



TESIS-TM 142501

**IMPLEMENTASI SERAT KARBON/EPOKSI UNTUK *DRIVE SHAFT*
PADA KENDARAAN PENGGERAK RODA BELAKANG**

FIRMAN ALHAFFIS
NRP 2114201011

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Eng. Sutikno, ST., MT.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

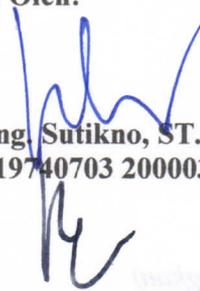
**LEMBAR PENGESAHAN
TESIS**

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

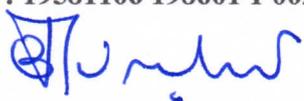
**Oleh:
Firman Alhaffis
NRP. 2114201011**

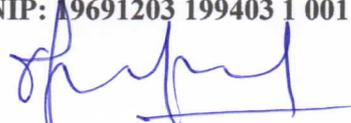
**Tanggal Ujian : Selasa, 17 Januari 2017
Periode Wisuda : Maret 2017**

Disetujui Oleh:


1. **Dr. Eng. Sutikno, ST., MT.** (Pembimbing)
NIP: 19740703 200003 1 001

2. **Prof. Dr. Ir. I Made Londen Batan., M.Eng.** (Penguji)
NIP: 19581106 198601 1 002


3. **Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng., Ph.D.** (Penguji)
NIP: 19691203 199403 1 001


4. **Suwarno, ST., M.Sc., Ph.D.** (Penguji)
NIP: 19800520 200501 1 003



**an. Direktur Program Pascasarjana
Asisten Direktur**

Prof. Dr. Ir. Widjaja, M.Eng.
NIP: 19611023 198603 1 001

Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.
NIP: 196012021987011001

Halaman ini sengaja dikosongkan

IMPLEMENTASI SERAT KARBON/EPOKSI UNTUK DRIVE SHAFT PADA KENDARAAN PENGGERAK RODA BELAKANG

Nama : Firman Alhaffis
NRP : 2114201011
Pembimbing : Dr. Eng. Sutikno, ST., MT.

ABSTRAK

Komposit dibutuhkan dalam aplikasi kendaraan roda empat pada *drive shaft* sebagai penghantar torsi dan daya dari transmisi ke diferensial. Untuk menghindari konsumsi daya yang berlebihan pada *drive shaft*, maka disyaratkan *drive shaft* harus memiliki bobot yang lebih ringan dari bobot *drive shaft* konvensional (baja). Efisiensi penggunaan bahan bakar dapat meningkat jika bobot *drive shaft* dapat direduksi. Keuntungan lain yang diperoleh dari penggunaan *drive shaft* dengan material komposit adalah kemampuannya terhadap korosi.

Dalam penelitian melakukan perancangan mengenai penggunaan komposit serat karbon/epoksi sebagai *drive shaft* untuk kendaraan penggerak roda belakang kapasitas mesin 1329 cc memiliki torsi maksimum 120,62 N.m. Panjang 785 mm dan diameter 60 mm diambil dari referensi *drive shaft* baja SM45C. Metode perancangan simulasi menggunakan *software finite element analysis* (FEA) kemudian dilakukan pembuatan spesimen *drive shaft* komposit sesuai rekomendasi hasil simulasi.

Konfigurasi orientasi serat dan susunan *layer* terbaik adalah 45/45/0/0. Orientasi serat 45⁰ memiliki karakteristik torsi yang baik. Orientasi serat 45⁰ disusun pada bagian terluar (*hoop*) *drive shaft*, karena tegangan akibat torsi paling besar terjadi pada sisi luar. Orientasi serat 0⁰ memiliki kemampuan lebih baik pada kondisi tarik dan *bending*. Penggunaan *drive shaft* komposit serat karbon/epoksi dapat mereduksi bobot hingga 88%. Pada konfigurasi orientasi serat dan susunan *layer* terbaik ditemukan *natural frequency* meningkat hingga 38%.

Kata Kunci: Serat Karbon/Epoksi, *Drive Shaft*, Orientasi Serat, Kekakuan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

IMPLEMENTATION CARBON FIBER/EPOXY FOR DRIVE SHAFT AT REAR WHEEL DRIVE VEHICLES

Name : Firman Alhaffis
Student Identity Number : 2114201011
Supervisor : Dr. Eng. Sutikno, ST., MT.

ABSTRACT

Composite applications are required in four-wheel drive vehicles. The drive shaft as a transmitting power and torque from the transmission to the differential. To avoid excessive power consumption in the drive shaft, the drive shaft should be required to have a lighter than a conventional drive shaft (steel). Fuel efficiency can be increased if the weight of drive shaft can be reduced. Another advantage from the use of the drive shaft with a composite material is corrosion resistant.

In this study is using the composite carbon fiber/epoxy as a drive shafts for rear-wheel drive vehicle with engine capacity is 1.329 cc has maximum 120.62 N.m is torque. The length is 785 and is 60 mm diameter were taken from reference SM45C steel drive shaft. The design is using by finite element analysis (FEA) simulation method. Furthermore, the manufacturing process of specimens composite drive shaft to according simulation results recommendations.

Configuration of winding angle and stacking sequence is found the best is 45/45/0/0. The winding angle 45° has a good torque characteristics. The winding angle 45° are arranged on the hoop of drive shaft, because the stress is greatest torque occurs on outer side. The winding angle 0° have a better ability on tensile and bending conditions. The use of drive shaft composite carbon fiber/epoxy can reduce weight to 88%. The best configuration of winding angle and stacking sequence is increasing natural frequency to 38%.

Key Words: Carbon Fiber/epoxy, Drive Shaft, Winding Angle, Stiffness.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, atas segala rahmat dan hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan judul **“Implementasi Serat Karbon/Epoksi untuk *Drive Shaft* pada Kendaraan Penggerak Roda Belakang”**. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Tahun 2017.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berperan serta dalam penyusunan tesis ini, diantaranya kepada:

1. Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng., Ph.D, selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan jajarannya.
2. Bapak Dr. Eng. Sutikno, ST., MT, selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan solusi, bimbingan dan motivasi.
3. Bapak Prof. Dr. Ing. Ir. I Made Londen Batan, M.Eng, Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng., Ph.D dan Bapak Suwarno, ST., M.Sc., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberi saran yang bermanfaat kepada penulis.
4. Bapak Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng. selaku Kaprodi Pascasarjana Jurusan Teknik Mesin, FTT-ITS, yang telah memberi arahan dan kemudahan kepada penulis dalam penyelesaian tesis.
5. Orang tua penulis, Ayahanda Amrin (alm) dan dan Ibunda Maryati. H yang telah memberikan curahan kasih sayang, dukungan, semangat, motivasi dan do'a kepada penulis.
6. Separuh jiwaku, Istriku tercinta Rosmida, kedua cahaya mataku Muhammad Auffa Zibrán dan Aurra Qalisha.
7. Saudara-saudaraku di Teknik Mesin, khususnya Bidang Rekayasa dan Sistem Manufaktur, Moh. Muzaki, Sufiyanto, Ali Sai'in, Anhar, Idiar, Thenny, Benedictus, Balkhaya, Husnul Abid, Jariyanti dan Hiding.

8. Teman-teman Teknik Mesin Bidang Rekayasa Konversi Energi, Alfi, Arifin, Indarto, Luthfi, Izhari, Erwiyen dan Romy atas kebersamaannya.
9. Teman-teman Teknik Material dan Metalurgi, Fahriadi, Saddam, Mustofa, Yuli dan Nia yang selalu memberikan semangat dan dukungan.
10. Teman-teman Metalurgi khususnya Lab Komposit, Esya, Gani, Syafaat, Wira dan Tasa.
11. Seluruh karyawan Jurusan Teknik Mesin yang banyak membantu dalam penyelesaian pengerjaan tesis ini.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah banyak memberi dorongan dan bantuan dalam menyelesaikan tesis ini baik secara langsung maupun tidak langsung.

Menyadari atas keterbatasan pengetahuan dan penelitian sehingga dimungkinkan ada kekeliruan dan kesalahan yang tidak sengaja. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan guna perbaikan dan pengembangan lebih lanjut. Semoga tesis dapat bermanfaat dan memenuhi apa yang diharapkan.

Surabaya, Januari 2017

Firman Alhaffis

DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Drive Shaft Konvensional	5
2.2 Drive Shaft Komposit	5
2.3 Fiber (Serat)	6
2.4 Matriks	7
2.5 Studi Hasil Penelitian Sebelumnya	8
BAB 3 METODELOGI PENELITIAN	21
3.1 Diagram Alir Penelitian	21
3.2 Objek Penelitian	22
3.3 Material Penelitian	22
3.4 Tahapan Penelitian	23
3.5 Properties simulasi Finite Element Analysis	31
3.6 Perhitungan Rancangan Drive Shaft Komposit	34
BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Pengaruh Torsi	39
4.2 Pengaruh Arah Serat Terhadap Gaya Tarik	42
4.3 Perbandingan Bending	43

4.4	Pengaruh Diameter	45
4.5	Natural Frequency terhadap Orientasi Serat	47
4.6	Pengaruh Konfigurasi Arah Serat dan Susunan Layer	48
4.7	Konfigurasi Serat dan Susunan Layer Terhadap Natural Frequency	51
4.8	Pengujian Konfirmasi.....	54
4.9	Perbandingan Drive Shaft Baja dan Komposit	59
BAB 5 KESIMPULAN		61
5.1	Kesimpulan.....	61
5.2	Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA		

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Sistem transmisi penggerak roda belakang	5
Gambar 2.2 Pengujian torsi pada <i>drive shaft</i> tentang nilai resin.....	8
Gambar 2.3 Susunan skematis dari kendaraan penggerak roda belakang.	9
Gambar 2.4 <i>Drive shaft</i> komposit serat kevlar dan serat karbon	10
Gambar 2.5 Perbandingan antara <i>drive shaft</i> baja SM45 dan kevlar/epoksi ..	11
Gambar 2.6 Zona <i>barrel</i> Grafik intensitas (K_{III}) tegangan <i>drive shaft</i>	11
Gambar 2.7 Pola <i>crack tip</i> material baja SM45 dan kevlar/epoksi	12
Gambar 2.8 Perubahan orientasi serat terhadap <i>natural frequency</i>	13
Gambar 2.9 Pengaruh urutan susunan <i>layer</i> dan orientasi serat	13
Gambar 2.10 Pengaruh orientasi serat terhadap <i>buckling torque</i>	14
Gambar 2.11 Fungsi keanggotaan sebagai variabel <i>output</i>	14
Gambar 2.12 Skema penyambungan dengan press.....	15
Gambar 2.13 Bagian-bagian <i>drive shaft</i>	15
Gambar 2.14 Hasil pengujian torsi statik dari <i>hybrid drive shaft</i>	16
Gambar 2.15 Hasil tes frekuensi putaran kritis (rpm).....	17
Gambar 2.16 Orientasi serat <i>drive shaft</i> komposit.....	18
Gambar 2.17 Orientasi serat yang digunakan pada FEA	19
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	21
Gambar 3.2 Model dan geometri <i>drive shaft</i> serat karbon/epoksi	22
Gambar 3.3 <i>Surface</i> pada pemodelan sebagai referensi awal.	24
Gambar 3.4 <i>Mashing</i> pada <i>drive shaft</i> dan jumlah elemen.....	24
Gambar 3.5 Contoh orientasi serat dan jumlah <i>layer</i>	25
Gambar 3.6 <i>Boundary conditions</i> pada <i>drive shaft</i> serat karbon/epoksi.....	26
Gambar 3.7 Skema proses simulasi FEA ACP <i>PrePost</i>	27
Gambar 3.8 Total deformasi pada <i>drive shaft</i> pada kondisi satu <i>layer</i>	27
Gambar 3.9 Lembaran komposit serat karbon <i>woven</i>	28
Gambar 3.10 Resin epoksi dan hardener sebagai matriks.....	28
Gambar 3.11 Pvc digunakan sebagai <i>core</i>	29
Gambar 3.12 <i>Polivinil Alkohol (PVA)</i>	29

Gambar 3.13 Lembaran <i>peel ply</i> lapisan akhir sebelum divacum	30
Gambar 3.14 Pompa vakum udara untuk komposit.....	30
Gambar 3.15 Ilustrasi mesin tes torsi <i>specimen drive shaft</i>	31
Gambar 4.1 <i>Drive shaft</i> ketika ditorsi 120,62 N.m	39
Gambar 4.2 Orientasi serat terhadap <i>total deformation</i>	41
Gambar 4.3 Orientasi serat terhadap <i>equivalent stress</i>	41
Gambar 4.4 Orientasi serat pada <i>layer</i> simulasi gaya tarik.	42
Gambar 4.5 Metode gaya tarik yang diberikan pada <i>layer</i>	42
Gambar 4.6 perbandingan tegangan <i>bending</i> yang terjadi pada <i>layer</i>	44
Gambar 4.7 Perbandingan defleksi yang terjadi diorientasi serat 0 ⁰ dan 45 ⁰ ..	45
Gambar 4.8 Pengaruh diameter terhadap orientasi serat	46
Gambar 4.9 Pengaruh perbedaan diameter terhadap orientasi serat.....	47
Gambar 4.10 <i>Natural Frequency</i> terhadap orientasi serat.....	48
Gambar 4.11 Konfigurasi <i>layer</i> terhadap <i>total deformation</i>	49
Gambar 4.12 <i>Equivalent stress drive shaft</i> komposit serat karbon/epoksi.....	50
Gambar 4.13 Orientasi dan susunan <i>layer</i> terhadap <i>equivalent stress</i>	51
Gambar 4.14 Konfigurasi susunan <i>layer</i> terhadap <i>natural frequency</i>	51
Gambar 4.15 Pola defleksi <i>drive shaft</i> pada frekuensi pertama	52
Gambar 4.16 Pola defleksi <i>drive shaft</i> difrekuensi yang lebih tinggi	53
Gambar 4.17 Konfigurasi serat dan susunan <i>layer</i> terhadap <i>critical speed</i>	54
Gambar 4.18 Perbandingan tegangan pada <i>drive shaft</i> dalam satu laminasi.....	54
Gambar 4.19 Alat uji tarik yang digunakan	55
Gambar 4.20 Pengujian tarik terhadap spesimen berbeda orientasi serat	55
Gambar 4.21 <i>Drive shaft</i> serat karbon/epoksi	56
Gambar 4.22 Kunci momen (<i>torque wrench</i>).....	56
Gambar 4.23 Sambungan kunci socket momen	57
Gambar 4.24 Metode pengujian torsi pada <i>drive shaft</i> serat karbon	57

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Perbandingan resin yang berbeda pada uji torsi <i>drive shaft</i>	9
Tabel 3.1 Spesifikasi kendaraan penggerak roda belakang.....	22
Tabel 3.2 Serat karbon TC35-12K <i>properties</i>	23
Tabel 3.3 Resin epoksi <i>properties</i>	23
Tabel 3.4 <i>Boundary conditions</i> pada <i>drive shaft</i> serat karbon/epoksi.....	26
Tabel 3.5 <i>Mechanical properties drive shaft</i> baja SM45C	27
Tabel 3.6 <i>Material properties carbon fiber TC35-12K/epoxy woven</i>	34
Tabel 4.1 Perbandingan orientasi serat.....	40
Tabel 4.2 Perbandingan orientasi serat terhadap gaya tarik pada <i>layer</i>	43
Tabel 4.3 Pengaruh orientasi serat terhadap gaya <i>bending</i>	44
Tabel 4.4 Hasil pengujian tarik	56
Tabel 4.5 Hasil Pengujian torsi <i>drive shaft</i>	58
Tabel 4.6 Perbandingan <i>drive shaft</i> baja dan komposit.....	58

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Komposit memiliki kekuatan dan kekakuan spesifik yang baik sehingga dibutuhkan pada industri maritim, dirgantara, militer, dan otomotif. *Persentase* yang cukup besar yaitu 50% komposit digunakan pada pesawat *Boeing 787* untuk mereduksi bobot pesawat, Tanasa (2013). Industri militer mengganti material baja ke material komposit sebagai alternatif untuk mereduksi bobot senjata dan perangkat tempur. Kombinasi baja yang dilapisi serat karbon pada laras senjata mampu mereduksi bobot hingga lebih ringan dari laras sebelumnya (baja). Kelebihan lainnya yaitu meningkatkan efisiensi pemakaian senjata karena akan lebih ringan dan lebih mudah digunakan, Xia dkk (2006). Dalam bidang otomotif komposit digunakan untuk mereduksi bobot kendaraan dan mengurangi penggunaan material baja. Semakin banyak bagian kendaraan yang dibuat dari komposit maka secara keseluruhan bobot kendaraan akan lebih ringan, kondisi ini berpengaruh positif terhadap efisiensi bahan bakar, Xu Fang-Jing dkk (1991).

Kendaraan roda empat memiliki tiga macam penggerak yaitu penggerak roda depan, penggerak roda belakang dan kombinasi penggerak depan dan belakang. Kendaraan penggerak roda belakang membutuhkan *drive shaft* (poros gardan) untuk menyalurkan torsi dari transmisi ke *differensial*. *Drive shaft* baja memiliki bobot yang berat dan mudah terkorosi. Upaya untuk mengatasi kelemahan *drive shaft* baja adalah menggantikan material *drive shaft* ke aluminium. Aluminium mampu meminimalisir bobot dan korosi, namun material aluminium tidak mampu menerima beban kejutan yang besar. Lee dkk (2004) melakukan penelitian tentang kemampuan torsi dari paduan *hybrid* yang dikombinasi serat karbon, serat kaca dan aluminium sebagai lapisan terluar. Kombinasi material tersebut memiliki kemampuan torsi 4320 N.m.

Teknologi pesawat ruang angkasa menggunakan material komposit serat karbon/epoksi dan serat kaca/epoksi sebagai sudu-sudu (*blade*) turbin. Komposit dipilih karena memiliki karakteristik meredam getaran, umur fatik yang tinggi

serta kemampuan pada putaran tinggi lebih baik dibandingkan komponen konvensional (baja), Rastogi (2004). Penggunaan struktur komposit untuk menggantikan struktur konvensional menghasilkan banyak keuntungan. Keuntungan diperoleh dari kombinasi *winding angle* (orientasi serat), jumlah *layer* (lapisan) serta *stacking sequence* (susunan *layer*). Konfigurasi ketiga faktor tersebut dapat mempengaruhi kekuatan *drive shaft*, nilai getaran dan bobot yang lebih ringan, Mutasher (2009). Massa dijadikan ukuran kelembaman benda (*inersia*) pada gerak translasi yaitu nilai respon benda terhadap perubahan gerak. Jika massa benda besar, maka benda sukar dipercepat atau sukar dirubah geraknya. Sebaliknya jika massa benda kecil, maka benda mudah dipercepat atau mudah diubah geraknya.

Penentuan parameter material komposit seperti orientasi serat, jumlah *layer* dan ketebalan *layer* menggunakan simulasi FEA (*finite element analysis*) diteliti oleh Cherniaev dan Komarov (2014). Hasil simulasi yang diperoleh digunakan sebagai rekomendasi untuk menghindari jumlah *layer* yang berlebihan atau *over design*. Simulasi FEA juga dilakukan oleh Abu Talib, dkk (2010) pada komposit yang terdiri dari satu *layer* serat karbon/epoksi dan tiga *layer* serat kaca/epoksi dengan variasi orientasi serat 0^0 , $\pm 45^0$ dan 90^0 . Penelitian tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi orientasi serat karbon yang tidak optimal mengakibatkan hasil yang kurang baik, yaitu kehilangan *natural frequency* (frekuensi pribadi) dan turunya *buckling strength* (kemampuan torsi). Orientasi serat dan jumlah *layer* perlu dioptimalkan, karena sangat mempengaruhi kekuatan dan kekakuan dari *drive shaft* komposit.

Rompicharla dan Rambabu (2012) menggunakan metode simulasi *finite element analysis* untuk membandingkan *drive shaft* baja (steel SM45) dan *drive shaft* komposit serat kevlar/epoksi. *Drive shaft* serat kevlar/epoksi memiliki kekuatan dan kekakuan seperti *drive shaft* konvensional. Simulasi *drive shaft* serat kevlar/epoksi mereduksi bobot hingga 28% dan tidak mudah terdeformasi jika dibandingkan *drive shaft* baja.

Variasi material komposit yang digunakan pada penelitian sebelumnya terdiri dari serat karbon, serat kaca, dan serat kevlar. Pada penelitian ini akan dianalisis kemampuan torsi pada *drive shaft* yang hanya menggunakan serat

karbon/epoksi. *Drive shaft* serat karbon/epoksi dirancang untuk mentransfer torsi sebesar 120,62 N.m sesuai spesifikasi *city car* kapasitas mesin 1329 cc. Geometri referensi SM45C sebagai referensi *drive shaft* adalah panjang 785 mm dan diameter 60 mm, Harshal Bankar (2013).

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan sebelumnya, akan diteliti bagaimana merancang *drive shaft* komposit serat karbon/epoksi dengan panjang 785 mm dan diameter 60 mm yang memiliki kemampuan torsi sebesar 120,62 N.m. Bagaimana menentukan orientasi serat, jumlah *layer* dan susunan *layer* untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan sekaligus mereduksi bobot *drive shaft* pada kendaraan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan orientasi serat dan jumlah *layer* yang dibutuhkan untuk mentransfer torsi sebesar 120,62 N.m serta mereduksi bobot *drive shaft*. Penelitian dilakukan dengan simulasi *finite element analysis* (FEA), hasil terbaik dari simulasi tersebut akan dibuatkan spesimen *drive shaft* material komposit serat karbon/epoksi. Pengujian berupa uji torsi terhadap spesimen *drive shaft* komposit.

1.4 Batasan Masalah dan Asumsi Penelitian

Agar penelitian ini dapat berjalan fokus, maka dibuat batasan dan asumsi penelitian sebagai berikut:

1. Tidak membahas kekuatan penyambungan antara silinder *drive shaft* serat karbon/epoksi dan baja.
2. Tidak membahas secara spesifik serat karbon dan epoksi.
3. Kekuatan dan kekakuan serat karbon/epoksi dianggap homogen ketika eksperimen.
4. Putaran pada *drive shaft* diasumsikan seimbang dan konstan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian *drive shaft* komposit serat karbon/epoksi ini diharapkan bermanfaat untuk:

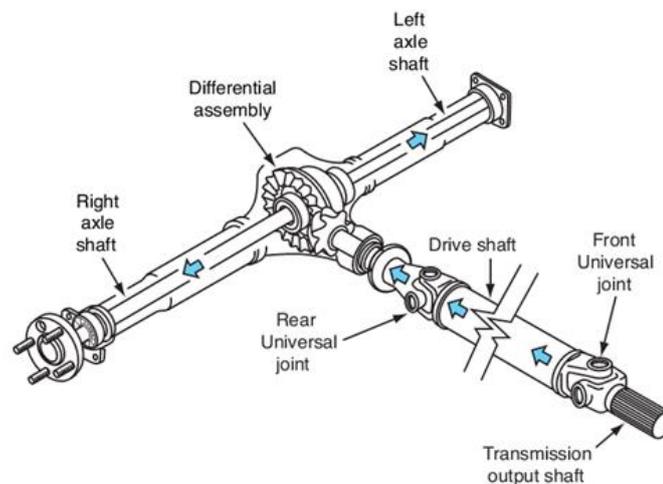
1. Meningkatkan pemanfaatan komposit sebagai pengganti material konvensional untuk mencapai hasil yang lebih efektif dan efisien.
2. Menjadi referensi untuk penelitian yang berorientasi *drive shaft* bermaterial komposit.
3. Memperluas lingkup keilmuan khususnya dalam bidang komposit serat karbon/epoksi.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Drive shaft* Konvensional

Drive shaft merupakan komponen yang berbentuk silinder berfungsi sebagai transmisi daya dari transmisi menuju diferensial. *Drive shaft* juga dikenal dengan nama lain seperti poros gardan dan ada juga yang menyebutnya *propeller shaft*. Pada kendaraan roda empat, roda belakang kendaraan sering mengalami dinamika yang diakibatkan oleh kondisi jalan yang tidak selalu datar. Hal ini memberikan tegangan dan regangan pada sistem suspensi dari kendaraan dan juga berpengaruh pada kinerja dari *drive shaft*. Kondisi ini memberikan efek terhadap *drive shaft* yaitu perubahan jarak antara transmisi dan diferensial. Teknologi terakhir yang digunakan adalah sambungan dua buah *drive shaft* yang dihubungkan dengan *universal joint*, Hilier (2004). Gambar 2.1 menunjukkan Sistem transmisi pada kendaraan roda empat penggerak roda belakang.



Gambar 2.1 Sistem transmisi penggerak roda belakang.
Hilier (2004)

2.2 *Drive shaft* Komposit

Teknologi *drive shaft* pada awalnya menggunakan silinder pejal untuk mentransfer torsi ke diferensial. Namun dianggap masih memiliki bobot yang terlalu besar, dari masalah tersebut desain *drive shaft* dirubah ke baja silinder *hollow*. Pengembangan terus dilakukan dengan mengganti ke material aluminium

untuk meminimalisir dari bobot *drive shaft*, tetapi aluminium memiliki kelemahan yaitu tidak mampu terhadap beban dampak yang terlalu besar.

Teknologi terkini, penggunaan material konvensional (baja) mulai dikurangi dan diganti ke penggunaan material komposit. Pada kendaraan roda empat, sudah banyak mengadopsi komposit sebagai komponen kendaraan seperti bumper, velg dan aksesoris lainnya. Untuk beban kerja yang lebih besar juga sudah menggunakan material komposit seperti pada rangka (*chassis*) dan *drive shaft*. Keistimewaan komposit yaitu mampu mereduksi bobot *drive shaft*, selain itu memiliki sifat mekanik yang sangat baik. Dikarenakan kesistimewaan tersebut, komposit sudah digunakan sebagai *blade* pada rotor helikopter, sayap pesawat terbang dan sebagai struktur jembatan dibidang teknik sipil. Beberapa keuntungan dari *drive shaft* menggunakan material komposit adalah, Bhajantri dkk (2014):

- a. Komposit memiliki kekuatan dan modulus spesifik yang tinggi.
- b. Dengan komposit bobot *drive shaft* dapat direduksi.
- c. Jika berat dapat direduksi, maka konsumsi bahan bakar akan menurun.
- d. Memiliki sifat meredam getaran oleh karena itu mampu meminimalkan getaran.
- e. Kemampuan sangat baik terhadap korosi.
- f. Kapasitas torsi lebih baik jika dibandingkan *drive shaft* dari aluminium dan baja.
- g. Umur fatik lebih panjang dari pada *drive shaft* aluminium dan baja.

2.3 Serat (*fiber*)

Serat adalah konstituen utama dalam komposit, serat merupakan sebagai penguat (*reinforcement*) pada suatu laminasi. Sebagian besar penguat dari laminasi komposit merupakan serat. Melakukan seleksi terhadap jenis serat yang tepat, jumlah *layer* dan orientasi serat sangatlah penting. Hal ini sangat berpengaruh terhadap karakteristik laminasi komposit selanjutnya. Beberapa hal kemampuan serat yang harus diperhatikan, Chawla, K. K. (2012):

- a. Berat jenis.
- b. Kekuatan tarik dan modulus.
- c. Kekuatan tekan dan modulus.

- d. Kemampuan fatik dan kegagalan akibat fatik.
- e. Penghantar listrik dan konduktivitas termal.
- f. Biaya.

Berbagai serat yang umum digunakan untuk membentuk struktur ikatan komposit, Chawla, K. K. (2012):

- a. Serat kaca.
- b. Serat karbon.
- c. Serat aramid.
- d. Serat boron.
- e. Serat silicon carbida.

2.4 Matriks

Material komposit tersusun atas dua tipe material penyusun yakni matriks dan serat (*reinforcement*). Keduanya memiliki fungsi yang berbeda, serat berfungsi sebagai material rangka yang menyusun komposit, sedangkan matriks berfungsi untuk merekatkan serat dan menjaganya agar tidak berubah posisi. Campuran keduanya akan menghasilkan material yang keras, kuat, namun ringan. Matriks berupa lapisan tipis yang menahan serat secara permanen dalam orientasi serat yang diinginkan dan berfungsi mendistribusikan beban ke semua bidang serat. Matriks juga memainkan peran yang kuat dalam menentukan stabilitas tegangan ke seluruh struktur komposit serta faktor mekanis seperti ketangguhan dan kekuatan geser. Matriks juga melindungi serat dari kerusakan mekanis (abrasi) dan dari pengaruh faktor lingkungan, Chawla, K. K. (2012).

Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau kelompok volume terbesar (dominan). Matriks mempunyai fungsi sebagai berikut:

- a. Mentransfer tegangan ke serat secara merata.
- b. Melindungi serat dari gesekan mekanik.
- c. Memegang dan menahan serat pada orientasinya.
- d. Melindungi dari faktor lingkungan yang merugikan.
- e. Tetap stabil setelah proses manufaktur.

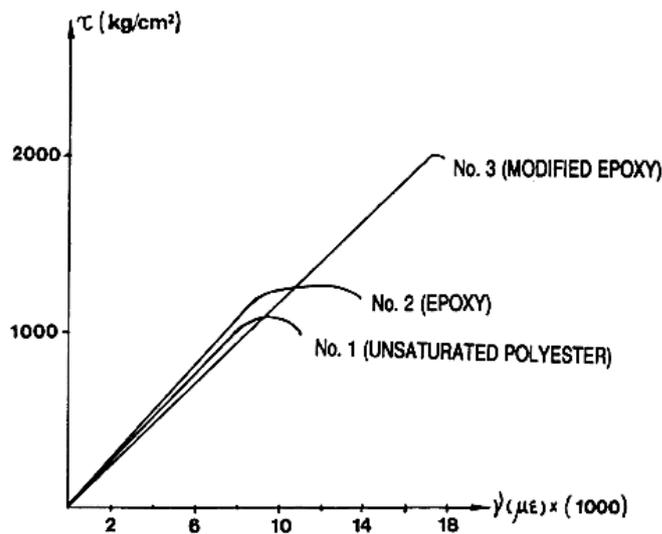
Pada penelitian sebelumnya mendefinisikan beberapa keunggulan dan sifat dari matriks, Tanasa, F. & Zanoaga, M. (2013):

- a. Memiliki sifat mekanis yang baik.
- b. memiliki kekuatan ikatan yang baik.
- c. Ketangguhan yang baik.
- d. Tahan terhadap temperatur.

2.5 Studi Hasil Penelitian Sebelumnya

Syarat umum untuk desain *drive shaft* pada industri otomotif yaitu berupa batasan terhadap getaran, kekakuan, kemampuan torsi dan *buckling strength* pada *drive shaft* komposit merupakan faktor penting dari perancangan, Xu Fang-Jing dkk (1991). Pada penelitiannya, melakukan eksperimen terhadap silinder komposit dengan pengujian tekan dan diuji torsi aksial maka diperoleh orientasi serat untuk memenuhi beban kerja *drive shaft* yang digunakan pada kendaraan roda empat Shanghai tipe SH760.

Berdasarkan data eksperimen *drive shaft* yang dilakukan pada penelitian, *drive shaft* komposit dinyatakan mampu menggantikan *drive shaft* konvensional (baja). *Drive shaft* komposit harus memiliki desain yang proporsional terhadap kemampuan *buckling torque*, *natural frequency*, kemampuan fatik terhadap torsi dan diketahui kekuatan maksimal dari *drive shaft*.



Gambar 2.2 Pengujian torsi pada *drive shaft* tentang nilai resin, Xu Fang Jing dkk (1991).

Dari grafik perbandingan hasil pengujian pada Gambar 2.2, yaitu perbandingan antara resin *unsaturated polyester*, resin *epoxy* dan resin *modified*

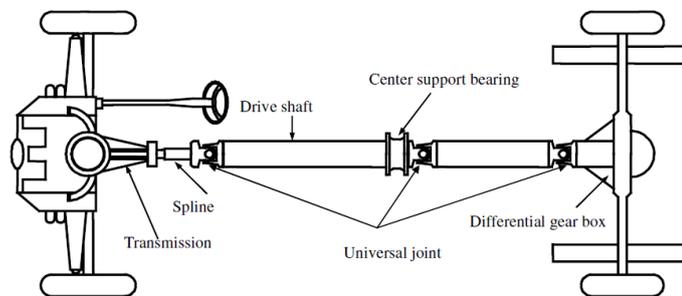
epoxy. Resin terbaik yaitu memiliki kapasitas geser (*shear strength*) terhadap tegangan. Hasil pengujian merekomendasikan bahwa resin *modified epoxy* memiliki sifat mekanik dan biaya yang lebih menguntungkan. Pada Tabel 2.1 menjelaskan hasil pengujian dari tiga jenis resin tersebut.

Tabel 2.1 Perbandingan dari tiga resin yang berbeda pada uji torsi *drive shaft*.

No	Winding Angle/Layer	Resin	Thickness	Shear Strength
1	±45/6	Unsaturated polyester	0,086 cm	1296 kg/cm ²
2	±45/6	Epoxy	0,086 cm	1630 kg/cm ²
3	±45/6	Modified epoxy	0,086 cm	2100 kg/cm ²

Sumber: Xu Fang Jing dkk (1991).

Kemampuan dari *drive shaft* dapat ditingkatkan dengan menggunakan material serat karbon yang diikat dengan resin *modified epoxy*. Dalam industri otomotif, biaya merupakan indikator utama dalam produksi. Jadi untuk meningkat kemampuan dan meminimalkan biaya produksi maka dapat dilakukan penambahan jumlah *layer* dengan serat kaca, Xu Fang Jing dkk (1991).



Gambar 2.3 Susunan skematis dari kendaraan penggerak roda belakang. D. G. Lee dkk (2004)

Pada Gambar 2.3 merupakan susunan skematis dari kendaraan roda empat dengan penggerak roda belakang. Diteliti oleh Romphicharla dan Rambabu (2012), dengan menganalisis *drive shaft* komposit untuk metransmisi daya dari transmisi ke diferensial. Aplikasi material komposit memberikan banyak keuntungan dari segi kekuatan dan kekakuan spesifik yang lebih tinggi jika dibandingkan dari baja. Penelitian yang telah dilakukan menggunakan metode simulasi *Finite Element Analysis* (FEA). Gambar 2.3 menjelaskan skematis

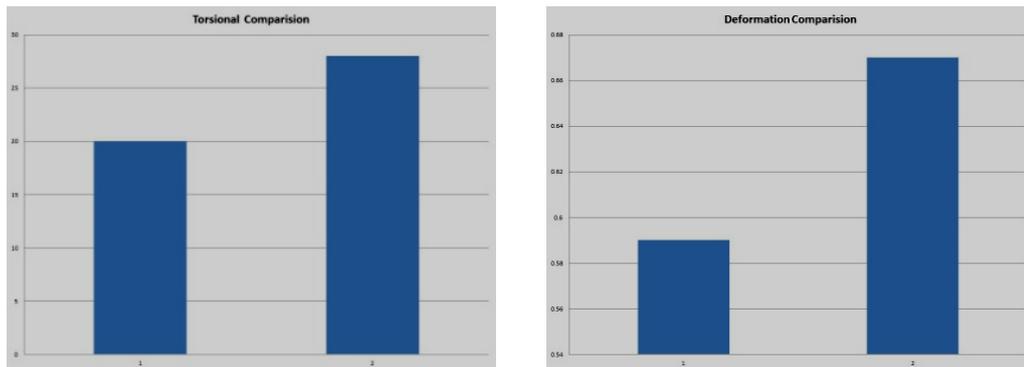
transfer torsi dari mesin hingga diferensial pada kendaraan penggerak roda belakang.

Dimensi *drive shaft* dengan panjang 1500 mm diameter luar 72 mm diambil dari *Toyota Qualis* yang kemudian dijadikan sebagai pembanding untuk menentukan sifat material dan stabilitas *drive shaft*. Membandingkan antara *drive shaft* dari baja kualitas tinggi (*steel SM45*) dan *drive shaft* komposit dari serat kevlar matriks epoksi. Respon penelitian berdasarkan kemampuan *drive shaft* terhadap torsi dari transmisi 151 N.m. *Drive shaft* merupakan sistem transmisi daya dirancang secara optimal untuk memenuhi beban kerja yang diberikan. Dalam penelitiannya, menggunakan material komposit serat kevlar/epoksi dengan mengoptimalkan parameter desain tujuan untuk meminimalkan berat *drive shaft* komposit, Romphicharla dan Rambabu (2012).



Gambar 2.4 *Drive shaft* komposit serat kevlar dan serat karbon.

Asumsi yang diberikan *drive shaft* berputar pada kecepatan konstan sekitar sumbu longitudinal, poros memiliki struktur yang seragam, berputar pada sumbu, memiliki keseimbangan yang sempurna, semua getaran teredam dan pengecualian terhadap efek non linier karena hubungan tegangan regangan untuk bahan komposit adalah linear dan elastis. Maka dari itu hukum *Hooke* berlaku untuk bahan komposit. Selama lamina masih dalam skala tipis dan tidak ada kerusakan permukaan atau perubahan bentuk dari bentuk awal pada saat pembebanan, maka itu dianggap masih di bawah tegangan bidang.

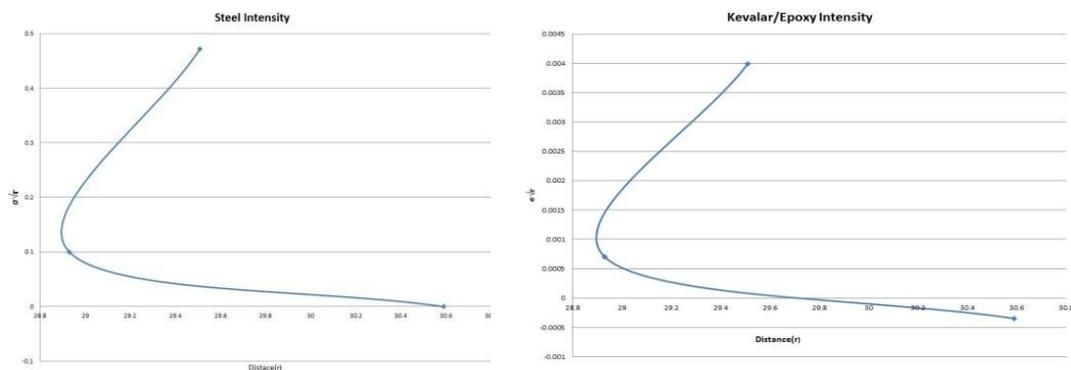


a. Perbandingan tegangan torsi

b. Perbandingan deformasi

Gambar 2.5 Perbandingan antara *drive shaft* baja SM45 dan kevlar/epoksi [9]. Romphicharla dan Rambabu (2012)

Hasil gambar 2.5 menunjukkan perbandingan nilai tegangan yang dialami akibat torsi pada *drive shaft* komposit serat kevlar/epoksi lebih kecil jika dibandingkan dengan *drive shaft* dari baja (*steel SM45*). Perbandingan nilai total deformasi yang terjadi juga lebih kecil pada *drive shaft* serat kevlar/epoksi dari pada nilai total deformation pada baja. Nilai positif lain yang didapat dari serat kevlar/epoksi ini mampu mereduksi hingga 28% bobot jika dibandingkan dengan poros baja konvensional, Romphicharla dan Rambabu (2012). Jadi dapat disimpulkan bahwa jika suatu desain mempertimbangkan untuk mereduksi bobot *drive shaft*, deformasi dan nilai tegangan geser ini jelas memberikan hasil yang sangat baik karena dinyatakan bahwa komposit kevlar/epoksi memiliki sifat yang dibutuhkan untuk mengganti *Drive shaft* baja.

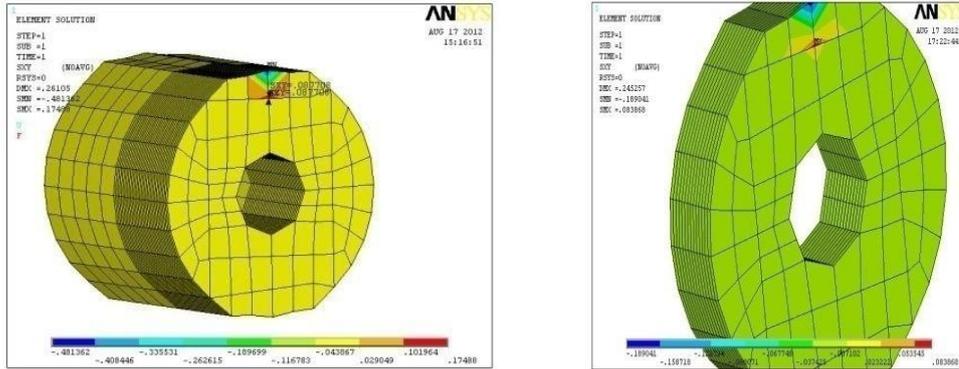


a. *Drive shaft* SM45 0,13 MPa

b. *Drive shaft* kevlar/epoksi 0,12 MPa

Gambar 2.6 Grafik intensitas (K_{III}) tegangan *drive shaft*. Romphicharla dan Rambabu (2012)

Romphicharla juga menyatakan apabila suatu perangkat mesin yang menggunakan *Drive shaft* dan bertujuan untuk menghemat bahan bakar, maka akan dapat diwujudkan jika *Drive shaft* komposit dari material kevlar/epoksi. Pada gambar 2.7 menjelaskan bahwa nilai intensitas tegangan (K_{III}) yang diamati terjadinya *crack tip* (retak ujung) untuk *drive shaft* komposit masih dalam skala rendah.

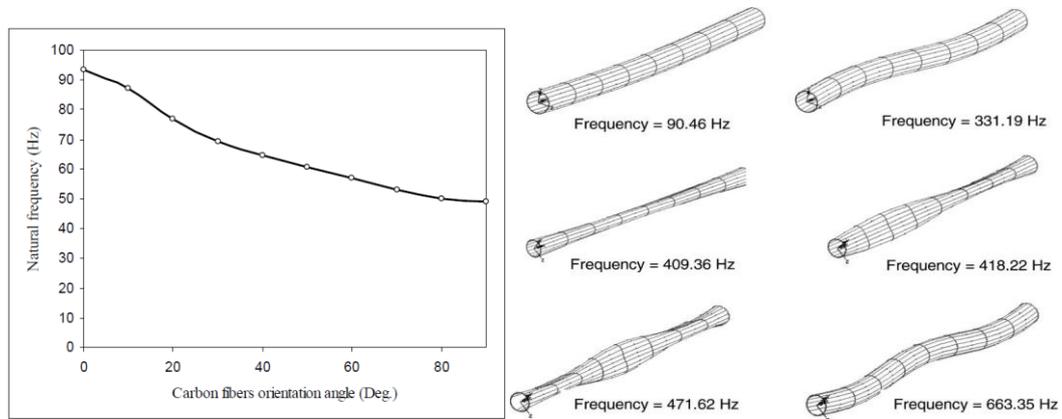


Gambar 2.7 Pola *crack tip* material baja SM45 dan kevlar/epoksi. Romphicharla dan Rambabu (2012)

Abu Talib (2010), juga melakukan penelitian dengan metode komputasi FEA. Material yang digunakan untuk merancang *drive shaft* komposit yaitu dengan memadukan serat kaca dan serat karbon dalam matriks epoksi. Jumlah *layer* yaitu satu *layer* serat karbon dan tiga *layer* serat kaca dalam matriks epoksi. Konfigurasi optimal adalah variasi orientasi serat (sudut kemiringan serat) $\pm 45^0$, 0^0 dan 90^0 . *Layer* pertama yaitu dengan orientasi serat ($+45^0$) serat kaca/epoksi, *layer* kedua orientasi serat (-45^0) serat kaca/epoksi, *layer* ketiga orientasi serat (0^0) karbon/epoksi dan *layer* terakhir dengan serat kaca dengan orientasi serat (90^0).

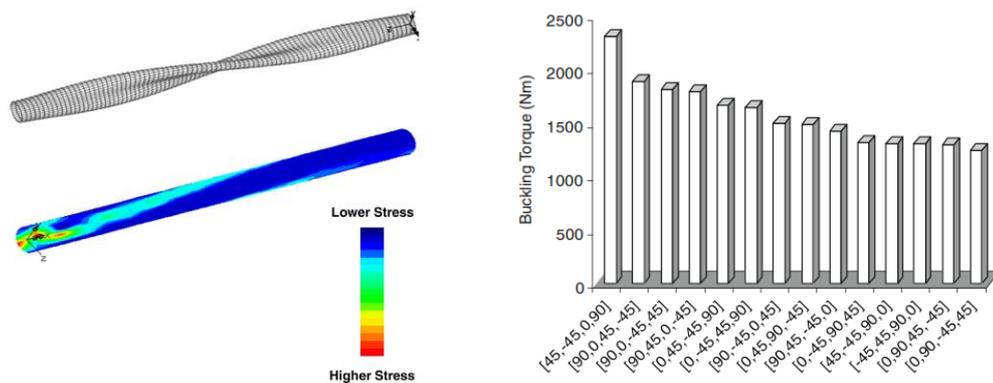
Pada Gambar 2.8 menerangkan bahwa *layer* serat karbon harus berorientasi pada orientasi 0^0 untuk meningkatkan *natural frequency* serta meningkatkan modulus elastisitas *drive shaft* komposit. Ketika mengganti orientasi serat karbon dari 0^0 ke 90^0 , maka *drive shaft* akan kehilangan *natural frequency*. Akan terjadi penurunan pada *natural frequency* sebesar 44,5%. Selain itu, terjadi penurunan kemampuan *buckling strength* sebesar 46,07%. dari persentase tersebut dapat disimpulkan bahwa perlu dioptimalkan dari setiap tahapan perancangan yang dilakukan seperti orientasi *winding angle*, jumlah *layer* serta urutan susunan *layer*,

karena akan sangat mempengaruhi kemampuan dari *drive shaft* komposit, Badie, M. A dkk (2006).



Gambar 2.8 Pengaruh perubahan orientasi serat karbon terhadap *natural frequency* pada susunan *layer* [+45⁰_{kaca}/-45⁰_{kaca}/0⁰_{karbon}/90⁰_{kaca}]. Badie, M. A dkk (2006)

Pada Gambar 2.9 bagian (a) menjelaskan *buckling strength* terjadi searah dengan tegangan geser sesuai dengan arah torsi yang diberikan. Gambar bagian (b) menjelaskan pengaruh urutan susunan *layer* dan orientasi serat yang diterapkan mempengaruhi *buckling torque*, dari Gambar (b) terlihat bahwa konfigurasi paling optimal yaitu pada [45, -45, 0, 90].

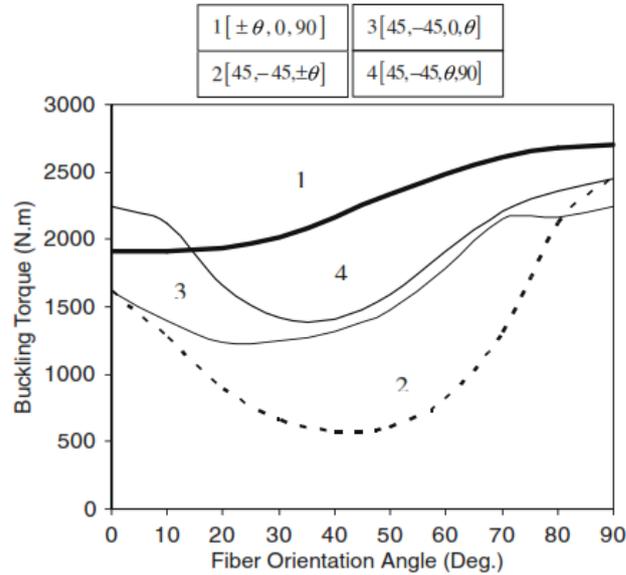


a. *Buckling strength* searah tegangan b. Urutan *layer* terhadap *buckling torque*

Gambar 2.9 Pengaruh susunan *layer* dan orientasi serat terhadap buckling torque. Abu talib dkk (2010)

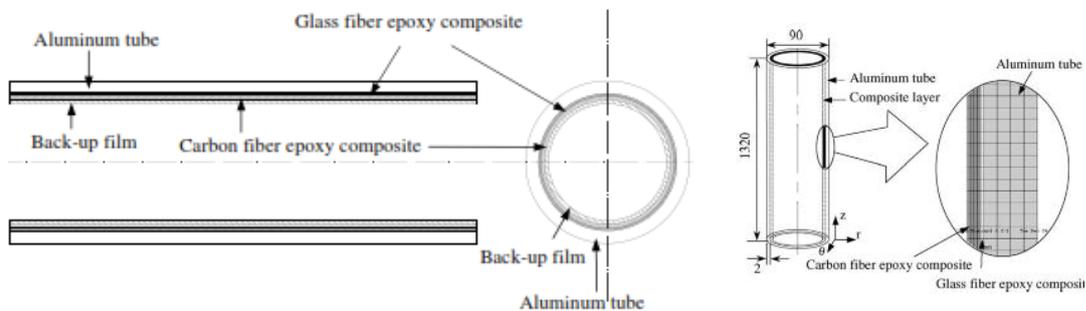
Pada Gambar 2.10 dibawah, menjelaskan pengaruh jika orientasi serat bernilai θ (diganti dari nilai 0⁰ sampai 90⁰) maka akan berpengaruh terhadap

kemampuan *buckling torque* dari *drive shaft* komposit serat kaca dan serat karbon/epoksi dengan catatan *layer* yang lainnya berada pada sudut optimal.



Gambar 2.10 Pengaruh orientasi serat terhadap *buckling torque*.
Abu talib dkk (2010)

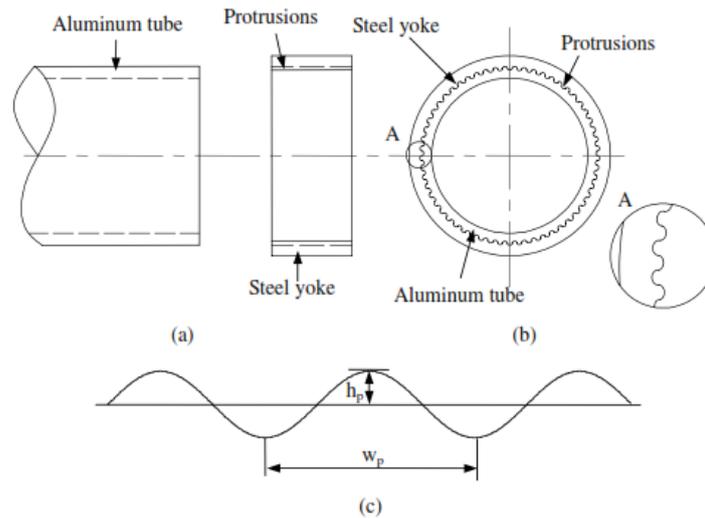
Penelitian yang dilakukan Lee D. G. dkk (2004), untuk mewujudkan material *hybrid* dengan memadukan tiga elemen material serat kaca, serat karbon dan aluminium. Aluminium berada pada lapisan paling luar dari *drive shaft* karena untuk mencegah lapisan komposit agar tidak rusak oleh dampak eksternal dan penyerapan kelembaban. Urutan susunan *layer* paling optimal untuk komposit ditentukan karena tegangan sisa termal antara silinder aluminium dan lapisan *layer* komposit.



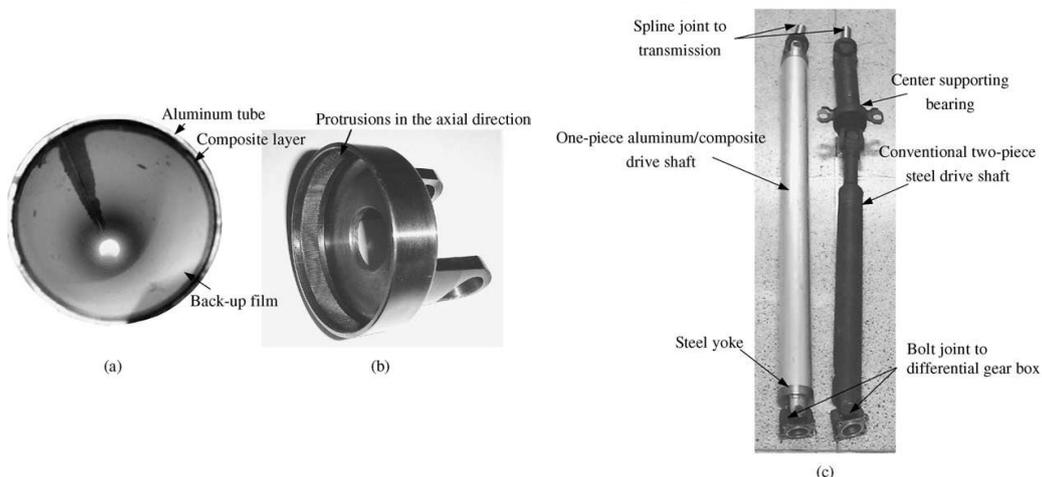
Gambar 2.11 Konsep material *hybrid* aluminium/komposit.
Lee D. G. dkk (2004)

Metode penyambungan antara silinder *hybrid* dan *flange* dilakukan dengan mesin press, karena bertujuan untuk meningkatkan kemampuan dan mengurangi biaya

produksi. Dari hasil percobaan, ditemukan bahwa memadukan satu unit *drive shaft hybrid* aluminium/komposit mampu mereduksi bobot hingga 75% dari desain sebelumnya. Terjadi peningkatan kemampuan torsi 160% dibandingkan *drive shaft* konvensional yang menggunakan dua silinder. Pada Gambar 2.12 menjelaskan skema penyambungan pada *drive shaft hybrid* dengan menggunakan mesin press, Lee D. G. dkk (2004).



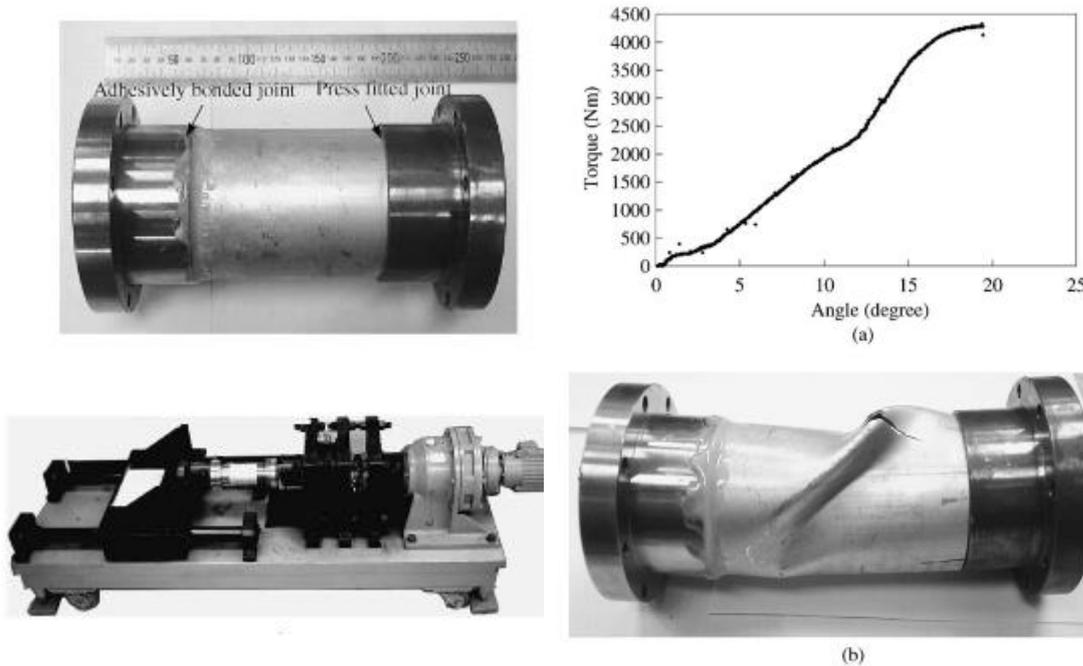
Gambar 2.12 Skema penyambungan dengan press: (a) sebelum disambung; (b) setelah disambung; (c) pola ikatan sambungan. Lee D. G. dkk (2004)



Gambar 2.13 Bagian-bagian *drive shaft*: (a) lapisan dalam silinder; (b) *flange joint* untuk *drive shaft*; (c) *hybrid drive shaft* dan *drive shaft* baja konvensional. Lee D. G. dkk (2004)

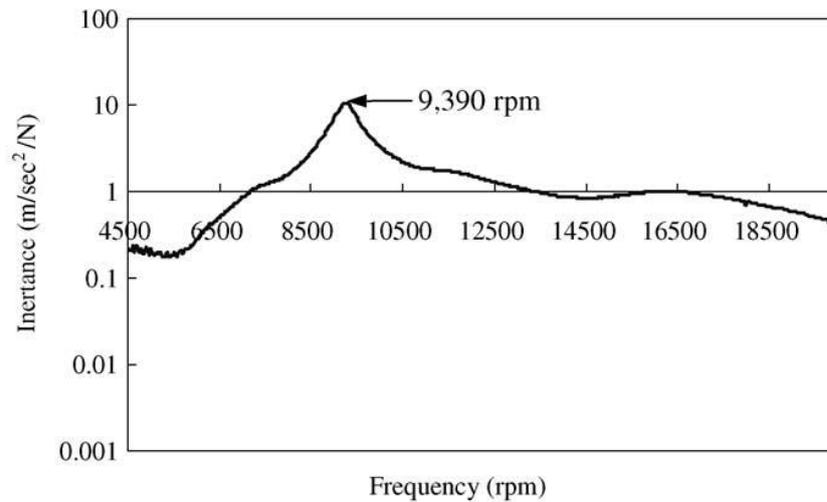
Hasil kombinasi dari tiga material *hybrid* tersebut menghasilkan *drive shaft* komposit yang memiliki bobot yang lebih ringan dan mengurangi getaran, D.G. Lee (2004). Namun, dari segi biaya material serat karbon/epoksi tidaklah

ekonomis. Untuk mengimbangi masalah tersebut digunakan silinder aluminium yang harganya masih tergolong murah. Dalam operasi *drive shaft*, silinder aluminium memiliki peran untuk mentransfer torsi dari transmisi, sedangkan serat karbon/epoksi berperan dalam meningkatkan *natural frequency*.



Gambar 2.14 Hasil pengujian torsi statik dari *hybrid drive shaft*: (a) diagram sudut orientasi terhadap torsi; (b) *buckling* setelah pengujian torsi statik. Lee D. G. dkk (2004)

Lee menyatakan *drive shaft hybrid* butuh pengembangan mengenai penyambungan antara silinder dan *flange joint* karena masih terjadi slip ketika diuji torsi. Berat *drive shaft hybrid* aluminium/komposit setelah diproduksi adalah 3,3 kg, bobot ini hanya 25% dari *drive shaft* konvensional (baja). Kemampuan torsi statik maksimum 4320 Nm pada Gambar 2.14 (a), (b) menerangkan setiap besaran torsi yang diberikan akan membentuk pola puntiran pada silinder aluminium dan ini diukur sebesar 19° pada torsi maksimum.



Gambar 2.15 Hasil tes frekuensi putaran kritis (rpm)
Lee D. G. dkk (2004)

Nilai frekuensi putaran kritis terjadi pada putaran 9390 rpm, dimana pada rpm ini drive shaft bergetar sangat hebat dan akan mulai teredam kembali jika sudah melewati nilai frekuensi putaran kritis seperti pada Gambar 2.15. Hal ini dinyatakan sudah melebihi persyaratan desain.

Hasil dari Bhajantri, V. S. dkk (2014) meneliti dengan konsep yang sama dengan penelitian Lee D. G. dkk (2004), yaitu berkaitan dengan mengganti dua unit *drive shaft* baja metode konvensional ke satu unit *drive shaft* komposit. Yang membedakan adalah *properties* material, Bhajantri menggunakan material komposit kombinasi antara serat kaca/epoksi dan karbon/epoksi dengan kualitas tinggi (*high strength dan high modulus*) untuk diaplikasikan pada kendaraan roda empat. Target penelitian masih dalam orientasi yang sama yaitu meminimalkan bobot *drive shaft*, meningkatkan akselerasi dan mampu mengganti *drive shaft* konvensional.

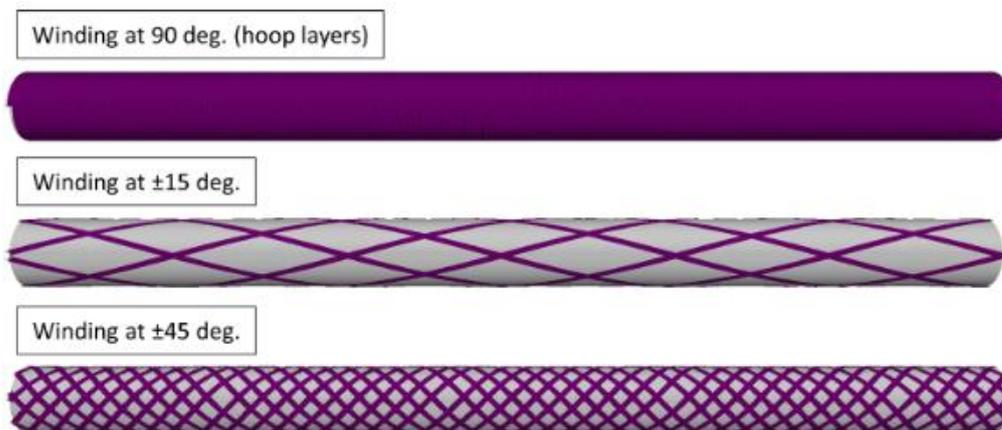
Analisa dari penelitian menghasilkan kombinasi dari material yang digunakan, mampu menggantikan *drive shaft* dari baja. Silinder dari komposit bermaterial serat kaca/epoksi dan serat karbon/epoksi dengan kualitas tinggi memiliki bobot 50% lebih ringan dibandingkan *drive shaft* dari baja. Sudut orientasi serat (*winding angle*) sangat mempengaruhi dari kekuatan dan kekakuan dari *drive shaft* komposit. *Drive shaft* komposit memiliki urutan susunan *layer* yang optimal. Hasil menunjukkan bahwa orientasi serat memiliki pengaruh besar

pada karakteristik statik *drive shaft* komposit dan menawarkan keuntungan seperti, Bhajantri, V. S (2014):

- a. Memurunkan bobot *drive shaft*.
- b. Meningkatkan kekuatan dan kekakuan yang lebih tinggi.
- c. Mekanisme kegagalan dapat dideteksi lebih awal. dengan FEA.
- d. Konsumsi daya *drive shaft* yang rendah (inersia lebih kecil)

Kompleksitas masalah desain *drive shaft* terkait dengan kebutuhan untuk menentukan nilai-nilai rasional (porsi) untuk beberapa parameter karakteristik material komposit seperti sudut winding angle, urutan susunan *layer* dan ketebalan *layer*. A. Cherniaev dan V. Komarov (2014) melakukan pendekatan masalah sebagai pertimbangan untuk mendesain *drive shaft* serat *filament* karbon/epoksi dengan beberapa langkah optimasi, seperti:

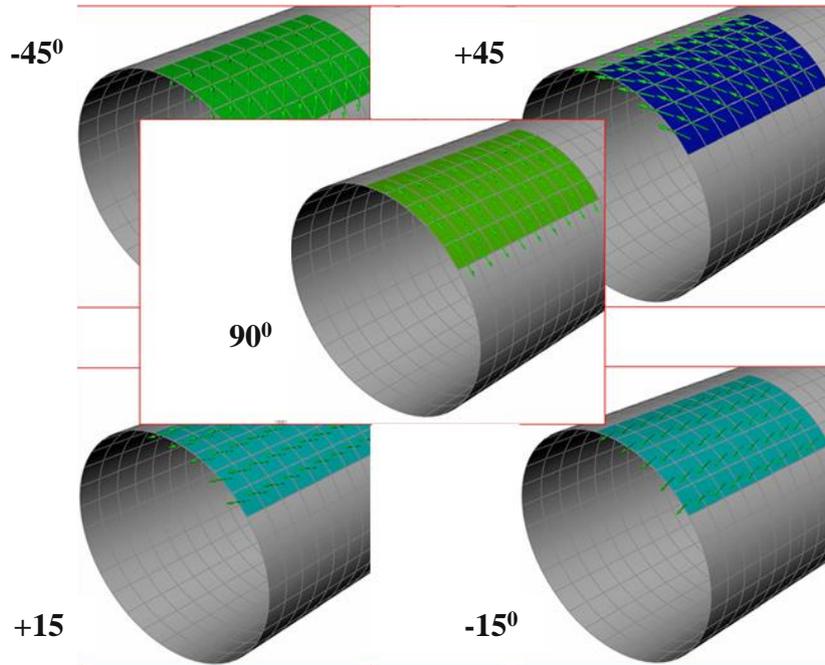
- a. Penentuan sudut orientasi serat dan urutan susunan *layer* disusun berdasarkan analisa kondisi pembebanan dan reaksi beban tekuk (*buckling load*) dan *natural frequency* minimal ideal pada *drive shaft*.



Gambar 2.16 Orientasi serat *drive shaft* komposit.
Cherniaev dan V. Komarov (2014)

- b. Menemukan ketebalan *layer* rasional menggunakan prosedur optimasi.
- c. Analisis verifikasi konfigurasi dioptimalkan dengan penggunaan nonlinier analisis tekuk untuk menjamin batas keamanan stabilitas.

Pada Gambar 2.16 menjelaskan orientasi serat yang diterapkan pada penelitan menggunakan 5 layer dengan prientasi sudut 90° , $+15^{\circ}$, -15° , $+45^{\circ}$, dan -45° . Gambar 2.17 penerapan orientasi serat pada silinder drive shaft dengan menggunakan simulasi FEA.



Gambar 2.17 Orientasi serat yang digunakan pada FEA.
Cherniaev dan V. Komarov (2014)

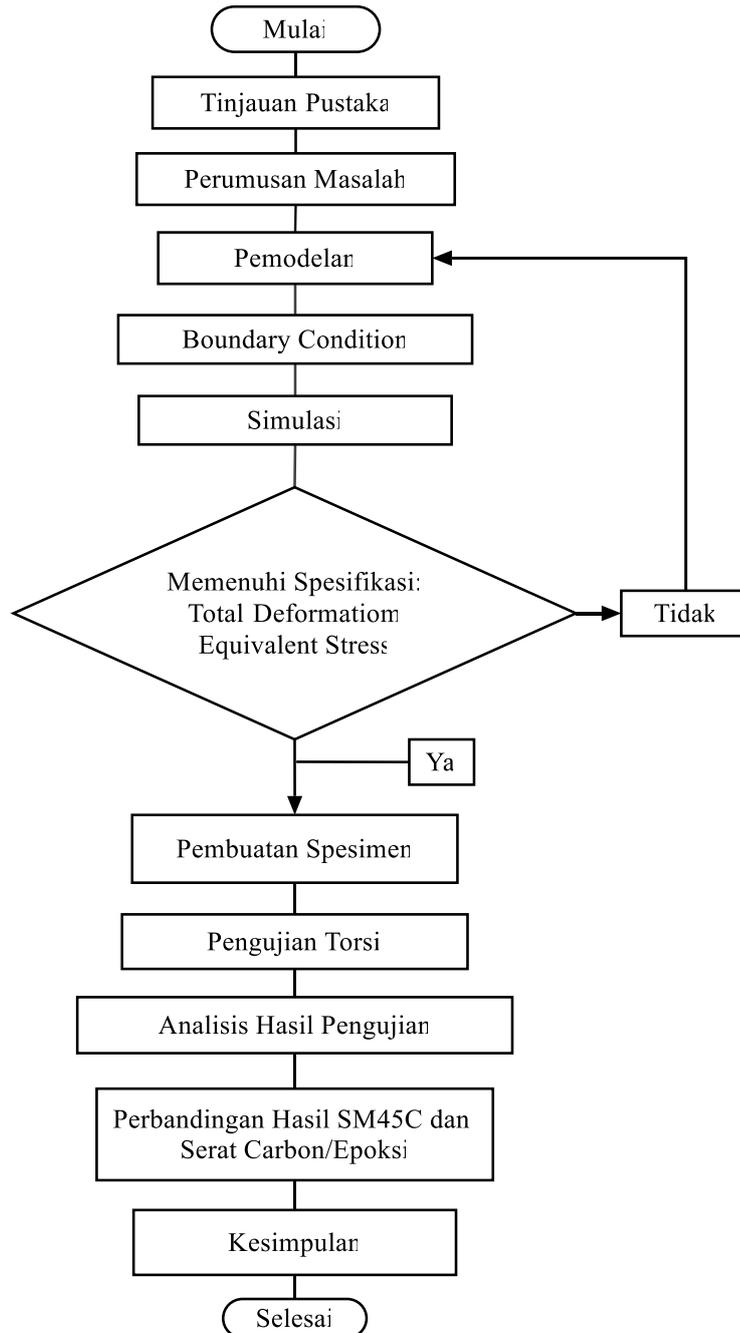
Optimasi dilakukan untuk menemukan desain optimal dengan beban kerja. Semua syarat desain sudah terpenuhi dan bobot *drive shaft* direduksi sebesar 10% lebih ringan dibandingkan dengan desain referensi. Urutan susunan *layer* terbukti meningkatkan kemampuan *buckling load* kritis dari *drive shaft*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3 METODELOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Agar penelitian mencapai tujuan dari penelitian maka perlu disusun diagram alir. Berikut diagram alir penelitian *drive shaft* serat karbon/epoksi:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

3.2 Objek Penelitian

Penelitian dilakukan pada *city car* penggerak roda belakang (*rear wheel drive*). Kendaraan menggunakan *drive shaft* baja pada desain sebelumnya. Spesifikasi kendaraan tertera dalam tabel 3.1:

Tabel 3.1 Spesifikasi kendaraan penggerak roda belakang.

SPESIFIKASI KENDARAAN	
Tipe Mesin	4 Cylinder,16 valve
Isi Silinder (cc)	1.329
Daya maksimum (HP/rpm)	96,5/6.000
Torsi maksimum (N.m/rpm)	120,62/4200
Panjang drive shaft (mm)	785
Diameter luar drive shaft (mm)	60



Gambar 3.2 Model dan geometri *drive shaft* serat karbon/epoksi.

3.3 Material Penelitian

Material komposit yang digunakan adalah serat karbon TC35-12K *woven* dan resin epoksi sebagai matriks. Berikut pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3 *mechanical properties* dari masing-masing material induk yang akan padukan dalam satu laminasi sebagai berikut:

Tabel 3.2 Serat karbon TC35-12K *properties*.

<i>Mechanical properties</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>Modulus young serat karbon (E_f)</i>	240	GPa
<i>Shear modulus (G_f)</i>	96,77	GPa
<i>Poisson ratio (ν_f)</i>	0,240	-
<i>Density (ρ)</i>	1,79	g/cm ³

Sumber: *Technical Fabrics Handbook*, 2010

Tabel 3.3 Epoksi *resin properties*.

<i>Mechanical properties</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>Modulus young matriks epoksi (E_m)</i>	3,78	GPa
<i>Shear modulus (G_m)</i>	1,4	GPa
<i>Poisson ratio (ν_m)</i>	0,35	-
<i>Density (ρ)</i>	1,16	g/cm ³

Sumber: *Technical Fabrics Handbook*, 2010

3.4 Tahapan Penelitian

a. Tinjauan Pustaka

Penelitian dimulai dari tinjauan pustaka dari beberapa sumber buku dan jurnal dari penelitian-penelitian sebelumnya. Referensi jurnal sebagai referensi penelitian yang berkaitan *drive shaft* komposit, jumlah *layer*, sudut orientasi dan susunan *layer*.

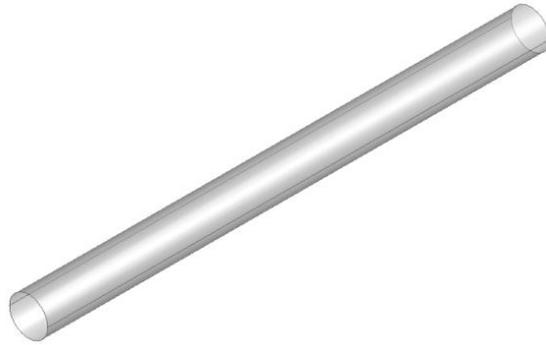
b. Rumusan Masalah

Rumusan masalah ditentukan untuk mengetahui langkah dan tahapan yang harus dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian. Rumusan masalah ini diperoleh dari tinjauan pustaka dan pengamatan langsung *drive shaft* baja.

c. Pemodelan

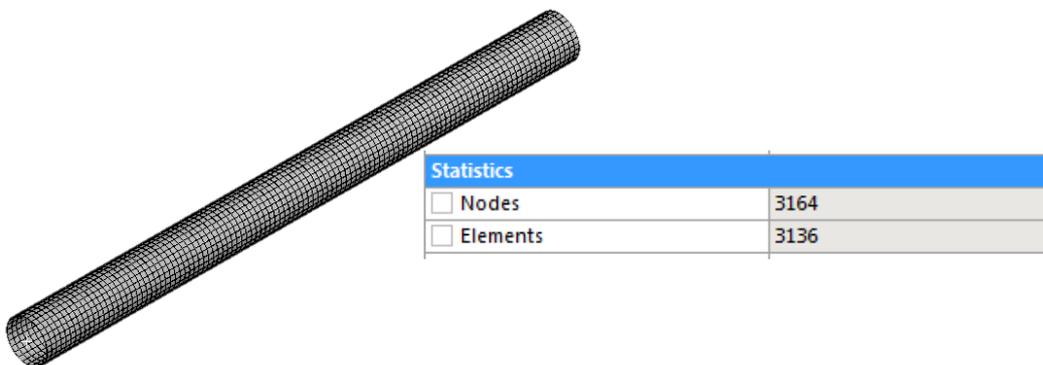
Pemodelan adalah proses pembentukan objek menggunakan sistem komputasi, sehingga hasil model (*part*) terlihat nyata sesuai objek aslinya. Proses pemodelan secara keseluruhan meliputi pembentukan *part*, proses perakitan (*assembly part*) dan model proyeksi dua dimensi (*2D engineering drawing*). *Output* dari pemodelan berupa *volume*, massa, dan lain sebagainya. Pada tahap

simulasi dibutuhkan *surface* sebagai referensi awal (*core*) dari penambahan jumlah *layer* serat karbon/epoksi pada *drive shaft*. Ekstensi file dari pembentukan *surface* adalah “STEP”.



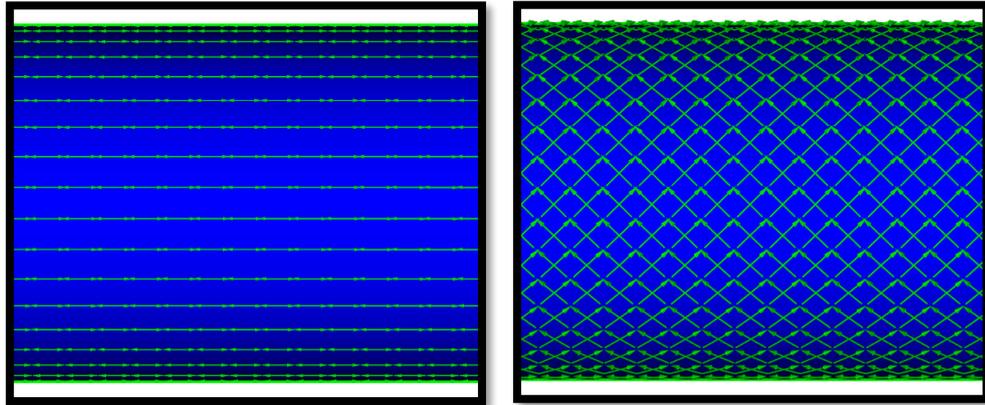
Gambar 3.3 *Surface* pada pemodelan sebagai referensi awal.

Meshing merupakan proses pembagian objek menjadi bagian-bagian yang lebih kecil. Semakin kecil *meshing size* yang digunakan maka hasil perhitungan akan semakin akurat namun membutuhkan spesifikasi komputasi yang tinggi. *Meshing size* yang digunakan pada simulasi ini adalah 7 mm², menghasilkan jumlah *element* sebanyak 3136 dan *node* 3164.



Gambar 3.4 *Meshing* pada *drive shaft* dan jumlah elemen.

Untuk mendapatkan hasil terbaik dalam penggunaan material komposit, orientasi serat, jumlah *layer* dan susunan *layer* yang digunakan merupakan faktor yang mempengaruhi kemampuan material komposit. Tahap simulasi, khususnya material komposit dilakukan pada *PrePost* untuk menentukan material komposit yang digunakan. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah serat karbon/epoksi *woven wet* TC-35 12K.



Gambar 3.5 Contoh orientasi serat dan jumlah *layer*.

Serat karbon memiliki kekuatan yang baik jika arah serat sama dengan arah pembebanan. Pada simulasi disebutkan bahwa komposit merupakan *orthophic* atau anisotropik material yaitu kekuatan komposit sangat dipengaruhi oleh orientasi serat dan fraksi *volume*. Ketika orientasi serat dirubah dari searah dengan pebebanan, maka terjadi penurunan kekuatan dari komposit. Dasar penentuan orientasi serat terbaik yang mempengaruhi kekuatan komposit (σ_c) adalah sebagai berikut:

$$\sigma_c = \eta \cdot \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m \quad (3.1)$$

Dimana

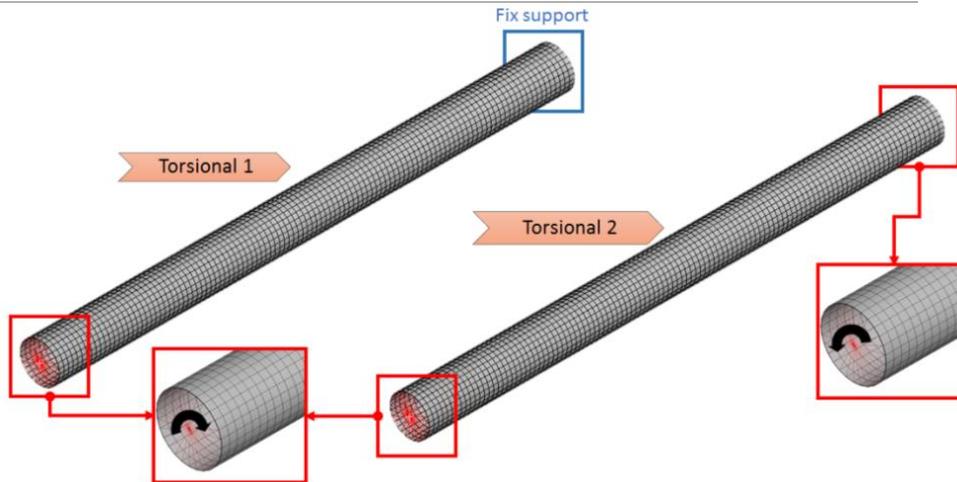
- σ_c = Kekuatan komposit,
- η = Faktor orientasi serat,
- σ_f = Kekuatan serat,
- V_f = *Volume* fraksi serat (*fiber*),
- σ_m = Kekuatan matriks,
- V_m = *Volume* fraksi matriks.

d. *Boundary Condition*

Proses terdiri dari input nilai torsi yang diberikan oleh transmisi untuk *drive shaft* lalu diteruskan ke differensial. Pada simulasi *static structural*, akan ditentukan bidang mana yang akan di *fix support* dan bidang mana yang akan diberikan torsi (*moment*), metode pembebanan dijelaskan pada tabel dibawah ini:

Tabel 3.4 *Boundary conditions* pada *drive shaft* serat karbon/epoksi.

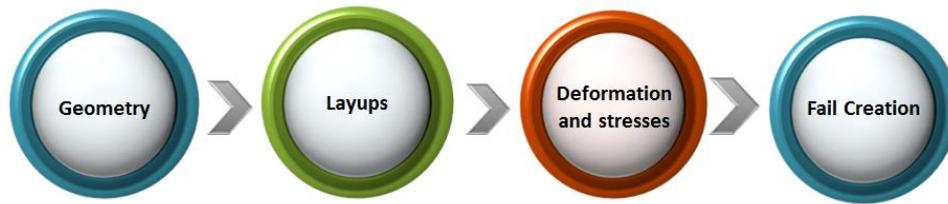
No	Test	Constraints	Loading Condition
1	Torsional 1	<i>Fix support</i> sisi differensial	Torsi searah jarum sisi transmisi
2	Torsional 2	-	Torsi sisi transmisi dan differensial berlawanan arah



Gambar 3.6 Konsep *boundary conditions* pada *drive shaft* serat karbon/epoksi.

e. Simulasi *Finite Element Analysis*

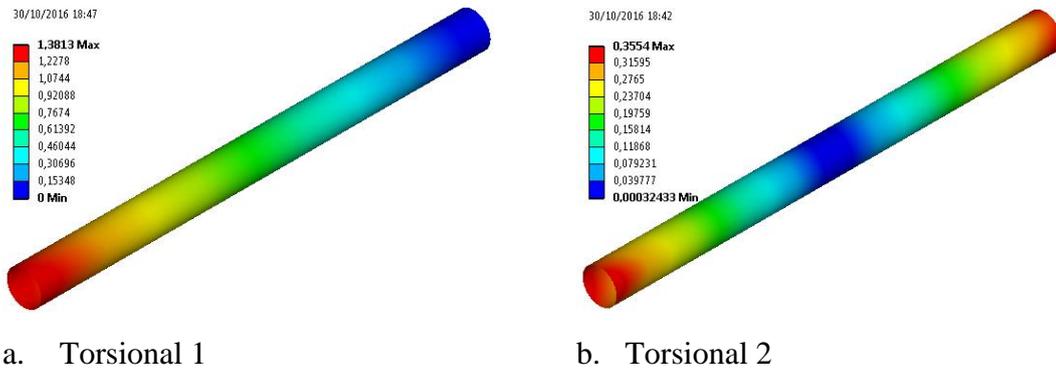
Metode elemen hingga merupakan salah satu metode numerik yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah struktural. Proses simulasi *finite element analysis* dilakukan untuk mendesain suatu pendekatan kondisi *real* yang terjadi pada *drive shaft*. Pendekatan yang dilakukan menggunakan sistem komputasi *software* yang sudah banyak diterapkan pada penelitian-penelitian sebelumnya. *Software* melakukan simulasi kondisi *drive shaft* komposit terhadap total deformasi, tegangan normal, regangan normal dan energi regangan yang dialami *drive shaft*. Konfigurasi terbaik *drive shaft* komposit serat karbon/epoksi akan dapat dicapai apabila orientasi serat (sudut kemiringan serat) dan jumlah *layer* ditemukan nilai orientasi optimal. ACP (*Composite PrePost*) digunakan untuk pemodelan material komposit khususnya serat karbon/epoksi. Pemberian beban (*loading*) bersifat statik untuk kondisi torsi pada *drive shaft*. Maka digunakan simulasi *mode static structural* untuk torsi (*moment*) pada material komposit serat karbon/epoksi.



Gambar 3.7 Skema proses simulasi FEA ACP *PrePost*.

f. Analisa Hasil Simulasi

Dari hasil simulasi berupa distribusi tegangan dan nilai total deformasi yang akan dianalisa apakah nilai tegangan berada dibawah tegangan *yield* (aman digunakan) pada torsi 120,62 N.m. Analisa dilakukan dengan melihat daerah kritis pada saat terjadi torsi maksimal.



Gambar 3.8 *Total deformation* pada *drive shaft* pada kondisi satu *layer*.

g. Referensi Baja SM45C.

Memenuhi nilai referensi disini yaitu nilai *total deformation* dan *equivalent stress* pada *drive shaft* SM45C yang dijadikan sebagai acuan penelitian. Nilai *total deformation* harus dapat dicapai oleh *drive shaft* serat karbon/epoksi untuk menyamai kemampuan SM45C. Adapun spesifikasi material *drive shaft* baja adalah:

Tabel 3.5 *Mechanical properties drive shaft* baja SM45C

<i>Mechanical properties</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
<i>Modulus young (E)</i>	207	Gpa
<i>Modulus geser (G)</i>	80	Gpa
<i>Rasio Poisson (ν)</i>	0,3	-

Densitas (ρ)	7600	Kg/m ³
Yield strength (S_y)	370	MPa
Total deformation	0,3002	mm
Bobot	8,58	Kg

Sumber: Harshal Bankar (2013)

h. Pembuatan Spesimen

Pembuatan spesimen dibuat sesuai dengan rekomendasi hasil simulasi mengenai jumlah layer, orientasi serat dan susunan layer. Material komposit terbagi atas dua komponen utama yakni matriks (*matrix*) dan material penguat (*reinforcement*). Serat karbon sebagai material penguat pada komposit, sedangkan untuk matriksnya digunakan resin epoksi. Matriks resin ini berfungsi untuk mengikat material serat karbon. Dikarenakan komposit hanya tersusun oleh dua material tersebut, maka sifat-sifatnya juga hanya ditentukan oleh kedua material ini. Proses pembuatan spesimen *drive shaft* serat karbon/epoksi mengacu hasil simulasi variasi terbaik dari orientasi serat dan jumlah *layer*.



Gambar 3.9 Lembaran komposit serat karbon *woven*.



Gambar 3.10 Resin epoksi dan hardener sebagai matriks.

Penelitian ini menggunakan resin epoksi sebagai matriks dari serat karbon TC-3512K sebagai penguat. Proses pembuatan drive shaft komposit sebagai berikut:

1. Pembuatan *core* berbentuk silinder menggunakan pipa pvc sebagai mold lalu dibalut dengan 1 *layer* serat karbon dan dioles epoksi.



Gambar 3.11 Pvc digunakan sebagai *core*.

2. Sebelum dibalut dengan serat karbon, *core* dibersihkan dan dilapisi dengan *Polivinil Alkohol* (PVA) secara merata. Hal ini bertujuan agar *core* mudah dilepas dari epoksi yang terikat sempurna.



Gambar. 3.12 *Polivinil Alkohol* (PVA).

3. Setelah dioles PVA dan kering, baru proses laminasi dilakukan. Laminasi adalah proses membalut *core* dengan serat karbon yang dicampur resin epoksi. Jumlah layer dan orientasi serat sesuai dengan hasil simulasi.
4. Setelah dioles resin secara merata pada serat karbon lalu dibungkus dengan *peel ply* untuk mengikat pola serat untuk mengikuti kontur *core*. Campuran epoksi dan *hardener* dengan perbandingan 3 *resin* 1 *hardener*.



Gambar 3.13 Lembaran *peel ply* merupakan lapisan akhir sebelum divacum.

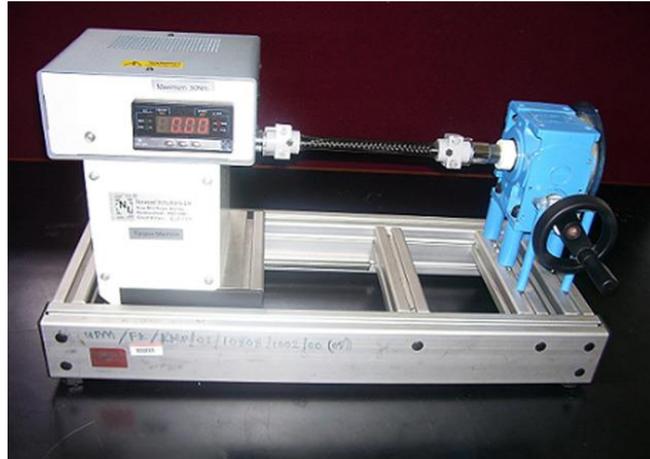
5. Proses selanjutnya ke proses vakum dengan menggunakan pompa vakum. Proses ini bertujuan agar tidak ada udara yang terjebak didalam matriks. Proses vakum berlangsung selama 8 jam agar epoksi dan *hardener* rata pada bidang serat karbon.



Gambar 3.14 Pompa vakum udara untuk komposit.

- i. Pengujian Torsi

Mesin uji torsi digunakan untuk melakukan pengujian terhadap spesimen dengan memberikan puntiran ke spesimen agar diketahui angka kemampuan material terhadap puntir. Uji torsi merupakan pengujian konfirmasi dari hasil simulasi yang telah dilakukan. Kedua ujung *specimen* dijepit, salah satu ujung tetap (*fix*) dan lagi diberikan puntiran (*moment*). Nilai beban puntir dilakukan secara kontinu ke tingkat yang lebih tinggi sehingga terjadi kerusakan pada spesimen. Besaran angka dari puntiran akan muncul di monitor dan angka akan otomatis berhenti jika kerusakan terjadi pada *drive shaft*.



Gambar 3.15 Ilustrasi mesin tes torsi *specimen drive shaft*.
(M.A. Badie dkk, 2011)

j. Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen

Penelitian dilakukan dua tahap, yaitu simulasi dan eksperimen. Eksperimen dilakukan untuk konfirmasi hasil simulasi. Dari pengujian akan dilihat berapa terjadi *angle of twist* (θ) pada *drive shaft* serat karbon/epoksi. Dengan perhitungan *torsional stiffness* (K) akan diketahui berapa kemampuan *drive shaft* terhadap puntiran. Perbandingan lain yaitu mengenai bobot *drive shaft* antara SM45C dan serat karbon/epoksi.

3.5 *Properties simulasi Finite Element Analysis.*

Sebelum melakukan simulasi, perlu dipastikan material yang digunakan memiliki karakter yang sama antara simulasi dan eksperimen. Kekurangan dari simulasi yaitu *software* akan memproses setiap data yang dimasukkan. Jadi perlu dilakukan perhitungan untuk membuat pendekatan matematis mengenai serat karbon apabila dipadukan dengan epoksi.

Tahap pertama menentukan *modulus young* komposit serat karbon TC35-12K dan resin epoksi pada arah serat x (E_x), arah y (E_y) dan z (E_z). Tipe material yang digunakan adalah serat karbon *wet woven*, jadi persamaan E_x dan E_y adalah sama:

Serat karbon TC35-12K *properties*:

Fraksi serat karbon TC35-12K (V_f)	= 45% = 0,45
Modulus young serat karbon (E_f)	= 240 GPa
Shear modulus (G_f)	= 96,77 GPa
Poisson ratio (ν_f)	= 0,240
Density (ρ)	= 1,79 g/cm ³
Elongation	= 1,6%

Resin epoksi *properties*:

Fraksi matriks epoksi (V_m)	= 55% = 0,55
Modulus young matriks epoksi (E_m)	= 3,78 GPa
Shear modulus (G_m)	= 1,4 GPa
Poisson ratio (ν_m)	= 0,35
Density (ρ)	= 1,16 g/cm ³
Elongation	= 0,01%

Menentukan modulus young arah x (E_x):

$$E_x = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (3.2)$$

$$E_x = (240 \cdot 0,45) + (3,78 \cdot 0,55)$$

$$E_x = 112,33 \text{ GPa}$$

Tipe serat yang digunakan *woven*, maka kekuatan arah x dan y dianggap:

$$E_x = E_y$$

$$E_y = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (3.3)$$

$$E_y = 112,33 \text{ GPa}$$

Menentukan modulus young arah z (E_z):

$$E_z = \frac{E_f \cdot E_m}{V_f \cdot E_m + V_m \cdot E_f} \quad (3.4)$$

$$E_z = \frac{240 \cdot 3,78}{(0,45 \cdot 3,78 + (0,55 \cdot 240))}$$

$$E_z = \frac{907,2}{133,701}$$

$$E_z = 6,79 \text{ GPa}$$

$$\begin{aligned} \text{Elongation} &= (0,016 \cdot 0,45) + (0,01 \cdot 0,55) \\ &= 0,0162 \% \end{aligned}$$

Menentukan *ultimate strength* pada *drive shaft* serat karbon TC35-12K/epoksi:

$$E = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \approx \sigma_t = E \cdot \varepsilon_t \quad (3.5)$$

$$\sigma_t = E \cdot \varepsilon_t = 112330 \times 0,016$$

$$\sigma_t = 1820 \text{ MPa}$$

Menentukan modulus geser (G_{xy}) pada matriks komposit serat karbon TC35-12K dengan resin epoksi:

$$G_{12} = \frac{G_f \cdot G_m}{V_f \cdot G_m + V_m \cdot G_f} \quad (3.6)$$

$$G_{12} = \frac{96,77 \cdot 1,4}{(0,45 \cdot 1,4) + (0,55 \cdot 96,77)}$$

$$G_{12} = 2,52 \text{ GPa}$$

Poison ratio (ν_{12}) merupakan konstanta elastisitas yang dimiliki setiap material atau perbandingan antara regangan *transversal* terhadap regangan *longitudinal* pada saat mengalami tegangan *aksial*. Ketika material diberikan gaya tarik maupun tekan, akan mengalami perubahan bentuk.

$$\nu_{12} = V_f \cdot \nu_f + V_m \cdot \nu_m \quad (3.7)$$

$$\nu_{12} = (0,45 \cdot 0,24) + (0,55 \cdot 0,35)$$

$$\nu_{12} = 0,3005 = 0,3$$

Density atau massa jenis (ρ) adalah suatu besaran kerapatan massa benda yang dinyatakan dalam berat benda per satuan volume. Besaran massa jenis dapat

membantu menerangkan mengapa benda yang berukuran sama memiliki berat yang berbeda Semakin tinggi massa jenis suatu benda, maka semakin besar pula massa setiap volumenya.

$$\begin{aligned}\rho_c &= \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot v_m & (3.8) \\ \rho_c &= (1,79 \cdot 0,45) + (1,16 \cdot 0,55) \\ \rho_c &= 1,45 \text{ g/cm}^3 = 1450 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Dari perhitungan yang telah dilakukan maka dapat didapat nilai *properties* serat karbon TC35-12K/epoksi *woven* yang akan diinput ke *software finite element analysis* seperti yang tertera pada tabel 3.6.

Tabel 3.6 *Material properties* serat karbon TC35-12K/epoksi *woven*.

Density	1450	Kg/m ³
Young's Modulus X Direction	112,3	GPa
Young's Modulus Y Direction	112,3	GPa
Young's Modulus Z Direction	6,8	GPa
Poisson's Ratio XY	0,3	
Poisson's Ratio YZ	0,3	
Poisson's Ratio XZ	0,3	
Shear Modulus XY	17500	MPa
Shear Modulus YZ	2520	MPa
Shear Modulus XZ	2520	MPa

3.6 Perhitungan Rancangan *Drive Shaft* Komposit

Matriks kekakuan terluar [A] diperlukan untuk mendapatkan nilai A_{11} , A_{12} dan A_{22} . Nilai tersebut akan diperlukan untuk mencari modulus arah axial (E_x) dan modulus *hoop* (E_h):

$$[A] = \sum_{K=1}^N [\bar{Q}]^k (Z_K - Z_{K-1}) = \begin{bmatrix} 94,03 & 3,277 & 0 \\ 3,277 & 94,03 & 0 \\ 0 & 0 & 4,032 \end{bmatrix} \text{GPa} \cdot \text{mm} \quad (3.9)$$

Maka:

$$A_{11} = 94,03 \text{ GPa} \cdot \text{mm}$$

$$A_{12} = 3,277 \text{ GPa} \cdot \text{mm}$$

$$A_{22} = 94,03 \text{ GPa} \cdot \text{mm}$$

Hasil matriks [A] diatas dan ketebalan masing-masing layer pada *drive shaft* serat karbon/epoksi (t) 1 mm untuk menentukan modulus rata-rata diarah aksial (E_x) dan *hoop* (E_h) seperti:

modulus rata-rata arah aksial (E_x):

$$E_x = \frac{1}{t} \left[A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} \right] \quad (3.10)$$

$$E_x = \frac{1}{1} \left[94,03 - \frac{3,277^2}{94,03} \right]$$

$$E_x = 93,91 \text{ GPa}$$

modulus rata-rata arah *hoop* (E_h):

$$E_h = \frac{1}{t} \left[A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} \right] \quad (3.11)$$

$$E_h = \frac{1}{1} \left[94,03 - \frac{3,277^2}{94,03} \right]$$

$$E_h = 93,91 \text{ GPa}$$

Momen inersia (I_m):

$$I_m = \frac{1}{2} \rho_c (r_i^2 + r_o^2)$$

$$I_m = \frac{1}{2} 1450 (0,026^2 + 0,03^2)$$

$$I_m = 1,1426 \text{ kg.m}^2$$

Natural frequency adalah nilai frekuensi pribadi *drive shaft* komposit serat karbon/epoksi, m adalah nilai massa per satuan panjang:

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_x I_m}{m L^4}} \quad (3.12)$$

$$f_n = \frac{3,14}{2} \sqrt{\frac{93,91(1,1426)}{0,8 (0,785)^4}}$$

$$f_n = 1,57 \sqrt{\frac{107,3015}{0,3037}}$$

$$f_n = 129,51 \text{ Hz}$$

Konsep frekuensi ini secara langsung berkaitan dengan *torsional stiffness* (K), di mana θ adalah *angle of twist* dan T adalah torsi yang diterapkan pada *drive shaft*. Maka dapat diketahui deformasi ketika dipuntir 120,62 N adalah:

$$\theta = \frac{TL}{2\pi r_m^3 Gt} \quad (3.13)$$

$$\theta = \frac{120,62 \cdot 0,785}{2\pi(0,028)^3(2,52 \times 10^9)(0,004)}$$

$$\theta = 0,06810 \text{ Radian}$$

$$\theta = 3,9^\circ$$

Torsional stiffness (K) adalah kekakuan *drive shaft* pada saat diberikan momen puntir, maka kemampuan spesifik *drive shaft* adalah:

$$K = \frac{T}{\theta} \quad (3.14)$$

$$K = \frac{120,62}{3,90}$$

$$K = 30,92 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{deg}$$

Frequency torsional adalah fungsi getaran akibat putaran yang diberikan. Frekuensi getaran *torsional* dapat disajikan sebagai:

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{I_m}} \quad (3.15)$$

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{30,92 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{deg}}{1,1426 \text{ kg}\cdot\text{m}^2}}$$

$$f_t = 0,828 \text{ Hz}$$

Jika frekuensi dirubah ke putaran (1 Hz = 60 rpm) maka *drive shaft* yang dirancang akan terjadi getaran pada putaran 28,77 rpm. Kemampuan torsi maksimum dari *drive shaft* serat karbon/epoksi dapat dihitung. Berdasarkan kalkulasi sebelumnya maka dapat diketahui *Critical buckling* (T_{cr}) adalah:

$$T_{cr} = (2\pi r^2 t)(0,272)[E_x \cdot E_h^3]^{1/4} \left(\frac{t}{r}\right)^{3/2} \quad (3.16)$$

$$T_{cr} = (2 \cdot 3,14 (0,03)^2 \cdot 0,001)(0,272)[93,91 \cdot 93,91^3]^{1/4} \left(\frac{0,001}{0,03}\right)^{3/2}$$

$$T_{cr} = (0,000005652)(0,272)[93,91](0,006085)$$

$$T_{cr} = 8,786 \times 10^{-7} \text{ GPa} \cdot \text{m}^3$$

$$T_{cr} = 878,6 \text{ N/m}^2 \cdot \text{m}^3$$

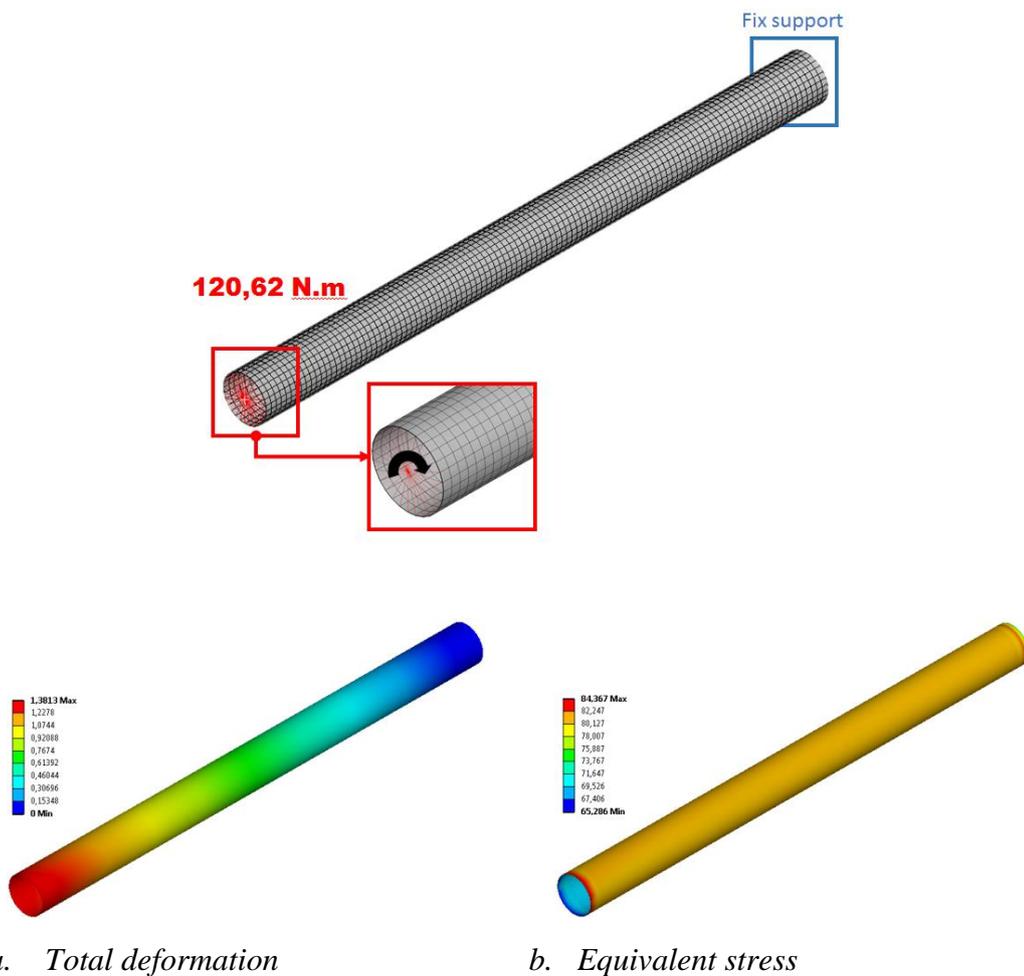
$$T_{cr} = 879 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Torsi

Karakteristik *drive shaft* komposit serat karbon/epoksi diketahui ketika struktur diberikan beban. Simulasi menggunakan sistem kompuasi *software finite element analysis*. Tujuan pemodelan untuk mengetahui nilai *equivalent stress* dan *total deformation* ketika diberikan beban torsi sebesar 120,62 N.m. *Equivalent stress* merupakan nilai tegangan yang terjadi pada seluruh bidang *drive shaft* akibat torsi yang diberikan. *Total deformation* adalah nilai perubahan bentuk atau defleksi ketika torsi diberikan pada *drive shaft*. Gambar 4.1 menunjukkan metode pembebanan *drive shaft* pada penelitian ini.



Gambar 4.1 *Drive shaft* ketika ditorsi 120,62 N.m.

Gambar 4.1 menunjukkan torsi diberikan pada *drive shaft* serat karbon/epoksi untuk mengetahui nilai *total deformation* dan *equivalent stress*. Ujung *drive shaft* sisi *diferential* di *fix support* sedangkan sisi ujung lainnya atau sisi transmisi diberikan torsi (*moment*) 120,62 N.m. Dari Tabel 4.1 diketahui bahwa pada orientasi serat 0^0 dan 90^0 diperoleh nilai *total deformation* terbesar 2,15 mm, sedangkan orientasi serat 45^0 merupakan nilai terkecil yaitu 1,38 mm.

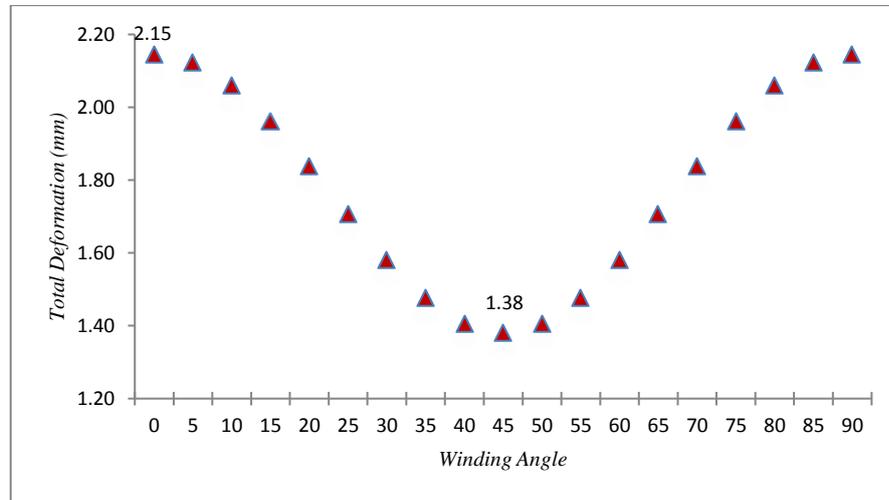
Tabel 4.1. Perbandingan orientasi serat.

No	Number of layer	Winding angle (\emptyset)	Total Deformation (mm)	Equivalent Stress (MPa)
1	1	0	2,15	89,25
2	1	5	2,12	88,58
3	1	10	2,06	88,17
4	1	15	1,96	87,50
5	1	20	1,84	86,69
6	1	25	1,71	85,82
7	1	30	1,58	85,01
8	1	35	1,48	84,58
9	1	40	1,41	84,27
10	1	45	1,38	84,18
11	1	50	1,41	84,38
12	1	55	1,48	84,75
13	1	60	1,58	85,40
14	1	65	1,71	86,25
15	1	70	1,84	87,21
16	1	75	1,96	88,15
17	1	80	2,06	88,96
18	1	85	2,12	89,53
19	1	90	2,15	89,78
		Min	1,38	84,18
		Maks	2,15	89,78

Sumber: Hasil simulasi

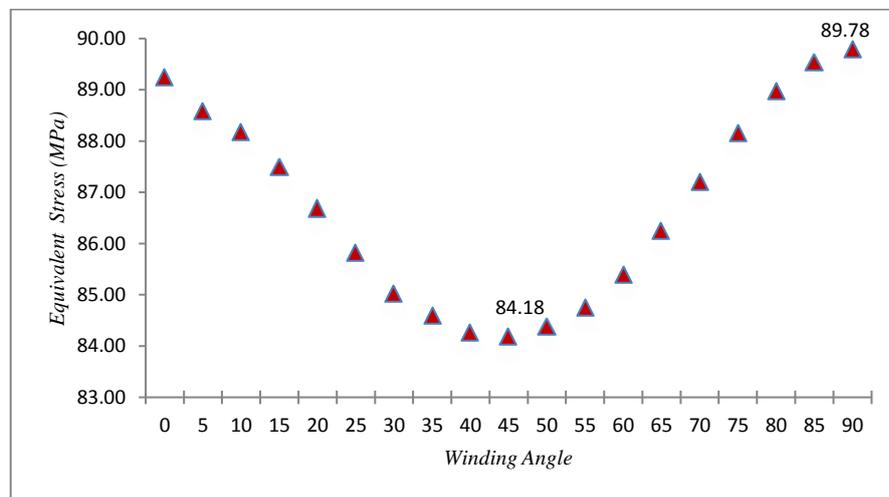
Simulasi dilakukan satu *layer* pada silinder berdiameter (D) 60 mm dan panjang (L) 785 mm. Dari Gambar 4.1 menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai *total deformation* seiring peningkatan orientasi serat dari 0^0 hingga 45^0 . Nilai *total deformation* kembali meningkat dari orientasi serat 50^0 hingga 90^0 . Hasil tersebut menunjukkan bahwa orientasi serat memiliki pengaruh terhadap kekuatan dan kekakuan *drive shaft* komposit. Hasil orientasi serat 0^0 dan 90^0 memiliki angka yang sama karena *layer* yang digunakan serat karbon tipe *woven*

yang memiliki serat pada arah x dan y . Gambar 4.2 menunjukkan pengaruh orientasi serat terhadap *total deformation* sebagai berikut.



Gambar 4.2 Orientasi serat terhadap *total deformation*.

Equivalent stress terhadap orientasi serat yang terjadi pada *drive shaft* menunjukkan *trend* data yang sama dengan *total deformation*. *Equivalent stress* ditemukan pada *drive shaft* lebih kecil pada orientasi serat 45^0 sedangkan yang terbesar terjadi orientasi serat 90^0 .



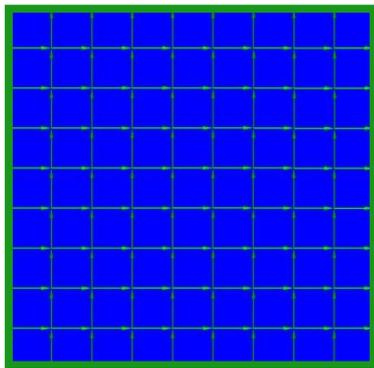
Gambar 4.3 Orientasi serat terhadap *equivalent stress*.

Hasil Gambar 4.3 menunjukkan bahwa *drive shaft* memiliki kemampuan terhadap torsi lebih baik jika berada pada orientasi serat optimal. Nilai tegangan paling besar pada orientasi serat 90^0 yaitu 89,78 MPa. Orientasi serat terbaik untuk

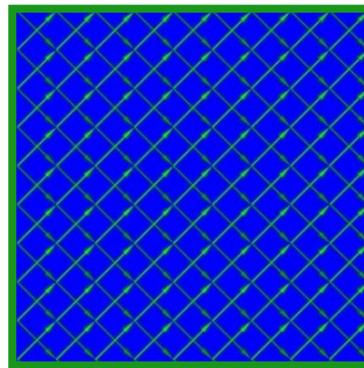
menahan tegangan adalah yang memiliki nilai *equivalent stress* lebih kecil 84,18 MPa pada orientasi serat 45^0 .

4.2 Pengaruh Arah Serat terhadap Gaya Tarik

Dari hasil pengamatan, ketika *drive shaft* diberikan torsi maka *drive shaft* akan mengalami puntiran (*twist*) dan ada gaya tarik yang memaksa terjadinya regangan pada *drive shaft*. Jadi perlu diketahui berapa orientasi serat terbaik untuk merespon kondisi tersebut. Simulasi yang dilakukan untuk membuat pendekatan pada kondisi aslinya. Geometri model yang disimulasi berukuran 20x20 cm dengan jumlah 1 *layer*. Masing-masing tepi (*edge*) *layer* diberikan gaya tarik sebesar 60 N dengan arah gaya tarik saling berlawanan. Gambar 4.4 merupakan orientasi serat yang disusun pada *layer*.

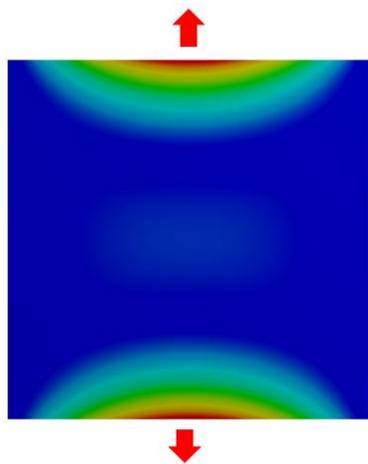


a. Orientasi serat 0^0

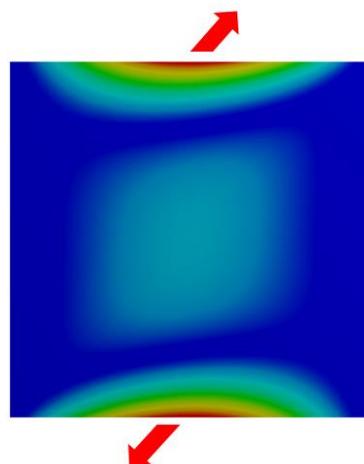


b. Orientasi serat 45^0

Gambar 4.4 Orientasi serat pada *layer* simulasi gaya tarik.



a. Gaya tarik A



b. Gaya tarik B

Gambar 4.5 Metode gaya tarik yang diberikan pada *layer*.

Gambar 4.5 menunjukkan metode gaya tarik yang diberikan pada masing-masing *edge layer*. Gaya tarik yang diberikan tegak lurus dan diagonal dengan arah saling berlawanan. Simulasi dilakukan pada setiap orientasi serat, ditemukan nilai *total deformation* dan *equivalent stress* berbeda pada setiap orientasi serat. Kekuatan dan kekakuan *layer* lebih baik ketika arah serat searah dengan arah gaya yang bekerja pada *layer*.

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa orientasi serat 0^0 lebih baik untuk kondisi tarik dengan nilai *equivalent stress* 1,20 MPa dan *total deformation* yaitu 0,07 mm. Hasil orientasi serat 45^0 *equivalent stress* sedikit lebih besar yaitu 1,51 MPa dan *total deformation* yang terjadi 0,16 mm. Dinyatakan bahwa simulasi uji tarik metode A diperoleh orientasi serat terbaik pada orientasi serat 0^0 .

Tabel 4.2 Hasil perbandingan orientasi serat terhadap gaya tarik pada *layer*.

Winding Angle	Gaya Tarik A		Gaya tarik B	
	Equivalent stress	Total Deformation	Equivalent stress	Total Deformation
0^0	1,20 MPa	0,07 mm	2,94 MPa	0,010 mm
45^0	1,51 MPa	0,16 mm	1,71 MPa	0,010 mm
$0^0/45^0$	1,65 MPa	0,95 mm	6,98 MPa	0,068 mm
$45^0/0^0$	8,23 MPa	0,07 mm	7,15 MPa	0,040 mm

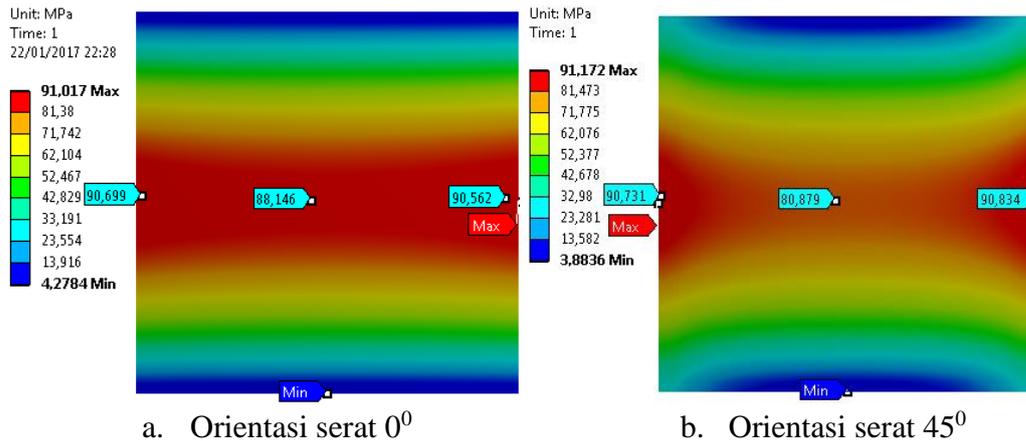
Sumber: Hasil simulasi

Untuk gaya tarik metode B ditemukan orientasi serat terbaik pada 45^0 , diperoleh nilai *equivalent stress* 1,71 MPa dan *total deformation* 0,012 mm. Nilai yang didapat lebih kecil dibandingkan dengan orientasi serat 0^0 , $0^0/45^0$ dan $45^0/0^0$. Pada simulasi orientasi serat $0^0/45^0$ dan $45^0/0^0$ digunakan dua *layer unidirectional* atau *layer* yang hanya memiliki serat yang searah. *Total deformation* dan *equivalent stress* yang ditemukan jauh lebih besar dan tidak direkomendasi untuk digunakan.

4.3 Perbandingan Bending

Pada tahap selanjutnya yaitu dilakukan simulasi tekuk (*bending*) pada dua spesimen berukuran 20x20 cm dengan jumlah 1 *layer*. Uji *bending* dilakukan untuk mengetahui peran orientasi serat terhadap gaya yang diberikan. Gambar 4.6 menunjukkan bahwa nilai *stress* dan *deformation* paling besar terjadi pada bagian

tengah *layer* (zona warna merah). Ini disebabkan oleh gaya yang terkonsentrasi pada bagian tengah *layer* dan paling kecil dimasing-masing sisi *layer* (zona warna biru) sebagai tumpuan. Kondisi *bending* terbaik diperoleh pada orientasi serat 0^0 , dengan *total deformation* sebesar 12,84 mm dan *equivalent stress* sebesar 91,01 MPa seperti pada Gambar 4.7 menunjukkan *total deformation* dan *equivalent stress* pada *layer* dengan orientasi serat 0^0 .



Gambar 4.6 perbandingan tegangan *bending* yang terjadi pada *layer*.

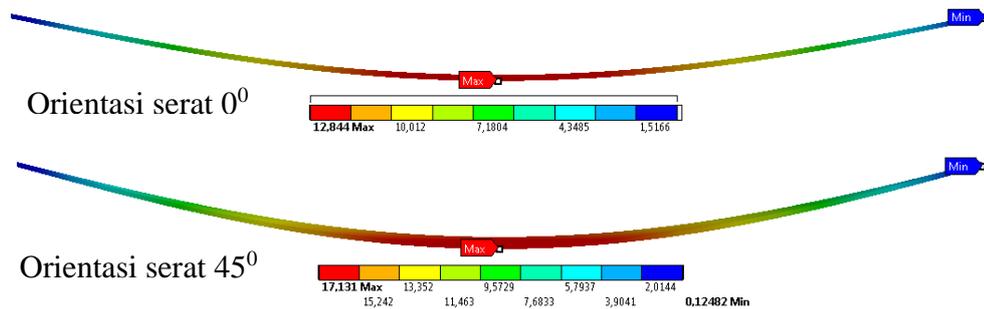
Ketika *layer* diberikan gaya maka menyebabkan perubahan bentuk (defleksi) pada bidang *layer*. Jika besarnya gaya yang diberikan tidak melewati batas elastis, maka perubahan bentuk yang terjadi hanya bersifat sementara. Apabila tegangan yang diberikan melebihi batas *modulus young* dan elastis maka sebagian dari perubahan akan tetap ada walaupun gaya sudah dihilangkan. Tabel 4.3 menunjukkan bahwa dengan besar gaya dan geometri yang sama terjadi perbedaan kemampuan *layer* jika memiliki orientasi serat yang berbeda. Orientasi serat 0^0 memiliki kekakuan lebih baik terhadap gaya *bending*, terlihat pada gambar 4.6 bahwa tegangan terdistribusi secara merata. Orientasi serat 45^0 tegangan yang terjadi lebih besar pada suatu bagian dan tidak terdistribusi dengan baik ke seluruh bidang *layer*.

Tabel 4.3 Pengaruh orientasi serat terhadap gaya *bending*.

Dimensi	Winding Angle	Gaya (N)	Total Deformation (mm)	Equivalent Stress (MPa)
20x20 cm	0	120	12,84	91,01
20x20 cm	45	120	17,13	91,17

Sumber: Hasil Simulasi

Dari Gambar 4.6 dan 4.7 menunjukkan bahwa defleksi akan terjadi ketika layer menerima beban, sehingga dapat dibandingkan *total deformation* antara orientasi serat 0^0 dan 45^0 . Defleksi akibat *bending* pada *layer* dengan orientasi serat 0^0 lebih unggul jika dibandingkan serat 45^0 . Hal ini diketahui dari Tabel 4.3 orientasi serat 0^0 memiliki nilai *total deformation* lebih kecil yaitu 12,84 mm dan *equivalent stress* sebesar 91,01 MPa. Pada orientasi serat 45^0 dihasilkan *total deformation* yang lebih besar yaitu 17,13 mm dan *equivalent stress* yang hampir sama dengan 0^0 yaitu 91,17 MPa.

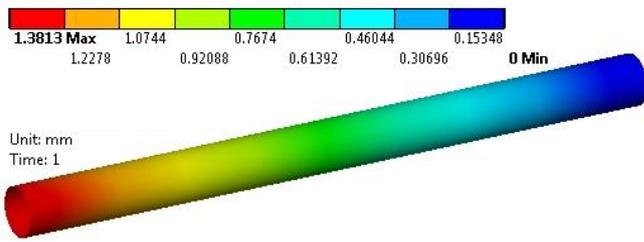


Gambar 4.7 Perbandingan defleksi yang terjadi diorientasi serat 0^0 dan 45^0 .

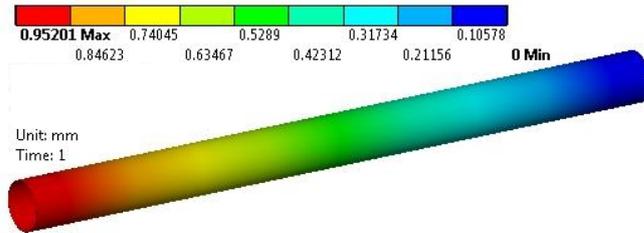
4.4 Pengaruh Diameter

Perbandingan simulasi diameter dilakukan untuk mengetahui apakah diameter yang berbeda pada masing-masing *layer* akan berpengaruh terhadap nilai orientasi serat terbaik. Sebagai acuan awal pada diameter terbesar sebesar 60 mm dan ukuran terkecil sebesar 54 mm. Hasil simulasi pada Gambar 4.8 menunjukkan *drive shaft* serat karbon/epoksi dengan variasi diameter tetapi dengan gaya dan arah torsi yang sama, apakah orientasi serat terbaik yang ditemukan sama.

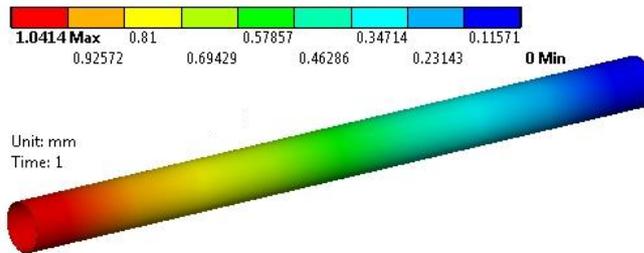
Pada *drive shaft* diameter 60 mm, memiliki nilai *total deformation* paling kecil 1,38 mm ditemukan pada orientasi serat 45^0 . Diameter *drive shaft* 58 mm memiliki nilai *total deformation* paling kecil 0,95 mm pada orientasi serat 45^0 . Selanjutnya *drive shaft* berdiameter 56 mm dengan *total deformation* 1,04 mm terjadi pada 45^0 . Diameter terkecil yaitu 54 mm diperoleh nilai *total deformation* 1,13 mm pada orientasi terbaik juga pada 45^0 .



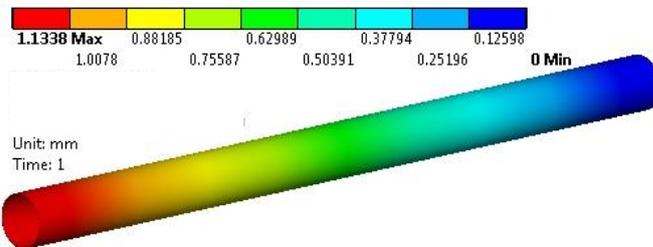
a. Diameter 60 mm.



b. Diameter 58 mm.



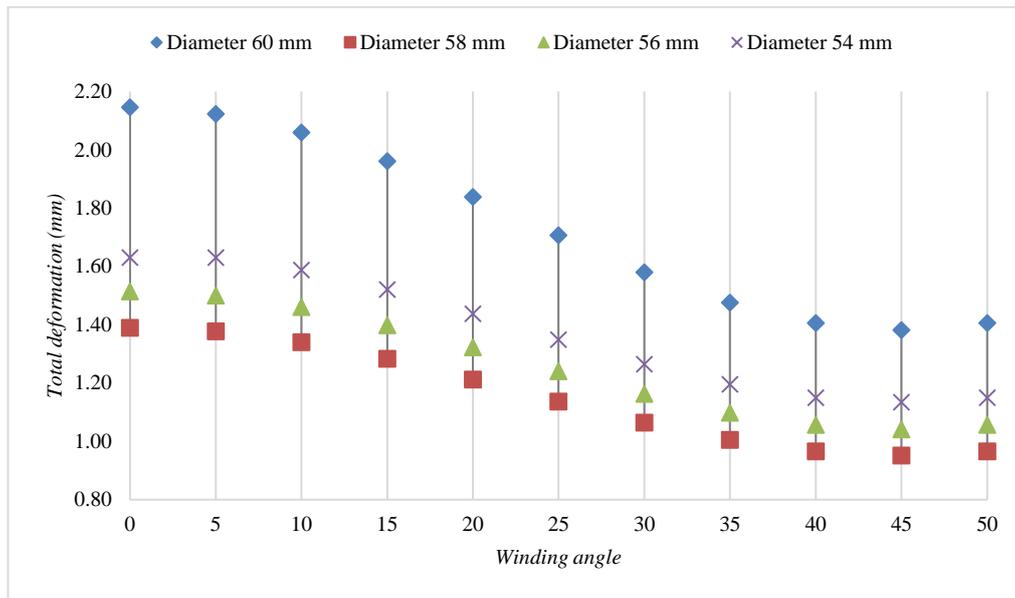
c. Diameter 56 mm.



d. Diameter 54 mm.

Gambar 4.8 Pengaruh diameter terhadap orientasi serat.

Hasil data simulasi yang dilakukan sebagai kesimpulan bahwa diameter *drive shaft* tidak mempengaruhi orientasi serat, namun faktor yang mempengaruhi yaitu arah gaya atau torsi yang diterapkan pada *drive shaft*. Setiap diameter menunjukkan *trend* data yang sama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 bahwa terjadi penurunan nilai *total deformation* ketika orientasi serat dirubah dari 0^0 sampai ke 45^0 , tetapi nilai ini kembali naik pada orientasi serat 50^0 .



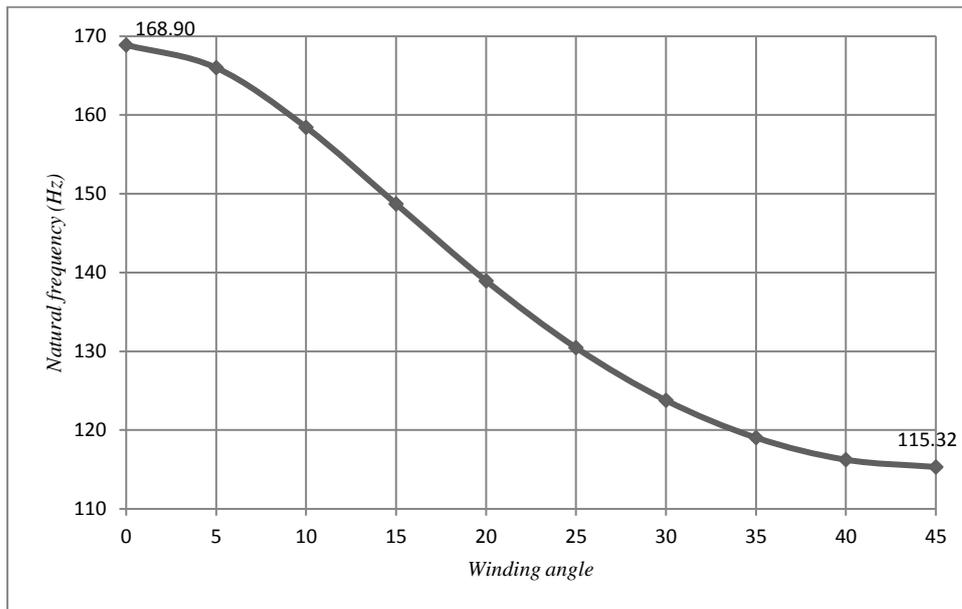
Gambar 4.9 Pengaruh perbedaan diameter terhadap orientasi serat.

4.5 Natural Frequency terhadap Orientasi Serat

Pada dasarnya setiap struktur memiliki *natural frequency* (frekuensi pribadi), yaitu jika suatu struktur mengalami gangguan (*resonance*) pada frekuensinya maka material tersebut akan terjadi defleksi atau bergetar. *Drive shaft* beroperasi pada sistem yang berputar dan sangat rentan terjadi getaran akibat *resonance* dari mesin melalui transmisi. Rancangan *natural frequency* (f_n) dipengaruhi oleh massa dan kekakuan. Persamaan dasar untuk mengetahui *natural frequency* adalah sebagai berikut.

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_x I_m}{mL^4}} \quad (4.1)$$

Pada simulasi *finite element analysis* melalui *modal analysis* untuk mengetahui pada frekuensi berapa *drive shaft* serat karbon/epoksi terjadi defleksi dan mulai bergetar. Material serat karbon memiliki kemampuan yang baik untuk meningkatkan *natural frequency drive shaft* melalui menemukan orientasi terbaik yang diterapkan. Selain itu serat karbon memiliki properties *modulus young* spesifik yang tinggi.



Gambar 4.10 *Natural Frequency* terhadap orientasi serat.

Pada simulasi *modal analysis* untuk mencari berapa orientasi serat terbaik pada *natural frequency drive shaft* serat karbon/epoksi untuk meningkatkan performa pada putaran tinggi. Hasil simulasi menemukan orientasi serat terbaik pada 0^0 untuk meningkat *natural frequency drive shaft*. Penelitian pendahuluan dilakukan pada *drive shaft* dengan diameter 60 mm, jumlah 1 *layer*, panjang 785 mm. Sesuai hasil Gambar 4.10 bahwa orientasi serat terbaik pada 0^0 menghasilkan *natural frequency* 168,90 Hz. Orientasi serat 0^0 meningkatkan kekakuan *drive shaft* pada arah *longitudinal*. Kondisi sebaliknya diorientasi serat 45^0 , kekakuan *drive shaft* lebih rendah dengan nilai *natural frequency* 115,32 Hz.

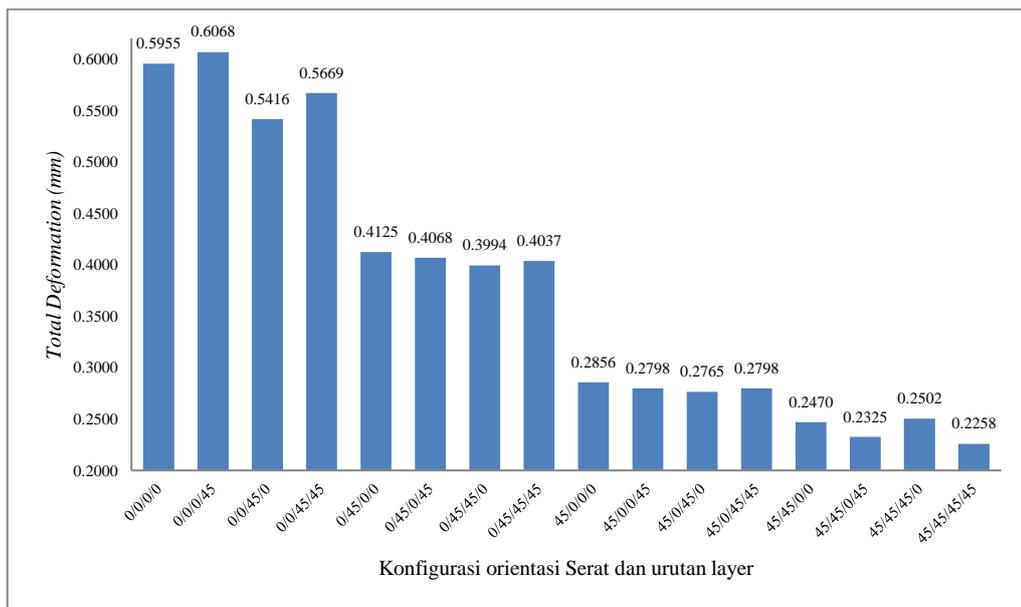
4.6 Pengaruh Konfigurasi Arah Serat dan Susunan *Layer*

Orientasi serat berpengaruh besar terhadap kemampuan dari suatu struktur komposit. Setiap perubahan arah serat akan memberikan pengaruh yang berbeda. Pada simulasi sebelumnya dinyatakan bahwa orientasi serat 0^0 dan 45^0 memiliki keunggulan masing-masing yang dibutuhkan pada rancangan *drive shaft* serat karbon/epoksi. *Drive shaft* serat karbon/epoksi diharapkan memiliki kekuatan dan kekakuan yang baik serta *natural frequency* yang ideal, sehingga mampu bekerja

pada putaran tinggi. Beberapa aspek yang disyaratkan dapat dicapai dengan menemukan variasi orientasi serat dan urutan susunan *layer* terbaik.

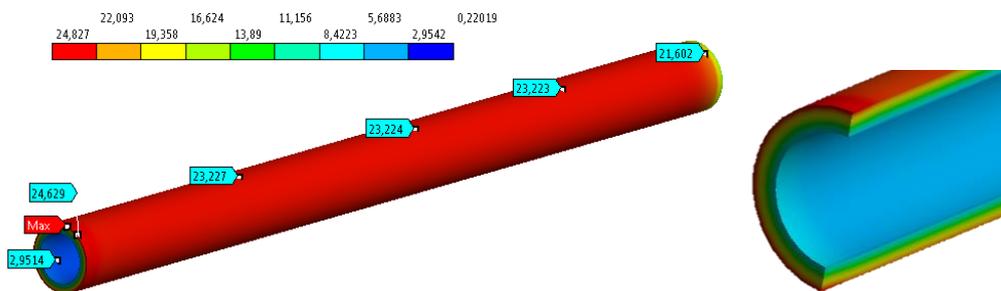
Gaya yang diterapkan pada *drive shaft* bukan hanya gaya puntir, namun gaya tarik antara sisi transmisi dan diferensial ketika berputar. Dari kondisi tersebut *drive shaft* harus memenuhi kebutuhan desain yang telah disyaratkan. Dari hasil simulasi sebelumnya, orientasi serat 45^0 sangat baik untuk kondisi puntir namun lemah ketika terjadi gaya tarik. Pada rancangan *drive shaft* serat karbon/epoksi dibutuhkan kombinasi antara orientasi serat 45^0 dan 0^0 . Orientasi serat 0^0 memiliki karakter lebih baik untuk gaya tarik dan *bending* yang terjadi ketika *drive shaft* menghantar daya dari transmisi ke diferensial.

Pada Gambar 4.11 jika jumlah 4 *layer* diterapkan pada semua variasi untuk memenuhi beban kerja *drive shaft* serat karbon/epoksi, hanya sebagian variasi yang memenuhi nilai referensi *drive shaft* baja. Nilai referensi sebagai patokan diambil dari drive shaft baja SM45C dengan *total deformation* 0,3002 mm ketika ditorsi 120,62 mm. Orientasi serat 45/45/45/45 memiliki nilai *total deformation* paling kecil yaitu 0,2258 mm, sedangkan terbesar adalah 0,2856 mm yang masih dibawah nilai referensi pada orientasi serat dan susunan *layer* 45/0/0/0. Nilai *total deformation* bisa lebih baik jika ditemukan konfigurasi orientasi serat dan susunan *layer* terbaik.



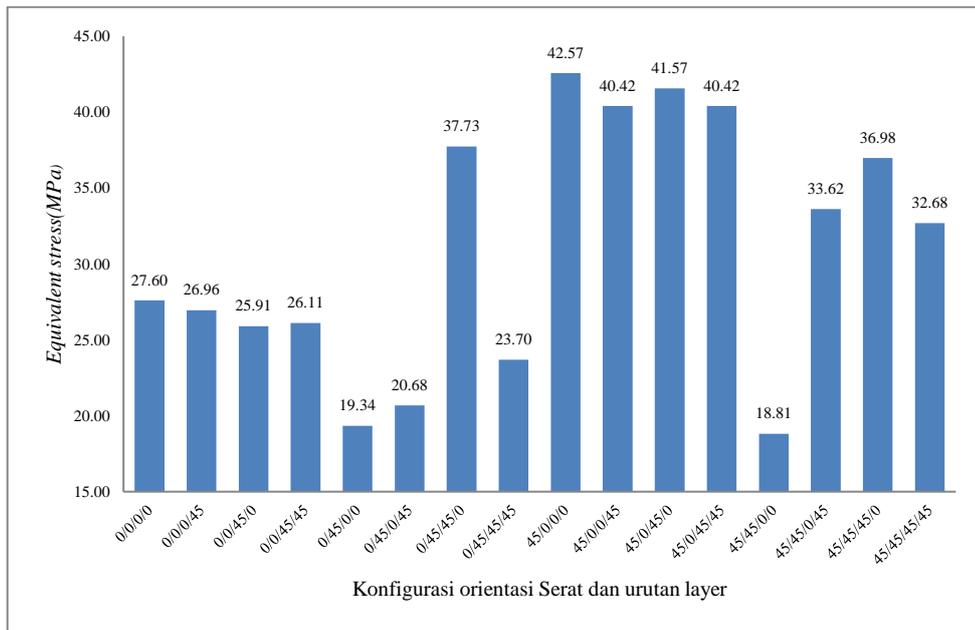
Gambar 4.11 Orientasi serat dan urutan susunan layer terhadap *total deformation*.

Susunan layer yang diawali orientasi serat 45^0 memiliki kemampuan jauh lebih baik jika dibandingkan 0^0 . Semua variasi yang diawali dengan 45^0 memiliki angka dibawah referensi dan direkomendasikan, sedangkan yang diawali orientasi serat 0^0 rata-rata nilai *total deformation* diatas nilai referensi atau lebih besar. Kondisi ini terjadi karena ketika *drive shaft* ditorsi ditemukan *equivalent stress* paling tinggi terjadi pada bidang silinder bagian luar yang memiliki sebaran tegangan yang lebih besar, karakteristik dari orientasi serat 45^0 dibutuhkan pada sisi terluar *drive shaft* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 *Equivalent stress drive shaft* komposit serat karbon/epoksi.

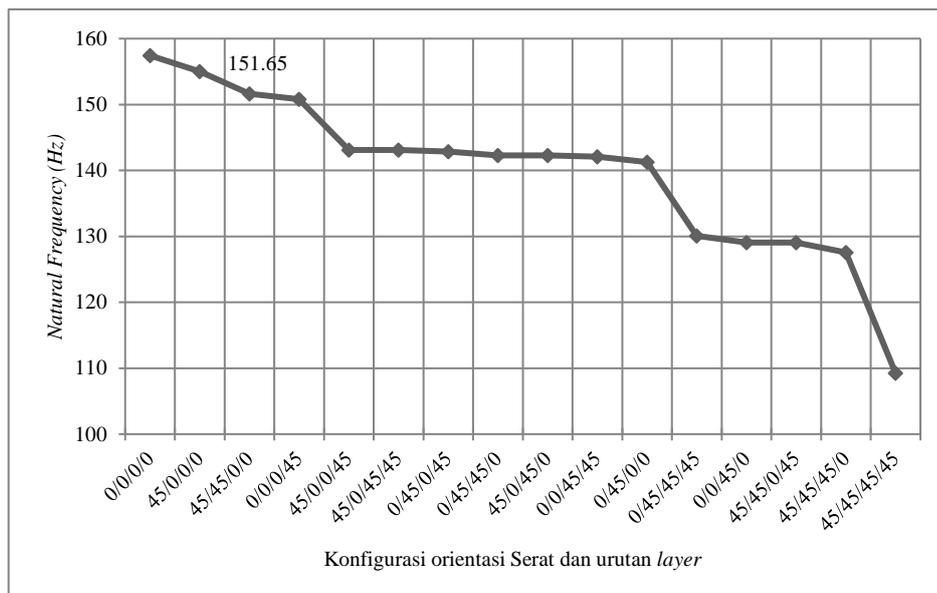
Pada simulasi *finite element analysis* diketahui bahwa dengan konfigurasi orientasi serat dan susunan *layer* akan memberikan pengaruh terhadap jumlah *layer* yang akan digunakan, semakin sedikit jumlah *layer* yang digunakan akan berpengaruh besar terhadap biaya proses manufaktur *drive shaft*. Ditunjukkan pada Gambar 4.13 bahwa besarnya sebaran tegangan pada *drive shaft* paling rendah pada konfigurasi orientasi serat dan urutan *layer* 45/45/0/0 dengan nilai tegangan 18,81 MPa. *Equivalent stress* paling tinggi terjadi pada orientasi serat dan susunan *layer* 45/0/0/0 dengan besar tegangan sebesar 42,57 MPa. Besaran tegangan *equivalent stress* lebih diprioritaskan, karena apabila tegangan akibat torsi lebih kecil maka peluang terjadinya kerusakan pada *drive shaft* akan berkurang. Ini terjadi karena peningkatan kekuatan dan kekakuan *drive shaft* dipengaruhi oleh konfigurasi orientasi serat dan susunan *layer* yang diterapkan.



Gambar 4.13 Pengaruh orientasi dan susunan *layer* terhadap *equivalent stress*.

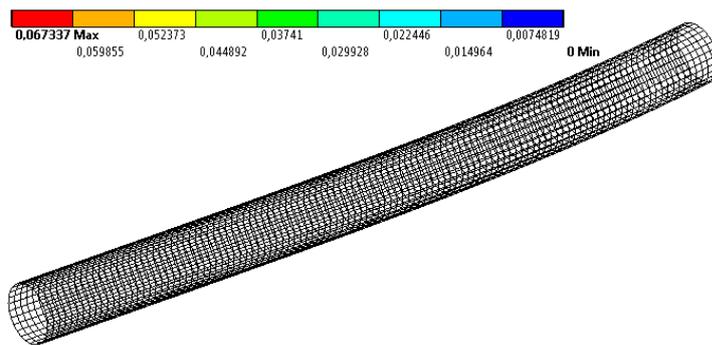
4.7 Konfigurasi Serat dan Susunan *Layer Terhadap Natural Frequency*

Natural frequency drive shaft memiliki kekakuan yang baik pada orientasi serat 0^0 , kondisi ini akan dikombinasikan dengan 45^0 yang memiliki karakteristik torsi yang sangat baik untuk diaplikasikan pada *drive shaft* serat karbon/epoksi. Pada *drive shaft* yang harus memiliki kemampuan torsi, tarik, *bending* dan mampu berputar seimbang pada putaran tinggi.

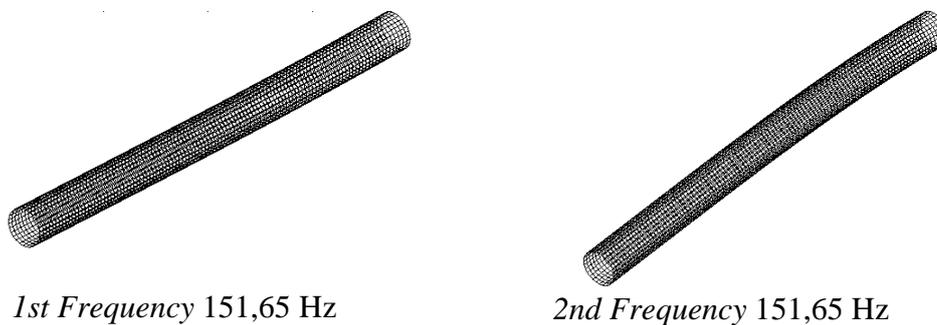


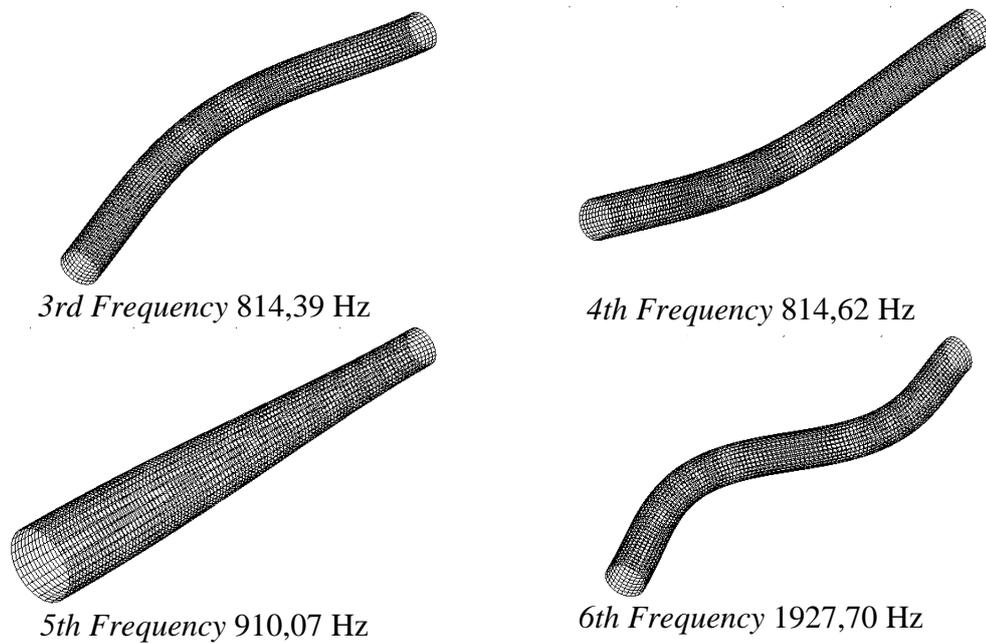
Gambar 4.14 Pengaruh konfigurasi susunan *layer* terhadap *natural frequency*.

Pada Gambar 4.14 dijelaskan bahwa konfigurasi serat harus memiliki *layer* yang menggunakan orientasi serat 0^0 untuk meningkatkan *natural frequency* sehingga modulus elastisitas diarah *logitudinal* dari *drive shaft* lebih baik. Pada orientasi serat dan susunan *layer* 0/0/0/0, memiliki *natural frequency* tertinggi yaitu 157,43 Hz. Kondisi ini belum yang terbaik karena tidak memenuhi kebutuhan utama untuk kemampuan torsi. Urutan susunan *layer* yang paling tinggi nilai *natural frequency* dan mendukung kinerja torsi pada *drive shaft* serat karbon/epoksi yang dipilih sebagai yang terbaik. Berdasarkan pernyataan tersebut maka *natural frequency* untuk konfigurasi susunan *layer* dan orientasi serat adalah 45/45/0/0 memperoleh *natural frequency* 151,65 Hz. Nilai *natural frequency* serat karbon jauh lebih baik jika dibanding *drive shaft* baja SM45C yang terdefleksi pada frekuensi pertama diangka 93,40 Hz.



Gambar 4.15 Pola defleksi *drive shaft* pada frekuensi pertama.

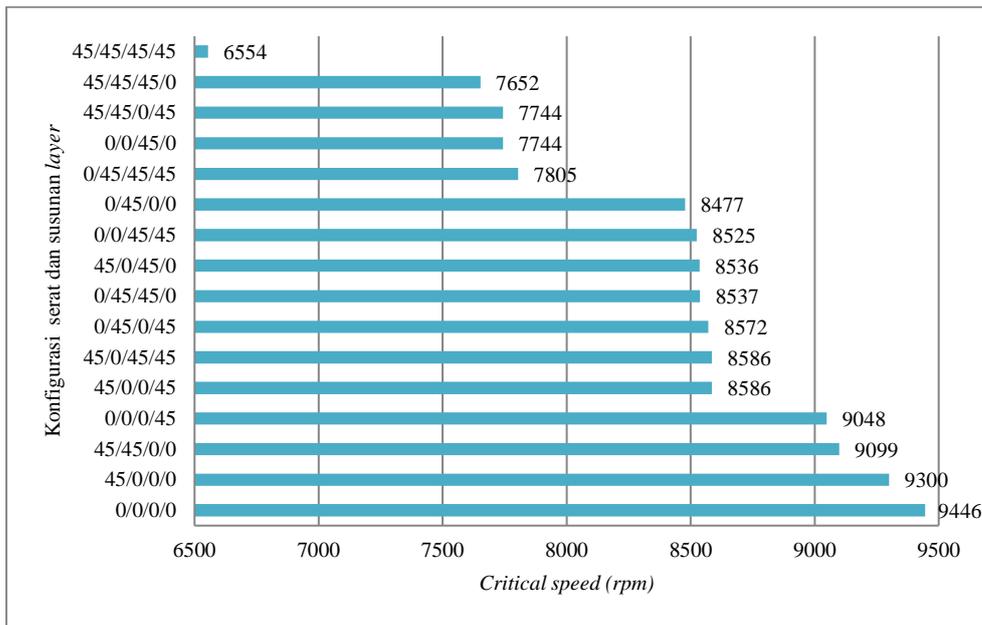




Gambar 4.16 Pola defleksi *drive shaft* pada frekuensi yang lebih tinggi.

Dijelaskan pada Gambar 4.15, terjadi defleksi pola pertama pada *drive shaft* serat karbon/epoksi pada frekuensi pertama yaitu 151,65 Hz. Frekuensi pertama dijadikan batas frekuensi maksimal *drive shaft* serat karbon/epoksi. Ketika frekuensi ditingkatkan maka pola defleksi pun berbeda sesuai dengan besar frekuensi yang terjadi karena *drive shaft* tidak mampu mempertahankan kekakuannya pada frekuensi tersebut, kondisi ini dijelaskan pada Gambar 4.16.

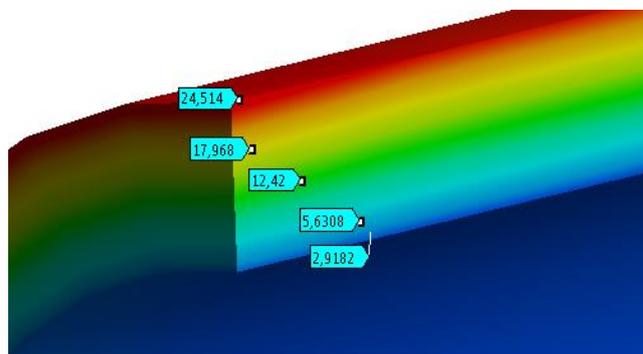
Critical speed (putaran kritis) terjadi pada struktur yang prinsip kerjanya berputar. Pada rancangan *drive shaft* serat karbon/epoksi perlu diketahui berapa besar putaran maksimum. *Critical speed* sangat terkait dengan *natural frequency*, semakin tinggi *natural frequency drive shaft* maka kemampuan *drive shaft* pada putaran kritis semakin baik ditunjukkan Gambar 4.17. Pada putaran kritis terjadi defleksi yang berdampak pada punca getaran. Untuk konfigurasi orientasi serat dan susunan *layer* yang dipilih 45/45/0/0 ditemukan *drive shaft* mampu bekerja pada putaran 9099 rpm.



Gambar 4.17 Konfigurasi serat dan susunan layer terhadap *critical speed*.

4.8 Pengujian Konfirmasi

Setelah dilakukan simulasi *finite element analysis* untuk menemukan konfigurasi orientasi serat dan susunan layer terbaik, maka tahap selanjutnya adalah pembuatan spesimen *drive shaft* komposit dengan material serat karbon/epoksi. Jumlah layer, orientasi serat dan susunan layer sesuai dengan hasil simulasi. Pada eksperimen jumlah layer yang digunakan adalah 4 layer woven, orientasi serat 45^0 dan 0^0 dengan konfigurasi 45/45/0/0. Berdasarkan hasil simulasi pada sisi luar orientasi serat adalah orientasi 45^0 dan sisi dalam silinder adalah 0^0 yang terbaik. Susunan diatur karena tegangan terbesar ketika ditorsi ada disisi luar silinder seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 4.18. Matriks epoksi digunakan sebagai pengikat serat penguat serat karbon TC35-12K.



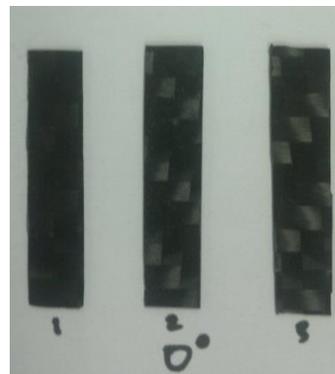
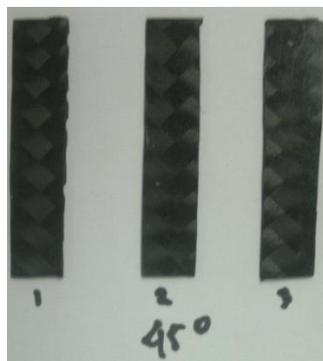
Gambar 4.18 Perbandingan tegangan pada *drive shaft* dalam satu laminasi.

Spesimen disiapkan untuk pengujian tarik dan torsi. Pengujian tarik dilakukan pada 1 *layer* spesimen dengan panjang 10 mm lebar dan 50 mm. Alat uji tarik yang digunakan adalah Mark ESM301L.



Gambar 4.19 Alat uji tarik yang digunakan.

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik pada spesimen. Spesimen dibedakan antara orientasi serat 0° dan 45° .



Orientasi serat 45°



Orientasi serat 0°

Gambar 4.20 Hasil pengujian tarik terhadap spesimen berbeda orientasi serat.

Pengujian tarik yang dilakukan memiliki hasil yang berbeda pada orientasi serat yang berbeda. Kemampuan orientasi serat 0^0 jauh lebih baik jika dibandingkan 45^0 untuk pengujian tarik. Hasil yang didapat sama dengan pernyataan simulasi bahwa orientasi serat 0^0 lebih baik dari 45^0 ketika terjadi gaya tarik. Hasil pengujian terhadap orientasi serat ditabel berikut.

Tabel 4.4 Hasil pengujian tarik.

No	Orientasi Serat	UTS (kN/m ²)	Keterangan
1.	Spesimen 1 (45^0)	3303.73	Putus
2.	Spesimen 2 (45^0)	3303.03	Putus
3.	Spesimen 1 (0^0)	9384.53	Tidak putus

Sumber: Hasil pengujian

Tahap selanjutnya melakukan pengujian puntir terhadap *drive shaft* serat karbon/epoksi. Drive shaft terdiri dari empat layer dengan urutan susunan layer terluar 45/45/0/0.



Gambar 4.21 *Drive shaft* serat karbon/epoksi

Momen puntir yang dibebankan pada *drive shaft* adalah 120,62 N.m. Dikarenakan keterbatasan alat pengujian, maka digunakan kunci momen (*torque wrench*) untuk mengukur kemampuan torsi dari *drive shaft*.



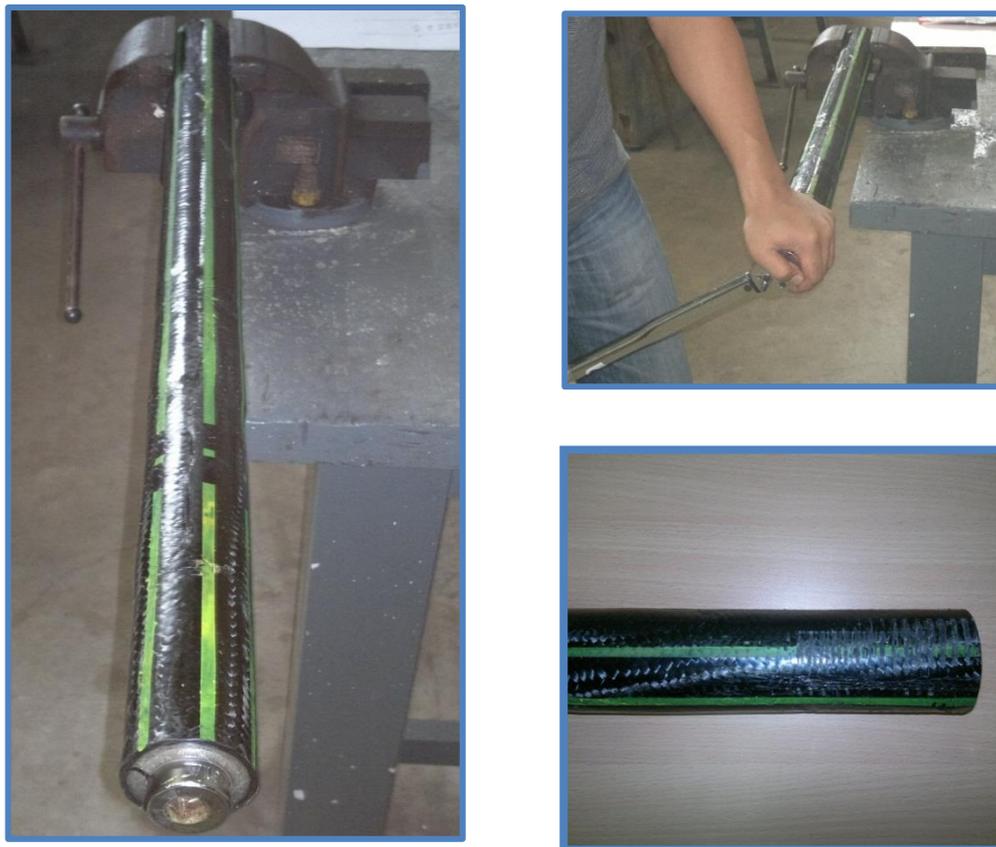
Gambar 4.22 Kunci momen (*torque wrench*)

Digunakan epoksi *adhesive* untuk mengikat antara kunci socket dan silinder *drive shaft* serat karbon/epoksi. Epoksi *adhesive* memiliki kekuatan tarik 2300 N.m, jadi untuk pengujian masih dalam skala aman atau kemungkinan terjadinya slip masih kecil.



Gambar 4.23 Sambungan kunci socket momen.

Pengujian dilakukan dengan sistem manual, tanpa menggunakan mesin khusus. Spesimen *drive shaft* dijepit pada ragum, selanjutnya diberikan torsi dengan kunci momen. Pemberian momen diberikan secara bertahap dari 60 N sampai 160 N. Desain rancangan membutuhkan 120,62 N.



Gambar 4.24 Metode pengujian torsi pada *drive shaft* serat karbon.

Dari hasil pengujian yang dilakukan, maka didapat data kekuatan *drive shaft*. Berdasarkan data Tabel 4.5 *drive shaft* diuji secara bertahap untuk mengetahui berapa sudut puntir (*angle of twist*) yang terjadi. Torsi diberikan sehingga 140 N.m, tidak terjadi puntiran dan perubahan bentuk pada bidang *drive shaft*. Ini berarti *drive shaft* mampu mempertahankan kekakuan pada torsi 120,62 N.m dan dinyatakan aman digunakan. Ketika torsi ditingkatkan 160 N.m, terjadi slip pada bagian cekam Sehingga tidak bisa diuji ke torsi yang lebih tinggi.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian torsi *drive shaft*.

No	Torsi (N.m)	Angle of twist	Keterangan
1	60	0	Aman
2	80	0	Aman
3	100	0	Aman
4	120	0	Aman
5	140	0	Aman
6	160	-	Slip dicekam

Sumber: Hasil pengujian

4.9 Perbandingan Drive shaft Baja dan Komposit

Pada desain sebelumnya *drive shaft* kendaraan roda empat penggerak roda belakang menggunakan steel SM45C memiliki bobot 8,58 Kg seperti yang dinyatakan oleh Harshal bankar (2013). Dari hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat dibandingkan antara *drive shaft* serat karbon/epoksi dan SM45C sebagai berikut.

Tabel 4.6 Perbandingan *drive shaft* baja dan komposit.

Parameter	SM45C	Serat karbon/epoksi
Bobot (kg)	8,58	1,03
Total deformation (mm)	0,30	0,24
Natural Frequency (Hz)	93,40	151,65

Sumber: Data simulasi dan eksperimen

Dari hasil simulasi dan eksperimen, ditemukan hasil perbandingan antara *drive shaft* baja SM45C dan *drive shaft* komposit serat karbon/epoksi. Berdasarkan data pada Tabel 4.6 *drive shaft* serat karbon/epoksi memiliki bobot yang jauh lebih

ringan. Mengganti material *drive shaft* baja ke material serat karbon/epoksi dapat mereduksi bobot hingga 88%.

Konfigurasi orientasi serat dan susunan layer terbaik ditemukan 45/45/0/0. Pada konfigurasi ini mampu meminimalkan *total deformation* lebih baik jika dibandingkan dari konfigurasi lainnya. Dari hasil simulasi, *total deformation* SM45C adalah 0,3002 mm sedangkan serat karbon/epoksi 0,2447 mm. Penggunaan serat karbon/epoksi mampu mereduksi deformasi yang terjadi hingga 20%.

Natural frequency drive shaft meningkat jika menggunakan material serat karbon/epoksi. *natural frequency* dipengaruhi oleh massa dan kekakuan material. Serat karbon/epoksi memiliki kekakuan yang baik dan bobot yang lebih ringan dibandingkan baja. Data Tabel 4.6 *natural frequency* baja SM45C adalah 93,40 Hz sedangkan serat karbon/epoksi 151,65 Hz. Terjadi peningkatan *natural frequency* sebesar 38% jika menggunakan material serat karbon/epoksi sebagai *drive shaft*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada *drive shaft* komposit serat karbon/epoksi untuk kendaraan penggerak roda belakang, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- a. Peningkatan kekuatan dan kekakuan *drive shaft* pada orientasi serat 45^0 lebih baik ketika ditorsi. Orientasi serat 0^0 lebih baik pada gaya tarik dan *bending*.
- b. Ditemukan konfigurasi orientasi serat dan susunan *layer* terbaik jika dikenakan torsi 120,62 N.m dengan jumlah 4 *layer* adalah pada 45/45/0/0.
- c. Susunan *layer* yang diawali orientasi serat 45^0 memiliki kemampuan jauh lebih baik jika dibandingkan 0^0 apabila keduanya dalam satu laminasi untuk beban torsi.
- d. Menggunakan material komposit serat karbon/epoksi mampu mereduksi bobot *drive shaft* hingga 88%, *total deformation* 20% dan meningkatkan *natural frequency* 38%.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan pada *drive shaft* komposit serat karbon/epoksi terdapat beberapa saran untuk pengembangan:

- a. Semakin sedikit jumlah *layer* yang digunakan berpengaruh terhadap biaya manufaktur *drive shaft*. Perlu dioptimalkan orientasi serat dan susunan *layer* untuk mendapatkan konfigurasi terbaik.
- b. Perlu alat pengujian lebih presisi untuk mengetahui perubahan *angle of twist* akibat gaya puntir yang diberikan.
- c. Perlu ada penelitian lebih lanjut tentang penyambungan antara baja dan *carbon fiber/epoxy*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Fang-Jing, X., Jian-Rong, Y., & Yuan-De, X. (1991). Design and mechanical analysis of a hybrid composite driveshaft. In *Composite Structures* (pp. 207-216). Springer Netherlands.
- Rastogi, N. (2004). *Design of composite driveshafts for automotive applications*(No. 2004-01-0485). SAE Technical Paper.
- Lee, D. G., Sung Kim, H., Woon Kim, J., & Kook Kim, J. (2004). Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft. *Composite Structures*, 63(1), 87-99.
- Mutasher, S. A. (2009). Prediction of the torsional strength of the hybrid aluminum/composite drive shaft. *Materials & design*, 30(2), 215-220.
- Talib, A. A., Ali, A., Badie, M. A., Lah, N. A. C., & Golestaneh, A. F. (2010). Developing a hybrid, carbon/glass fiber-reinforced, epoxy composite automotive drive shaft. *Materials & Design*, 31(1), 514-521.
- Badie, M. A., Mahdi, E., & Hamouda, A. M. S. (2011). An investigation into hybrid carbon/glass fiber reinforced epoxy composite automotive drive shaft. *Materials & Design*, 32(3), 1485-1500.
- Rompicharla, R. K., & Rambabu, K. (2012). Design and Optimization of Drive Shaft with composite materials. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2(05).
- Tanasa, F., & Zanoaga, M. (2013). Fiber-Reinforced Polymer Composites As Structural Materials For Aeronautics. *Scientific Research & Education In The Air Force-Afases*, 2.
- Bhajantri, V. S., Bajantri, S. C., Shindolkar, A. M., & Amarapure, S. S. (2014). Design and Analysis of Composite Drive Shaft. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3.
- Cherniaev, A., & Komarov, V. (2015). Multistep optimization of composite drive shaft subject to strength, buckling, vibration and manufacturing constraints. *Applied Composite Materials*, 22(5), 475-487.
- Xia, L. H., Chang, C. W., & Zhang, Y. P. (2006). Application Of Composite Materials In Military Bridge Equipment. *Fiber Reinforced Plastics*, 2, 013.

Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: science and engineering*. Springer Science & Business Media.

Hillier, V. A. W., & Coombes, P. (2004). *Hillier's fundamentals of motor vehicle technology*. Nelson Thornes.

www.proofresearch.com

RIWAYAT HIDUP



Firman Alhaffis - Lahir di Bengkalis, Propinsi Riau, pada 30 Januari 1984, merupakan anak pertama dari pasangan Ayahanda Alm. Amrin dan Ibunda Maryati, H. Penulis memulai pendidikan formal pada jenjang Sekolah Dasar pada tahun 1990 di SDN 080 Senggoro-Bengkalis. Kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di MTsN Bengkalis pada tahun 1996 dan pendidikan tingkat atas pada tahun 1999 di SMKN 2 Kota Dumai. Tahun 2002 penulis melanjutkan pendidikan tingkat tinggi Diploma 3 (D3) di Politeknik Negeri Bengkalis (POLBENG), lalu pada tahun 2006 melanjutkan keningkat strata satu (S1) di Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta, Jurusan Teknik Mesin konsentrasi Manufaktur. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan studi dengan beasiswa BPPDN Calon Dosen 3T dengan mengikuti program Pra S2 Fisika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) selama 1 tahun, setelah itu melanjutkan pendidikan strata dua (S2) tahun 2014 dengan bidang keahlian Rekayasa Sistem Manufaktur di Jurusan Teknik Mesin ITS. Penulis melakukan penelitian mengenai Implementasi Serat Karbon/Epoksi untuk *Drive Shaft* pada Kendaraan Penggerak Roda Belakang. Penelitian ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Magister Teknik (MT) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Email: firman.alhaffis@gmail.com