×10^{-11}	34
9	380.497×10^{-11}	-72	22	133.074×10^{-11}	64
10	271.915×10^{-11}	-89	23	124.109×10^{-11}	78
11	191.925×10^{-11}	-81	24	65.317×10^{-11}	85
12	120.56×10^{-11}	-78	25	145.133×10^{-11}	86
13	46.773×10^{-11}	-88	26	129.311×10^{-11}	87

4.1.4 Modus Getar Pada Frekuensi Natural 321 Hertz

Pada frekuensi natural keempat didapatkan modus getar dengan bentuk *torsional mode shape* seperti modus getar ketiga



namun dengan kondisi simetris pada *head* rangka seperti ditunjukkan Gambar 4.4. Bagian *grip* pada frekuensi natural keempat ini mengalami amplitudo getaran seperti modus getar kedua, yaitu kembali mengecil. Pada bagian *head* terlihat modus torsional dengan *compliance* yang lebih kecil dibanding modus getar ketiga. Karakteristik torsional yang menyerupai modus getar ketiga ini juga disebabkan dekatnya frekuensi natural ketiga dan keempat serta, modus getar keempat ini masih merupakan bagian dari puncak ketiga sehingga modus getar yang terjadi memiliki perbedaan yang tidak terlalu signifikan.



Gambar 4.4 Modus getar raket Puma Boris Becker pada frekuensi natural keempat

Hal yang sama dialami peneliti Miles dengan mode getar terakhir untuk range 0-600 Hertz adalah 2nd torsional mode shape [15]. Pada modus getar keempat ini didapatkan nilai *compliance* maksimum pada titik 20 yaitu sebesar $37.7802 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dan *compliance* minimum pada titik 2 yaitu $7.012 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dengan rincian *compliance* dan sudut fase (ϕ) pada masing-masing titik ditunjukkan tabel 4.4,



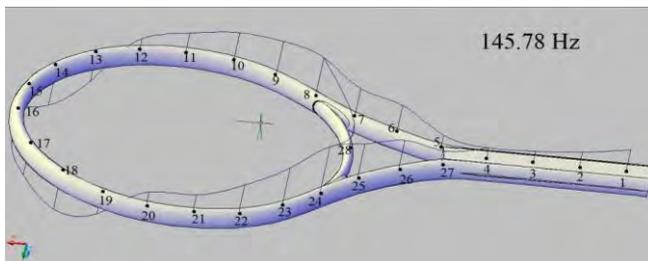
Tabel 4.4 Compliance dan sudut fase raket Puma pada frekuensi natural keempat

Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)	Node	Compliance	Sudut Fase (°)
1	15.996×10^{-11}	50	14	31.305×10^{-11}	-2
2	7.012×10^{-11}	63	15	25.033×10^{-11}	-19
3	26.042×10^{-11}	31	16	19.627×10^{-11}	-84
4	31.463×10^{-11}	51	17	12.478×10^{-11}	-34
5	22.466×10^{-11}	49	18	8.0005×10^{-11}	-11
6	7.323×10^{-11}	43	19	22.881×10^{-11}	27
7	12.486×10^{-11}	-83	20	37.78×10^{-11}	56
8	18.089×10^{-11}	-46	21	29.978×10^{-11}	0.2
9	25.944×10^{-11}	-59	22	27.106×10^{-11}	72
10	29.057×10^{-11}	-78	23	21.349×10^{-11}	49
11	34.542×10^{-11}	-82	24	14.227×10^{-11}	58
12	37.653×10^{-11}	-59	25	18.182×10^{-11}	12
13	28.422×10^{-11}	-39	26	19.178×10^{-11}	23

4.2 Raket Wilson Hyper Pro Staff Extreme 6.7

4.2.1 Modus Getar Pada Frekuensi Natural 145.78 Hertz

Pada frekuensi natural pertama didapatkan modus getar dengan bentuk *bending mode shape* seperti ditunjukkan gambar 4.5. Perbedaan besar nilai compliance (X/F) disebabkan oleh geometri dan kekakuan yang berbeda-beda pada tiap bagian rangka (frame).



Gambar 4.5 Modus getar raket Wilson Hyper Pro Staff pada frekuensi natural pertama

Seperti halnya modus getar pertama pada raket Puma Boris Becker Winner, kecenderungan ini juga tidak lepas dari batasan yang dipakai yaitu *free-free boundary condition* pada *frame*



seperti pada percobaan yang dilakukan Miles dkk, sehingga modus getar dan frekuensi natural yang terjadi adalah murni dari *frame* raket. Dalam hal ini, modus getar yang terjadi sama dengan penelitian yang dilakukan Miles dan Yao Dong dan raket Puma dengan hasil modus getar pertamanya yaitu *frame bending* [2] [15].

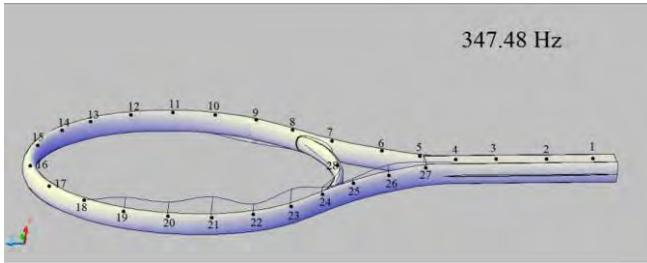
Pada modus getar pertama ini didapatkan nilai *compliance* maksimum pada titik 24 yaitu sebesar $150 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dan nilai *compliance* minimum pada titik 4 (*grip*) yaitu sebesar $13.49 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dengan rincian *compliance* dan sudut fase (ϕ) pada masing-masing titik ditunjukkan tabel 4.5

Tabel 4.5 *Compliance dan sudut fase raket Wilson Hyper 6.7 pada modus getar pertama*

Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)	Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)
1	135.86×10^{-11}	86	15	79.8×10^{-11}	-58
2	76.73×10^{-11}	86	16	107.9×10^{-11}	-63
3	38.05×10^{-11}	87	17	90.5×10^{-11}	-54
4	13.49×10^{-11}	75	18	101.11×10^{-11}	-51
5	48.4×10^{-11}	88	19	53.03×10^{-11}	-67
6	98.36×10^{-11}	75	20	19.05×10^{-11}	-54
7	94.39×10^{-11}	62	21	63.95×10^{-11}	78
8	125.2×10^{-11}	56	22	95.62×10^{-11}	77
9	112.87×10^{-11}	70	23	126.47×10^{-11}	53
10	94.78×10^{-11}	86	24	150×10^{-11}	45
11	69.07×10^{-11}	84	25	117.5×10^{-11}	55
12	46.03×10^{-11}	87	26	100.32×10^{-11}	68
13	42.42×10^{-11}	-73	27	50.25×10^{-11}	77
14	120.83×10^{-11}	-52	28	87.58×10^{-11}	53

4.2.2 Modus Getar Pada Frekuensi Natural 347.48 Hertz

Pada frekuensi natural kedua ini *frame* raket mengalami *mode shape torsional* dengan *compliance* lebih kecil dibandingkan *mode shape* pertama. Pada *grip* raket, *compliance* lebih kecil dibandingkan dengan titik lainnya seperti ditunjukkan gambar 4.6. Modus getar ini sama seperti hasil yang didapatkan pada percobaan Miles dan Yao-dong namun dengan frekuensi yang berbeda, yaitu pada 307 Hz untuk penelitian Miles, dan 220 Hz pada Yao dikarenakan batas pengkondisian yang berbeda.



Gambar 4.6 Modus getar raket Wilson Hyper Pro Staff pada frekuensi natural kedua

Berbeda dengan raket Puma Boris Becker Winner yang mengalami *tosional mode shape* pada frekuensi natural ketiga dan keempat, raket Wilson mengalami modus getar ini pada frekuensi natural kedua namun dengan nilai yang tidak terpaut jauh dengan frekuensi natural keempat pada raket Puma Boris Becker Winner yaitu 321 Hz. Hal ini disebabkan oleh properti material penyusun dan konstruksi geometris penampang frame yang berbeda.

Rincian *compliance* dan sudut fase (φ) pada masing-masing titik ditunjukkan tabel 4.6

Tabel 4.6 Compliance dan sudut fase raket Wilson Hyper 6.7 pada modus getar kedua

Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)	Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)
1	12.8×10^{-11}	37	15	17.56×10^{-11}	-56
2	4.3×10^{-11}	30	16	11.77×10^{-11}	-87
3	5.6×10^{-11}	37	17	4.33×10^{-11}	72
4	13.33×10^{-11}	42	18	17.32×10^{-11}	75
5	17.4×10^{-11}	-81	19	53.21×10^{-11}	76
6	28.34×10^{-11}	-89	20	48.99×10^{-11}	76
7	28.54×10^{-11}	-81	21	54×10^{-11}	79
8	32.58×10^{-11}	-67	22	39.02×10^{-11}	71
9	43.64×10^{-11}	-71	23	60.63×10^{-11}	62
10	34.8×10^{-11}	-70	24	36.79×10^{-11}	80
11	20.09×10^{-11}	-80	25	28.06×10^{-11}	86
12	20.84×10^{-11}	-89	26	40.13×10^{-11}	76
13	30.35×10^{-11}	-67	27	29.8×10^{-11}	87
14	22.6×10^{-11}	-73	28	12.68×10^{-11}	60

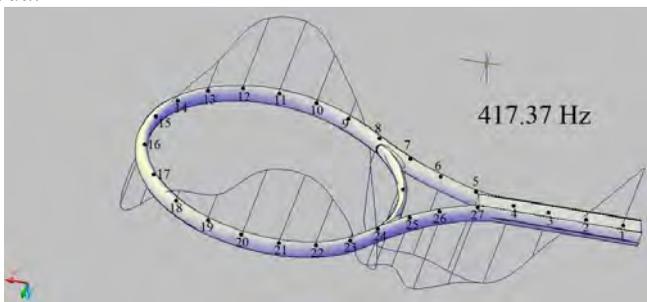


Pada modus getar kedua ini didapatkan nilai *compliance* maksimum pada titik 23 yaitu sebesar $60.63 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dan nilai *compliance* minimum pada titik 2 (*grip*) yaitu sebesar $4.31 \times 10^{-11} \text{m/N}$.

4.2.3 Modus Getar Pada Frekuensi Natural 417.37 Hertz

Pada frekuensi natural ketiga ini frame raket mengalami *saddle mode shape* seperti ditunjukkan Gambar 4.7. Pada modus getar ini, nilai *compliance* mengalami kenaikan yang cukup signifikan dibanding modus getar pertama dan kedua sehingga rata-rata nilai *compliance* modus getar ini adalah yang terbesar. Modus getar ini berbeda dengan hasil yang didapatkan pada percobaan Miles dan Yao-dong dikarenakan batas pengkondisian dan konstruksi serta material penyusun raket yang berbeda.

Berbeda dengan raket Puma Boris Becker Winner yang mengalami *saddle mode shape* pada frekuensi natural kedua, raket Wilson Hyper Pro Staff mengalami modus getar ini pada frekuensi natural ketiga dan dengan nilai yang terpaut jauh dengan frekuensi natural kedua pada raket Puma Boris Becker Winner yaitu 210 Hz. Hal ini disebabkan oleh properti material penyusun dan konstruksi geometris penampang frame yang berbeda.



Gambar 4.7 Modus getar raket Wilson Hyper Pro Staff pada frekuensi natural ketiga



Pada modus getar ketiga ini didapatkan nilai *compliance* maksimum pada titik 5 atau pada sambungan *grip* dan *neck* yaitu sebesar $310 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dan nilai *compliance* minimum pada titik 23 yaitu sebesar $23.67 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dengan rincian *compliance* dan sudut fase (ϕ) pada masing-masing titik ditunjukkan tabel 4.7

Tabel 4.7 *Compliance dan sudut fase raket Wilson Hyper 6.7 pada modus getar ketiga*

Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase ($^{\circ}$)	Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase ($^{\circ}$)
1	255.2×10^{-11}	76	15	103.96×10^{-11}	-80
2	39.63×10^{-11}	84	16	131.04×10^{-11}	-71
3	167.82×10^{-11}	-64	17	120.8×10^{-11}	-68
4	302.2×10^{-11}	-67	18	52.96×10^{-11}	67
5	310.9×10^{-11}	-81	19	119.59×10^{-11}	64
6	304.04×10^{-11}	-80	20	281.29×10^{-11}	74
7	170.55×10^{-11}	-82	21	301.7×10^{-11}	64
8	86.83×10^{-11}	-68	22	205×10^{-11}	76
9	87.52×10^{-11}	75	23	23.67×10^{-11}	82
10	214.85×10^{-11}	77	24	127.81×10^{-11}	-70
11	309.6×10^{-11}	88	25	182.04×10^{-11}	-76
12	307.6×10^{-11}	83	26	303.89×10^{-11}	-69
13	144.74×10^{-11}	67	27	299.27×10^{-11}	-65
14	39.44×10^{-11}	63	28	275.18×10^{-11}	-69

4.3 Raket Wilson Hyper Hammer 4.0

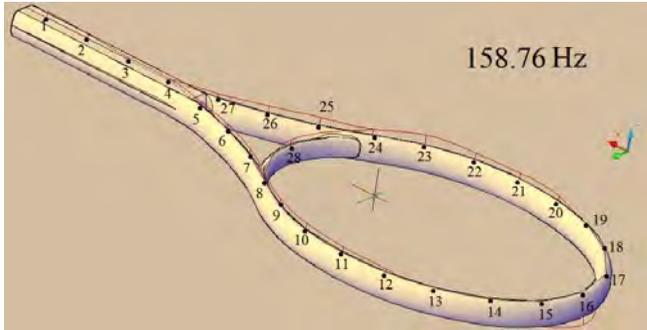
4.3.1 Modus Getar Pada Frekuensi Natural 158.76 Hertz

Pada frekuensi natural pertama didapatkan modus getar dengan bentuk *bending mode shape* seperti ditunjukkan gambar 4.8. Hal ini dialami juga oleh raket Puma Boris Becker dan raket Wilson ProStaff 6.7 namun dengan nilai *compliance* yang lebih kecil. Nilai *compliance* yang cenderung lebih kecil ini disebabkan perbedaan bentuk penampang raket Wilson Hyper Hammer 4.0 dengan raket-raket sebelumnya yaitu perpaduan *rectangular* dan *ovale*.

Seperti halnya modus getar pertama pada raket Puma Boris Becker Winner, dan Wilson Pro Staff 6.7, kecenderungan ini juga tidak lepas dari batasan yang dipakai yaitu *free-free boundary condition* pada *frame* seperti pada percobaan yang dilakukan Miles dkk, sehingga modus getar dan frekuensi natural yang



terjadi adalah murni dari *frame* raket. Dalam hal ini, modus getar yang terjadi sama dengan penelitian yang dilakukan Miles dan Yao Dong dan raket Puma dengan hasil modus getar pertamanya yaitu *frame bending* [2].



Gambar 4.8 Modus getar raket Wilson Hyper Hammer pada frekuensi natural pertama

Rincian *compliance* dan sudut fase (ϕ) pada masing-masing titik ditunjukkan tabel 4.8

Tabel 4.8 Compliance dan sudut fase raket Wilson Hyper 4.0 pada modus getar pertama

Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase ($^{\circ}$)	Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase ($^{\circ}$)
1	14×10^{-11}	84	15	10×10^{-11}	-58
2	8.85×10^{-11}	88	16	12.3×10^{-11}	-73
3	3.8×10^{-11}	83	17	12.4×10^{-11}	-75
4	3.5×10^{-11}	55	18	13.8×10^{-11}	-64
5	6.4×10^{-11}	87	19	12×10^{-11}	-31
6	9.5×10^{-11}	85	20	9×10^{-11}	16
7	10.4×10^{-11}	83	21	11.1×10^{-11}	39
8	11.2×10^{-11}	72	22	12.3×10^{-11}	39
9	11.4×10^{-11}	74	23	19.5×10^{-11}	46
10	12.5×10^{-11}	62	24	10.7×10^{-11}	75
11	9.3×10^{-11}	44	25	16.3×10^{-11}	60
12	4.7×10^{-11}	29	26	13.5×10^{-11}	60
13	5.4×10^{-11}	-80	27	7.64×10^{-11}	70
14	8.5×10^{-11}	-83	28	9.6×10^{-11}	89

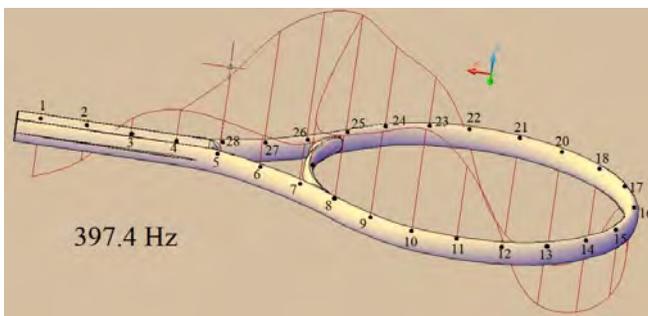


Pada modus getar pertama ini didapatkan nilai *compliance* maksimum pada titik 23 atau pada salah satu sisi *head* yaitu sebesar $19.5 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dan nilai *compliance* minimum pada titik 4 atau pada sambungan *grip* dan *neck* yaitu sebesar $3.5 \times 10^{-11} \text{m/N}$.

4.3.2 Modus Getar Pada Frekuensi Natural 397.4 Hertz

Pada frekuensi natural kedua ini frame raket mengalami *saddle mode shape* seperti ditunjukkan gambar 4.9. Pada modus getar ini, nilai *compliance* mengalami kenaikan yang cukup signifikan dibanding modus getar pertama sehingga rata-rata nilai *compliance* modus getar ini adalah yang terbesar. Modus getar ini berbeda dengan hasil yang didapatkan pada percobaan Miles dan Yao-dong dikarenakan batas pengkondisian dan konstruksi serta material penyusun raket yang berbeda [2].

Hal yang sama dialami raket Puma Boris Becker Winner yang mengalami *saddle mode shape* pada frekuensi natural kedua namun pada frekuensi yang lebih awal (210 Hz). Raket Wilson Hyper Hammer mengalami modus getar ini pada frekuensi natural 397.4 Hz dimana nilai frekuensi natural ini tidak terpaut jauh dengan frekuensi natural ketiga raket Wilson Hyper Pro Staff yaitu 417.37 Hz.



Gambar 4.9 Modus getar raket Wilson Hyper Hammer pada frekuensi natural kedua



Hal tersebut yang menyebabkan kedua raket Wilson memiliki karakteristik modus getar yang mirip pada frekuensi kisaran ini.

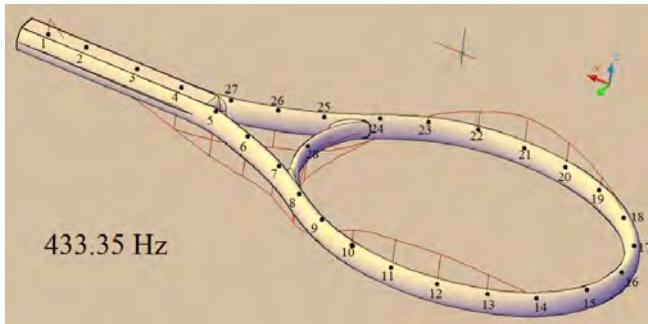
Pada modus getar kedua ini didapatkan nilai *compliance* maksimum pada titik 26 atau di daerah sambungan *head* yaitu sebesar $350 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dan nilai *compliance* minimum pada titik 17 atau pada daerah atas *head* yaitu sebesar $16.6 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dengan rincian *compliance* dan sudut fase (ϕ) pada masing-masing titik ditunjukkan tabel 4.9

Tabel 4.9 Compliance dan sudut fase raket Wilson Hyper 4.0 pada modus getar kedua

Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)	Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)
1	123.6×10^{-11}	-52	15	146.3×10^{-11}	-64
2	59.97×10^{-11}	-55	16	86×10^{-11}	-44
3	99.08×10^{-11}	47	17	16.6×10^{-11}	-62
4	120.9×10^{-11}	22	18	163.2×10^{-11}	-75
5	79.5×10^{-11}	66	19	256.6×10^{-11}	-75
6	17.45×10^{-11}	65	20	215×10^{-11}	-81
7	60.3×10^{-11}	75	21	32.1×10^{-11}	-86
8	211×10^{-11}	82	22	139.7×10^{-11}	-80
9	207×10^{-11}	80	23	219.7×10^{-11}	85
10	270.9×10^{-11}	86	24	310×10^{-11}	85
11	203.5×10^{-11}	85	25	308×10^{-11}	82
12	34×10^{-11}	87	26	350×10^{-11}	85
13	124.6×10^{-11}	-79	27	216.6×10^{-11}	70
14	127.5×10^{-11}	-79	28	119.75×10^{-11}	70

4.3.3 Modus Getar Pada Frekuensi Natural 433.35 Hertz

Pada frekuensi natural ketiga ini frame raket mengalami *saddle mode shape* seperti ditunjukkan gambar 4.10. Pada modus getar ini, nilai *compliance* kembali turun cukup signifikan dibanding modus getar kedua. Modus getar ini memiliki kemiripan karakteristik dengan modus getar kedua dan berbeda dengan hasil yang didapatkan pada percobaan Miles (313 Hz) dan Yao-dong (470 Hz) dikarenakan batas pengkondisian dan konstruksi serta material penyusun raket yang berbeda [15].



Gambar 4.10 Modus getar raket Wilson Hyper Hammer pada frekuensi natural ketiga

Hal berbeda dialami raket Puma Boris Becker Winner yang mengalami *torsion mode shape* pada frekuensi natural ketiga. Raket Wilson Hyper Hammer mengalami modus getar ini pada frekuensi natural 397.4 Hz dimana nilai frekuensi natural ini tidak terpaut jauh dengan frekuensi natural ketiga raket Wilson Hyper Pro Staff yaitu 417.37 Hz. Hal tersebut yang menyebabkan kedua raket Wilson memiliki karakteristik modus getar yang mirip pada frekuensi kisaran ini.

Tabel 4.10 Compliance dan sudut fase raket Wilson Hyper 4.0 pada modus getar ketiga

Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)	Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase (°)
1	57.65×10^{-11}	24	15	26×10^{-11}	-52
2	17.04×10^{-11}	-21	16	22.2×10^{-11}	-85
3	43.5×10^{-11}	-16	17	22.9×10^{-11}	-58
4	75.8×10^{-11}	-18	18	32×10^{-11}	80
5	83.3×10^{-11}	-38	19	34×10^{-11}	65
6	73×10^{-11}	-73	20	70×10^{-11}	45
7	58.7×10^{-11}	-74	21	82.6×10^{-11}	63
8	54×10^{-11}	-71	22	61.6×10^{-11}	75
9	19.4×10^{-11}	-21	23	28.4×10^{-11}	63
10	54.9×10^{-11}	53	24	29.5×10^{-11}	-10
11	80×10^{-11}	56	25	62.9×10^{-11}	-55
12	84×10^{-11}	62	26	70.5×10^{-11}	-48
13	59.4×10^{-11}	78	27	79.17×10^{-11}	-43
14	16.5×10^{-11}	79	28	71.71×10^{-11}	-55

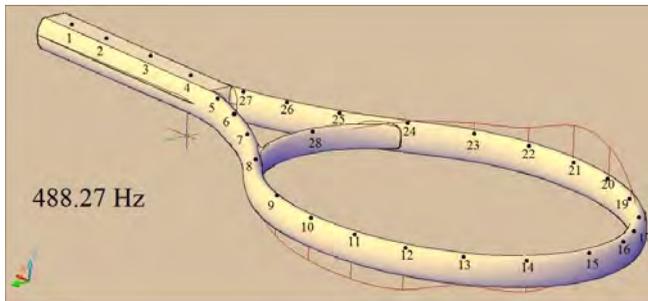


Selain itu, modus getar yang mirip dengan modus getar pada frekuensi natural kedua ini disebabkan posisi puncak *compliance* ini masih dekat dengan puncak *compliance* pada frekuensi natural kedua.

Rincian *compliance* dan sudut fase (ϕ) pada masing-masing titik ditunjukkan tabel 4.10. Pada modus getar ketiga ini didapatkan nilai *compliance* maksimum pada titik 12 atau di bagian sisi *head* yaitu sebesar $84 \times 10^{-11} \text{m/N}$ dan nilai *compliance* minimum pada titik 14 yaitu sebesar $16.5 \times 10^{-11} \text{m/N}$.

4.3.4 Modus Getar Pada Frekuensi Natural 488.27 Hertz

Pada frekuensi natural keempat didapatkan modus getar dengan bentuk *torsional mode shape* seperti modus getar keempat untuk raket Puma Boris Becker seperti ditunjukkan Gambar 4.11. Bagian *grip* pada frekuensi natural keempat ini mengalami penurunan *compliance*.



Gambar 4.11 Modus getar raket Wilson Hyper Hammer pada frekuensi natural keempat

Raket Wilson Hyper Hammer mengalami modus getar ini pada frekuensi natural 488.27 Hz dimana nilai frekuensi natural ini mendekati frekuensi natural frame ketiga pada penelitian Miles yaitu 489 Hz dengan modus getar yang sama yaitu *frame torsion*. Selain itu, kemiripan dengan modus getar pada frekuensi natural keempat raket Puma namun dengan frekuensi yang terpaut



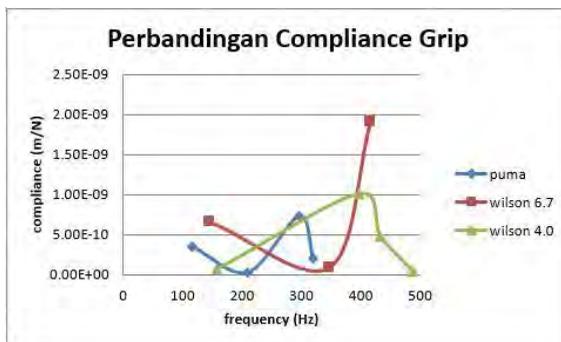
jauh ini disebabkan perbedaan material penyusun dan penampang frame sehingga kekakuan kedua raket berbeda.

Pada modus getar keempat ini didapatkan nilai *compliance* maksimum pada titik 21 yaitu sebesar 80×10^{-11} m/N dan *compliance* minimum pada titik 2 yaitu 2.67×10^{-11} m/N dengan rincian *compliance* dan sudut fase (ϕ) pada masing-masing titik ditunjukkan tabel 4.11 berikut

Tabel 4.11 *Compliance dan sudut fase raket Wilson Hyper 4.0 pada modus getar keempat*

Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase ($^{\circ}$)	Node	Compliance (m/N)	Sudut Fase ($^{\circ}$)
1	6×10^{-11}	25	15	33×10^{-11}	-65
2	2.67×10^{-11}	24	16	7.4×10^{-11}	-16
3	3.3×10^{-11}	61	17	8.7×10^{-11}	42
4	6.7×10^{-11}	83	18	15.6×10^{-11}	3
5	8.3×10^{-11}	20	19	37×10^{-11}	8
6	6.65×10^{-11}	-35	20	74×10^{-11}	33
7	13×10^{-11}	-23	21	80×10^{-11}	35
8	12×10^{-11}	-30	22	51.5×10^{-11}	39
9	24.6×10^{-11}	-45	23	37×10^{-11}	52
10	40×10^{-11}	-27	24	26×10^{-11}	44
11	51×10^{-11}	-27	25	16×10^{-11}	74
12	54×10^{-11}	-24	26	6×10^{-11}	65
13	50×10^{-11}	-46	27	5×10^{-11}	64
14	28.5×10^{-11}	-52	28	4×10^{-11}	86

4.4 Perbandingan Harga *Compliance* Rata-Rata Pada Grip



Gambar 4.12 grafik *compliance* rata-rata pada grip ketiga raket



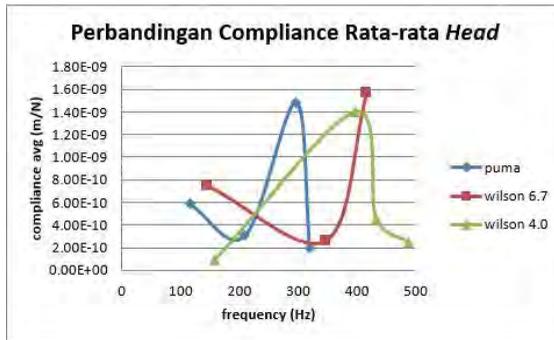
Dari grafik perbandingan ketiga raket untuk *compliance* rata-rata *grip* diperoleh bahwa raket Puma Boris Becker memiliki nilai paling rendah pada frekuensi natural ketiga dibanding Wilson Hyper Pro Staff 6.7 yang memiliki nilai terbesar pada frekuensi natural ketiga pula dan pada frekuensi natural kedua, raket Wilson Hyper Hammer 4.0 memiliki nilai *compliance* rata-rata *grip* tidak terpaut jauh diatas raket Puma Boris Becker namun cukup jauh di bawah nilai *compliance* Wilson Hyper Pro Staff 6.7.

Pada frekuensi natural pertama terlihat ketiga raket memiliki nilai frekuensi natural yang tidak terpaut jauh, hal ini disebutkan pula pada hasil penelitian Yao-dong Gu bahwa untuk struktur raket yang sama atau mirip akan memiliki frekuensi natural yang tidak jauh nilainya, sedangkan perbedaan nilai *compliance* dipengaruhi oleh material penyusun dan kondisi *grip*. Tingginya harga *compliance grip* pada raket Wilson Hyper Pro Staff 6.7 dibandingkan dengan kedua raket lainnya disebabkan kondisi *grip* pada saat pengambilan data tidak dibalut dengan peredam berupa kain serabut atau lembaran spon.

Berbeda dengan dengan raket Puma Boris Becker yang penyusun *grip*-nya berupa komposit namun tidak dibalut kain peredam, berbeda pula dengan kondisi Wilson Hyper Hammer 4.0 yang dibalut rata dengan kain peredam pada *grip* sehingga nilai *compliance* pada frekuensi natural pertamanya paling rendah.



4.5 Perbandingan Harga *Compliance* dan Kekakuan Dinamik Rata-rata Pada Head

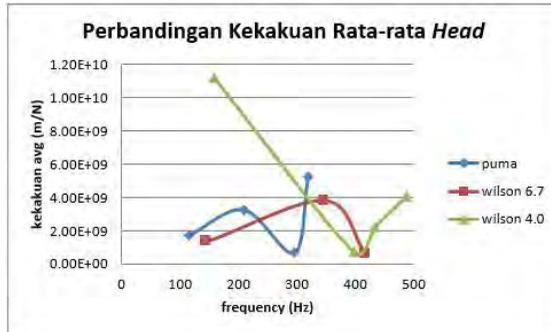


Gambar 4.13 grafik *compliance* rata-rata pada head ketiga raket

Dari grafik perbandingan ketiga raket untuk *compliance* rata-rata diperoleh bahwa raket Wilson Hyper Pro Staff 6.7 memiliki nilai tertinggi untuk frekuensi natural ketiga di atas nilai *compliance* maksimum raket Puma Boris Becker Winner pada frekuensi natural ketiga dan, dibawahnya adalah raket Wilson Hyper Hammer 4.0 dengan nilai *compliance* yang tidak terpaut jauh dengan Puma Boris Becker Winner. Sedangkan pada frekuensi natural pertama ketiga raket menunjukkan trend nilai *compliance* rata-rata yang sama dengan trend nilai *compliance* maksimum. Harga *compliance* rata-rata raket Puma disebabkan besarnya perbedaan nilai *compliance* antar titik sehingga, walaupun *compliance* maksimum raket ini memiliki nilai tertinggi dibanding kedua raket lainnya namun nilai rata-rata *compliance* lebih rendah dibanding raket Wilson Hyper Pro Staff 6.7. Dalam hal ini kekakuan dinamik rata-rata yang dimiliki raket Wilson Hyper Hammer 4.0 pada frekuensi natural kedua adalah yang tertinggi mengingat nilai *compliance* berbanding terbalik dengan nilai kekakuan dinamik. Harga *compliance* rata-rata ketiga raket pada frekuensi natural pertama memiliki perbandingan yang serupa dengan harga *compliance* maksimum, hal ini disebabkan



kecilnya perbedaan nilai *compliance* di setiap titik untuk frekuensi natural ini. Perbandingan nilai kekakuan dinamik rata-rata ketiga raket ditunjukkan oleh Gambar 4.14.



Gambar 4.14 grafik kekakuan dinamik rata-rata pada head ketiga raket



BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan dipaparkan hasil analisa serta pembahasan yang telah dilakukan dan disimpulkan dalam beberapa kesimpulan, serta diberikan pula saran-saran yang dapat dijadikan rujukan atau rekomendasi untuk penelitian-penelitian serupa kedepannya.

5.1 Kesimpulan

Dari analisa dan pembahasan data hasil eksperiman yang telah dilakukan dapat diambil bebera kesimpulan yaitu

1. Perbandingan modus getar ketiga rangka raket

Tabel 5.1 Perbandingan karakteristik modus getar

Puma Boris Becker Winner	Wilson Hyper Pro Staff 6.7	Wilson Hyper Hammer 4.0
Bending 116 Hz		
	Bending 146 Hz	Bending 159 Hz
Saddle 210 Hz		
Torsion 297 Hz		
2 nd Torsion 321 Hz	Torsion 347 Hz	
		Saddle 397 Hz
	Saddle 417 Hz	2 nd Saddle 433 Hz
		Torsion 488 Hz



2. Kemiripan karakteristik modus getar pada kedua raket Wilson disebabkan bahan dan dimensi raket yang sama serta geometri penampang yang tidak jauh berbeda. Sedangkan perbedaan karakteristik modus getar raket Puma disebabkan perbedaan bahan penyusun rangka serta geometri dan dimensi rangka raket dibandingkan dengan raket Wilson.
3. Nilai *compliance* rata-rata *grip* terbesar dimiliki raket Wilson Hyper Pro Staff 6.7 pada frekuensi natural ketiga, kemudian nilai terbesar kedua dimiliki raket Wilson Hyper Hammer 4.0 pada frekuensi natural kedua, dan yang ketiga dimiliki raket Puma Boris Becker Winner pada frekuensi natural ketiga. Namun untuk rata-rata *compliance grip* keseluruhan frekuensi natural yang paling rendah adalah *grip* raket Puma Boris Becker Winner.
4. Nilai kekakuan dinamik rata-rata pada *head* terbesar pada frekuensi natural pertama dimiliki Wilson Hyper Hammer 4.0, kemudian raket Puma Boris Becker dan Wilson Hyper Pro Staff 6.7 yang nilai kekakuannya tidak terpaut jauh. Nilai kekakuan dinamik *head* terkecil dimiliki raket Wilson Hyper Pro Staff 6.7 dan Puma Boris Becker pada frekuensi natural ketiga dan raket Wilson Hyper Hammer 4.0 pada frekuensi natural kedua.

5.2 Saran dan Rekomendasi

Dari penelitian dan evaluasi yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa saran serta rekomendasi untuk penelitian-penelitian serupa berikutnya antara lain,

1. Dapat dilakukan variasi pada rangka raket dengan tahun pembuatan yang sama agar analisa yang dilakukan lebih fokus.



2. Pengambilan data dilakukan pada saat ruang/laboratorium dalam kondisi minim *noise* sehingga hasil yang didapatkan bisa lebih presisi.
3. Dilakukan pemodelan spesimen dalam software seperti *3D SolidWorks* atau *Ansys* untuk dapat dijadikan perbandingan dalam metode eksperimen dan pemodelan.
4. Penelitian juga dapat dilakukan dengan mengubah kondisi batas atau *boundary condition* sesuai kebutuhan analisa.

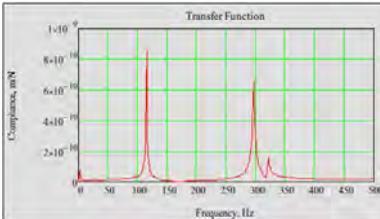


(halaman sengaja dikosongkan)

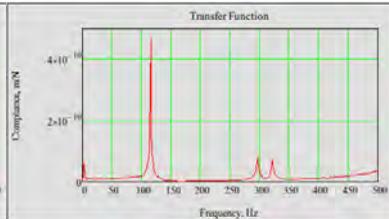


LAMPIRAN

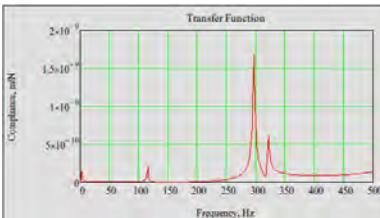
Lampiran 1: Grafik compliace domain frekuensi untuk raket Puma Boris Becker Winner di tiap titik



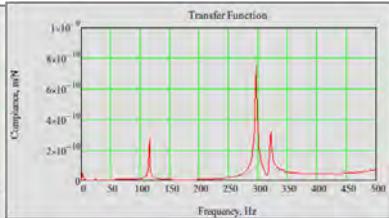
Titik 1



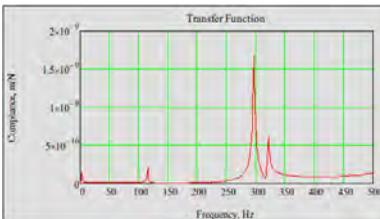
Titik 2



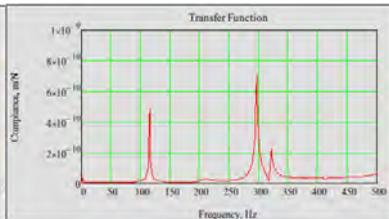
Titik 3



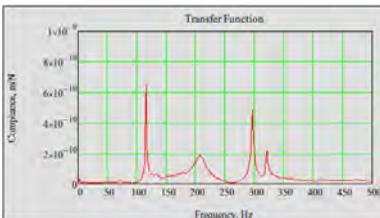
Titik 4



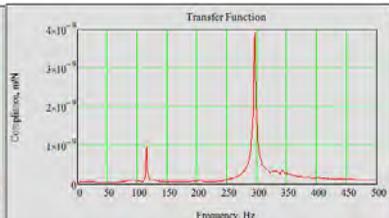
Titik 5



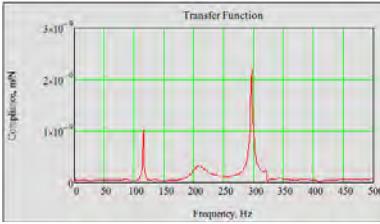
Titik 6



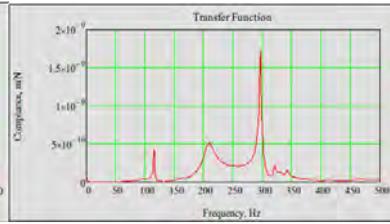
Titik 7



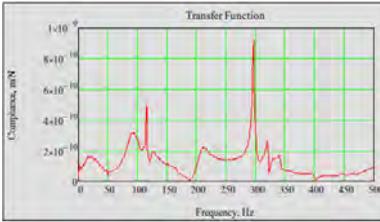
Titik 8



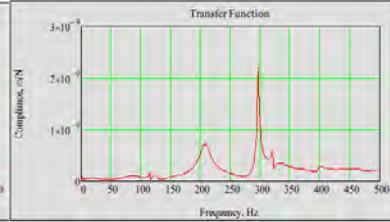
Titik 9



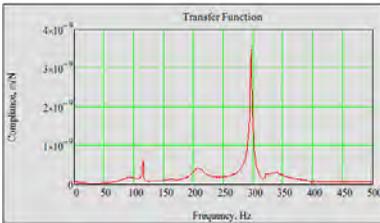
Titik 10



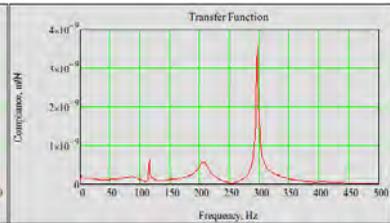
Titik 11



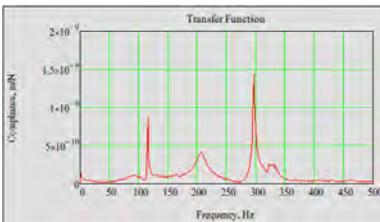
Titik 12



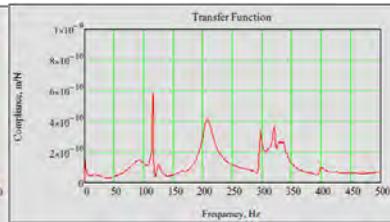
Titik 13



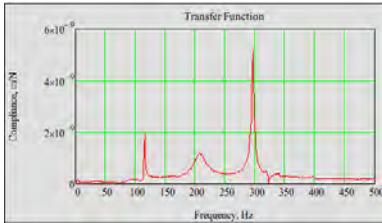
Titik 14



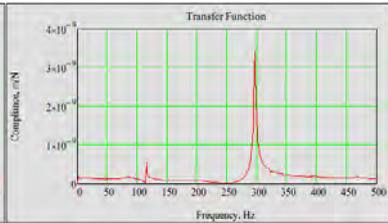
Titik 15



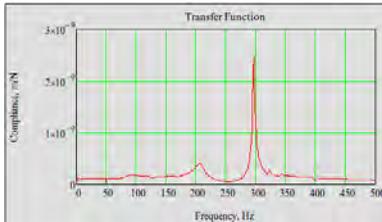
Titik 16



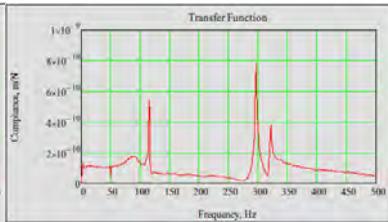
Titik 17



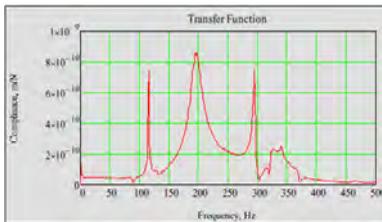
Titik 18



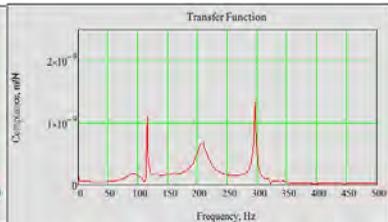
Titik 19



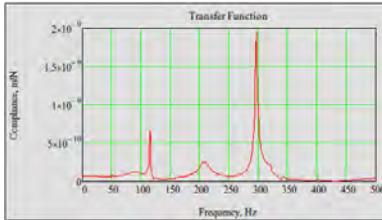
Titik 20



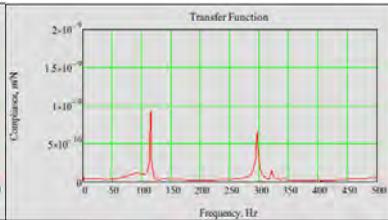
Titik 21



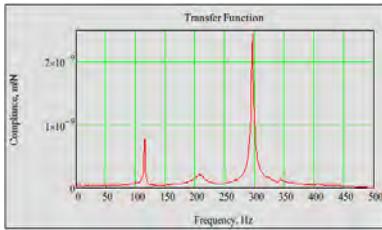
Titik 22



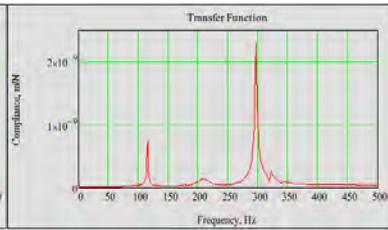
Titik 23



Titik 24



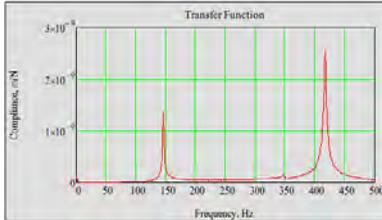
Titik 25



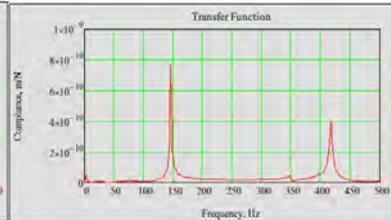
Titik 26



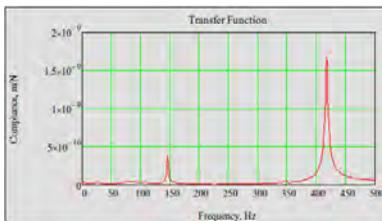
Lampiran 2: Grafik compliace domain frekuensi untuk raket Wilson Hyper Pro Staff 6.7 di tiap titik



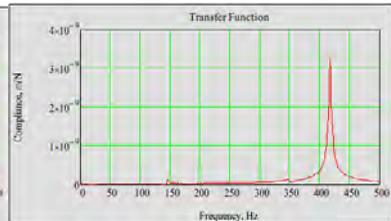
Titik 1



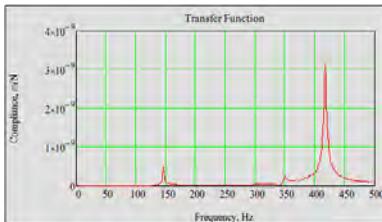
Titik 2



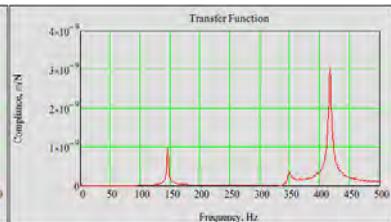
Titik 3



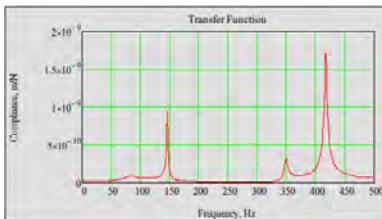
Titik 4



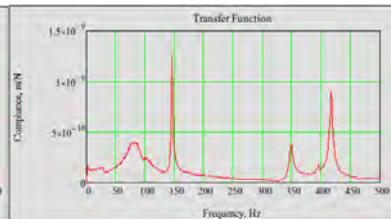
Titik 5



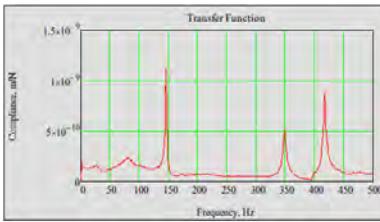
Titik 6



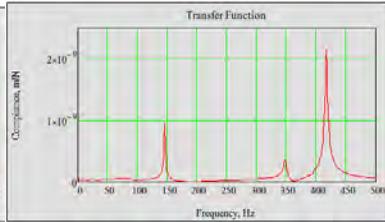
Titik 7



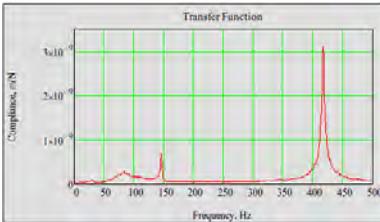
Titik 8



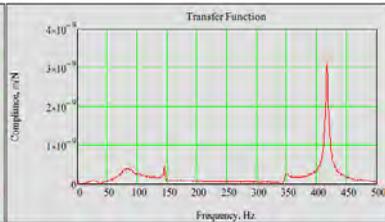
Titik 9



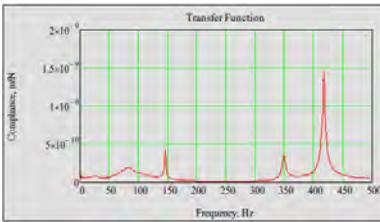
Titik 10



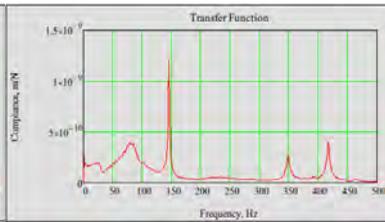
Titik 11



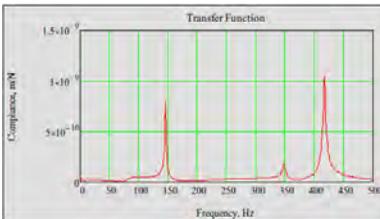
Titik 12



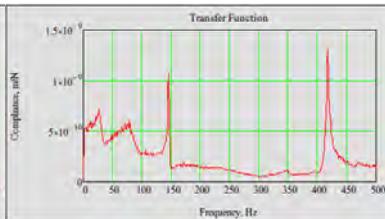
Titik 13



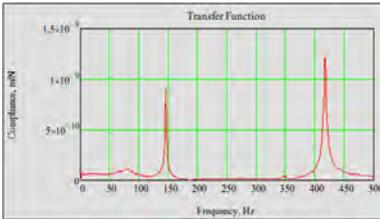
Titik 14



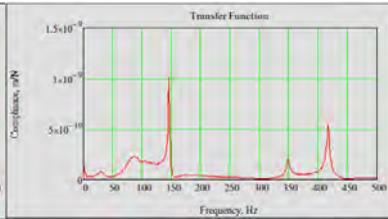
Titik 15



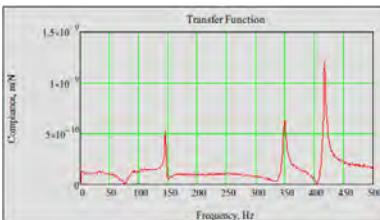
Titik 16



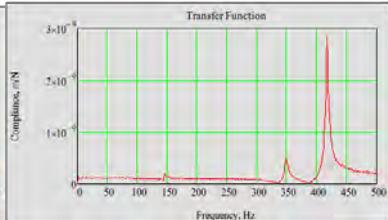
Titik 17



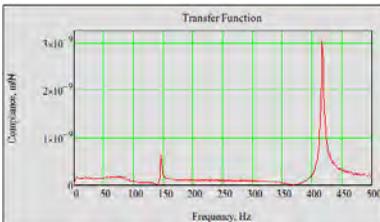
Titik 18



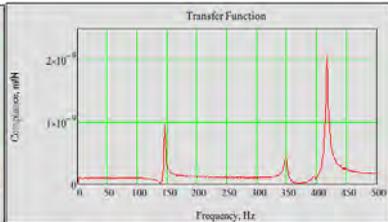
Titik 19



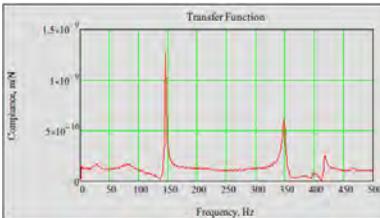
Titik 20



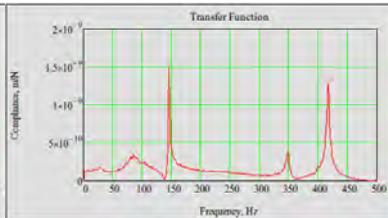
Titik 21



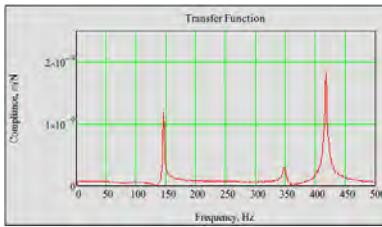
Titik 22



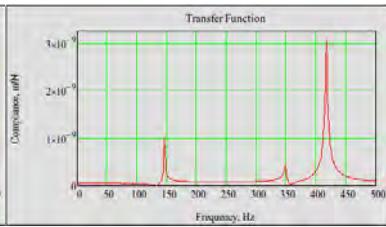
Titik 23



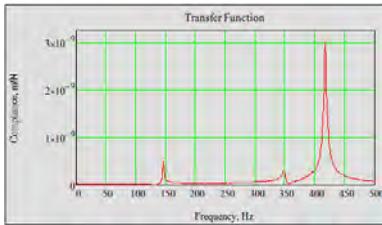
Titik 24



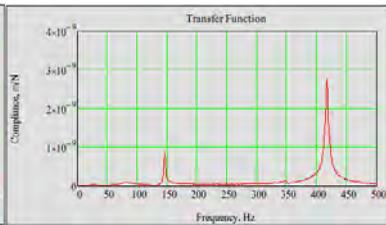
Titik 25



Titik 26



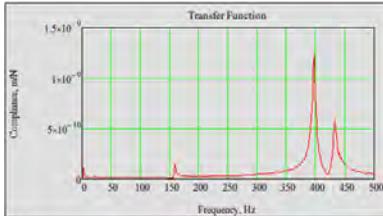
Titik 27



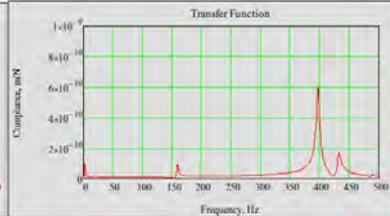
Titik 29



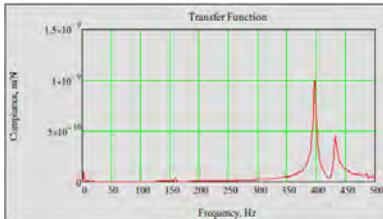
Lampiran 3: Grafik compliace domain frekuensi untuk raket Wilson Hyper Hammer 4.0 di tiap titik



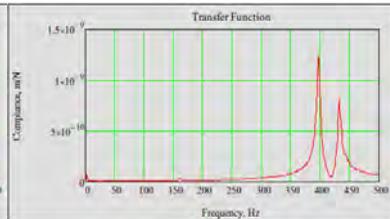
Titik 1



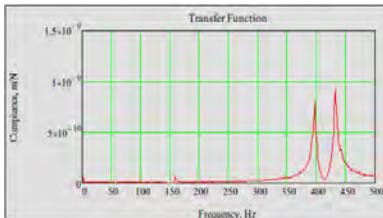
Titik 2



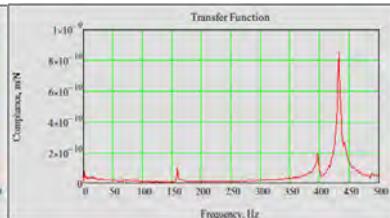
Titik 3



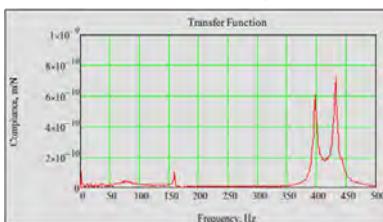
Titik 4



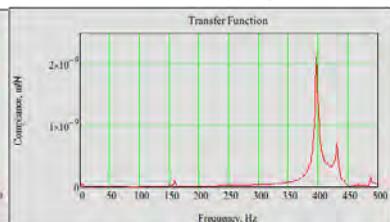
Titik 5



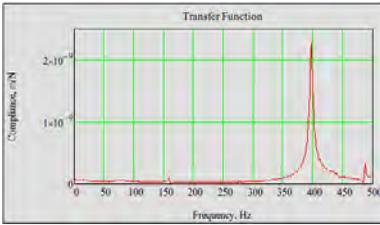
Titik 6



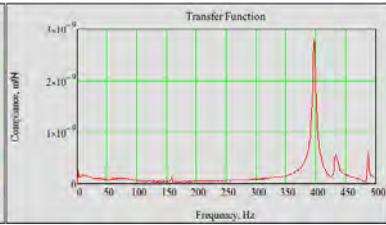
Titik 7



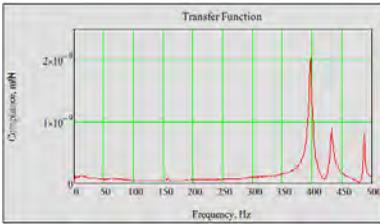
Titik 8



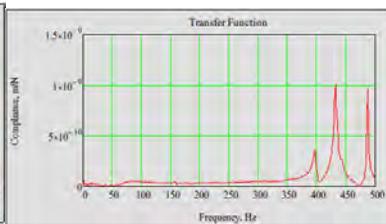
Titik 9



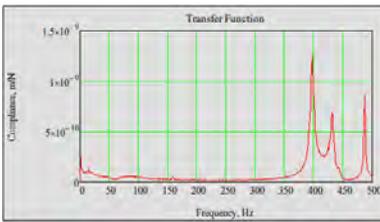
Titik 10



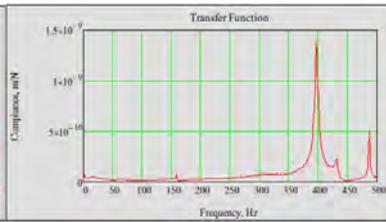
Titik 11



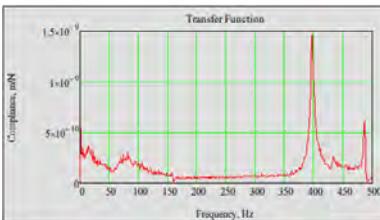
Titik 12



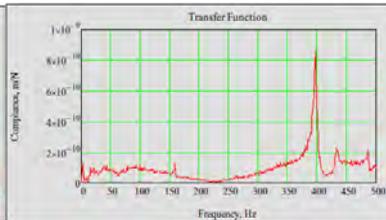
Titik 13



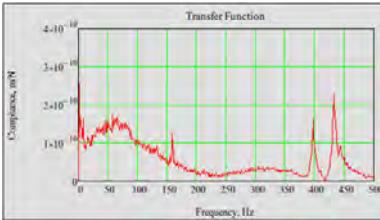
Titik 14



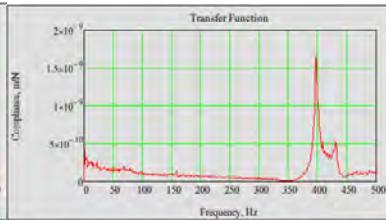
Titik 15



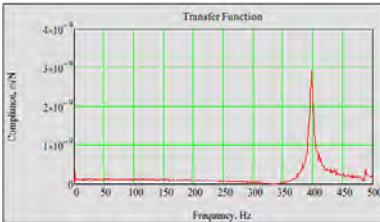
Titik 16



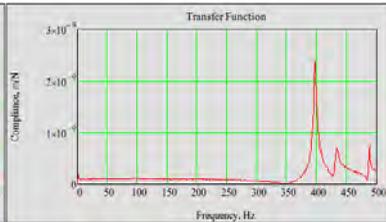
Titik 17



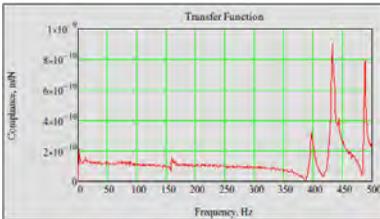
Titik 18



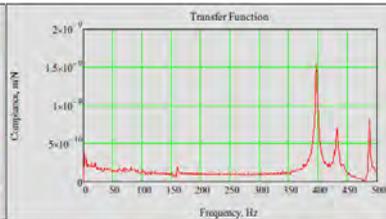
Titik 19



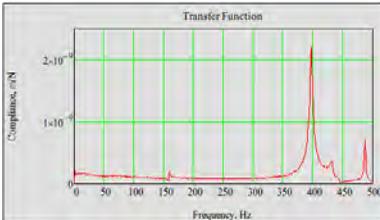
Titik 20



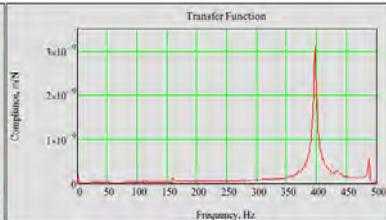
Titik 21



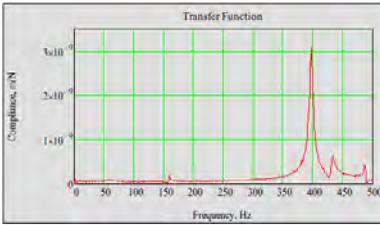
Titik 22



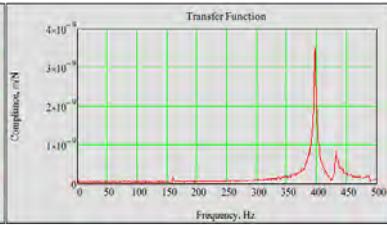
Titik 23



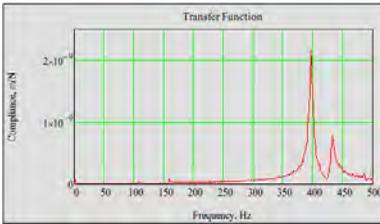
Titik 24



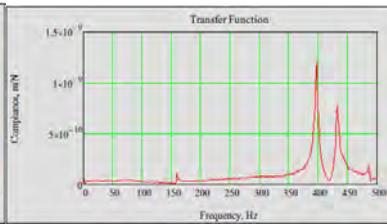
Titik 25



Titik 26



Titik 27



Titik 28



DAFTAR PUSTAKA

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Tennis>
- [2] Gu, Yao. Li, J. 2007. **Dynamic Simulation of Tennis Racket and String**. International Journal of Sports Science and Engineering, Vol 1, hal 55-60.
- [3] <http://www.80s-tennis.com/pages/puma-becker-super-and-winner.html>
- [4] Knudson, D. Blackwell, J. 1997. **Upper Extremity Angular Kinematics Of The One-Handed Backhand Drive In Tennis Players With And Without Tennis Elbow**. International Journal of Sports Medicine, Vol. 18: hal. 79-82.
- [5] Hennig, E.M. 2007. **Influence of Racket Properties on Injuries and Performance in Tennis**. Germany: Essen, Bewegungswissenschaften Universität Duisburg-Essen.
- [6] <http://www.wilson.com/en-us/tennis/rackets/>
- [7] Rao, Singiresu. 2011. **Mechanical Vibrations 5th ed**. Pearson Education, Inc. Prentice Hall, Upper Saddle River, USA
- [8] Mobley, R. Keith. 1999. **Vibration Fundamentals**. Boston Oxford Auckland Johannesburg: Melbourne.
- [9] <http://vibrasiblog.blogspot.com/2011/10/bab-ii-getaran.html>
- [10] Ewins, D. J. 1994. **Modal testing: theory, practice, and application**. Research Studies Press, Michigan University, Michigan.
- [11] Suhardjono. 2005. **Kaji Eksperimental Analisis Modal untuk Struktur 3 in 1 Mesin Kombinasi Bubut-Freis-Gurdi Emco Maximat Super 11**, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.



-
- [12] http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782006000300007
- [13] Zavery, K. 1984. **Modal Analysis of Large Structures – Multiple Exciter System**, 1st edition, Bruel & Kjaer, USA.
- [14] Hibbeler, R.C. 2011. **Mechanics of Materials 8th ed**, Pearson Education, Inc. Prentice Hall, Upper Saddle River, USA.
- [15] Buechler, M. 2003. **Vibration Modelling And Suppression In Tennis Racquets**, Montana State University, USA.
- [16] Chidambaram, P.K. Ramakrishanan, R. 2014. **Impact, String Tension and Vibration Analysis of Nanocomposite Based Tennis Racket Frame**. Scholars Journal of Engineering and Technology, Vol. 2, hal 206-211.



BIOGRAFI PENULIS



Dimas Angga Pradiga adalah nama pemberian dari Risdianto dan Nur Urifah, pasangan suami-istri yang tidak lain adalah kedua orang tua penulis. Lahir di Jombang 9 Februari 1991 dan menyelesaikan pendidikan dasar di SDN Purwotengah 1 tahun 2003, kemudian melanjutkan ke salah satu sekolah unggulan di Jawa Timur, SMPN 1 Kota Mojokerto dan lulus tahun 2006, kemudian melanjutkan ke jenjang SMA di SMAN 2 Kota Mojokerto dan lulus di tahun 2009.

Selepas SMA penulis melanjutkan studinya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Jurusan Teknik Mesin pada tahun akademik 2009/2010. Selain belajar, penulis juga aktif dalam kegiatan berorganisasi di Himpunan Mahasiswa Mesin dan pernah diamanahi menjadi kepala departemen Pengembangan Potensi Ilmiah Mahasiswa (PPIM). Selain dalam organisasi, selama kuliah penulis juga sering membuat karya tulis dalam beberapa kompetisi penalaran dan penulis sangat menyukai kegiatan di alam bebas dalam rangka bercengkrama dengan alam serta melepas beban pikiran.

Selama masa perkuliahan, penulis sangat menyukai bidang ilmu mengenai getaran atau dalam istilah asing vibration. Sebelum menaruh pilihan di Laboratorium Mesin Perkakas, penulis sempat mengerjakan tugas akhir di Laboatorium Vibrasi dan Sistem Dinamis dengan bidang yang sama seperti sekarang yaitu vibrasi sampai akhirnya jatuh pilihan pada topik Vibrasi pada Rangka Raket Tenis dibawah bimbingan Prof. Dr. Ing. Suhardjono, M Sc. Pada tahun 2015 tugas akhir ini pun selesai dan penulis menyelesaikan studi untuk meraih gelar sarjananya.