



UNIVERSITAS INDONESIA

**SINTESIS KOMPOSIT HYBRID GLASS/EPOXY-MWNT
DAN ANALISIS DENGAN MODEL MIKROMEKANIK**

DISERTASI

**A R W A N T O
0806400610**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
JAKARTA
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**SINTESIS KOMPOSIT HYBRID GLASS/EPOXY-MWNT
DAN ANALISIS DENGAN MODEL MIKROMEKANIK**

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar doktor

**A R W A N T O
0806400610**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
JAKARTA
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Arwanto
NPM : 0806400610

Tanda Tangan :

Tanggal : 18 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :
Nama : Arwanto
NPM : 0806400610
Program Studi : Ilmu Material
Judul Disertasi : Sintesis Komposit Hybrid Glass/Epoxy-
MWNT dan Analisis dengan Model
Mikromekanik

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Ilmu Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Ketua Sidang : Dr. Adi Basukriadi
Promotor : Dr. Suhardjo Poertadji
Ko-Promotor : Dr. Bambang Soegijono
Tim Penguji : Dr. Azwar Manaf, M.Met
Dr. Muhammad Hikam
Dr. Emil Budianto
A. Riza Wahono, B.Eng, MSo., Ph.D

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 18 Juli 2012

UNGKAPAN TERIMA KASIH

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Alhamdulillah robbil alamin, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas segala karunia, berkah dan rahmat yang dilimpahkanNya kepada kami sekeluarga sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi ini. Penulisan disertasi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor dalam bidang Ilmu Material di Universitas Indonesia. Penelitian dan penulisan disertasi ini dilengkapi oleh asupan, arahan, dukungan, dorongan, koreksi, serta nasehat dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, sepatutnyalah penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tak terhingga serta penghargaan kepada mereka yang terukir dalam tulisan ini.

Kepada Rektor Universitas Indonesia, Prof. Dr. der. Soz. Gumilar Rusliwa Soemantri, yang telah menerima penulis sebagai mahasiswa S3 di Universitas Indonesia, penulis sampaikan terima kasih.

Kepada Dekan FMIPA-UI, Dr. Adi Basukriadi, MSc, yang telah menerima penulis di Program Studi Ilmu Material, FMIPA-UI dan juga telah menjadi Ketua Pelaksana Sidang Promosi, penulis sampaikan terima kasih.

Penghargaan penulis haturkan kepada Dr. Suhardjo Poertadji, yang telah berkenan menjadi Promotor. Rasa hormat yang tak terhingga penulis sampaikan atas langkah-langkah yang berarti dari beliau bagi penulis selama penulis menjalani program studi S3. Penulis sampaikan rasa terima kasih atas waktu, tenaga dan pikiran yang diluangkan untuk mengoreksi disertasi ini, di tengah kesibukan beliau sebagai Sekretaris Program Studi Ilmu Material, FMIPA-UI.

Penghargaan yang sama penulis haturkan kepada Dr. Bambang Soegijono, yang telah berkenan menjadi Ko-Promotor. Tuntunan beliau merupakan sesuatu yang amat berarti. Penulis sampaikan rasa terima kasih untuk beliau yang telah

menyediakan waktu untuk berdiskusi serta mengoreksi disertasi ini disela-sela kesibukan beliau sebagai Ketua Program Studi Ilmu Material, FMIPA-UI.

Penghargaan serta rasa hormat yang tak terhingga penulis haturkan kepada Tim Dr. Azwar Manaf, M.Met, Dr. Muhammad Hikam, Dr. Emil Budianto, A. Riza Wahono, B.Eng, MSc., Ph.D. Beliau semua telah meluangkan waktu untuk mempelajari, menelaah, memberi asupan, memeriksa bahasa dan mengoreksi ejaan untuk dapat menjadikan disertasi ini lebih baik. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada tim penguji atas arahan untuk mencari mutiara dari penelitian ini agar hasil penelitian dapat disumbangkan baik untuk kemajuan ilmu pengetahuan maupun masyarakat.

Kepada semua staf pengajar Program Pendidikan Doktor Ilmu Material FMIPA-UI yang telah memberi bekal ilmu melalui pembelajaran yang penulis ikuti dalam rangka menempuh program Doktor, penulis sampaikan terima kasih. Khususnya kepada Dr. Suhardjo Poertadji, Dr. Bambang Soegijono, Dr. Azwar Manaf, M.Met, dan Dr. Muhammad Hikam, yang memberikan wawasan ilmu material yang sangat bermanfaat dalam penyelesaian penulisan disertasi ini.

Penghargaan penulis sampaikan kepada Bapak Agus Eddy P, Asisten Direktur Pengembangan Produk Strategis, PT Dirgantara Indonesia, yang telah memberi kesempatan dan mengizinkan untuk melakukan penelitian di PT Dirgantara Indonesia. Penghargaan yang sama penulis sampaikan kepada Ir, Sutarno, MT, Manajer Pengembangan Manufaktur, Direktorat Aerostructure, Ir. Handoko Subawi, MSc, Ir. Sukartini, MSc, yang telah memberi arahan diawal pelaksanaan penelitian pembuatan komposit laminasi. Terima kasih tidak lupa penulis sampaikan kepada Bapak Hari dan Saudara Syamsul Hadi, bagian *Bonding Composite*, yang telah membantu dan membimbing penggunaan peralatan dalam pembuatan komposit laminasi.

Terima kasih sebesar-besarnya kepada saudara Rohman dan Mei, yang telah bersedia membantu melakukan uji mekanik dan *Burn off Test*, di Laboratorium PT Dirgantara Indonesia.

Terima kasih juga penulis sampaikan kepada saudara Thomas Hargono dan Eduardus, Politeknik Manufaktur Astra Jakarta, yang telah memberi kesempatan melakukan pengujian mekanik diawal penelitian ini.

Penghargaan dan terima kasih penulis sampaikan kepada Dr. Ir. Tatang A. Taufik, MSc, selaku Kepala BPPT Bidang Pengkajian Kebijakan Teknologi yang telah memberikan kesempatan dan dukungannya dalam menjalani pendidikan Doktor. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Dr. Ir. Asep Husni Yasin Rosadi, MM, selaku Direktur Pusat Pengkajian Kebijakan Difusi Teknologi – BPPT dan Dr. Derry Pantjadarma, Direktur Pusat Pengkajian Kebijakan Peningkatan Daya Saing – BPPT yang telah memberikan dukungan dalam menjalani pendidikan Doktor. Penulis juga tidak pernah lupa kepada para sejawat di Pusat Pengkajian Kebijakan Difusi Teknologi – BPPT, yang telah penuh pengertian mengambil alih pekerjaan yang menjadi tanggung jawab penulis, selama penulis menjalani pendidikan Doktor. Untuk semua ini penulis sampaikan terima kasih.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada beberapa pihak di Program Studi Doktor Ilmu Material, FMIPA-UI. Kepada teman-teman dan khususnya teman satu angkatan tahun 2008 yang telah menjadi teman bertukar pikiran dan telah menjadi penyemangat sehingga beban yang penulis tanggung terasa lebih ringan dan menyenangkan. Ungkapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada rekan-rekan yang telah membantu penulis saat berlangsungnya acara Sidang Terbuka Promosi Doktor pada tanggal 11 Juli 2012, khususnya rekan-rekan yang telah berkenan membantu operasional tayangan presentasi dan yang telah berkenan menjadi pendamping (paranim). Dan tidak lupa penulis berterimakasih kepada semua staf administrasi dan pegawai yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan hal-hal yang bersifat administratif.

Terima kasih penulis sampaikan kepada Kementerian Riset dan Teknologi khususnya program pendidikan pascasarjana-KRT yang telah memberikan kesempatan dan dukungan bagi penulis dalam menempuh pendidikan Doktor.

Akhirnya, penulis mengungkapkan terima kasih kepada keluarga tercinta. Pertama sekali rasa cinta dan terima kasih yang tak terhingga penulis haturkan kepada kedua orang tua penulis, Bapak Solichin (Alm) dan Ibu Sariyah yang telah membesarkan dan mendoakan terus-menerus untuk penulis. Begitu pula untuk Ibu dan Bapak Mertua, atas dukungan moril yang diberikan, penulis ucapkan terima kasih. Selanjutnya untuk istri tercinta, Endang Sulaswati dan anak-anak tersayang, Metha Dhiya', Bagus Adiwena dan Adlan Faza, rasanya tidak henti-hentinya penulis bersyukur dan berterima kasih atas dukungan dan semangatnya, dari awal sampai akhir penulis menjalani program Doktor ini.

Masih banyak pihak yang telah membantu penulis, namun tidak mungkin semuanya dapat disebutkan satu persatu. Untuk itu setulusnya penulis mohon maaf dan terima kasih. Hanya Allah yang dapat memberi imbalan serta melimpahkan karuniaNYA kepada semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu terselesaikannya program Doktor dan terwujudnya disertasi ini. Penulis juga menyampaikan mohon maaf kepada semua yang terlibat dalam penelitian ini apabila selama penelitian atau bimbingan berlangsung penulis telah berbuat kesalahan yang tak penulis sadari;

Jakarta, 18 Juli 2012

Penulis,

Arwanto

NPM. 0806400610

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Arwanto
NPM : 0806400610
Program Studi : Ilmu Material
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Disertasi

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

Sintesis Komposit Hybrid Glass/Epoxy-MWNT dan Analisis dengan Model Mikromekanik

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikannya tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta
Pada tanggal : 18 Juli 2012
Yang menyatakan



(Arwanto)

ABSTRAK

Nama : Arwanto
Program Studi : Ilmu Material
Judul Disertasi : Sintesis Komposit Hybrid Glass/Epoxy-MWNT dan Analisis dengan Model Mikromekanik

Potensi pemanfaatan material komposit untuk pembuatan tabung gas sangat besar, karena memiliki bobot sekitar 70% lebih ringan dibandingkan tabung baja dan 30 – 50% lebih ringan dibanding tabung dari Aluminium. Carbon nanotube (CNT) sejak ditemukan pertama kali oleh Iijima pada tahun 1991 telah banyak dimanfaatkan untuk meningkatkan kekuatan struktur komposit. Potensi ini dapat dimanfaatkan untuk peningkatan kekuatan pada disain tabung komposit. Pemanfaatan CNT pada komposit *glassfiber reinforced polymer* akan memiliki sifat mekanik yang berbeda. Dalam penelitian ini dilakukan eksperimen pembuatan sampel komposit laminasi menggunakan teknik *handly up*. Material yang digunakan adalah Epoxy sebagai matrik, serat Glass dan MWNT sebagai penguat Untuk mngurangi terjadinya void, digunakan metode RTVBM (*Room Temperature Vaccum Bag Moulding*). Variasi Penambahan MWNT dilakukan untuk melihat pengaruhnya terhadap sifat mekanik komposit. Disamping eksperimen dalam penelitian ini juga dikembangkan model mikromekanik komposit hybrid (Glass/Epoxy – MWNT) yang akan digunakan dalam menganalisis hasil eksperimen. Model juga dapat digunakan untuk memprediksi sifat mekanik komposit hybrid. Pengembangan model didasarkan pada Model ROM dan persamaan Halpin – TSai. Pada bagian akhir penelitian dilakukan simulasi disain lapisan tabung untuk melihat pengaruh penambahan MWNT dan untuk mendapatkan disain lapisan yang dapat memenuhi persyaratan tabung gas. Hasil eksperimen memperlihatkan penambahan MWNT dapat meningkatkan sifat mekanik komposit. Penambahan 0,1% berat MWNT dapat meningkatkan Kekuatan tarik mencapai rata-rata 91% dan modulus elastisitas 42%. Pengaruh penambahan MWNT hanya terjadi pada penambahan MWNT maksimum 0,3% berat. Penambahan MWNT di atas 0,3% tidak banyak berpengaruh bahkan cenderung menurun pada penambahan MWNT 1,0% berat. Validasi model secara teoritis menunjukkan model sangat valid untuk digunakan. Begitu pula perbandingan model dengan data eksperimen menunjukkan tingkat kecocokan yang sangat tinggi. Simulasi disain lapisan tabung menunjukkan, komposit laminasi dapat memenuhi syarat untuk pembuatan tabung, yaitu dengan kekuatan 0,29 GPa jauh lebih dari persyatan 0,003 GPa. Kemampuan menahan tekanan dapat mencapai 0,011 GPa, sementara persyaratannya 0,008 GPa dengan jumlah lapisan tabung 6 Ply. Jadi penambahan MWNT dapat membantu meningkatkan kinerja dari komposit. Model mikromekanik komposit hybrid dapat digunakan untuk membantu disain lapisan tabung.

Kata Kunci:

Komposit Hybrid, *Carbon Nanotube*, Model Mikromekanik, Tabung Gas

ABSTRACT

Name : Arwanto
Study Program : Material Science
Title : Synthesis Composite Hybrid (Glass/Epoxy-MWNT) and Analysis with Micromechanic Model

Potential use of composite materials for the manufacture of gas cylinders is enormous, because it weight about 70% lighter than steel and 30-50% lighter than aluminum. The discovery of Carbon nanotubes (CNTs) by Iijima in 1991 has brought the material technology into the era of nanotechnology. Utilization of CNTs as a reinforcement component has been chosen in order to improve the mechanical properties of the composite materials. This potential can be exploited to increase the strength of the composite tube design. Utilization of CNTs in glassfiber reinforced polymer composites will have different mechanical properties. In this study, laminated composite is manufactured by using the handly up method, and material to be used are, Epoxy as a matrix, MWNT and Glass fibers as reinforcement. RTVBM (Room Temperature Vacuum Bag Moulding) method was used to reduce the occurrence of voids. The addition of MWNT was done to see its effect on mechanical properties of composites. This study also developed a micromechanical model of hybrid composites (Glass / Epoxy - MWNT) to be used for analyzing experimental results. The model can also be used to predict the mechanical properties of hybrid composites. The development of the model is based on the ROM model and Halpin - Tsai equations. The study carried out simulations for the design of the LPG tube layer. The effect of MWNT on the design of the LPG tube layer was also studied. Experiment results showed, that the effect of MWNT can improve the mechanical properties of composites. The addition of 0.1 wt% MWNT can improve the tensile strength reached an average of 91% and 42% modulus of elasticity. Effect of the addition of MWNT occurs only in the addition of a maximum of 0.3 wt% MWNT. The addition of MWNT above 0.3% did not have much effect even it tends to decrease on addition of 1.0 wt% MWNT. Theoretically, modification of micromechanic model showed that the model is valid for use. Similarly, comparison of the model with experimental data shows a very high degree of similarity. Based on simulation result, the composite laminate can qualify for the manufacture of tubes, by tensile strength of 0.29 GPa which is much more than 0.003 GPa on its requirement. The ability to withstand the pressure can reach 0.011 GPa, while its requirements is 0.008 GPa. with the number of layers 6 Ply. Thus the addition of MWNT can help improve the performance of the composites. Micromechanical models of composite Hybrid can be used to help design the tube layer.

Keyword:

Composite Hybrid, Carbon Nanotube, Micromechanic model, LPG Tube

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
UNGKAPAN TERIMA KASIH	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	viii
ABSTRAK	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR NOTASI	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xx
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	5
1.3. Pembatasan Masalah	5
1.4. Tujuan Penelitian	6
1.5. Hipotesis Penelitian	6
1.6. Manfaat Penelitian	6
1.7. Sistematika Penulisan	6
BAB II. TINJAUAN TEORI	
2.1. Spesifikasi Teknis Tabung LPG	8
2.2. Komposit	8
2.2.1. Matrik	9
2.2.2. Serat	13
2.3. Carbon Nanotube	14
2.3.1. Struktur	14
2.3.2. Sifat Mekanik	16
2.4. Model Mikromekanik	19
2.4.1. Perkembangan Model	19
2.4.2. Rule of Mixture	22
2.4.3. Halpin - TSai Equation	26
2.5. <i>Classical Lamination Theory</i>	28
2.6. Delaminasi	30
BAB III. METODOLOGI	
3.1. Bahan dan Peralatan	32
3.2. Preparasi Sample	33
3.2.1. Sampel Casting	33
3.2.2. Sampel Laminasi	34
3.2.3. Sampel Laminasi dengan MWNT	35
3.3. Karakterisasi Sampel	36

3.3.1.	Analisis Fraksi	36
3.3.2.	Uji Mekanik	37
3.4.	Pengembangan Model	42
3.5.	Instrumen Pengujian	44
3.5.1.	<i>Universal Testing Machine</i>	44
3.5.2.	<i>Desiccator</i>	45
3.5.3.	Tungku	46
BAB IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1.	Persiapan Pengujian	47
4.1.1.	Tinjauan Karakteristik Bahan Dasar	47
4.1.2.	Preparasi Sampel Uji	49
4.1.3.	Perhitungan Fraksi Volum	51
4.2.	Hasil Uji Tarik	52
4.2.1.	Sampel Komposit Laminasi	52
4.2.2.	Sampel Komposit Hybrid	54
4.3.	Analisis Hasil Eksperimen	54
4.3.1.	Kekuatan Tarik	55
4.3.2.	Modulus Elastisitas	60
4.4.	Pengembangan Model Mikromekanik	65
4.4.1.	Model I	66
4.4.2.	Model II : Modifikasi Halpin – TSai	68
4.4.3.	Komparasi Model	72
4.5.	Komparasi Model dengan Hasil Eksperimen	77
4.5.1.	Kekuatan Tarik	77
4.5.2.	Modulus Elastisitas	79
4.6.	Komparasi Dengan Model Lain	81
4.6.1.	Komposit Epoxy - MWNT	81
4.6.2.	Komposit Epoxy - Glass	83
4.7.	Simulasi Disain Lapisan Tabung	84
4.7.1.	Berdasarkan Model Mikromekanik	87
4.7.2.	Berdasarkan Eksperimen	89
4.7.3.	Komparasi Basis 1 lembar dan 2 Lembar	92
BAB V.	KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1.	Kesimpulan	97
5.2.	Saran	98
DAFTAR REFERENSI		99

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Perbandingan Sifat Mekanik Beberapa Matrik	10
Tabel 2.2.	Klasifikasi <i>Unsaturated Polyesther Resin</i>	10
Tabel 2.3.	Perbandingan Karakteristik Epoxy dan Polyester Resin	12
Tabel 2.4.	Perbandingan Sifat Mekanik Beberapa Serat	13
Tabel 2.5.	<i>Woven Roving Constructions and Properties</i>	13
Tabel 2.6.	Perbandingan Sifat Mekanik CNT dengan Material Lain	19
Tabel 2.7.	<i>orientation efficiency factor - η_0</i>	25
Tabel 2.8.	Parameter Halpin – TSai	27
Tabel 4.1.	Karakteristik Bahan Dasar	47
Tabel 4.2.	Kombinasi Variasi Preparasi Sampel Uji	50
Tabel 4.3.	Hasil Perhitungan Fraksi Sampel Uji	51
Tabel 4.4.	Hasil Uji Tarik Sampel Neat Epoxy dan Laminasi Tanpa MWNT	52
Tabel 4.5.	Hasil Uji Tarik Sampel Laminasi dan Penambahan MWNT0,1%	52
Tabel 4.6.	Hasil Uji Tarik Sampel Laminasi (2 Lembar) dan Penambahan MWNT	54
Tabel 4.7.	Hasil Uji Tarik Sampel Laminasi (3 Lembar) dan Penambahan MWNT	54
Tabel 4.8.	Data kekuatan tarik Berdasarkan Fraksi MWNT dan Serat Glass	55
Tabel 4.9.	Data Kekuatan Tarik Berdasarkan Fraksi MWNT dan Glass $0,30 \pm 0,03$	56
Tabel 4.10.	Data Modulus Elastisitas Berdasarkan Fraksi MWNT dan Serat Glass	61
Tabel 4.11.	Data Modulus Berdasarkan Fraksi MWNT dan Glass $0,30 \pm 0,03$	62
Tabel 4.12.	Simulasi data untuk pengujian model pada kondisi $V_{CNT} = 0$	73
Tabel 4.13.	Simulasi data untuk pengujian model pada kondisi $V_{glass} = 0$	74
Tabel 4.14.	Simulasi data untuk pengujian model pada kondisi $V_{glass} \neq 0; V_{CNT} \neq 0$	76
Tabel 4.15.	Kekuatan tarik Komposit Hybrid Hasil Eksperimen, Perhitungan Model I dan Model II	77
Tabel 4.16.	Modulus Elastisitas Komposit Hybrid Hasil Eksperimen, Perhitungan Model I dan Model II	79
Tabel 4.17.	Modulus Elastisitas Komposit Epoxy – MWNT (Tanpa Glass) Hasil Eksperimen, Perhitungan Model I, Model II dan Model Lain	82
Tabel 4.18.	Modulus Elastisitas Komposit Epoxy – Glass (Tanpa MWNT) Hasil Eksperimen, Perhitungan Model I, Model II dan Model Lain	83
Tabel 4.19.	Komposit Hybrid Basis Perhitungan Simulasi (1Lembar)	87

Tabel 4.20.	Kemampuan menahan tekanan (P) Komposit Laminasi variasi jumlah lapisan dan %MWNT menurut Model I dan Model II (Basis 1 Lembar)	87
Tabel 4.21.	Komposit Hybrid Basis Perhitungan Simulasi (Hasil Eksperimen, 1 Lembar)	89
Tabel 4.22.	Kemampuan menahan tekanan (P) Komposit Hybrid variasi jumlah lapisan dan %MWNT berdasar Hasil Eksperimen (Basis 1 Lembar)	89
Tabel 4.23.	Komposit Hybrid Basis Perhitungan Simulasi (Hasil Eksperimen, Basis 2 Lembar)	90
Tabel 4.24.	Kemampuan menahan tekanan Komposit Hybrid variasi jumlah lapisan dan %MWNT berdasar Hasil Eksperimen	91
Tabel 4.25.	Perbandingan Kemampuan Menahan Tekanan Basis 1 Lembar dan 2 Lembar	92
Tabel 4.26.	Perbandingan Sifat Mekanik Spesifik, Kemampuan Menahan Tekanan untuk 8 Lapis antara Basis 1 Lembar dan 2 Lembar pada kondisi MWNT 0%	93
Tabel 4.27.	Perbandingan Sifat Mekanik Spesifik, Kemampuan Menahan Tekanan untuk 8 Lapis antara Basis 1 Lembar dan 2 Lembar pada kondisi MWNT 0,1%	95



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Klasifikasi Komposit	9
Gambar 2.2.	Mekanisme Pembentukan <i>network crosslinked</i>	12
Gambar 2.3.	Struktur CNT	14
Gambar 2.4.	Unit sel struktur armchair (a) dan zig-zag (b)	15
Gambar 2.5.	<i>Multi Walled Carbon Nanotube</i> (MWNT)	15
Gambar 2.6.	Perbandingan Sifat Mekanik dan Densiti CNT	16
Gambar 2.7.	Modulus dan Kekuatan CNT dalam Komposit	16
Gambar 2.8.	Pengaruh Perlakuan Dispersi terhadap Kekuatan tarik Komposit CNT/Epoxy.	17
Gambar 2.9.	Hubungan Luas Permukaan Kontak dengan Fraksi Volum Fiber	18
Gambar 2.10.	Elemen Komposit dengan Gaya yang Bekerja	22
Gambar 2.11	Mekanisme Delaminasi	31
Gambar 3.1.	Bentuk Spesimen Pengujian Sifat Mekanik	33
Gambar 3.2.	Proses <i>Casting</i> Epoxy Resin	34
Gambar 3.3.	Setting Temperatur dan Waktu Proses Oven	34
Gambar 3.4.	Gambaran urutan Proses RTVBM	35
Gambar 3.5.	Komposit Laminasi + MWNT	36
Gambar 3.6	Kalibrasi <i>Extensiometer</i> dan Proses Pengujian	37
Gambar 3.7	Diagram Alir Perhitungan Fraksi	38
Gambar 3.8	Preparasi dan Karakterisasi <i>Casting</i>	39
Gambar 3.9	Preparasi dan Karakterisasi Komposit Laminasi	40
Gambar 3.10.	Preparasi dan Karakterisasi Komposit Hybrid	41
Gambar 3.11.	Diagram Alir Pengembangan Model	42
Gambar 3.12.	Diagram Alir Validasi Model dengan Data Dummy	43
Gambar 3.13.	Diagram Alir Validasi Model dengan Data Eksperimen	44
Gambar 3.14.	Desiccator	46
Gambar 3.15.	Tungku	46
Gambar 4.1.	Grafik Strain – Stress Epoxy dan Serat	48
Gambar 4.2.	Fraksi Volum minimum Serat Glass	49
Gambar 4.3.	Sampel Casting	50
Gambar 4.4.	Sampel Laminasi	50
Gambar 4.5.	Berat Cawan, Sampel sebelum dan setelah dibakar	51
Gambar 4.6.	Sampel setelah di Uji	52
Gambar 4.7.	Perbandingan Strength antara Penambahan MWNT dan Tanpa MWNT, dengan variasi Lapisan Glass	53
Gambar 4.8.	Perbandingan Modulus antara Penambahan MWNT dan Tanpa MWNT, dengan variasi Lapisan Glass	53
Gambar 4.9.	Perbandingan Kekuatan Tarik Komposit Laminasi Tanpa MWNT dan dengan Penambahan MWNT	56
Gambar 4.10.	Pengaruh MWNT terhadap Kekuatan Tarik Komposit Laminasi	57

Gambar 4.11	Pengaruh % Berat CNT terhadap Kekuatan Tarik	58
Gambar 4.12	Pengaruh % Berat CNT terhadap Sifat Mekanik	58
Gambar 4.13.	Perbandingan Persentase peningkatan Kekuatan Tarik pada Penambahan MWNT 0,1%	59
Gambar 4.14.	Perbandingan Persentase peningkatan Kekuatan Tarik pada Penambahan MWNT 0,3%	60
Gambar 4.15.	Perbandingan Persentase peningkatan Kekuatan Tarik pada Penambahan MWNT 1,0 %	60
Gambar 4.16.	Perbandingan Modulus Komposit Laminasi Tanpa MWNT dan dengan Penambahan MWNT	62
Gambar 4.17.	Pengaruh MWNT terhadap Modulus Elastisitas Komposit Laminasi	63
Gambar 4.18.	Perbandingan Persentase peningkatan Modulus pada Penambahan MWNT 0,1%	64
Gambar 4.19.	Perbandingan Persentase peningkatan Modulus pada Penambahan MWNT 0,3%	65
Gambar 4.20.	Model I (<i>hybride Composite</i>)	66
Gambar 4.21.	Grafik Simulasi data pengujian model pada kondisi $V_{CNT} = 0$	73
Gambar 4.22.	Grafik Simulasi data pengujian model pada kondisi $V_{glass} = 0$	75
Gambar 4.23	Grafik Simulasi data pengujian model pada kondisi $V_{glass} \neq 0; V_{CNT} \neq 0$	76
Gambar 4.24	Perbandingan Kekuatan Tarik Hasil Eksperimen dengan Model I	77
Gambar 4.25	Perbandingan Kekuatan Tarik Hasil Eksperimen dengan Model II	77
Gambar 4.26	Perbandingan Tensile Strength Hasil Eksperimen dengan Model I dan Model II	78
Gambar 4.27	Perbandingan Modulus Elastisitas Komposit Hybrid Hasil Eksperimen dengan Model I	80
Gambar 4.28	Perbandingan Modulus Elastisitas Komposit Hybrid Hasil Eksperimen dengan Model II	80
Gambar 4.29	Perbandingan Modulus Elastisitas Komposit Hybrid Hasil Eksperimen dengan Model I dan Model II	81
Gambar 4.30	Perbandingan Modulus Komposit Epoxy – MWNT (Tanpa Glass) antara Model I, Model II dan Model Lain	82
Gambar 4.31	Perbandingan Modulus Komposit Epoxy – Glass (Tanpa MWNT) antara Model I, Model II dan Model Lain	84
Gambar 4.32	Diagram Alir Simulasi Disain Lapisan Tabung	85
Gambar 4.33	Perbandingan Kemampuan menahan tekanan Komposit Hybrid (Basis 1Lembar) menurut Model I	88
Gambar 4.34	Perbandingan Kemampuan menahan tekanan Komposit Hybrid (Basis 1Lembar) menurut Model II	88
Gambar 4.35	Perbandingan Kemampuan menahan tekanan	90

	Komposit Hybrid (Basis 1 Lembar) menurut Hasil Eksperimen	
Gambar 4.36	Perbandingan Kemampuan menahan tekanan Komposit Hybrid (Basis 2 Lembar) berdasar Hasil Eksperimen	91
Gambar 4.37	Perbandingan Kemampuan Menahan Tekanan Basis 1 Lembar dengan 2 Lembar	93
Gambar 4.38	Perbandingan Sifat Mekanik Spesifik antara Basis 1 Lembar dan Basis 2 Lembar Pada Kondisi MWNT 0%	94
Gambar 4.39	Perbandingan Sifat Kemampuan Menahan Tekanan (P) antara Basis 1 Lembar dan Basis 2 Lembar Pada Kondisi MWNT 0%	95
Gambar 4.40	Perbandingan Sifat Mekanik Spesifik antara Basis 1 Lembar dan Basis 2 Lembar Pada Kondisi MWNT 0,1%	96
Gambar 4.41	Perbandingan Sifat Kemampuan Menahan Tekanan (P) antara Basis 1 Lembar dan Basis 2 Lembar Pada Kondisi MWNT 0,1%	96

DAFTAR NOTASI

a	<i>Crack length</i>
n	Jumlah lapisan laminasi
p	% berat MWNT terhadap Epoxy
s	<i>crowding factor</i>
t	tebal total lapisan laminasi
t_k	tebal tiap lapisan laminasi
w_1	Berat Cawan + Sampel
w_2	Berat Cawan + Sampel setelah dibakar
z	koordinat antar lapisan laminasi
A_m	luas matrik
B	Lebar spesimen
L	panjang awal
E	<i>Flexural Modulus</i>
E_{11}	Modulus elastisitas arah longitudinal
E_{12}	Modulus elastisitas arah transversal
E_c	Modulus elastisitas komposit
E_f	Modulus elastisitas fiber
E_m	Modulus elastisitas matrik
F	<i>Load</i>
G_{12}	Modulus geser
M	<i>resultan momen</i>
N	<i>resultan stress</i>
P	Sifat mekanik (kekuatan, modulus) komposit
P_f	Sifat mekanik (kekuatan, modulus) fiber
P_m	Sifat mekanik (strength, modulus) matrik
S_C	Kekuatan tarik Komposit
S_f	Kekuatan tarik fiber
S_m	Kekuatan tarik matrik
S_{mf}	Kekuatan tarik matrik berdasarkan strain fiber
V_f	Fraksi volum fiber
$V_{f \max}$	fraksi volum fiber maksimum
V_m	Fraksi volum matrik
V_p	fraksi volum partikel
$V_{p \max}$	fraksi volum partikel maksimum
W_{CNT}	fraksi berat CNT (MWNT)

W_f	fraksi berat fiber (Glass)
W_m	fraksi berat matrik (Epoxy)
χ_p	<i>particle strengthening factor.</i>
ΔL	perubahan panjang
δ	<i>displacement</i>
ϵ_{11}	regangan (strain) pada arah longitudinal
ϵ_f	regangan (strain) dari fiber
ϵ_m	regangan (strain) dari matrik
ϵ^o	midplane strain
η_L	faktor efisiensi panjang dari fiber (<i>length efficiency factor</i>)
η_o	<i>orientation efficiency factor</i>
κ	<i>Curvature</i>
κ_l	parameter efisiensi panjang
ρ	<i>aspect ratio</i>
σ_{11}	Kekuatan tarik arah longitudinal
σ_f	Kekuatan tarik fiber
σ_m	Kekuatan tarik matrik
Superscript M	indikasi perubahan kelembaban
Superscript T	indikasi perubahan temperatur
u_m	<i>poisson ratio</i> matrik
u_{12}	<i>poisson ratio</i>
ψ	Konstanta Nielsen
θ	Sudut orientasi

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Validasi Teoritis Model I	108
Lampiran 2.	Validasi Teoritis Model II	110
Lampiran 3.	Variasi Pembuatan Sampel	112
Lampiran 4.	Perhitungan Fraksi Pembuatan Sampel	116
Lampiran 5.	Data <i>Burn Off Test</i>	117
Lampiran 6.	Data Rata-rata <i>Burn Off Test</i>	119
Lampiran 7.	Data Uji Tarik	120
Lampiran 8.	Data Densiti	124



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Fluktuasi harga minyak dunia dapat mengganggu stabilitas anggaran negara terutama bagi kebutuhan anggaran energi. Fluktuasi harga minyak bahkan sempat melampaui lebih dari US \$ 120 per barel pada medio tahun 2008 membuat pemerintah harus mengambil kebijakan-kebijakan yang dapat mengeliminir kebutuhan anggaran energi. Kebijakan yang diambil pemerintah dalam mengurangi beban anggaran adalah dengan mengurangi subsidi pemerintah terhadap energi. Subsidi terbesar bagi sektor energi dialokasikan untuk minyak tanah, energi yang kebanyakan digunakan oleh masyarakat Indonesia di sektor menengah ke bawah.

Kebijakan Energi Nasional antara lain melalui diversifikasi energi untuk mengurangi ketergantungan terhadap Bahan Bakar Minyak khususnya minyak tanah, untuk dialihkan ke LPG. Penggunaan LPG dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi yang cukup besar karena nilai kalor efektif LPG lebih tinggi dibandingkan minyak tanah dan mempunyai gas buang yang lebih bersih dan ramah lingkungan (ESDM, 2007). Pelaksanaan konversi minyak tanah ke LPG mengalami permasalahan yang cukup menghambat. Banyak masyarakat berpendapat beratnya tabung gas – walaupun untuk ukuran 3 kg – menjadi permasalahan yang menghambat minat masyarakat beralih dari minyak tanah ke LPG. Diluar permasalahan yang terkait dengan masyarakat, penyediaan tabung gas membutuhkan biaya pembuatan yang cukup besar.

Penggunaan komposit untuk keperluan berbagai komponen peralatan di berbagai industri terus dikembangkan. Hal ini dikarenakan kelebihan yang dimiliki komposit antara lain ringan dengan kekuatan yang dapat bersaing dengan material lain. Tabung komposit memiliki bobot sekitar 70% lebih ringan dibandingkan tabung baja dan 30 – 50% lebih ringan dibanding tabung dari aluminium (Gheshlaghi, 2006). Komposit itu sendiri merupakan bahan paduan atau kombinasi dari bahan-bahan yang secara kimia dan sifat mekaniknya berbeda.

Komposit paling sedikit terdiri dari dua komponen yaitu : serat sebagai penguat dan matrik (resin) sebagai pengikat. Dalam hal ini ketahanan terhadap bahan kimia dan lingkungan, jenis matrik memegang peranan yang sangat menentukan. Secara umum jika dibandingkan dengan material lain misalnya logam, komposit lebih tahan terhadap serangan pengikisan/korosi. Pengembangan komposit terus dilakukan karena beberapa keunggulan yang dimilikinya, antara lain (Belofsky, 1995):

- Rasio kekuatan dengan berat yang sangat tinggi
- Bentuk dimensi yang stabil dan rentang temperatur operasi yang cukup besar
- Dapat dibuat ukuran besar dan bentuk yang kompleks
- Tahan terhadap lingkungan yang korosif dan cuaca
- Penampakan dapat disesuaikan keinginan dengan biaya sedikit
- Mudah diperbaiki

Pemanfaatan komposit sebagai material dasar pembuatan tangki penyimpanan bahan kimia sudah berkembang sejak tahun 1960an. Disain pembuatan tangki penyimpanan sangat bervariasi tergantung dengan kebutuhan dan pemanfaatannya.

Fiber Reinforced Plastic (FRP) merupakan salah satu jenis komposit yang banyak digunakan untuk aplikasi pembuatan tangki. Kekuatan FRP sangat ditentukan oleh fiber. Performan dari FRP sangat bergantung pada sifat dari fiber, fraksi volume fiber dan juga sifat dari *interface* fiber – matrik. Penelitian menyangkut fraksi volum fiber kaitan dengan peningkatan sifat mekanik dari komposit juga telah dilakukan. Suatu penelitian menunjukkan bahwa kekuatan fiber meningkat dengan meningkatnya fraksi volum fiber sampai dengan 52%. Lebih dari 55% fraksi volum fiber akan mengakibatkan menurunnya nilai *strain to failure* (Cohen, 2001). Fraksi volum fiber dapat pula meningkatkan kekuatan *interface* matrik – fiber yang dapat digambarkan dengan meningkatnya kekuatan tarik transversal. Dalam penelitian tersebut pengukuran kekuatan *interface* matrik – fiber menggunakan teknik *vibration damping* yang merupakan teknik pengujian tanpa merusak sample untuk evaluasi *interface* (Gu, 2000).

Dalam upaya peningkatan performan tabung komposit, penelitian mengenai orientasi sudut dalam proses *filament winding* seharusnya juga dilakukan. Telah dilakukan penelitian mengenai beberapa variabel yang dapat mempengaruhi penentuan sudut orientasi yang optimum pada tabung komposit. Variabel tersebut adalah kekuatan tarik transversal, modulus fiber, modulus dari matrik. Disamping itu besarnya tekanan dan gaya aksial yang bekerja, dapat mempengaruhi kondisi *winding angle* yang optimum (Beakou, 2001). Orientasi sudut dalam proses *filament winding* juga menjadi variabel yang sangat dipertimbangkan dalam melakukan analisis struktur komposit terutama terkait dengan ketebalan dari komposit laminasi (Jae-Sung, 2002).

Permasalahan yang sangat penting dalam pembuatan tabung gas adalah bagaimana agar material yang digunakan mampu menahan tekanan yang ditimbulkan oleh gas yang ada di dalamnya. Dalam pemilihan dan disain tabung gas komposit, dipandang perlu memperhatikan sifat kekuatan tarik dan modulus elastisitas dari material yang akan digunakan.

Kekuatan tarik dipandang perlu karena untuk sebuah material kekuatan tarik merupakan sifat batas maksimum yang dapat ditahan oleh suatu material dalam menerima gaya. Oleh karena itu kekuatan tarik material yang dipilih harus jauh lebih besar dari tekanan yang ditimbulkan oleh gas. Menurut data pada dokumen *Blueprint Program Pengalihan Minyak Tanah Ke LPG* tekanan minimal yang harus mampu ditahan untuk tabung LPG ukuran 3 adalah 80 bar (ESDM, 2007). Begitu pula Ketentuan Menteri Perindustrian tekanan minimal yang harus mampu ditahan adalah sebesar 80 kg/cm^2 (Departemen Perindustrian, 2007).

Modulus elastisitas dipandang perlu terkait dengan besaran regangan maksimum yang masih dapat ditahan sebelum suatu material mengalami kerusakan. Dalam tabung gas yang menekan akan menimbulkan regangan sebelum terjadi *failure*, dalam hal ini regangan tidak boleh melebihi batas maksimal yang ditentukan. Analisis kemampuan menahan tekanan pada suatu disain lapisan tabung menggunakan batasan maksimum regangan yang diijinkan sebagai dasar perhitungan.

Carbon nanotube (CNT) sejak ditemukan pertama kali oleh Iijima, pada tahun 1991 telah banyak dimanfaatkan untuk meningkatkan kekuatan struktur

komposit. Potensi ini dapat dimanfaatkan untuk peningkatan kekuatan pada desain tabung komposit. Penelitian terkait dengan pemanfaatan CNT untuk meningkatkan sifat mekanik komposit polimer telah banyak dilakukan. Omidi (2010) melakukan penelitian penambahan sedikit MWNT (*Multi Walled Carbon Nanotube*) dapat meningkatkan sifat mekanik komposit MWNT/Epoxy secara signifikan. Montazeri (2010) melakukan penelitian hubungan sifat mekanik komposit MWNT/Epoxy terhadap jumlah persen berat MWNT yang ditambahkan, dengan menggunakan basis analisis model persamaan Halpin – TSai. Shao (2008) mendemonstrasikan pengaruh ukuran partikel CNT terhadap hubungan antara sifat mekanik komposit dengan persen berat CNT yang ditambahkan. Penelitian serupa dengan tujuan mempelajari model mikromekanik terhadap nanokomposit dengan matrik (resin) yang berbeda diantaranya HDPE (Kanagaraj, 2007) dan Phenolic (Nyan-Hwa, 2008). Penelitian yang mengemukakan *interfacial bonding* dan *fracture toughness* juga telah banyak dilakukan (Lachman, 2010; Wen-Xue, 2009; Seyhan, 2008; Davis, 2010; Romhany, 2009; Shimamura, 2008). Romhany (2009) dalam penelitiannya menemukan nilai *interlaminar fracture toughness* komposit meningkat maksimum 13% dengan penambahan 0,3% berat CNT. Penambahan *Vapor grown carbon fiber* (VGCF) meningkatkan *bending stiffness*, tetapi tidak berpengaruh terhadap *bending strength* dan *fracture toughness* setidaknya sampai penambahan 10% berat (Shimamura, 2008).

Pemanfaatan sifat mekanik dari CNT akan meningkatkan sifat mekanik dari komposit untuk tabung gas. Penambahan CNT pada komposit *glassfiber reinforced polymer* akan memiliki perilaku sifat mekanik yang berbeda. Untuk itu akan dilakukan penelitian sifat mekanik komposit Glass/Epoxy terhadap pengaruh penambahan CNT. Dengan penelitian ini akan dapat dihasilkan perilaku dan karakteristik komposit hybrid dengan komponen matrik Epoxy yang menggunakan serat Glass dan CNT. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan pengembangan model mikromekanik untuk komposit hybrid (Glass/Epoxy–CNT). Dengan Model tersebut dapat dimanfaatkan untuk memprediksi sifat mekanik komposit hybrid. Pengembangan model dilakukan dengan pendekatan teoritis yang berbasis pada model yang sudah ada yaitu *Halpin – TSai Equation* dan *Rule of Mixture* (ROM).

Penelitian diarahkan untuk mendemonstrasikan dan memformulasikan hubungan antara sifat mekanik Glass/Epoxy terhadap penambahan CNT berdasarkan model yang dikembangkan. Selanjutnya pada tahap aplikasi komposit hybrid untuk tabung gas, dilakukan analisis perbandingan antara komposit (tanpa CNT) dengan komposit hybrid. Analisis dilakukan hanya pada tataran teoritis perbandingan nilai sifat mekanik terhadap disain lapisan tabung gas. Hal ini dilakukan untuk menunjukkan keunggulan komposit hybrid – yang memanfaatkan CNT – terhadap komposit (tanpa CNT) yang ditinjau dari aspek disain lapisan tabung gas komposit. Disain lapisan tabung komposit dilakukan secara teoritis dengan berdasarkan pada *Classical Lamination Theory*. Dari sisi sifat mekanik fokus penelitian hanya diarahkan pada sifat Kekuatan tarik dan Modulus Elastisitas.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimana formulasi hubungan sifat mekanik Glass/Epoxy terhadap penambahan CNT ?
2. Apa perbedaan formulasi hubungan sifat mekanik Glass/Epoxy terhadap penambahan CNT dibandingkan persamaan Halpin-TSai?
3. Apa perbedaan formulasi hubungan sifat mekanik Glass/Epoxy terhadap penambahan CNT dibandingkan model Rule of Mixture?

1.3. Pembatasan Masalah

1. Bahan komposit (matrik dan serat) bersifat isotropik
2. Peran penambahan CNT dilihat dari aspek sifat mekaniknya.
3. Evaluasi sifat mekanik pada Kekuatan tarik dan Modulus Elastisitas
4. Spesimen uji dalam bentuk panel laminasi
5. Analisis diarahkan untuk memenuhi spesifikasi tabung gas bertekanan
6. Eksperimen dan analisis dilakukan untuk CNT satu jenis nilai l/d.

Dalam pengembangan model, komposit laminasi diasumsikan :

1. Serat (*fiber*) tersusun rapi.
2. Matriknya homogen dan tidak ada *void*, *crack* ataupun cacat yang lain.
3. komposit secara makro bersifat homogen
4. dispersi CNT dalam matrik bersifat homogen

1.4. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis faktor yang berpengaruh terhadap hubungan sifat mekanik Glass/Epoxy terhadap penambahan CNT.
2. Mengembangkan model mikromekanik komposit hybrid (Glass/Epoxy - CNT) dengan berbasis pada persamaan Halpin – TSai dan model rule of mixture (ROM)
3. Mendapatkan material yang memenuhi syarat untuk tabung gas bertekanan

1.5. Hipotesis Penelitian

Berdasarkan latar belakang masalah dan tujuan penelitian maka diajukan hipotesa penelitian sebagai berikut :

1. Penambahan CNT pada komposit akan meningkatkan sifat mekanik, sehingga memenuhi syarat sebagai bahan untuk pembuatan tabung gas
2. Prediksi sifat mekanik komposit hybrid (Glass/Epoxy – CNT) dapat ditentukan dengan mengembangkan model mikromekanik

1.6. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan bermanfaat antara lain :

1. Mengembangkan studi tentang komposit polimer, khusus *Fibre Reinforced Plastic* (FRP)
2. Mengembangkan model mikromekanik komposit hybrid (Glass/Epoxy – CNT)
3. Memberikan alternatif material untuk pembuatan tabung gas

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan disertasi mengikuti alur sebagai berikut :

- BAB 1. Pendahuluan, berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, hipotesis penelitian dan sistematika penulisan.
- BAB 2. Tinjauan Teori, berisi tentang spesifikasi teknis tabung gas, komposit, *carbon nanotube*, model mikromekanik, perkembangan model, *classical lamination theory*, dan delaminasi
- BAB 3. Metodologi, berisi tentang bahan dan peralatan, sintesis dan karakterisasi sampel komposit laminasi, pengembangan model mikromekanik dan simulasi disain lapisan tabung
- BAB 4. Hasil dan Pembahasan, berisi tentang tinjauan karakteristik bahan dasar, preparasi sampel uji, hasil pengujian, pengembangan model mikromekanik, komparasi model – hasil eksperimen, komparasi dengan model lain, simulasi disain tabung.
- BAB 5. Kesimpulan dan Saran

BAB 2 TINJAUAN TEORI

2.1. Spesifikasi Teknis Tabung LPG

Tabung LPG sebelum digunakan/dipasarkan harus telah diuji oleh :

1. Pabrik yang membuatnya, sesuai norma-norma ICC. 4. B. 240 (*Interstate Commerce Commission*).
2. Dinas Pembinaan Norma-Norma Keselamatan Kerja.

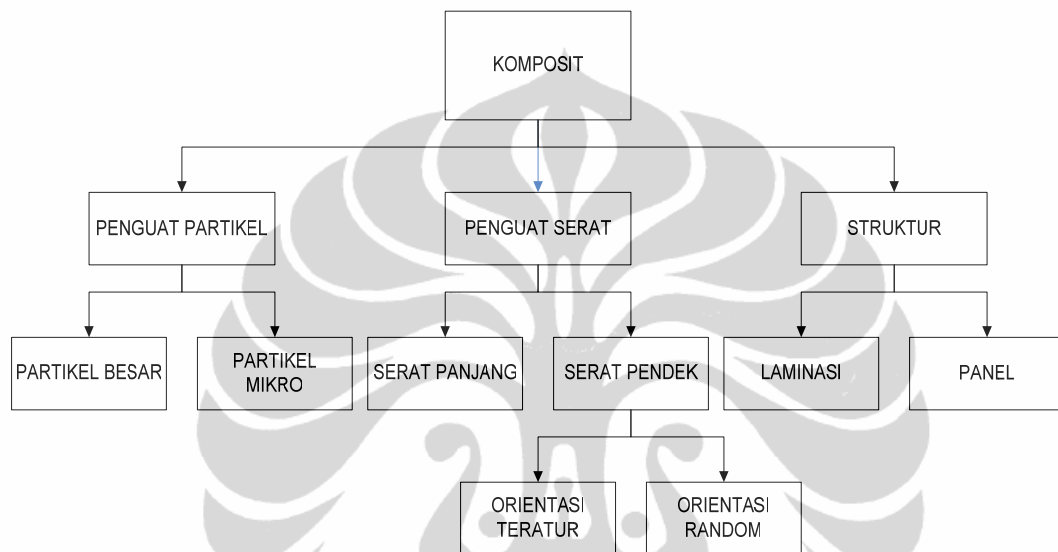
Setiap tabung LPG harus mampu menahan tekanan sampai sebesar 80-130 Kg/cm². Hal ini perlu demi keamanan pemakai bahan bakar gas LPG. Dalam Lampiran V Peraturan Menteri Perindustrian Nomor: 04/M-IND/PER/1/2007, tanggal 12 Januari 2007 tentang Spesifikasi Teknis Tabung Baja LPG, dinyatakan bahwa ketahanan pecah (uji bursting) untuk tabung 3 – 15 kg harus lebih besar dari 110 kg/cm² (Perindustrian, 2007). Tekanan uap LPG sebesar 4 - 9 Kg/cm². Jadi tabung LPG mempunyai kekuatan 9 kali lipat lebih besar dari tekanan uap LPG sendiri. Ini artinya faktor keamanan terjamin sampai enam kali lipat ("Mengenal Tabung"). Sedang menurut data pada dokumen *Blueprint Program Pengalihan Minyak Tanah Ke LPG* untuk tabung LPG ukuran 3 kg memiliki spesifikasi teknis yang mampu menahan tekanan sampai dengan 80 bar (ESDM, 2007).

Untuk mengetahui ketahanan terhadap kerusakan yang diakibatkan tekanan dari luar (*external pressure*) standar pengujian yang dilakukan adalah ASTM D 2924. Kerusakan yang diakibatkan *external pressure* antara lain : *buckling failure pressure, compressive failure pressure, leaking pressure*. Metode standar lain yang juga harus dilakukan adalah *compressive strength properties* yang dapat dilakukan dengan mengikuti ASTM D 2586.

2.2. Komposit

Komposit didefinisikan sebagai paduan dari kombinasi antara dua atau lebih komponen material untuk menghasilkan suatu karakteristik dan sifat tertentu yang diinginkan. Komposit minimal mengandung serat yang berfungsi sebagai penguat dan matrik sebagai pengikat.

Komposit dapat diklasifikasikan berdasarkan pada kandungan struktur komponen penyusunnya. *Fibrous*, komposit dengan serat sebagai penyusun yang diikat oleh matrik; Partikulat, merupakan komposit dengan partikel sebagai penguat dalam matrik. Komposit dengan polimer sebagai matrik diklasifikasikan seperti Gambar. 2.1.



Gambar 2.1. Klasifikasi Komposit
(Callister, 1994)

FRP merupakan salah satu jenis komposit yang perkembangannya sangat pesat. FRP pertama kali digunakan pada *light airframe structure* yang dikembangkan dan didesain oleh *Wright-Peterson Air Force Base, Structur and Material Laboratory*, Dayton, Ohio, pada tahun 1943 (Lubin, 1982).

2.2.1. Matrik

Berbagai jenis matrik resin banyak tersedia untuk memenuhi persyaratan karakteristik yang dibutuhkan untuk suatu disain, misalnya untuk temperatur tinggi, mudah dalam pemrosesan, keunggulan sifat mekanik. Tabel 2.1. menampilkan beberapa contoh resin sebagai matrik pada komposit.

Tabel 2.1. Perbandingan Sifat Mekanik Beberapa Matrik

	Epoxy	Poliester	Fenol	Poliamida
Densiti (g/cm^3)	1,1 – 1,4	1,1 – 1,5	1,3	1,2 – 1,9
Modulus (GPa)	2,1 – 6,0	1,3 – 4,5	4,4	3 – 3,1
Kekuatan Tarik (MPa)	35 – 90	45 – 85	50 – 60	80 – 190
<i>Fracture Toughness</i>				
K_{Ic} (Mpa $\text{m}^{1/2}$)	0,6 – 1	0,5		
G_{Ic} (kJ/m^2)	0,02			0,3 – 0,39

(Matthews, 1995)

Unsaturated Polyesther Resin

Unsaturated Polyesther Resin (UPR) biasa digunakan pada FRP sebagai matrik. UPR merupakan kombinasi dari gugus reaktif polimer dan gugus reaktif monomer, ditemukan oleh Carleton Ellis pada tahun 1930an (Lubin, 1982). Ellis mengemukakan bahwa UPR dibuat dengan mereaksikan Glikol dengan Maleat Anhidrida yang dapat mengalami proses *curing* membentuk padatan dengan menambahkan peroksida sebagai katalis.

Tabel 2.2. Klasifikasi *Unsaturated Polyesther Resin*

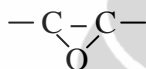
Komponen Pembentuk	Klasifikasi
Ftalat Anhidrida : Dietilen Glikol Ftalat Anhidrida : Etilen Glikol Phthalic Ftalat Anhidrida : Propilen Glikol	Ortoftalat Poliester
Asam Isoftalat : Dietilen Glikol Asam Isoftalat : Etilen Glikol Asam Isoftalat : Propilen Glikol	Isoftalat Poliester
Asam Isoftalat : Neo-Pentil Glikol	Neo Pentil Glikol Poliester (NPG)
Bisphenol	Bisphenol Poliester

(Haris, 1983)

Maleit Anhidrida banyak digunakan pada UPR karena adanya ikatan rangkap yang reaktif. Jenis asam atau Andidrida lain dapat digunakan seperti Asam Isoftalat dan Ftalat Anhidrida untuk menghasilkan atau memodifikasi sifat-sifat yang diinginkan. Tabel 2.2. memperlihatkan klasifikasi UPR berdasarkan komponen penyusunnya. Sifat ketahanan terhadap kimia dari mulai Ortoftalat sampai Bisphenol semakin meningkat.

Epoxy Resin

Epoxy Resin dapat didefinisikan sebagai senyawa yang mengandung dua atau lebih cincin epoxide tiap molekul. Epoxide atau sering disebut sebagai *Glycidyl Ether* mempunyai struktur sebagai berikut :



Epoxy Resin merupakan termasuk jenis matrial matrik terbaik sebagai material pembuatan komposit. Hal ini karena keunggulan yang dimiliki, antara lain (Lubin, 1982):

- Epoxy Resin dapat melekat dengan baik pada berbagai permukaan seperti filler, serat.
- Selain tahan terhadap bahan kimia, Epoxy Resin memiliki sifat insulasi listrik yang baik.

Beberapa keunggulan Epoxy Resin dibandingkan dengan Polyester Resin dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Umumnya senyawa dasar yang digunakan pada pembuatan Epoxy Resin adalah Bisphenol A yang direaksikan dengan Epiklorohidrin. Bispenol itu sendiri merupakan derivatif dari Fenol dan Aseton.

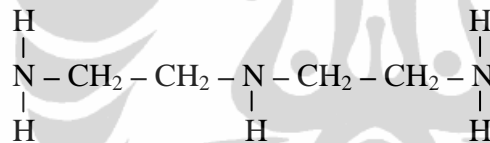
Linier Epoxy Resin berada dalam bentuk *viscous liquid*, dimana viskositasnya tergantung pada derajat polimerisasi. Untuk menghasilkan *Linier Epoxy Resin* dalam bentuk padatan, perlu ditambahkan *curing agent*, sehingga akan terjadi proses polimerisasi dengan hasil *network crosslinked polymer*. Gambaran mekanisme proses *curing* diperlihatkan pada Gambar 2.2.

Tabel 2.3. Perbandingan Karakteristik *Epoxy Resin* dan *Polyester Resin*

Karakteristik	Poliester Resin	Epoxy Resin
<i>Flexural Strength</i>	Baik	Terbaik
<i>Tensile Strength</i>	Baik	Terbaik
<i>Elongation %</i>	Baik	rendah
<i>Water Absorption</i>	Baik	rendah/Tinggi
<i>Hardness</i>	Baik	Terbaik
<i>Pot Life</i>	4 – 7 Menit	14 – 20 Menit
<i>Working Time</i>	20 – 30 Menit	½ - 6 Jam
<i>Above Waterline</i>	√	√
<i>Below Waterline</i>	√	√
<i>Major Construction</i>	√	√
<i>General Repair</i>	√	√
<i>Shelf Life</i>	18 – 24 Bulan	2 Tahun
<i>Catalyst</i>	MEKP	2 komponen
<i>Cure Time</i>	6 – 8 Jam	45 – 7 Hari

(“Choosing”)

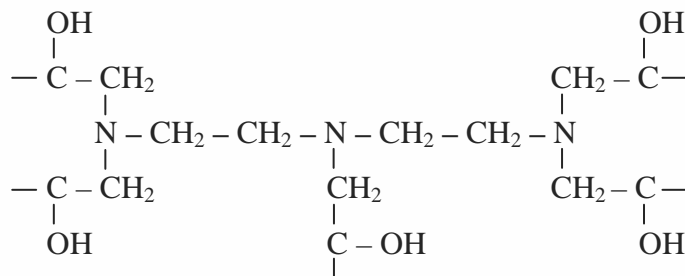
Untuk proses curing pada temperatur kamar, curing agent yang biasanya digunakan adalah *Diethylenetriamine* dengan rumus molekul :



5 molekul linier Epoxy Resin (Epoxide group = gugus reaktif) dapat bereaksi dengan setiap *Amine* (N) melalui atom Hidrogen yang berada pada atom Nitrogen.



(1). Tahap pemutusan ikatan rantai Epoxy



(2). Tahap Pembentukan Struktur Jaringan

Gambar 2.2. Mekanisme Pembentukan *network crosslinked Epoxy* (Raymond, 1975)

2.2.2. Serat

Serat dalam komposit berfungsi sebagai penguat. Beberapa jenis serat yang banyak digunakan antara lain : Glass, Aramid (Kevlar) dan Carbon. Dari beberapa jenis serat tersebut, Glass yang paling banyak digunakan, karena disamping lebih murah serat Glass memiliki kekuatan yang dapat bersaing dengan Kevlar maupun Carbon.

Tabel 2.4. Perbandingan Sifat Mekanik Beberapa Serat

Jenis Serat	Kekuatan Tarik (10^3 psi)	Modulus (10^6 psi)	Elongation (%)	Harga (US\$/lb)
E Glass	350	10	3,4	0,55
S Glass	500	13	4,0	2,30
Kevlar	400	18	2,2	9,00
Carbon	400	32	1,2	32,00

(James, 1986)

Beberapa bentuk dan tipe serat glass yang sudah dikenal antara lain: *Fiberglass Roving, Woven Roving, Fiberglass Mat, Textile Fiberglass Yarn, Textured Yarns, Fiberglass Fabric.*

Tipe *Woven Roving* tersedia dalam berbagai jenis klasifikasi berdasarkan ukuran berat mulai 407 – 1350 gr/m² dan ketebalan mulai dari 0,51 – 1,02 mm. lihat Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Dimensi Bentuk dan Sifat Fisik Serat Glass Anyaman

Dimensi (per cm)	Density gr/m ²	Tebal (mm)	Bentuk Anyaman
2 x 3,2	610	0,787	Plain
2 x 3,2	814	0,965	Plain
2 x 2,4	1020	1,240	Plain
2 x 3,2	1220	1,320	Plain

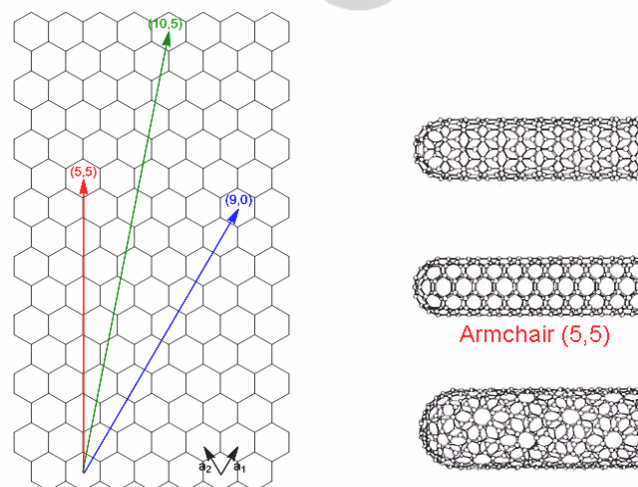
(Lubin. 1982)

2.3. Carbon Nanotube

CNT pertama kali dipreparasi oleh M. Endo pada tahun 1978 yang merupakan bagian dari studi doktornya di University of Orleans, Prancis. Beliau memproduksi suatu *filament* dengan diameter yang sangat kecil (sekitar 7 nm) dengan menggunakan *vapour-growth technique*, tetapi fiber ini tidak diakui sebagai *nanotube* (Ciselli, 2007). Penelitian dan eksplorasi mengenai struktur karbon selanjutnya dimulai setelah ditemukannya *Fullerenes* (C_{60}) pada tahun 1985 oleh Kroto (1985). Kemudian pada tahun 1991 Sumio Iijima (1991) memulai penelitian CNT lebih lanjut. Beliau mempelajari material yang tersimpan pada katoda selama proses sintesis *Fullerenes* dengan *arc-evaporation*, dan beliau menemukan CNT. Penemuan CNT membuka peluang baru pengembangan material dengan sifat mekanik, elektrik dan optikal yang sangat baik.

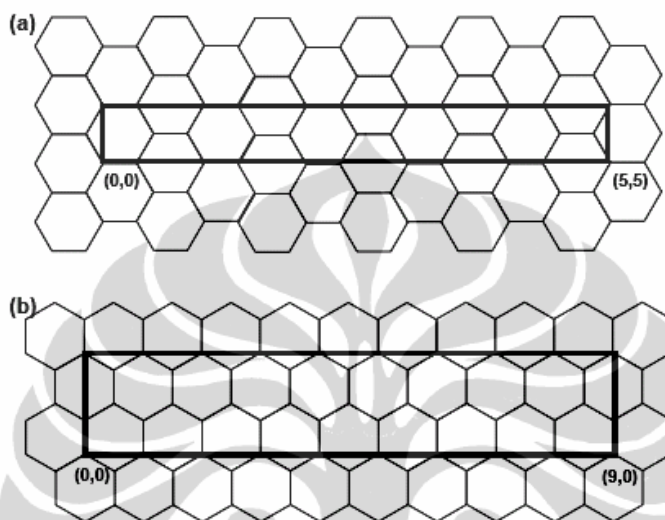
2.3.1. Struktur

Struktur CNT dapat digambarkan sebagai lembaran dari *graphene* (struktur garfit dalam satu bidang) yang digulung membentuk silinder (*tube*). Struktur Silinder yang dibentuk dapat diklasifikasikan berdasarkan sudut kiralnya (*chiral vector*). *Chiral vector* dapat didefinisikan sebagai indeks translasi kisi (n,m) dan vektor dasar a_1 dan a_2 dari heksagonal. Sudut kiral (θ) merupakan sudut kemiringan heksagonal terhadap sumbu *nanotube*. Struktur *zig-zag* memiliki sudut kiral 0° dan sudut kiral 30° untuk struktur *armchair*.

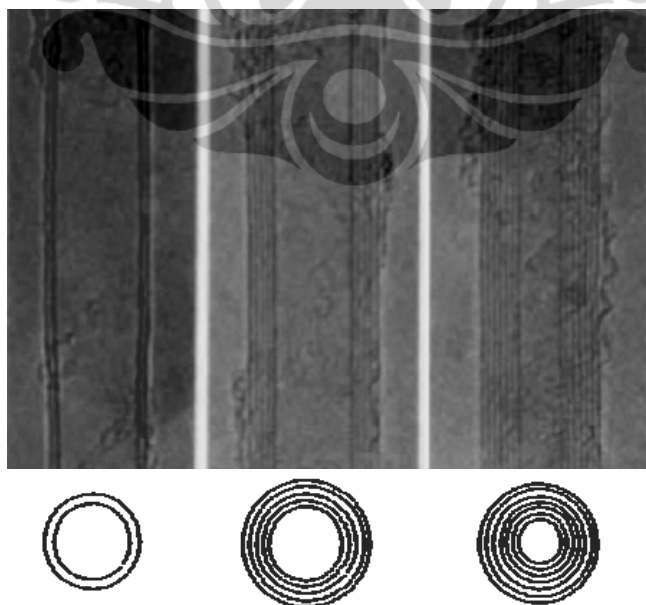


Gambar 2.3. Struktur CNT
(Burrmann, 2007)

Berdasarkan jumlah cangkang silinder yang terbentuk CNT dapat dibedakan atas *Single Walled Carbon Nanotube* (SWNT) yaitu CNT yang hanya membentuk satu cangkang silinder; dan *Multiwalled Carbon Nanotube* (MWNT) yang membentuk lebih dari satu cangkang berlapis.



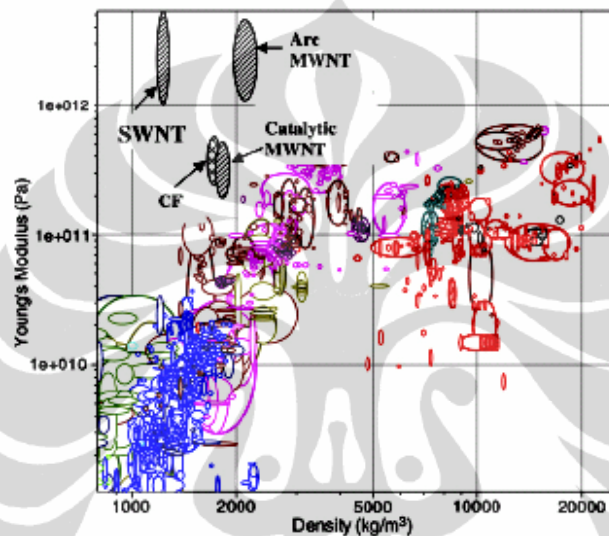
Gambar 2.4. Unit sel struktur armchair (a) dan zig-zag (b)
(Ciselli, 2007)



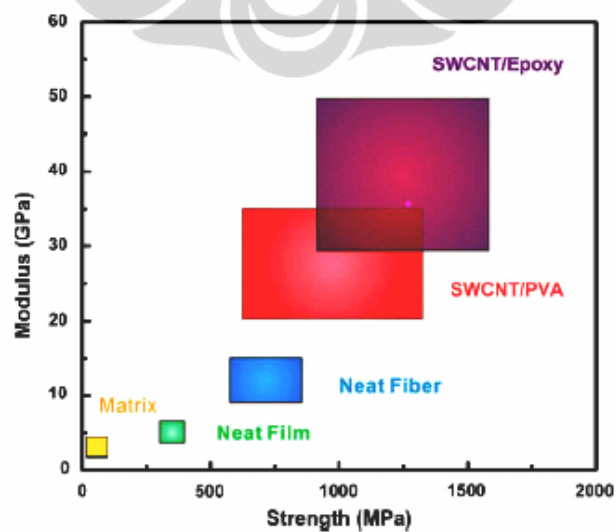
Gambar 2.5. Multi Walled Carbon Nanotube (MWNT)
(Burrmann, 2007)

2.3.2. Sifat Mekanik

CNT memiliki sifat mekanik yang sangat baik dibandingkan dengan material fiber lainnya. Secara umum sifat CNT memiliki karakteristik campuran antara *diamond* dan *graphite*. Kekuatan dan sifat termal konduktivitasnya seperti *diamond*, dan sifat konduktivitas listriknya seperti *graphite*. Kelebihan lainnya CNT memiliki densiti yang rendah dan fleksibel.



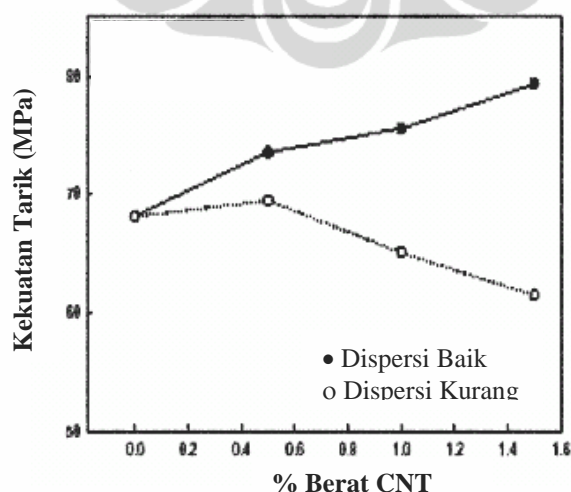
Gambar 2.6. Perbandingan Sifat Mekanik dan Densiti CNT (Esawi, 2007)



Gambar 2.7. Modulus dan Kekuatan CNT dalam Komposit (Tsu-Wei, 2010)

Peningkatan sifat mekanik pada komposit, sangat tergantung pada perlakuan saat mencampurkan CNT ke dalam matrik. Gojny (2005) menemukan penambahan CNT pada Epoxy Resin dengan metode dispersi secara mekanik akan meningkatkan *farcture toughness* hingga 50% (Lars Böger, 2010, p.1419). Begitu pula jumlah yang ditambahkan sangat mempengaruhi efektivitas peningkatan sifat mekanik komposit. Modulus Elastisitas komposit MWNT/Epoxy meningkat pada penambahan jumlah 0,1 MWNT % berat dan terjadi penurunan pada penambahan MWNT lebih banyak lagi (Gojny, 2005). Penambahan CNT yang terlalu banyak akan menyebabkan sulitnya untuk terjadi dispersi dari CNT, sehingga berakibat pada penurunan sifat mekanik. Ketika kandungan MWNT lebih dari 3% berat, viskositas campuran meningkat tinggi, yang mengakibatkan menambah tingkat kesulitan dalam melakukan dispersi (Peng, 2007).

Jadi penambahan CNT akan meningkatkan kekuatan tarik dari komposit bila dapat dilakukan dispersi dengan baik, namun bila proses kurang baik akan berakibat menurunnya sifat mekanik (Gambar 2.8). Agromerasi CNT karena kurang baiknya proses dispersi dapat menyebabkan adanya crack, sehingga terjadi penurunan kekuatan komposit (Young, 2005). Dispersi yang baik tidak hanya membuka permukaan kontak antara matrik dengan CNT, tetapi juga dapat mencegah terjadinya agromerasi (Sandler, 2004; Fidelus, 2005; Bal, 2007).

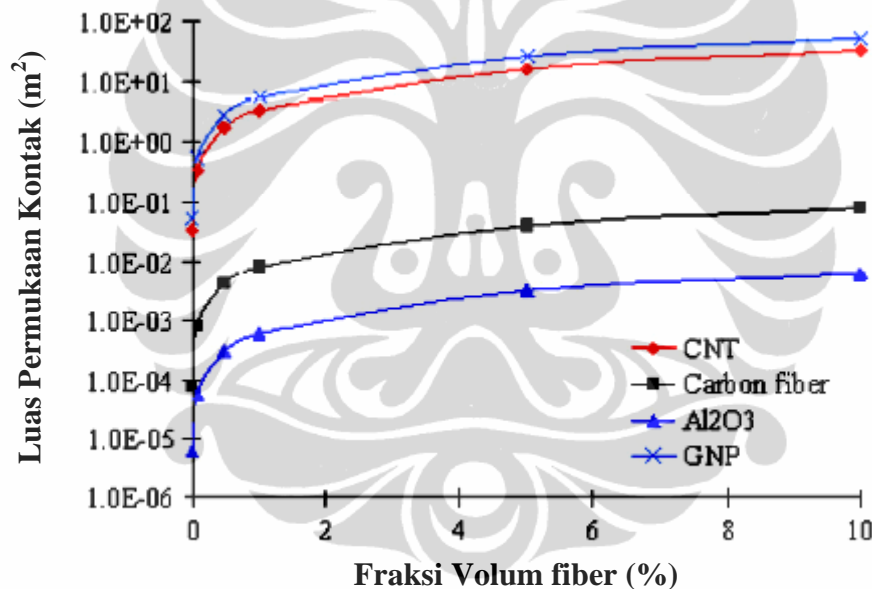


Gambar 2.8. Pengaruh Perlakuan Dispersi terhadap Kekuatan Tarik Komposit CNT/Epoxy.

(Young, 2005; Bal, 2007)

Secara teoritis Gambar. 2.9 memperlihatkan hubungan antara luas permukaan kontak CNT terhadap fraksi volum, dengan asumsi dispersi dapat dilakukan dengan sempurna (Peng-Cheng,2010). Luas permukaan kontak CNT akan meningkat dengan bertambahnya fraksi volum dari CNT, jika dispersi dapat dilakukan dengan sempurna. Menurut model philipse, jumlah kontak rata-rata tiap partikel bergantung pada *excluded volum*, V_{ex} , fraksi volum partikel, ϕ , dan volume dari partikel, V_p (Martone, 2011, p.1120):

$$(c) = \phi \frac{V_{ex}}{V_p}$$



Gambar 2.9. Hubungan Luas Permukaan Kontak dengan Fraksi Volum Fiber (Peng-Cheng, 2010)

Haggenmueller (2003), menemukan bahwa tensil modulus dari serat PE meningkat dari 0,65 menjadi 1,25 GPa dengan adanya penambahan 5% berat SWNT, sementara prediksi modulus elastisitas dengan menggunakan persamaan Halpin – TSai, 16 GPa (Moniruzzaman, 2006, p. 5199). Adanya perbedaan antara prediksi dengan menggunakan model persamaan dengan hasil eksperimen disebabkan karena adanya dispersi yang tidak sempurna (Moniruzzaman, 2006).

Jadi penggunaan CNT pada komposit dengan meningkatkan sifat mekanik, memiliki batasan maksimum CNT yang ditambahkan. Peningkatan kekuatan tarik maksimum pada penambahan CNT dalam Epoxy *nanocomposite* hanya 0,3% berat untuk VNT (*Vermicular structure*) dan 0,5% berat BNT (*Bamboo-like structure*) (Siddiqui, 2010).

Keunggulan sifat mekanik CNT ini menarik ilmuwan dan peneliti memanfaatkan dan meneliti karakteristik dari CNT. Bahkan CNT lebih unggul dibandingkan stainless steel. Perbandingan sifat mekanik CNT dengan beberapa jenis material lain disajikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Perbandingan Sifat Mekanik CNT dengan Material Lain

Material	Modulus (GPa)	Kekuatan tarik (GPa)
SWNT	~1 (from 1 to 5)	13–53 ^E
<i>Armchair</i> SWNT	0.94 ^T	126.2 ^T
MWNT	270 ^E	11 ^E
<i>Stainless steel</i>	186 ^E	0.38 ^E
Kevlar-29&149	60 ^E	3.6 ^E

(Min-Feng, 2000; Han Gi, 2006; Sinnott, 2001; Hilding, 2003, Sahoo, 2010)

Keterangan :

E : Hasil Eksperimen

T : Prediksi Teoritis

2.4. Model Mikromekanik

2.4.1. Perkembangan Model

Model mikromekanik untuk memprediksi sifat mekanik komposit pertama kali dikembangkan oleh Einstein pada tahun 1905, dengan persamaan sederhana (Abe, 2005):

$$E_c = E_m (1 + 1,25V_f) \quad (2.1)$$

Model persamaan Einstein dilakukan modifikasi oleh beberapa penulis. Guth pada tahun 1945 memodifikasi model Einstein dengan menambahkan faktor interaksi

partikel yang diekspresikan dalam bentuk persamaan derajat dua (Frogley, 2003; Joseph, 2003; SC Tjong, 2006; Shao-Yun, 2008; Jha, 2008).

$$E_c = E_m(1 + 1,25V_f + 14,1V_f^2) \quad (2.2)$$

Cohan memodifikasi model persamaan Einstein dengan mempertimbangkan adanya *aspect ratio* (ρ) dari fiber. Modifikasi yang dilakukan Cohan menghasilkan persamaan (Joseph, 2003; Shao-Yun, 2008):

$$E_c = E_m(1 + 0,675\rho + 1,62\rho^2V_f + 14,1V_f^2) \quad (2.3)$$

Sementara itu Mooney memasukkan unsur *crowding factor* (s) untuk memodifikasi persamaan Einstein (Mooney, 1951). Model persamaan Mooney yang dipresentasikan pada pertemuan tahunan *the Society of Rheology* di New York pada 3 – 4 November 1950 adalah:

$$E_c = E_m \exp\left(\frac{2,5V_f}{1 - sV_f}\right) \quad (2.4)$$

Ishai dan Cohen mengembangkan model untuk dua komponen komposit dengan asumsi campuran homogen dan terjadi ikatan yang kuat diantara keduanya sebagai berikut (Ishai, 1967) :

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + \frac{1 + \left(\frac{E_f}{E_m} - 1\right)V_f^{2/3}}{1 + \left(\frac{E_f}{E_m} - 1\right)(V_f^{2/3} - V_f)} \quad (\text{upper bound}) \quad (2.5)$$

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + \frac{V_f}{\frac{E_f}{E_m} / \left(\frac{E_f}{E_m} - 1\right) - V_f^{1/3}} \quad (\text{lower bound}) \quad (2.6)$$

Halpin dan TSai mengembangkan model untuk memprediksi modulus elastisitas komposit polimer dengan persamaan (Halpin, 1976):

$$\frac{E_c}{E_m} = \left[\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right] \quad (2.7)$$

Pengembangan model persamaan untuk memprediksi modulus elastisitas lainnya juga dilakukan oleh Kerner. Model yang dikembangkan Kerner memasukkan faktor poisson ratio (ν_m) dari matrik, dengan memberikan persamaan berikut:

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + \frac{V_f}{(1 - V_f)} \frac{15(1 - \nu_m)}{(8 - 10\nu_m)} \quad (2.8)$$

Selanjut Nielsen dengan berdasarkan pada model persamaan yang dikembangkan oleh Halpin – TSai dan Kerner mengembangkan model persamaan berikut (Yunkai, 2002; Shao-Yun, 2008):

$$\frac{E_c}{E_m} = \left(\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta \psi V_f} \right) \quad (2.9)$$

$$T_c = T_m \left(\frac{1 + \xi \eta' V_f}{1 - \eta' \psi V_f} \right) \quad (2.10)$$

dimana:

$$\psi = 1 + \left(\frac{1 - V_{f \max}}{V_{f \max}^2} \right) V_f$$

$$\xi = 2 \frac{l}{d}$$

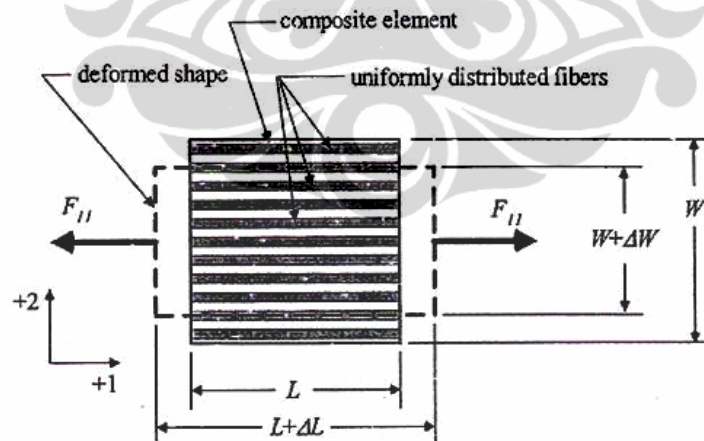
$$\eta = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + \xi}$$

$$\eta' = \frac{T_f/T_m - 1}{T_f/T_m + \xi}$$

Beberapa model persamaan untuk memprediksi modulus elastisitas yang telah dikembangkan umumnya digunakan untuk komposit dengan dua komponen. Model lain yang telah dikembangkan oleh penulis lain diantaranya : model Voigt-Reuss, model Hashin-Shtrikman, model Hui-Shia, model Wang-Pyrz, model Cox (Hu, 2010, p.282-286)

2.4.2. Rule of Mixture

Untuk memprediksi sifat mekanik dari struktur komposit yang berdasarkan pada diameter fiber diklasifikasi sebagai *micromechanic analysis*. Model mikromekanik sederhana yang digunakan memprediksi sifat mekanik dari struktur komposit adalah *Rule of Mixtures*.



Gambar 2.10. Elemen Komposit dengan Gaya yang Bekerja
(Tuttle, 2006)

Suatu elemen komposit diberikan gaya (F) yang searah dengan arah serat seperti pada Gambar 2.10 di atas, maka $F_{11} = \sigma_{11}A$, dimana A adalah luas dari

elemen komposit. Gaya yang bekerja pada elemen komposit merupakan penjumlahan dari gaya yang bekerja pada serat dan matrik, maka :

$$\sigma_{11} A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.11)$$

Akibat gaya yang bekerja menyebabkan perubahan panjang : ΔL , maka :

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_{11} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.12)$$

Hubungan antara stress dengan strain :

$$\sigma_{11} = \varepsilon_{11} E_{11} \quad (2.13a)$$

$$\sigma_f = \varepsilon_f E_f = \varepsilon_{11} E_f \quad (2.13b)$$

$$\sigma_m = \varepsilon_m E_m = \varepsilon_{11} E_m \quad (2.13c)$$

Substitusi persamaan (2.13b) dan (2.13c) ke dalam persamaan (2.11) menjadi :

$$E_{11} = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad (2.14)$$

Rule of mixture diekspresikan dalam fraksi volum

$$V_f = \frac{A_f}{A} \quad V_m = \frac{A_m}{A} = \frac{A - A_f}{A} = (1 - V_f)$$

Jadi Prediksi nilai E_{11} berdasarkan pendekatan *rule of mixture* :

$$E_{11} = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

atau

$$E_{11} = E_m + V_f (E_f - E_m) \quad (2.15)$$

Dari persamaan (2.15), dapat dikatakan jika $E_f \gg E_m$ dan umumnya seperti itu, maka dapat diperkirakan nilai $E_{11} = V_f E_f$. Jadi nilai E_{11} sangat ditentukan oleh fiber modulus (E_f) dan fraksi volum fiber (V_f).

Dari persamaan *Rule of Mixture* dapat terlihat bahwa kekuatan atau kinerja dari suatu komposit sangat ditentukan oleh kekuatan fiber dan juga fraksi volum fiber.

Untuk jenis fiber yang pendek dalam hal ini dapat berupa CNT, maka persamaan ROM pada persamaan (2.15) menjadi (Gdoutos, 2000):

$$E_c = \eta_L E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.16)$$

Dimana η_L merupakan faktor efisiensi panjang dari fiber (*length efficiency factor*)

Untuk serat berupa partikel maka ROM dimodifikasi mengikuti persamaan (Vu-Khanh, 1991; Shao-Yun, 2002, 2008):

$$E_c = \chi_p E_p V_p + E_m (1 - V_p) \quad (2.17)$$

dimana $0 < \chi_p < 1$ merupakan *particle strengthening factor*.

Verbeek (2003) mengevaluasi model tersebut dengan menentukan nilai χ_p mengikuti persamaan :

$$\chi_p = 1 - \frac{\tanh V_{p\max}}{V_{p\max}}$$

Modifikasi ROM juga dikemukakan oleh Omidi (2010):

$$E_c = \kappa_l E_{CNT} V_{CNT} + E_m (1 - V_{CNT}) \quad (2.18)$$

dimana :

$$\kappa_l = 1 - \frac{\tanh \xi \tau}{\xi \tau}$$

$$\xi = \frac{2l}{d}$$

$$\tau = \sqrt{\frac{-2}{\frac{E_{CNT}}{E_m} (1 - \nu_m) \ln(V_{CNT})}}$$

Persamaan (2.16) – (2.18) berlaku untuk serat pendek atau partikel dengan struktur teratur. Bila strukturnya acak (random) maka persamaan di atas dilengkapi dengan faktor efisiensi orientasi (η_o , *orientation efficiency factor*). Besarnya nilai η_o mengikuti Tabel 2.7.

Tabel 2.7. *orientation efficiency factor* - η_o

Orientation of Fibres	η_o
<i>Aligned Longitudinal</i>	1
<i>Aligned Transverse</i>	0
<i>Random in-plane (2 - D)</i>	0,375
<i>Three Dimensional Random</i>	0,2

(Matthews, 1995)

Kanagaraj (Kanagaraj, 2007) dalam penelitiannya menggunakan dasar persamaan berikut ini dalam menentukan sifat mekanik *high density polyethylene/carbon nanotube composites*.

$$E_C = (\eta_1 \eta_o E_{CNT} - E_{HDPE}) V_{CNT} + E_{HDPE} \quad (2.19)$$

$$\eta_1 = 1 - \frac{\text{Tanh}(a - (\frac{l}{d}))}{a(\frac{l}{d})}$$

$$a = \sqrt{\frac{-3E_{HDPE}}{2E_{CNT} \ln(V_{CNT})}}$$

Christensen and Waals mengembangkan model persamaan untuk memprediksi modulus elastisitas pada komposit dengan orientasi fiber random. Model Christensen and Waals mengikuti persamaan berikut (Christensen, 1976; Caba, 2005):

$$E_C \cong \frac{V_f}{3} E_f + (1 + V_f) E_m \quad (2.20)$$

Manera mengembangkan model persamaan untuk memprediksi modulus elastisitas pada fiberglass komposit dengan serat pendek dan orientasi fiber random (Yunkai, 2002).

$$\bar{E} = V_f \left(\frac{16}{45} E_f + 2E_m \right) + \frac{8}{9} E_m \quad (2.21)$$

2.4.3. Halpin - Tsai Equation

Persamaan Halpin – Tsai secara umum adalah sebagai berikut:

$$P = \left[\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right] P_m \quad (2.22)$$

dimana:

$$\eta = \frac{\frac{P_f}{P_m} - 1}{\frac{P_f}{P_m} + \xi}$$

P : mempresentasikan sifat mekanik pada komposit, seperti diuraikan pada Tabel 2.8.

Table 2.8. Parameter Halpin –Tsai

P	P _f	P _m	ξ	Keterangan
E ₁₁	E _f	E _m	2(l/d)	Modulus Longitudinal
E ₂₂	E _f	E _m	2	Modulus Transversal

(Halpin, 1976)

Untuk fiber dengan orientasi acak (random) maka untuk persamaan (2.12) menjadi:

$$E_{random} = \frac{3}{8}E_{11} + \frac{5}{8}E_{22} \quad (2.23)$$

Montazeri dalam penelitiannya melihat pengaruh penambahan MWNT terhadap sifat mekanik komposit MWNT/Epoxy. Penelitian ini berbasis pada model persamaan Halpin-TSai. Modifikasi persamaan Halpin-TSai untuk mengevaluasi modulus elastisitas dan kekuatan mekanik komposit MWNT/Epoxy. Modifikasi Halpin-TSai oleh Montazeri menghasilkan persamaan (Montazeri, 2010):

$$E = \frac{1 + \xi\eta V_f}{1 - \eta V_f} E_m \quad (2.24)$$

$$\eta = \frac{(6E_f / E_m) - 1}{(6E_f / E_m) + \xi}$$

diman :

$$\xi = 2 \frac{l}{d} e^{-150V_f - 1.5} \quad \text{for untreated MWNT}$$

$$\xi = 2 \frac{l}{d} e^{-75V_f - 0.7} \quad \text{for acid-treated MWNT}$$

Modifikasi persamaan Halpin-TSai juga dilakukan oleh Nyan, yang dimanfaatkan untuk komposit SWNT/Phenolic. Modifikasi Halpin-TSai oleh Nyan menghasilkan persamaan (Nyan, 2008):

$$E_f = \frac{(\xi + V_f)E - \xi(1 - V_f)E_m}{\eta_o [(\xi V_f + 1)E_m - (1 - V_f)E]} E_m \quad (2.25)$$

Model persamaan Halpin-TSai dan semua modifikasi yang telah dilakukan oleh beberapa penulis hanya berlaku untuk komposit dengan dua komponen (satu serat dan matrik).

2.5. Classical Lamination Theory (CLT)

CLT merupakan teori yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara tegangan (stress) dan *resultan momen* yang bekerja pada komposit laminasi terhadap regangan yang ditimbulkannya. *Stress* dan *resultan momen* sebagai representasi dari *load* yang bekerja pada komposit laminasi. Oleh karena itu *stress* dan *resultan momen* akan mempengaruhi atau yang menyebabkan terjadinya regangan (*strain*). Namun disamping adanya *stress* dan *resultan momen* yang dapat mempengaruhi terjadinya *strain*, ada faktor lainnya yaitu perubahan temperatur (ΔT) dan perubahan kandungan kelembaban (ΔM).

Hubungan antara *load* yang bekerja pada suatu komposit laminasi dengan *strain*, dapat digambarkan sebagai persamaan berikut (Tuttle, 2004).

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^o \\ \kappa \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N^T \\ M^T \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N^M \\ M^M \end{Bmatrix} \quad (2.26)$$

Persamaan di atas dapat dipandang sebagai Hukum Hooke untuk komposit laminasi (Eckold, 1985). Persamaan di atas juga dapat diinversikan menjadi hubungan *midplane* dan *curvature* sebagai fungsi dari *load* yang bekerja.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^o \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ b & d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N + N^T + N^M \\ M + M^T + M^M \end{Bmatrix} \quad (2.27)$$

dimana :

$$\begin{bmatrix} a & b \\ b & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1}$$

Pada kondisi perubahan temperatur dianggap konstan ($\Delta T = 0$) dan perubahan kandungan kelembaban juga dianggap konstan ($\Delta M = 0$), maka persamaan di atas, menjadi :

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^o \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^o \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ b & d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad (2.29)$$

dimana:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n \left\{ \overline{Q}_{ij} \right\}_k \langle z_k - z_{k-1} \rangle$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left\{ \overline{Q}_{ij} \right\}_k \langle z_k^2 - z_{k-1}^2 \rangle$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \left\{ \overline{Q}_{ij} \right\}_k \langle z_k^3 - z_{k-1}^3 \rangle$$

$$\overline{Q}_{11} = Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta$$

$$\overline{Q}_{12} = \overline{Q}_{21} = Q_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) + (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta$$

$$\overline{Q}_{16} = \overline{Q}_{61} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta$$

$$\overline{Q}_{22} = Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta$$

$$\overline{Q}_{26} = \overline{Q}_{62} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta$$

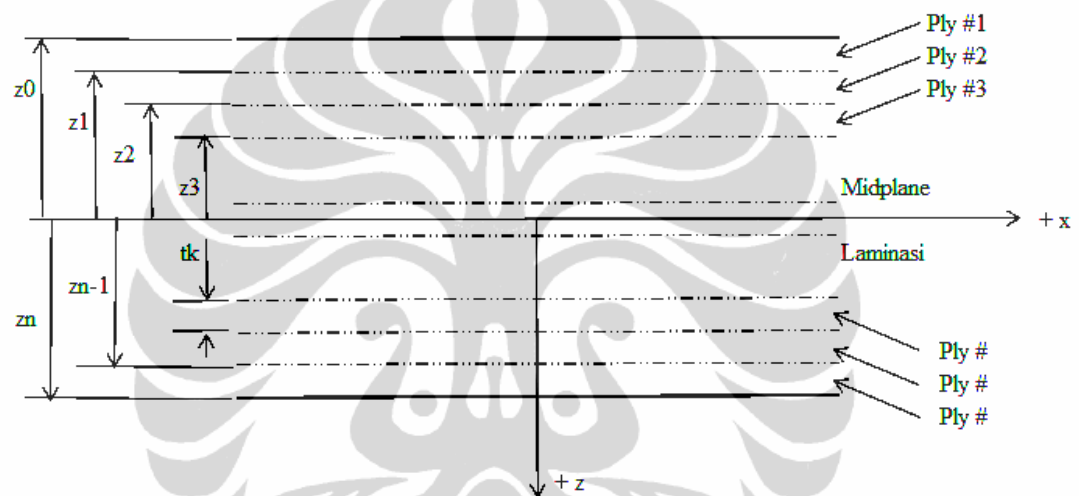
$$\overline{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{66} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta)$$

$$Q_{11} = \frac{E_{11}^2}{E_{11} - \nu_{12}^2 E_{22}}$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{12} E_{11} E_{22}}{E_{11} - \nu_{12}^2 E_{22}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_{11} E_{22}}{E_{11} - \nu_{12}^2 E_{22}}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$



2.6. Delaminasi

Delaminasi merupakan salah satu model kerusakan yang sering kali terjadi pada komposit laminasi. Kerusakan dalam bentuk delaminasi dapat dikarenakan adanya *impact*. Gambar 2.11. di bawah mengilustrasikan mekanisme delaminasi akibat *impact* pada suatu komposit laminasi.

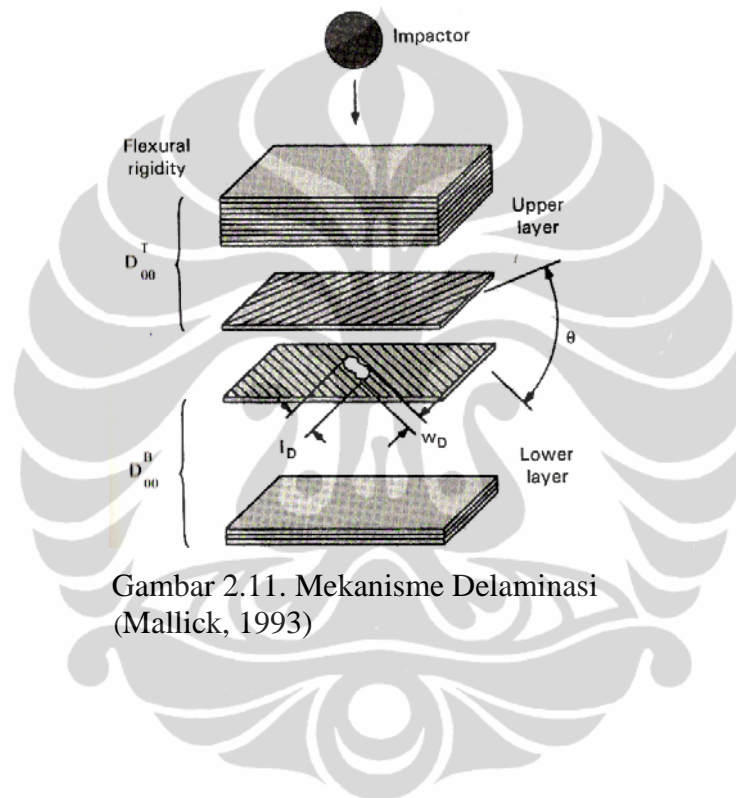
Strain energy release rate (G), adalah ukuran kuantitatif yang dapat menggambarkan keuletan interlaminar suatu material. Metode eksperimen yang banyak digunakan untuk menentukan *Strain energy release rate* adalah metode *Double Cantilever Beam* (DCB). Hubungan antara *Strain energy release rate*, G , dengan parameter dalam eksperimen DCB mengikuti persamaan di bawah ini.

$$C = \frac{\delta}{F} = \frac{2a^3}{3EI} \quad (2.30)$$

$$I = \frac{Bh^3}{12} \quad (2.31)$$

$$C = ka^n \quad \text{dan} \quad G = \frac{nF\delta}{2Ba} \quad (2.32)$$

Dari persamaan di atas, dengan memplot hubungan C dengan a, dalam fungsi log, akan didapat nilai n sebagai *slope* (gradien), sehingga akan dapat dihitung nilai dari G.



Gambar 2.11. Mekanisme Delaminasi (Mallick, 1993)

BAB 3 METODOLOGI

3.1. Bahan dan Peralatan

Dalam penelitian ini digunakan bahan matrik dan serat sebagai bahan utama. Disamping itu juga dimanfaatkan *Carbon Nanotube* (CNT) jenis MWNT.

Bahan matrik yang digunakan adalah Epoxy Resin dengan merek dagang Bakelite[®] EPR 174 yang diproduksi oleh Bakelite, Korea dan dipasarkan di Indonesia oleh PT Justus Kimiaraya, Jakarta. Sedangkan Epoxy Hardener yang digunakan adalah Versamid[®] 140 yang juga dipasarkan oleh PT Justus Kimiaraya, Jakarta. Bakelite[®] EPR 174 merupakan cairan standar Epoxy Resin dengan bahan dasar Bisphenol-A, yang memiliki tingkat viskositas antara sedang sampai dengan tinggi. Epoxy Resin jenis ini ketika telah mengeras (*curing*) memiliki ketahanan terhadap bahan kimia dan panas.

Karakteristik Bakelite[®] EPR 174 :

Viscositas (pada 25 °C)	13.000 ± 2.000	mPa.s
Densiti (pada 25 °C)	1,17 ± 0,01	gr/cm ³
<i>Flashpoint</i> ("Bakelite")	> 250	°C

Sebagai penguat, serat yang digunakan adalah serat *Glass Woven Roving* tipe 400 produksi TG Glassfiber Owens Corning Tech., Taiwan. Serat ini di Indonesia dipasarkan oleh PT Justus Kimiaraya, Jakarta. Pemanfaatan MWNT digunakan untuk mengetahui pengaruh sifat mekanik terhadap penambahan CNT.

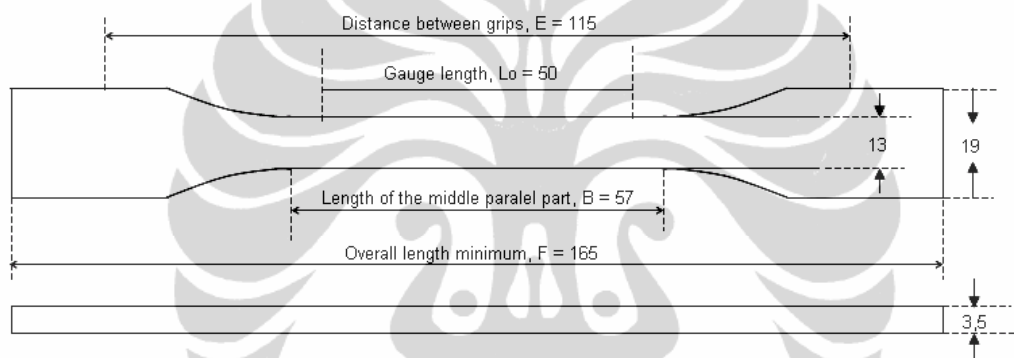
Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dibedakan atas peralatan untuk preparasi sampel dan peralatan uji spesimen. Peralatan Preparasi meliputi : Neraca Merk Sartorius, Gelas Ukur, Mistar, Mixer, Gelas Plastik, Pengaduk, Oven merk David Baader Kandel, Vacuum – SMC Type ISG 190 – 030, Cetakan sampel *casting*, Plat Alluminium. Sedangkan peralatan uji spesimen adalah : Neraca Merk Sartorius, Jangka Sorong Merk Mitutoyo, Gelas Ukur, UTM Merk Instron 4206 - 15.000 Kg, Furnace Merk Furnatrol Type 53600, Desiccator.

3.2. Preparasi Sampel

Dalam penelitian ini sampel yang dibuat ada 2 jenis yaitu: sampel *casting* dan sampel laminasi.

3.2.1. Sampel Casting

Pembuatan *casting* Epoxy Resin menggunakan cetakan yang disesuaikan dengan standar ASTM D638. Bentuk geometri dan dimensi dari spesimen pengujian sifat mekanik standar ASTM D638 ditampilkan seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Bentuk Spesimen Pengujian Sifat Mekanik

Spesimen Neat Resin dibuat dengan mencampur Epoxy Resin dengan Epoxy Hardener. Campuran dibuat dengan perbandingan Epoxy Resin : Hardener = 1 : 1. Campuran Epoxy dengan Hardener dituangkan ke dalam cetakan sesuai dengan standar. Untuk menghilangkan kemungkinan adanya *void*, selanjutnya casting Epoxy sebelum curing dimasukkan ke dalam *Oven* dengan temperatur 60 °C selama 60 menit (Gambar 3.3).

Diagram alir pembuatan sampel casting serta pengujian yang dilakukan disajikan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.2. Proses *Casting* Epoxy Resin



Gambar 3.3. Pengaturan Temperatur dan Waktu Proses *Oven*

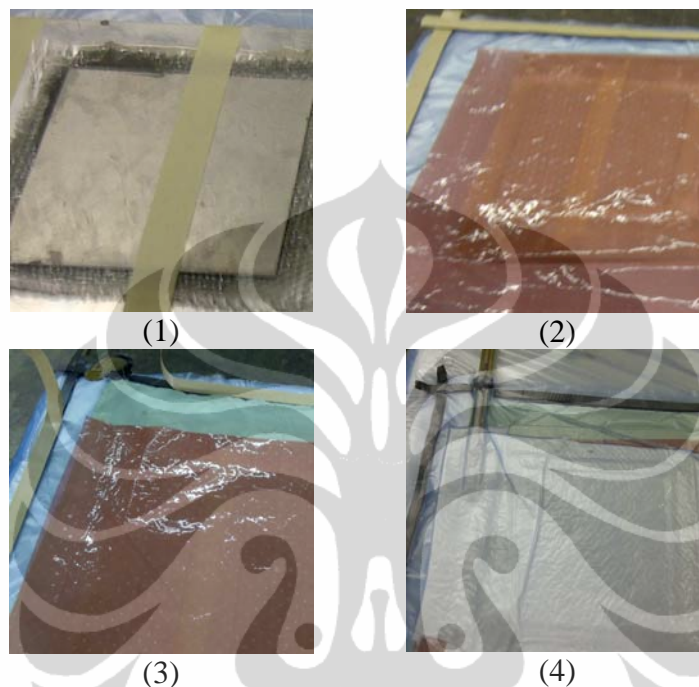
3.2.2. Sampel Laminasi

Sampel laminasi yang dibuat ada 2 jenis, yaitu komposit laminasi tanpa penambahan MWNT dan komposit laminasi dengan penambahan MWNT. Hal ini juga dimaksudkan untuk melihat pengaruh sifat mekanik terhadap penambahan MWNT pada komposit laminasi.

Sampel Laminasi Tanpa MWNT

Proses pembuatan komposit laminasi dilakukan dengan menggunakan metode *handlay up*. Untuk membuat sampel yang homogen, maka pembuatan komposit laminasi dilakukan pada dasar plat Aluminium dengan dimensi 170 x 180 mm. sehingga didapatkan paling tidak 7 – 8 spesimen untuk satu kali laminasi. Dalam satu kali pembuatan komposit laminasi akan diperoleh spesimen sampel yang relatif homogen baik dari sisi dimensi maupun sifatnya. Setelah proses laminasi, untuk menghilangkan adanya *void* dilakukan proses *vacuum* dengan menggunakan *vacuum bag moulding*. Proses *vacuum* dilakukan pada temperatur ruang, yang dikenal dengan teknik RTVBM (*Room Temperature Vacuum Bag Moulding*). Gambaran urutan proses RTVBM dapat dilihat pada Gambar 3.4.

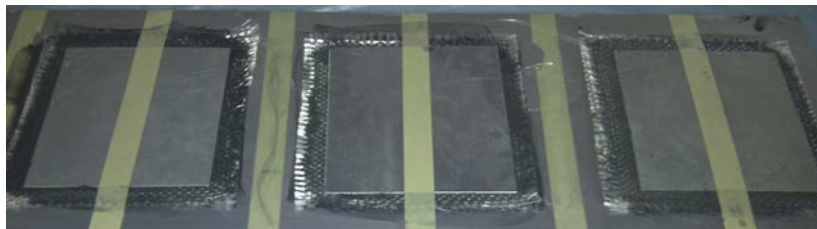
Sampel ini dibuat dengan proses laminasi secara bertahap tiap lapis. Variasi fraksi sampel laminasi yang dibuat didasarkan pada jumlah lembaran serat glass yang dibuat, yaitu : 1 lembar, 2 lembar, 3 lembar dan 4 lembar.



Gambar 3.4. Gambaran urutan Proses RTVBM

3.2.3. Sampel Laminasi dengan Penambahan MWNT

Prosedur pembuatan sampel Sampel laminasi dengan penambahan MWNT relatif sama. Hanya saja pada awal pembuatan, Epoxy sebelum dicampur dengan hardener, diberikan penambahan MWNT dengan jumlah fraksi berat tertentu. Variasi fraksi MWNT yang ditambahkan adalah: 0,1%; 0,3%; 0,5%; 1,0%; berat terhadap Epoxy Resin. Kemudian campuran tersebut diaduk dengan menggunakan mesin pengaduk dengan kecepatan 180 rpm, selama 10 menit. Setelah MWNT terdispersi kemudian campuran Epoxy – MWNT siap digunakan untuk proses laminasi. Diagram alir pembuatan sampel laminasi serta pengujian yang dilakukan disajikan pada Gambar 3.9 dan Gambar 3.10.



Gambar 3.5. Komposit Laminasi + MWNT

3.3. Karakterisasi Sampel

3.3.1. Analisis Fraksi

Analisis fraksi dilakukan untuk menentukan kandungan fraksi berat atau volum dari komponen penyusun suatu komposit. Metode yang digunakan adalah *Burn off Test* dengan standar ASTM D2584 atau yang dilakukan di PTDI (PT Dirgantara Indonesia) menggunakan standar IDE 124 (Casa) : *Physical Test on Glassfiber/Epoxy Resin Prepregs and Laminates*. Peralatan yang digunakan adalah Neraca Digital, *Furnace* dan *Desiccator*. Karakterisasi mengikuti alur diagram seperti pada Gambar 3.7.

Sampel Laminasi Tanpa MWNT

Perhitungan fraksi sampel dilakukan dengan menggunakan persamaan :

$$W_m = \frac{w_1 - w_2}{w_1 - w_0} \times 100\%$$

$$W_f = \frac{w_2 - w_0}{w_1 - w_0} \times 100\%$$

Sampel Laminasi + MWNT

Perhitungan fraksi sampel dilakukan dengan menggunakan persamaan :

$$W_m = \frac{w_1 - w_2}{w_1 - w_0} \times 100\%$$

$$W_{CNT} = \frac{p(w_1 - w_2)}{w_1 - w_0} \times 100\%$$

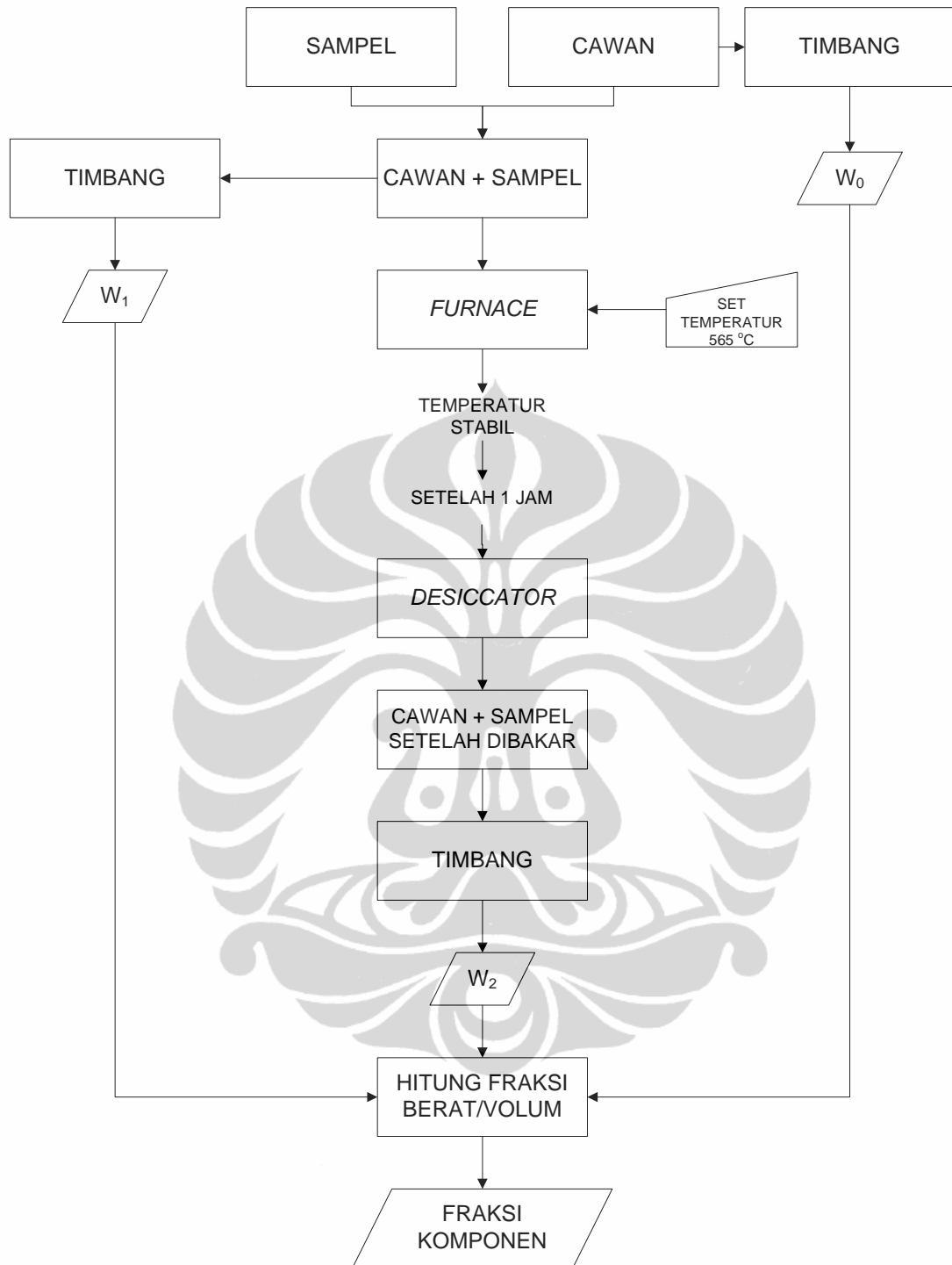
$$W_f = \frac{w_2 - w_0 - p(w_1 - w_2)}{w_1 - w_0} \times 100\%$$

3.3.2. Uji Mekanik

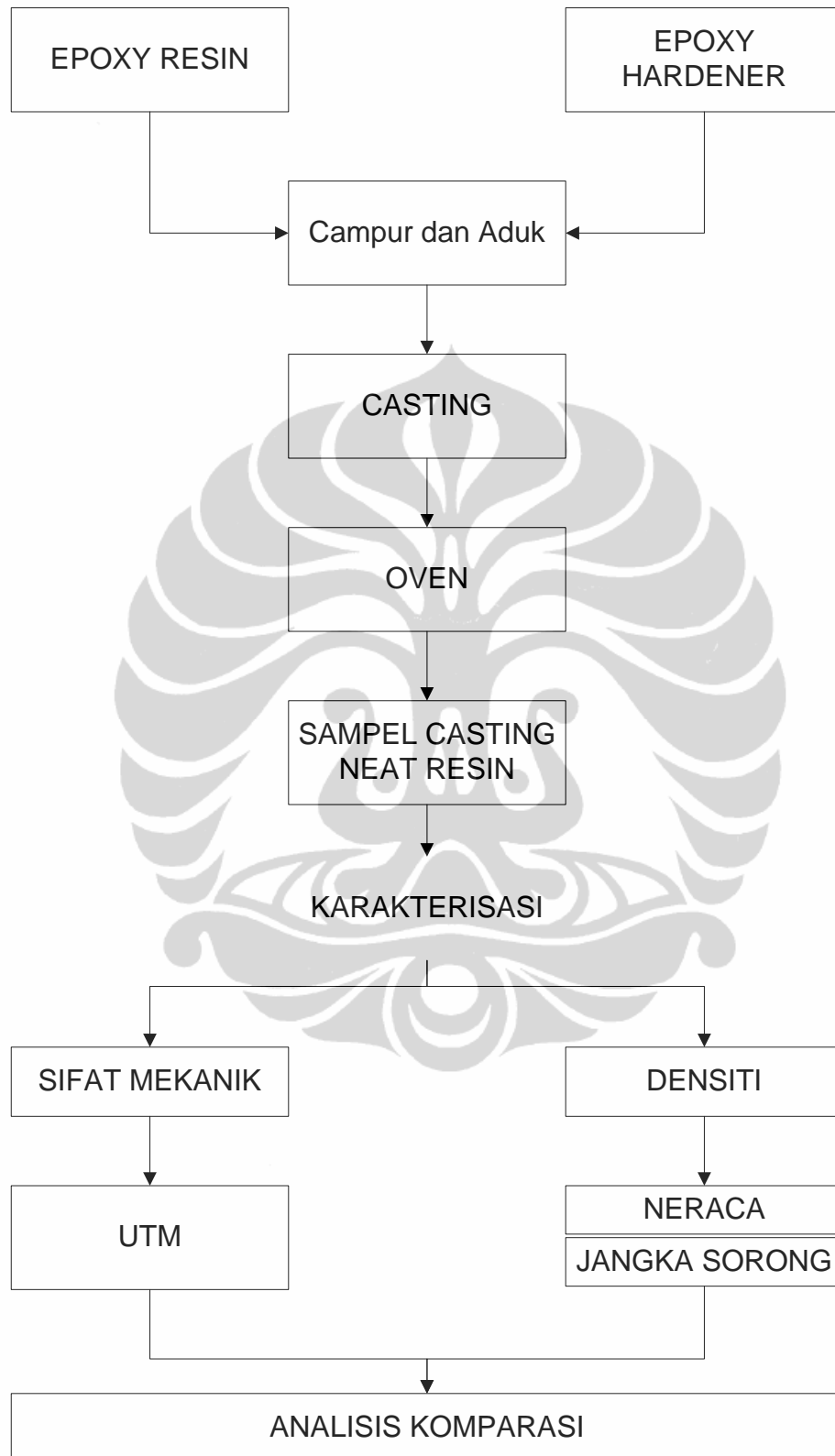
Uji mekanik dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik (Kekuatan tarik dan modulus elastisitas) suatu komposit. Metode yang digunakan adalah standar ASTM D638. Peralatan yang digunakan adalah *Universal Testing Machine* (UTM) Instron 4206 dengan kekuatan maksimum 15.000 kg. Pengujian dilakukan dalam ruangan dengan kondisi temperatur 23,4 °C dan kelembaban relatif 61,0%. Pengujian dilakukan dengan kecepatan penarikan sebesar 5 mm/menit. Sebelum pengujian dilakukan kalibrasi *extensiometer* yang diatur pada panjang 50 mm.



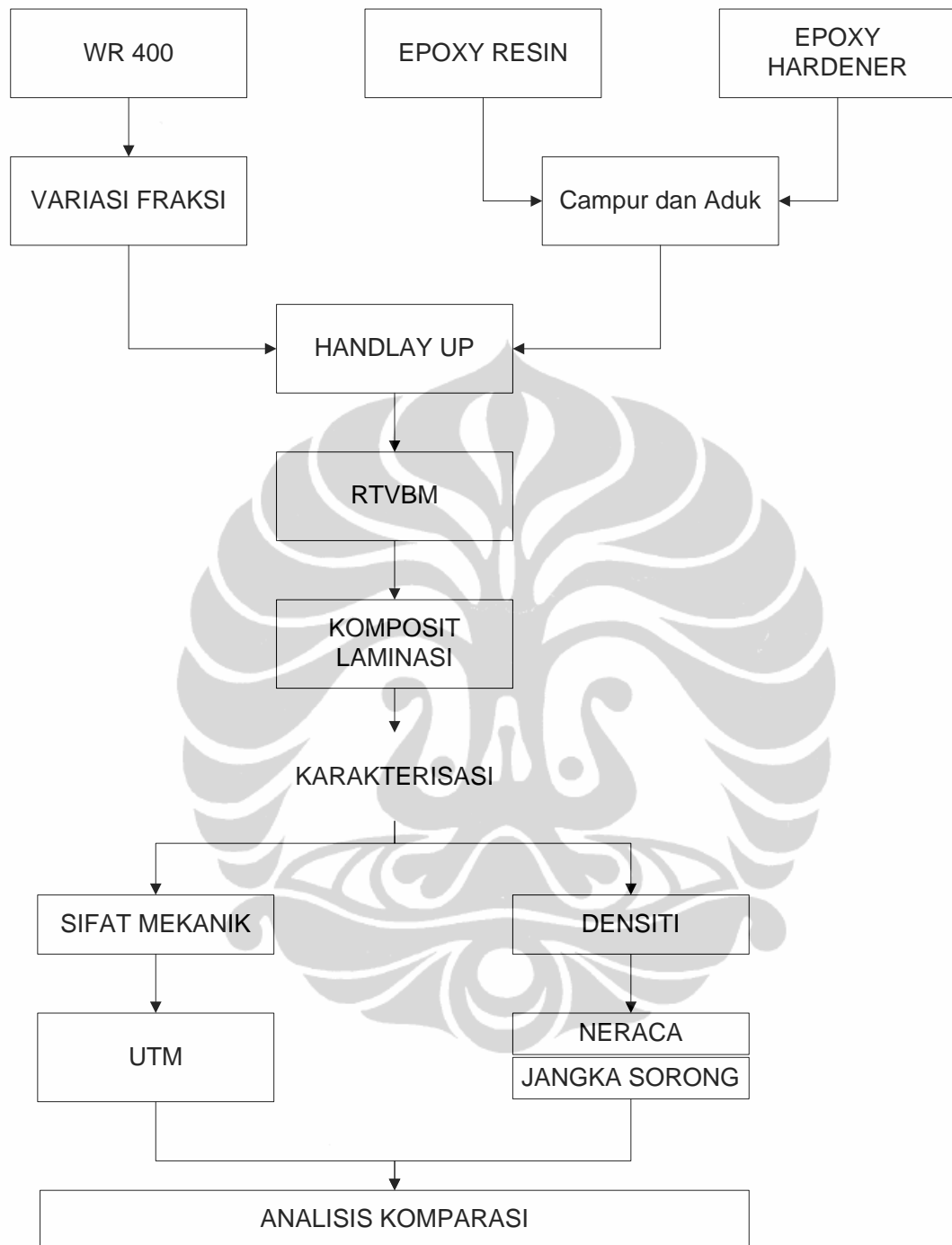
Gambar 3.6. Kalibrasi *Extensiometer* dan Proses Pengujian



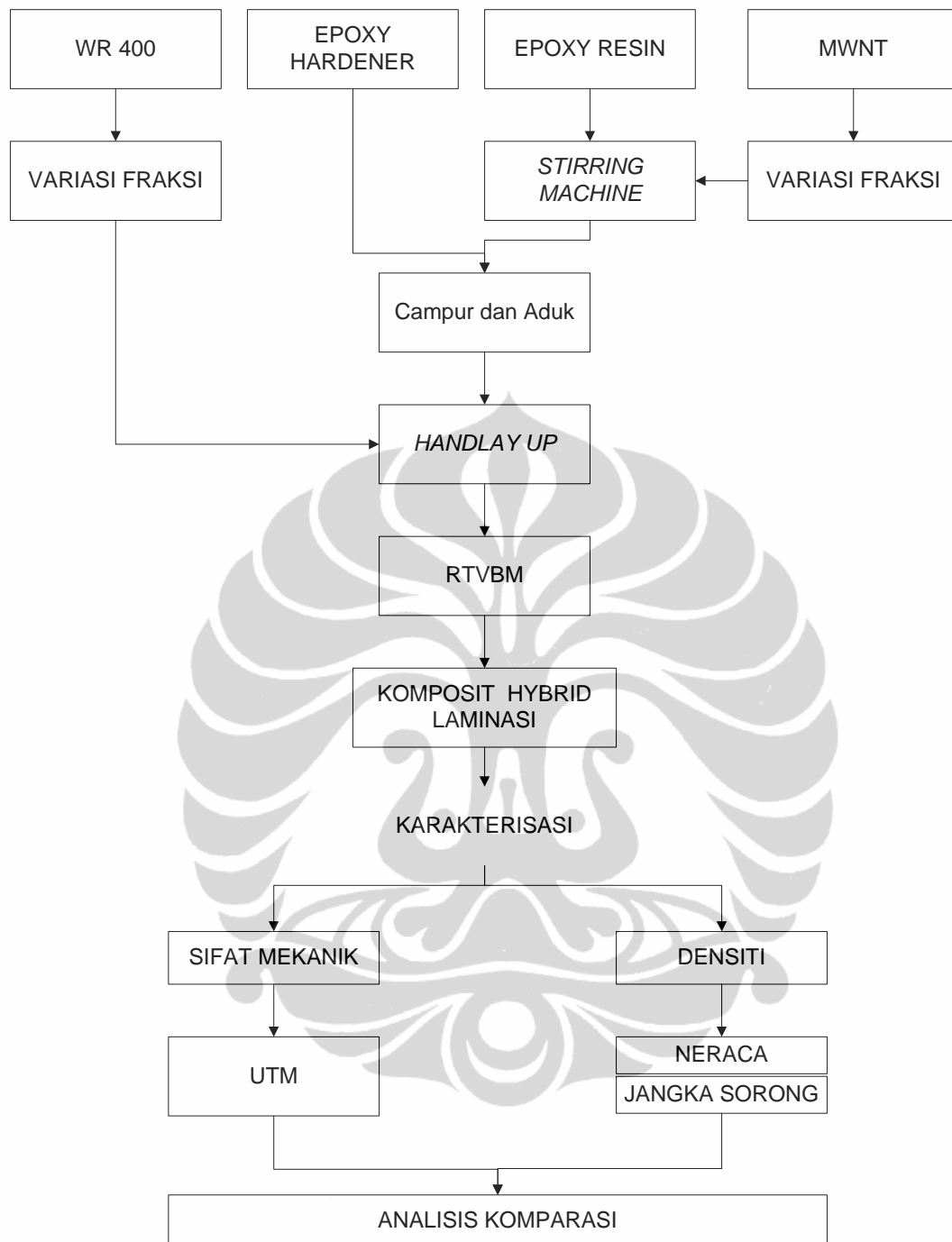
Gambar 3.7. Diagram Alir Perhitungan Fraksi



Gambar 3.8. Preparasi dan Karakterisasi *Casting*



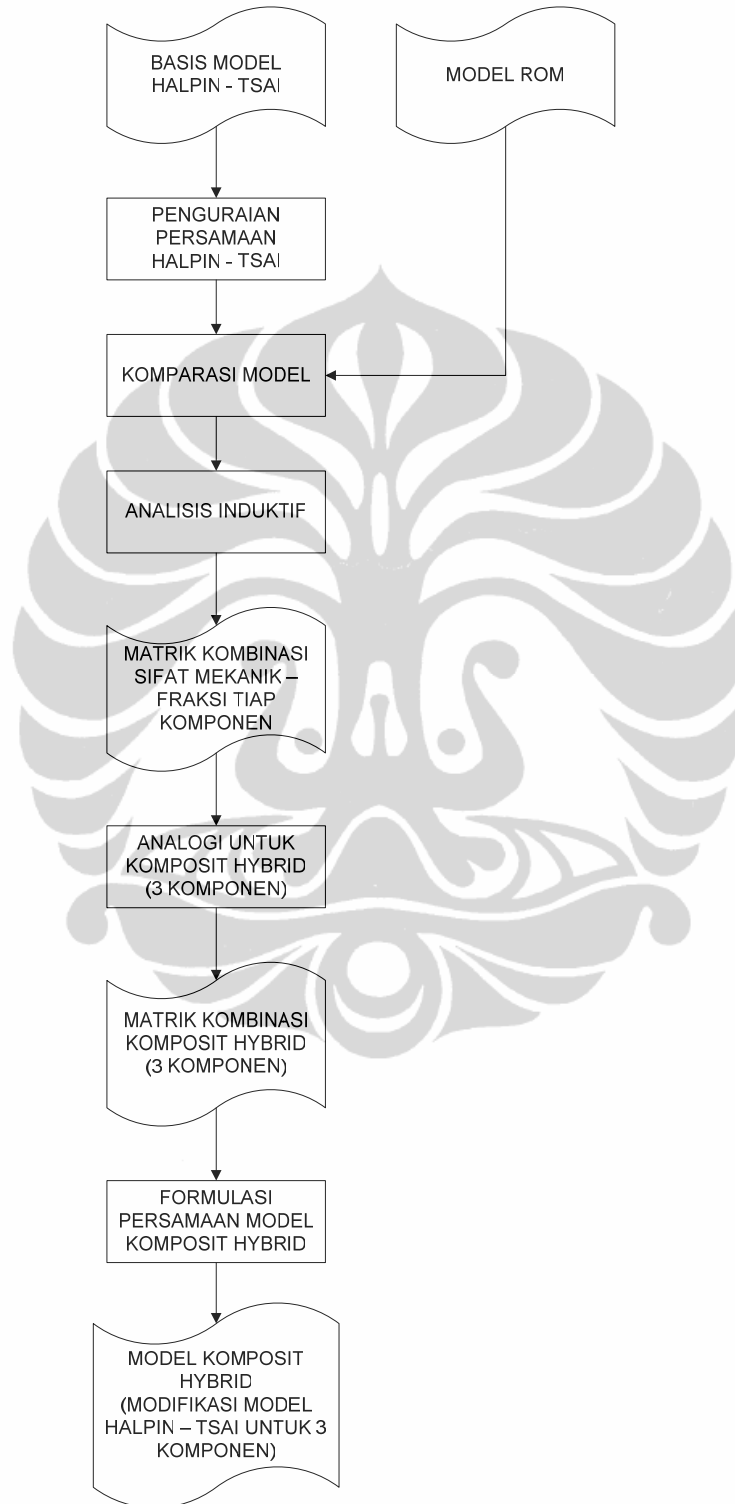
Gambar 3.9. Preparasi dan Karakterisasi Komposit Laminasi



Gambar 3.10. Preparasi dan Karakterisasi Komposit Hybrid

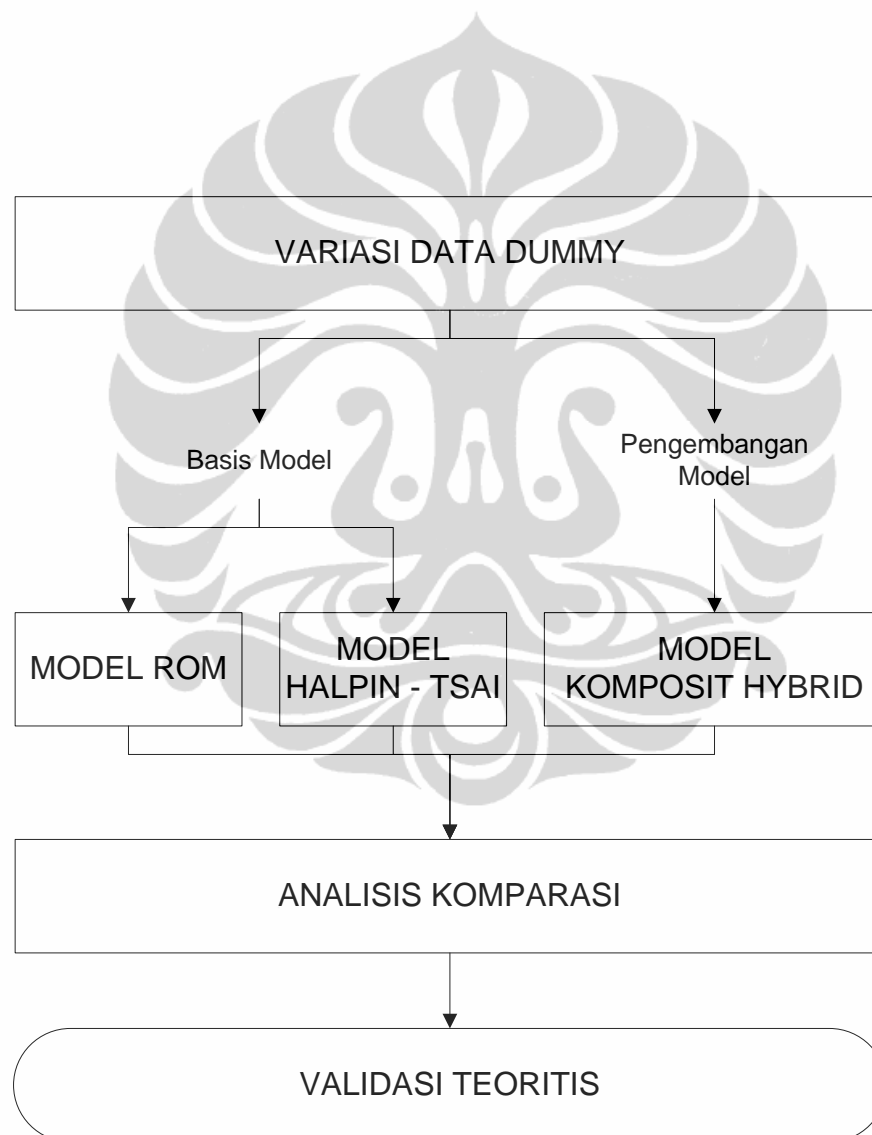
3.4. Pengembangan Model

Untuk mendukung eksperimen dilakukan pengembangan model dengan pendekatan teoritis yang berbasis pada model persamaan Halpin – TSai dan ROM.

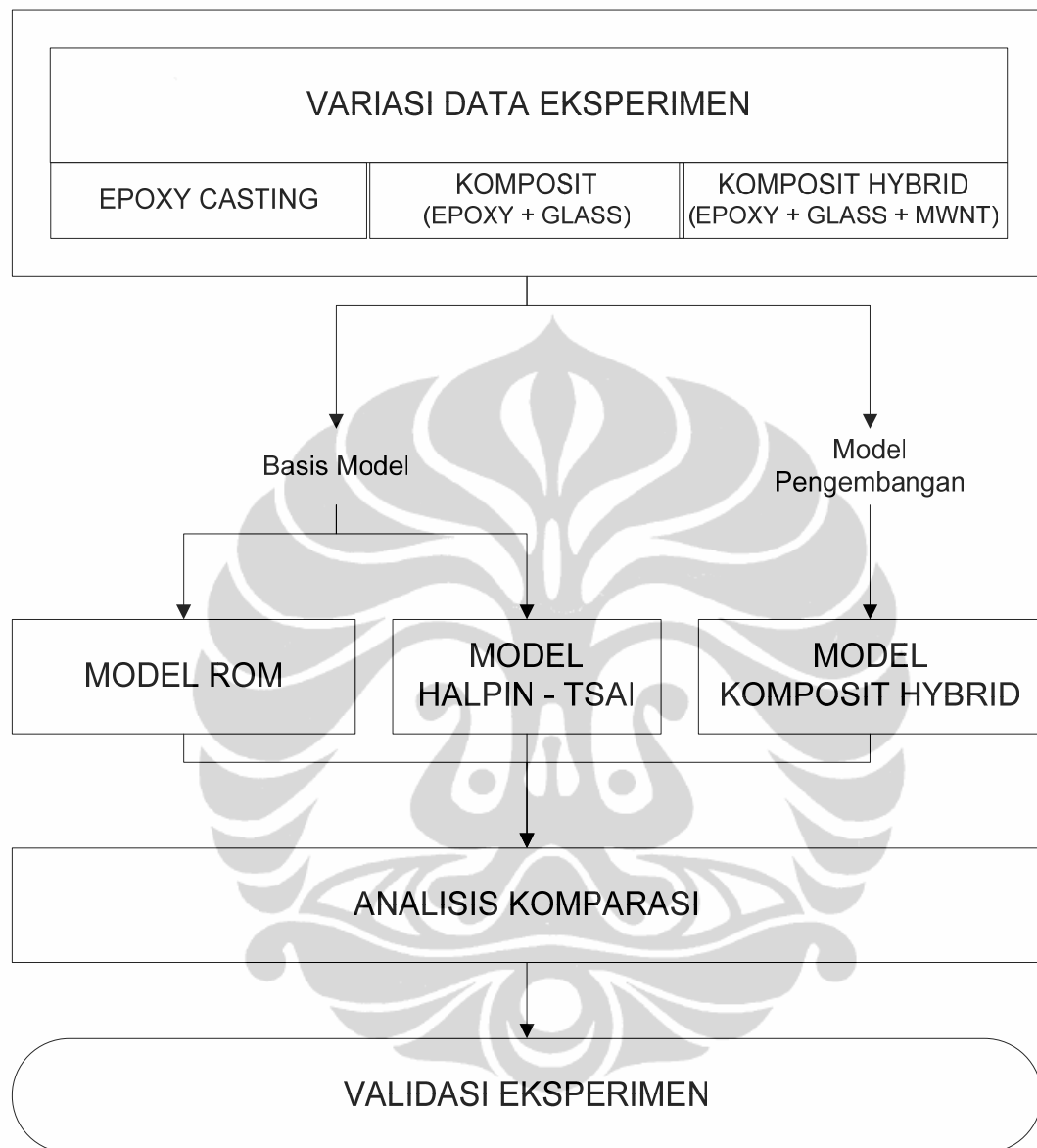


Gambar 3.11. Diagram Alir Pengembangan Model

Untuk mengetahui tingkat validasi model yang dikembangkan, maka dilakukan analisis perbandingan antara basis model (Model ROM dan Persamaan Halpin – TSai) dengan Model yang dikembangkan (Model Komposit Hybrid). Analisis perbandingan dilakukan dengan menggunakan data dummy. Diagram alir analisis perbandingan dapat dilihat seperti pada Gambar 3.12. Validasi juga dilakukan dengan membandingkan model komposit hybrid dengan data eksperimen. (Gambar 3.13)



Gambar 3.12. Diagram Alir Validasi Model dengan Data *Dummy*



Gambar 3.13. Diagram Alir Validasi Model dengan Data Eksperimen

3.5. Instrumen Pengujian

3.5.1. *Universal Testing Machine*

Secara umum pengujian yang menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) adalah uji tarik (*tensile test*) dan uji tekan (*compression test*). Pengujian

yang setipe dengan uji tarik adalah uji sobek (*tear test*), uji geser (*shear test*), uji kelelahan (*fatigue test*), dan uji kelupas (*peal test*). Sedangkan pengujian yang sejenis dengan uji tekan adalah uji lentur (*bending/flexural test*). Pengujian bisa dilakukan pada suhu kamar, 23 derajat Celcius dengan kelembaban 50% sampai pengujian pada suhu tinggi hingga 200 derajat Celcius.

Parameter yang dihasilkan UTM baik untuk uji tarik maupun uji tekan adalah modulus elastisitas, kuat luluh (*yield strength*), kuat maximum tekan/tarik (*ultimate strength*), kuat putus (*break strength*), regangan luluh (*yield strain*), regangan di titik maksimum tekan/tarik (*ultimate strain*), regangan putus (*break strain/ % elongation at break*). Data yang langsung diperoleh dari UTM ini adalah perubahan panjang sampel terhadap setiap besar gaya yang diberikan. Hasil ini akan dikonversikan ke dalam bentuk grafik strain-stress. Data awal inilah yang kemudian dianalisa lebih lanjut menggunakan komputer untuk mendapatkan parameter-parameter yang telah disebutkan di atas.

Merujuk pada ASTM D638 untuk pengujian kuat tarik sampel plastik, sampel harus dikondisikan pada suhu kamar selama 48 jam. Kemudian sampel dipotong dengan bentuk yang telah ditetapkan sesuai ASTM atau JIS menggunakan dumbbell. Kecepatan pengujian bisa bervariasi dari 0,2 mm/menit sampai 500 mm/menit.

3.5.2. Desiccator

Desiccator merupakan peralatan yang digunakan untuk mengeringkan sampel agar tidak mengandung uap air. Hal ini dilakukan agar pada saat pengukuran berat sampel tidak dipengaruhi oleh adanya uap air yang terkandung di dalam sampel. Desiccator berupa wadah dari kaca memiliki tutup yang kedap udara. Pada bagian bawah merupakan tempat untuk meletakkan bahan kimia yang dapat menyerap uap air, umumnya digunakan Kalsium Klorida.



Gambar 3.14. Desiccator

3.5.3. Tungku

Tungku digunakan untuk menguapkan bahan tertentu dalam suatu campuran yang bertujuan untuk mengetahui fraksi dari komponen penyusun suatu campuran. Tungku terdiri ruang bakar untuk meletakkan sampel, penutup ruang bakar dan indikator kontrol dan pengaturan (*setting*) temperatur.



Ruang Bakar



Indikator Temperatur

Gambar 3.15. Tungku

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Persiapan Pengujian

4.1.1. Tinjauan Karakteristik Bahan Dasar

Data karakteristik bahan dasar dalam penelitian ini adalah sebagai berikut seperti pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Karakteristik Bahan Dasar

	EPOXY	Glass	MWCNT
Densiti (gr/cm ³)	1,17	2,6	2,1
Kekuatan tarik (GPa)	0,069	0,512	11
Modulus Elastisitas (GPa)	2,482	38	270
Elongation	0,028	0,0135	
Diameter (nm)		17.000	20
Panjang (µm)		150.000	15

(“Polymer”, 1999; Andrews, 2004, p.35; Meng-Kao, 2008)

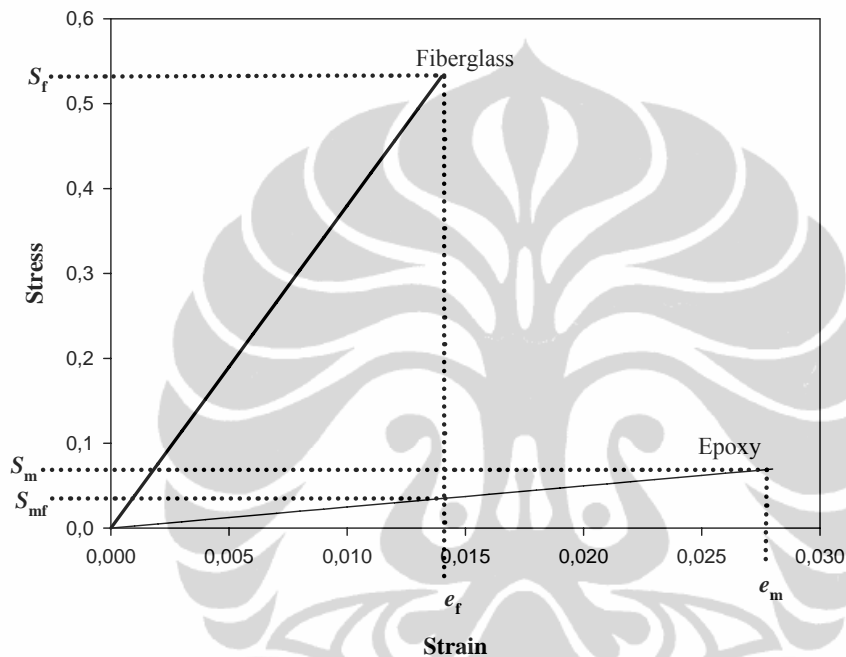
Dari data material dapat diketahui bahwa strain pada saat terjadi kerusakan untuk serat (*Fiberglass*) lebih kecil dibandingkan matrik, Kondisi ini yang umum terjadi pada komposit polimer. Hubungan *strain - stress* digambarkan secara grafik seperti pada Gambar 4.1. Karena *strain* Epoxy lebih besar dari serat glass maka besarnya kekuatan tarik dari Epoxy yang bekerja pada saat menerima beban akan lebih kecil yaitu menjadi S_{mf} .

Dengan sifat bahan dasar seperti pada Gambar 4.1 tersebut maka sifat mekanik komposit yang akan diperoleh akan mengikuti persamaan berikut (Gibson, 1994):

$$S_C = S_f V_f + S_{mf}(1 - V_f) \quad (4.1)$$

Pada saat menerima beban komposit dengan sifat bahan dasar seperti ini akan ditopang oleh sifat mekanik dari matrik sampai pada titik fraksi glass tertentu. Dukungan sifat mekanik oleh matrik mengikuti persamaan:

$$S_C = S_m V_m = S_m (1 - V_f) \quad (4.2)$$



Gambar 4.1. Grafik Strain – Stress Epoxy dan Serat

Sehingga antara persamaan (4.1) dan persamaan (4.2) terdapat titik potong yang merupakan titik minimum fraksi volum glass agar sifat mekanik komposit mengikut persamaan (4.1) dan cenderung meningkat dengan bertambahnya fraksi volum glass. (lihat Gambar 4.2). Fraksi glass minimum dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$V_{f_{\min}} = \frac{(S_m - S_{mf})}{(S_f - S_{mf} + S_m)}$$

Mengacu pada Gambar 4.1. maka dapat diperoleh nilai dari :

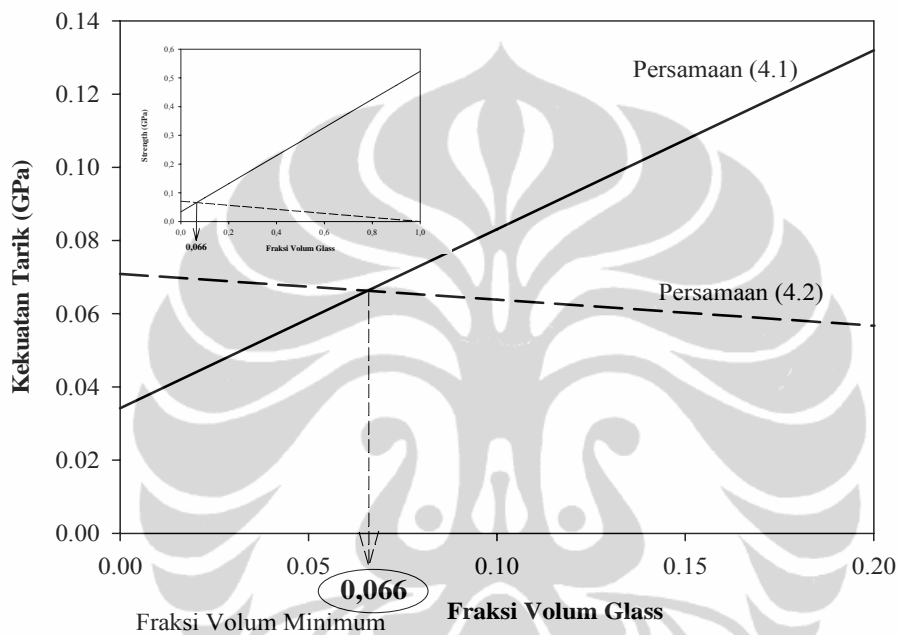
$$S_f = 0,523$$

$$S_m = 0,071$$

$$S_{mf} = 0,034$$

Sehingga dapat dihitung nilai dari $V_{f\min} = 0,066$

Secara grafik hasil perhitungan fraksi glass minimum digambarkan seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Fraksi Volum minimum Serat Glass

4.1.2. Preparasi Sampel Uji

Untuk mendukung dan memvalidasi pengembangan model mikromekanik yang dibuat serta untuk melihat perilaku komposit dengan penambahan MWNT maka dibuat sampel uji yang terdiri dari 3 macam. Ketiga macam sampel uji adalah :

- Sampel Casting Neat Resin
- Sampel laminasi, dengan variasi jumlah lapisan 1 lembar, 2 lembar, 3 lembar dan 4 lembar
- Sampel laminasi dengan penambahan MWNT

Contoh Kombinasi variasi jenis sampel yang dibuat dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Kombinasi Variasi Preparasi Sampel Uji

No	Kode Sampel	Berat (gr)		
		Epoxy	Glass	MWNT
1	S10000	125	0,00	0,00
2	S11L00	23,60	14,40	0,00
3	S12L00	43,20	28,80	0,00
4	S13L00	68,90	43,60	0,00
5	S14L00	86,40	57,70	0,00
6	S11L01	40,80	14,50	0,04
7	S12L01	60,50	28,30	0,06
8	S13L01	79,60	42,80	0,08
9	S14L01	100,60	56,70	0,10
10	S12L03	39,90	27,70	0,12
11	S12L05	40,10	28,10	0,21
12	S12L10	40,70	27,00	0,39
13	S13L03	80,40	37,50	0,24
14	S13L05	80,00	37,40	0,40
15	S13L10	80,00	38,80	0,79

Keterangan :

Kode S1 XL YZ
Makna Resin Lembar Glass %Berat MWNT

Contoh :

S1 3L 05
Resin 3 Lembar Glass MWNT 0,5% berat terhadap Matrik



Gambar 4.3. Sampel Casting



Gambar 4.4. Sampel Laminasi

4.1.3. Penghitungan Fraksi Volum

Perhitungan fraksi menggunakan persamaan pada subbab 3.3.1 dan mengikuti alur diagram seperti pada Gambar 3.7.

Hasil perhitungan fraksi dengan menggunakan metode *Burn off Test*, untuk tiap sampel uji disajikan pada Tabel 4.3.



Cawan Kosong

Cawan + Sampel

Setelah dibakar

Gambar 4.5. Berat Cawan, Sampel sebelum dan setelah dibakar

Tabel 4.3. Hasil Perhitungan Fraksi Sampel Uji

No.	Kode Sampel	Fraksi Volum	
		Glass	MWNT
1	S11L00	0,36 ± 0,02	0,0000
2	S12L00	0,36 ± 0,02	0,0000
3	S13L00	0,31 ± 0,01	0,0000
4	S14L00	0,33 ± 0,01	0,0000
5	S11L01	0,20 ± 0,03	0,0004
6	S12L01	0,28 ± 0,03	0,0004
7	S13L01	0,32 ± 0,01	0,0004
8	S14L01	0,26 ± 0,01	0,0004
9	S12L03	0,39 ± 0,01	0,0010
10	S12L05	0,36 ± 0,02	0,0018
11	S12L10	0,31 ± 0,02	0,0038
12	S13L03	0,27 ± 0,01	0,0012
13	S13L05	0,22 ± 0,01	0,0022
14	S13L10	0,21 ± 0,02	0,0044

4.2. Hasil Uji Tarik

4.2.1. Sampel Komposit Laminasi

Sampel Komposit terdiri sampel laminasi tanpa penambahan MWNT dan sampel laminasi dengan penambahan MWNT sebanyak 0,1% berat terhadap Epoxy. Sampel laminasi dibuat dengan variasi serat glass : 1 lembar, 2 lembar, 3 lembar dan 4 lembar, Hasil uji tarik sampel disajikan dalam Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Tabel 4.4. Hasil Uji Tarik Sampel Neat Epoxy dan Laminasi Tanpa MWNT

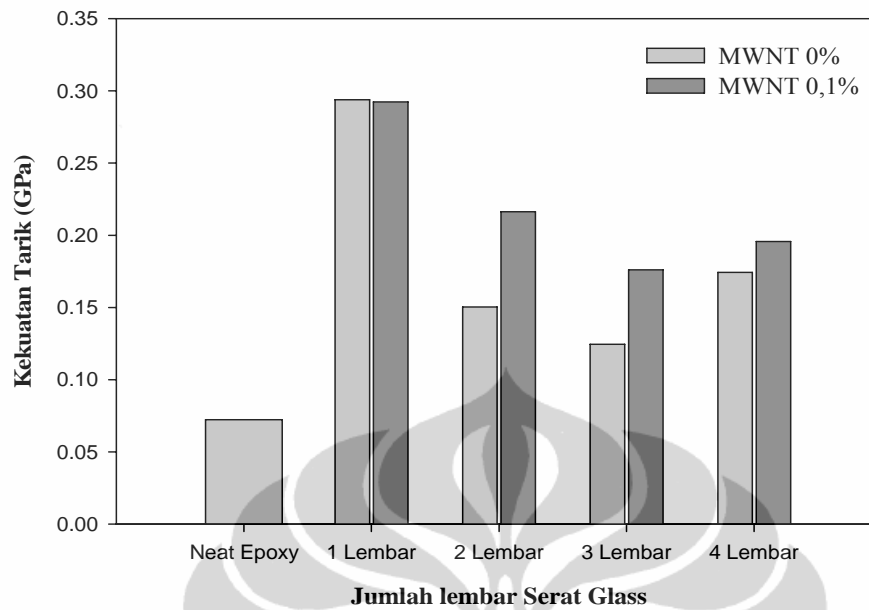
No	Kode Sampel	V_{glass}		V_{CNT}	Strength (GPa)	Modulus (GPa)
		Disain	Burn off Test			
1	S10000	0	0	0	$0,07 \pm 0,003$	$1,5 \pm 0,1$
2	S11L00	0,2	$0,36 \pm 0,02$	0	$0,29 \pm 0,04$	$15,9 \pm 1,5$
3	S12L00	0,2	$0,36 \pm 0,02$	0	$0,15 \pm 0,04$	$10,2 \pm 0,6$
4	S13L00	0,2	$0,31 \pm 0,01$	0	$0,12 \pm 0,02$	$8,2 \pm 1,2$
5	S14L00	0,2	$0,33 \pm 0,01$	0	$0,17 \pm 0,02$	$9,1 \pm 1,0$

Tabel 4.5. Hasil Uji Tarik Sampel Laminasi dan Penambahan MWNT0,1%

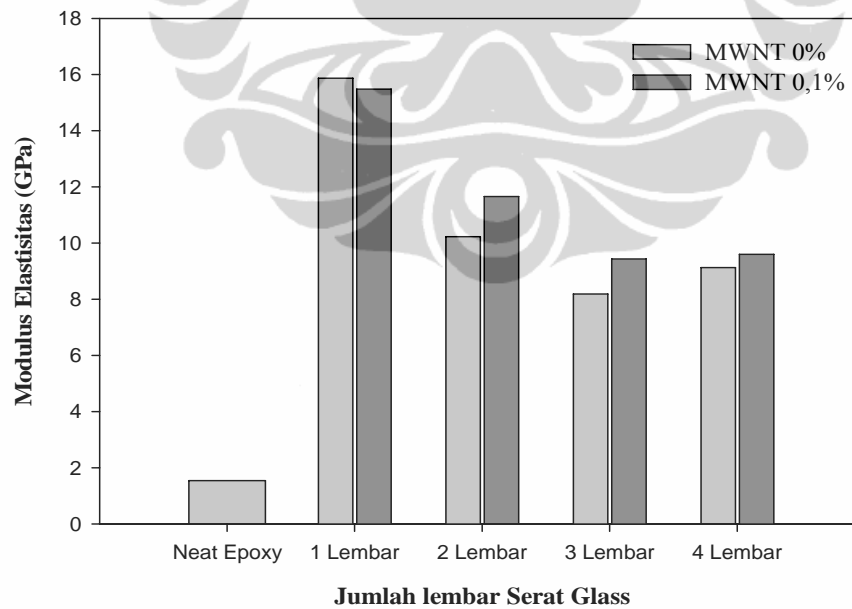
No	Kode Sampel	V_{glass}		V_{CNT}	Strength (GPa)	Modulus (GPa)
		Disain	Burn off Test			
1	S11L01	0,1	$0,20 \pm 0,03$	0.0004	$0,29 \pm 0,05$	$15,5 \pm 3,0$
2	S12L01	0,2	$0,28 \pm 0,03$	0.0004	$0,22 \pm 0,01$	$11,7 \pm 0,8$
3	S13L01	0,2	$0,32 \pm 0,01$	0.0004	$0,18 \pm 0,02$	$9,4 \pm 0,9$
4	S14L01	0,2	$0,26 \pm 0,01$	0.0004	$0,20 \pm 0,01$	$9,6 \pm 0,4$



Gambar 4.6. Sampel setelah di Uji



Gambar 4.7. Perbandingan Kekuatan Tarik antara Penambahan MWNT dan Tanpa MWNT, dengan variasi Lapisan Glass



Gambar 4.8. Perbandingan Modulus antara Penambahan MWNT dan Tanpa MWNT, dengan variasi Lapisan Glass

4.2.2. Sampel Komposit Hybrid

Sampel komposit hybrid merupakan sampel laminasi dengan variasi jumlah lapisan untuk serat glass dan variasi % berat untuk penambahan jumlah MWNT. Dalam hal ini variasi jumlah lapisan yang dibuat adalah 2 Lembar dan 3 Lembar. Sedangkan variasi % berat MWNT yang dibuat 0,3%, 0,5% dan 1,0%, Hasil uji tarik sampel komposit Hybrid disajikan dalam Tabel 4.6 dan Tabel 4.7.

Tabel 4.6. Hasil Uji Tarik Sampel Laminasi (2 Lembar) dan Penambahan MWNT

No	Kode Sampel	V_{glass}		V_{CNT}	Strength (GPa)	Modulus (GPa)
		Disain	Burn off Test			
1	S12L03	0,2	$0,39 \pm 0,01$	0.001	$0,27 \pm 0,05$	$14,9 \pm 2,9$
2	S12L05	0,2	$0,36 \pm 0,02$	0.002	$0,23 \pm 0,05$	$14,3 \pm 1,9$
3	S12L10	0,2	$0,31 \pm 0,02$	0.004	$0,24 \pm 0,02$	$13,4 \pm 1,5$

Tabel 4.7. Hasil Uji Tarik Sampel Laminasi (3 Lembar) dan Penambahan MWNT

No	Kode Sampel	V_{glass}		V_{CNT}	Strength (GPa)	Modulus (GPa)
		Disain	Burn off Test			
1	S13L03	0,2	$0,27 \pm 0,01$	0.001	$0,24 \pm 0,02$	$13,3 \pm 2,6$
2	S13L05	0,2	$0,22 \pm 0,01$	0.002	$0,23 \pm 0,03$	$12,0 \pm 1,1$
3	S13L10	0,2	$0,21 \pm 0,02$	0.004	$0,14 \pm 0,02$	$8,8 \pm 0,7$

4.3. Analisis Hasil Eksperimen

Dalam pembuatan sampel walaupun didasarkan pada jumlah lapisan, namun tidak didapatkan hubungan bahwa semakin banyak jumlah lapisan serat glass akan semakin tinggi fraksi glass. Hal ini dapat dikarenakan pada saat proses vakum semakin banyak lapisan akan semakin banyak resin yang dapat tertahan dalam komposit. Sehingga jumlah fraksi glass menjadi lebih kecil. Hal lain dapat pula dilihat dari perbandingan jumlah resin yang diperlukan dalam lapisan yang lebih dari satu akan memerlukan sejumlah resin yang berada diantara lapisan serat sehingga fraksi glass lebih kecil. Demikian pula untuk jumlah lapisan serat yang sama tidak menjamin fraksi glass dalam jumlah yang sama pula.

4.3.1. Kekuatan tarik

Untuk keperluan analisis akan dilakukan atas dasar fraksi volum serat glass. Untuk itu data hasil eksperimen selanjutnya akan dikelompokkan dan ditinjau dari jumlah fraksi volum glass. Pengelompokan data kekuatan tarik berdasarkan fraksi volum MWNT dan serat glass disajikan pada Tabel 4.8 yang selanjutnya digambarkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.9.

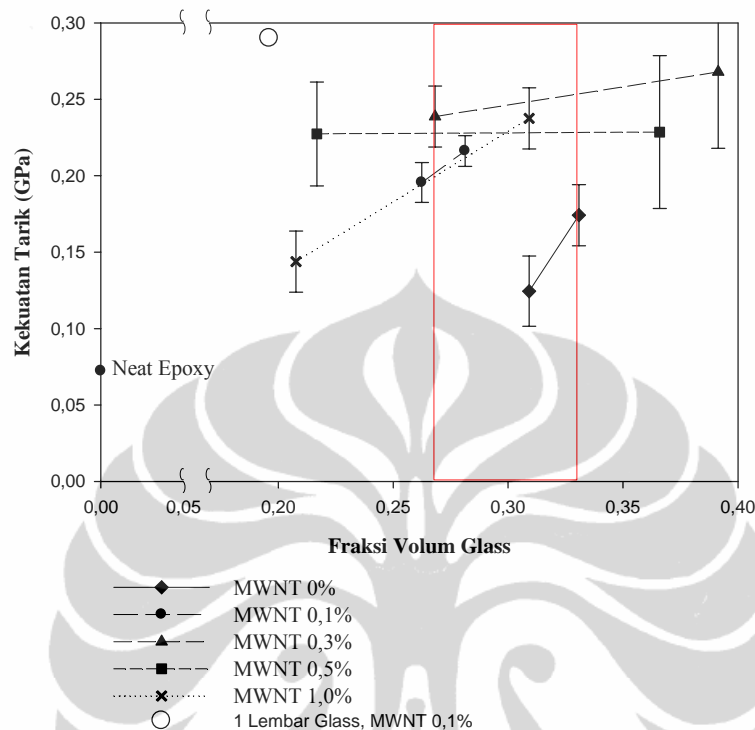
Tabel 4.8. Data kekuatan tarik Berdasarkan Fraksi MWNT dan Serat Glass

No	Kode Sampel	V_{glass}		V_{CNT}	Kekuatan Tarik (GPa)
		Disain	Burn off Test		
Neat Epoxy	S10000	0	0	0	0,07±0,003
Laminasi	S13L00	0,2	0,31 ± 0,01	0	0,12 ± 0,02
Tanpa MWNT	S14L00	0,2	0,33 ± 0,01	0	0,17 ± 0,02
Laminasi + MWNT 0,1%	S14L01	0,2	0,26 ± 0,01	0,0004	0,20 ± 0,01
	S12L01	0,2	0,28 ± 0,03	0,0004	0,22 ± 0,01
Laminasi + MWNT 0,3%	S13L03	0,2	0,27 ± 0,01	0,001	0,24 ± 0,02
	S12L03	0,2	0,39 ± 0,01	0,001	0,27 ± 0,05
Laminasi + MWNT 0,5%	S13L05	0,2	0,22 ± 0,01	0,002	0,23 ± 0,03
	S12L05	0,2	0,37 ± 0,02	0,002	0,23 ± 0,05
Laminasi + MWNT 1,0%	S13L10	0,2	0,21 ± 0,02	0,004	0,14 ± 0,02
	S12L10	0,2	0,31 ± 0,02	0,004	0,24 ± 0,02

Pada Gambar 4.9 juga ditampilkan data kekuatan tarik hasil eksperimen dari komposit laminasi dengan 1 lembar serat glass. Dari Gambar 4.9. dapat dikatakan bahwa penambahan MWNT pada komposit laminasi dapat meningkatkan sifat kekuatan tarik. Untuk memperlihatkan pengaruh penambahan MWNT terhadap sifat kekuatan tarik komposit laminasi maka dilakukan analisis dengan menggunakan data yang memiliki fraksi glass relatif sama, yaitu sebesar $0,30 \pm 0,03$.

Komposit laminasi dengan 1 Lembar serat glass terlihat kekuatan tarik dengan penambahan MWNT 0,1% berat, memiliki nilai tertinggi. Walaupun jika dilihat dari jumlah fraksi volum glass memiliki nilai terkecil, namun sifat mekaniknya lebih tinggi. Hal ini dapat dikarenakan pengaruh adanya penambahan

MWNT sebesar 0,1% berat terhadap Epoxy. Jenis komposit ini yang selanjutnya akan dapat dijadikan basis dalam mendesain simulasi lapisan tabung.

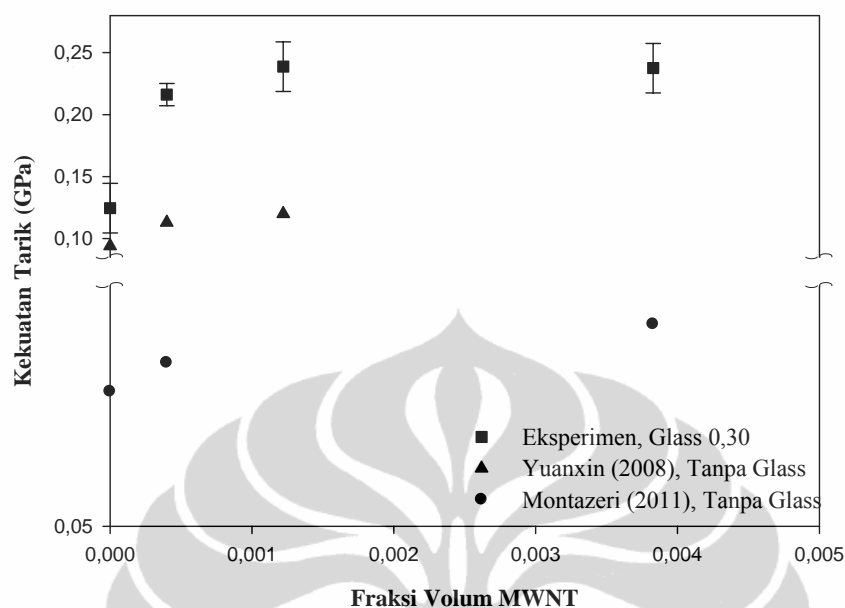


Gambar 4.9. Perbandingan Kekuatan tarik Komposit Laminasi Tanpa MWNT dan Komposit Laminasi dengan Penambahan MWNT

Berdasarkan data eksperimen pada Tabel 4.8, maka dikelompokan data dengan nilai fraksi volum Glass $0,30 \pm 0,03$ dengan penambahan MWNT 0,1% berat terhadap Epoxy yang setelah dilakukan perhitungan fraksi volum MWNT menjadi 0,0004. Data kekuatan tarik dengan fraksi volum Glass $0,30 \pm 0,03$ dengan variasi fraksi volum MWNT disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9. Data Kekuatan Tarik Berdasarkan Fraksi MWNT dan Glass $0,30 \pm 0,03$

No	Kode Sampel	V_{glass}	MWNT		Kekuatan Tarik (GPa)
			% Berat	V_{CNT}	
1	S13L00	$0,31 \pm 0,01$	0	0	$0,12 \pm 0,02$
2	S12L01	$0,28 \pm 0,03$	0,1	0,0004	$0,22 \pm 0,01$
3	S13L03	$0,27 \pm 0,01$	0,3	0,0012	$0,24 \pm 0,02$
4	S12L10	$0,31 \pm 0,02$	1,0	0,0038	$0,24 \pm 0,02$

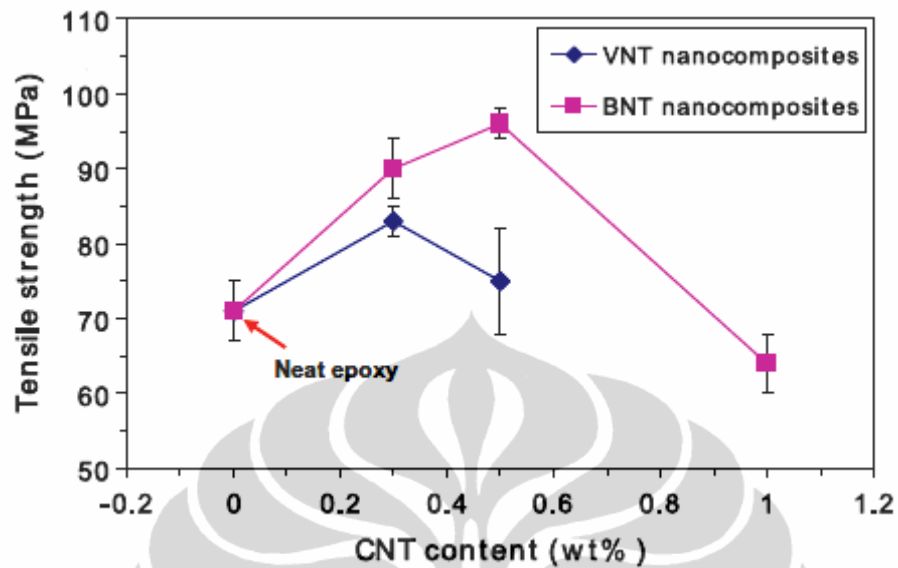


Gambar 4.10. Pengaruh MWNT terhadap Kekuatan tarik Komposit Laminasi

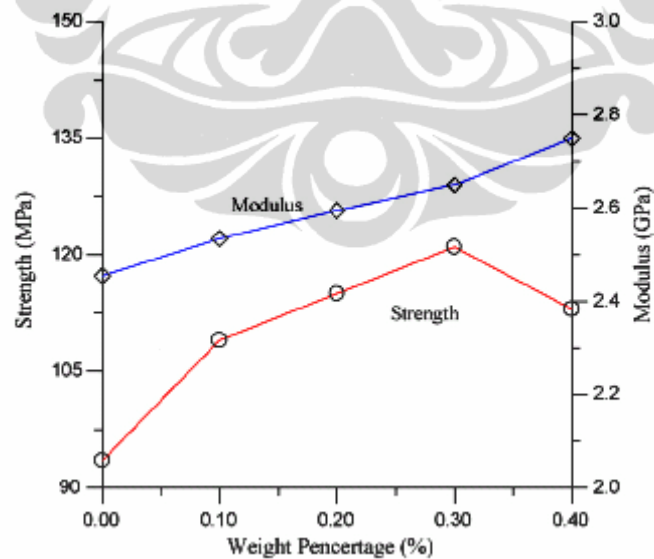
Memperhatikan Tabel 4.9 dan Gambar 4.10 di atas dapat dilihat terjadi peningkatan Kekuatan tarik sebesar 91% pada penambahan MWNT sebesar 0,1% berat terhadap resin Epoxy. Beberapa penelitian terdahulu dengan menggunakan matrik yang sama atau CNT yang sama menunjukkan hasil peningkatan sifat mekanik yang bervariasi besarnya. Valentini (2008) menambahkan SWNT sebanyak 0,1% ke dalam Epoxy dengan metode pencampuran sederhana dapat meningkatkan kekuatan tarik sebesar 12% (Spitalsky, 2010, p. 382). Montazeri dalam penelitiannya memperlihatkan penambahan 0,1% berat MWNT pada komposit MWNT/Epoxy meningkatkan sifat kekuatan tarik sebesar 4,7% (Montazeri, 2010, 2011)

Penambahan MWNT sebesar 0,3% berat terhadap komposit laminasi Glass/Epoxy mampu meningkatkan kekuatan tarik sebesar 100%. Selanjut penambahan MWNT sebesar 1% berat tidak terlalu banyak pengaruhnya, bahkan relatif menurun jika dibandingkan dengan penambahan 0,3% berat (lihat Gambar 4.10). Penelitian sebelumnya, yang dilakukan oleh Siddiqui (2010) juga

menunjukkan hal yang sama dimana penambahan 1% berat MWNT mengakibatkan penurunan sifat kekuatan tarik (lihat Gambar 4.11).



Gambar 4.11. Pengaruh % Berat CNT terhadap Kekuatan Tarik (Siddiqui, 2010, p.545)



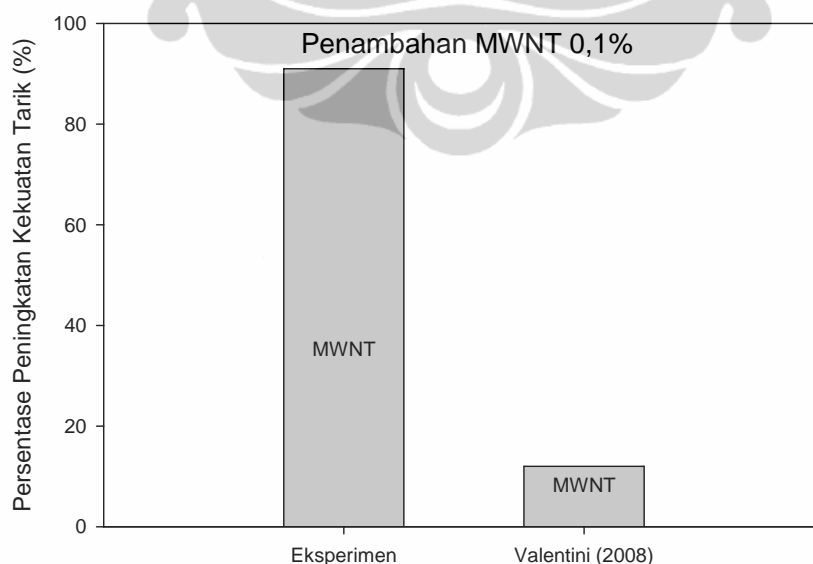
Gambar 4.12. Pengaruh % Berat CNT terhadap Sifat Mekanik (Yuanxin, 2008)

Penelitian yang dilakukan Yuanxin, bahkan menunjukkan penurunan sifat kekuatan tarik pada penambahan MWNT 0,4% berat (Gambar 4.12). Hal yang sama juga dialami Jun (2008) dalam penelitiannya menggunakan CNT pada matrik Polietilen Naphta (p.3344).

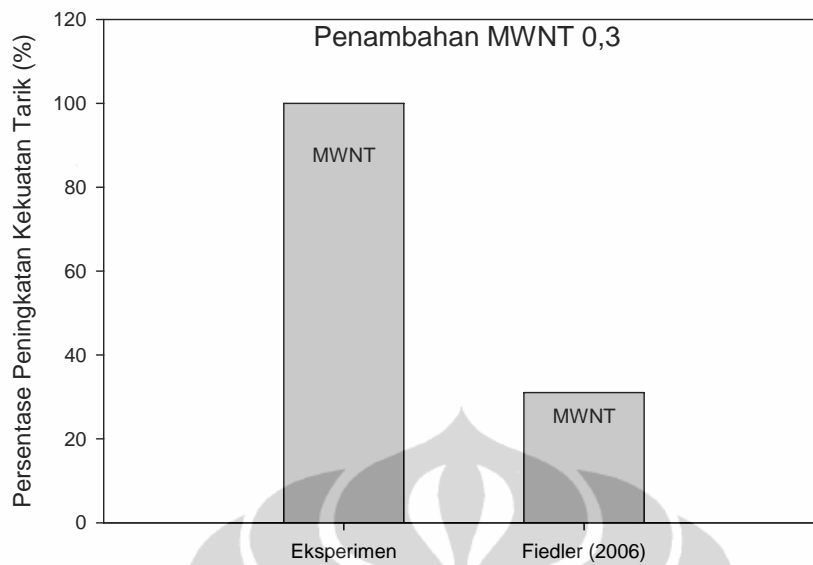
Ada dua hal yang dapat mengakibatkan penurunan sifat mekanik pada penambahan CNT yang lebih banyak. Pertama, sulitnya melakukan dispersi yang merata pada penambahan CNT yang semakin banyak (Yuanxin, 2008). Kedua karena adanya *void*, Choi (2005), melaporkan dalam penelitiannya bahwa *void* dapat terjadi selama proses pembuatan dan *void* akan semakin meningkat dengan semakin banyak kandungan nanopartikel. (Yuanxin, 2008, p.159).

Penelitian yang dilakukan Liu (2005), penambahan MWNT sebesar 1% berat terhadap Epoxy jenis Epon 828/D-2000, mampu meningkat kekuatan tarik sebesar 39% (SC Tjong, 2006, p.177). Penambahan 0,3% berat DWCNT yang dilakukan Fiedler mampu meningkatkan *fracture toughness* Epoxy sebesar 31% (Fiedler, 2006).

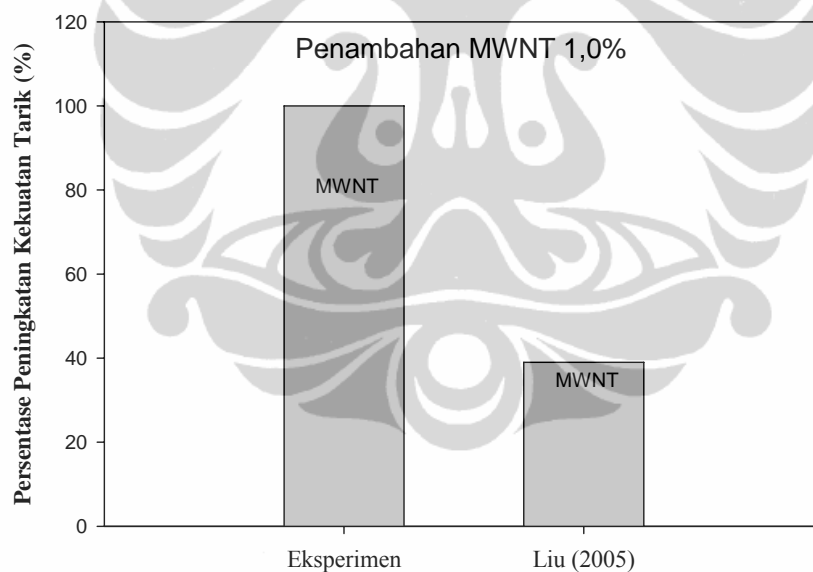
Perbandingan persentase peningkatan kekuatan tarik antara hasil eksperimen dengan penelitian terdahulu dapat dilihat pada Gambar 4.13, Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 berikut ini.



Gambar 4.13. Perbandingan Persentase peningkatan Kekuatan Tarik pada Penambahan MWNT 0,1%



Gambar 4.14. Perbandingan Persentase peningkatan Kekuatan Tarik pada Penambahan MWNT 0,3%



Gambar 4.15. Perbandingan Persentase peningkatan Kekuatan Tarik pada Penambahan MWNT 1,0 %

4.3.2. Modulus Elastisitas

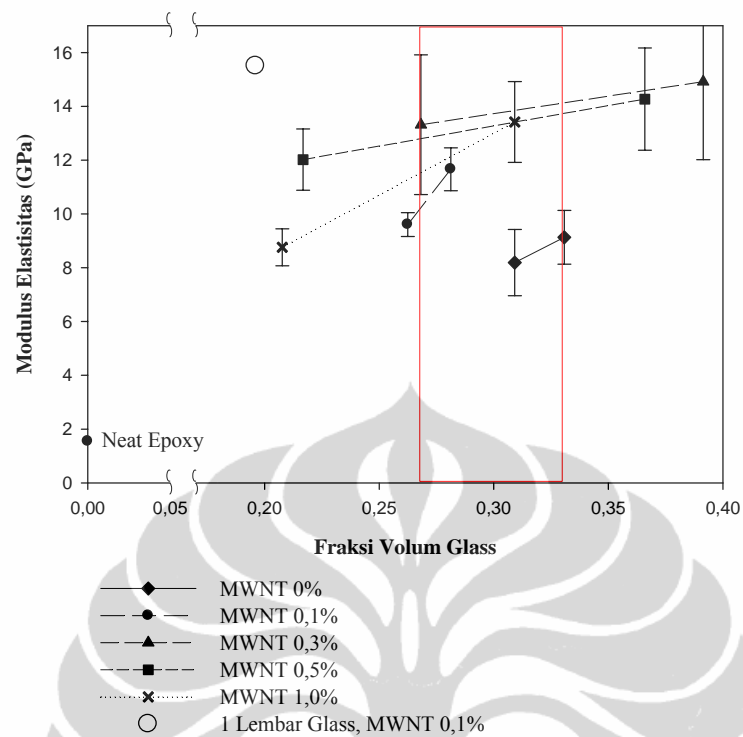
Pengelompokan data modulus elastisitas berdasarkan fraksi volum MWNT dan serat glass disajikan pada Tabel 4.10 yang selanjutnya digambarkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.16.

Tabel 4.10. Data Modulus Berdasarkan Fraksi MWNT dan Serat Glass

No	Kode Sampel	V_{glass}		V_{CNT}	Modulus (GPa)
		Disain	Burn off Test		
Neat Epoxy	S10000	0	0	0	$1,5 \pm 0,1$
Laminasi	S13L00	0,2	$0,31 \pm 0,01$	0	$8,2 \pm 1,2$
Tanpa MWNT	S14L00	0,2	$0,33 \pm 0,01$	0	$9,1 \pm 1,0$
Laminasi + MWNT 0,1%	S14L01	0,2	$0,26 \pm 0,01$	0,0004	$9,6 \pm 0,4$
	S12L01	0,2	$0,28 \pm 0,03$	0,0004	$11,7 \pm 0,8$
Laminasi + MWNT 0,3%	S13L03	0,2	$0,27 \pm 0,01$	0,001	$13,3 \pm 2,6$
	S12L03	0,2	$0,39 \pm 0,01$	0,001	$14,9 \pm 2,9$
Laminasi + MWNT 0,5%	S13L05	0,2	$0,22 \pm 0,01$	0,002	$12,0 \pm 1,1$
	S12L05	0,2	$0,37 \pm 0,02$	0,002	$14,3 \pm 1,9$
Laminasi + MWNT 1,0%	S13L10	0,2	$0,21 \pm 0,02$	0,004	$8,8 \pm 0,7$
	S12L10	0,2	$0,31 \pm 0,02$	0,004	$13,4 \pm 1,5$

Pada Gambar 4.16 juga ditampilkan data modulus elastisitas hasil eksperimen dari komposit laminasi dengan 1 lembar serat glass. Dari Gambar 4.16. dapat dikatakan bahwa penambahan MWNT pada komposit laminasi dapat meningkatkan sifat modulus elastisitas. Untuk memperlihatkan pengaruh penambahan MWNT terhadap modulus elastisitas komposit laminasi maka dilakukan analisis dengan menggunakan data yang memiliki fraksi glass relatif sama, yaitu sebesar $0,3 \pm 0,03$.

Komposit laminasi dengan 1 Lembar serat glass terlihat modulus elastisitas dengan penambahan MWNT 0,1% berat, memiliki nilai tertinggi. Walaupun jika dilihat dari jumlah fraksi volum glass memiliki nilai terkecil, namun sifat mekaniknya lebih tinggi. Hal ini dapat dikarenakan pengaruh adanya penambahan MWNT sebesar 0,1% berat terhadap Epoxy.

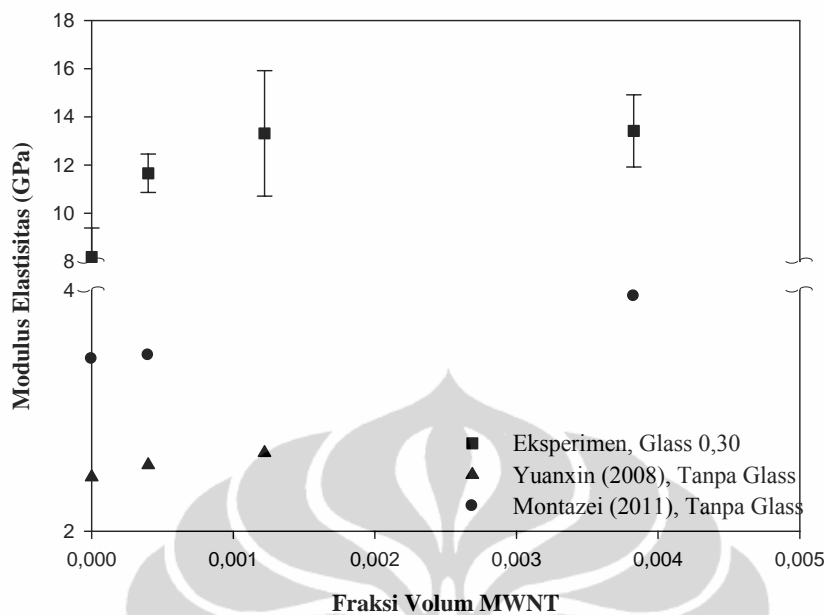


Gambar 4.16. Perbandingan Modulus Elastisitas Komposit Laminasi Tanpa MWNT dan Komposit Laminasi dengan Penambahan MWNT

Data kekuatan tarik dengan fraksi volum Glass $0,3 \pm 0,03$ dengan variasi fraksi volum MWNT disajikan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11. Data Modulus Berdasarkan Fraksi MWNT dan Glass $0,3 \pm 0,03$

No	Kode Sampel	V_{glass}	MWNT		Modulus (GPa)
			% Berat	V_{CNT}	
1	S13L00	$0,31 \pm 0,01$	0	0	$8,2 \pm 1,2$
2	S12L01	$0,28 \pm 0,03$	0,1	0,0004	$11,7 \pm 0,8$
3	S13L03	$0,27 \pm 0,01$	0,3	0,0012	$13,3 \pm 2,6$
4	S12L10	$0,31 \pm 0,02$	1,0	0,0038	$13,4 \pm 1,5$



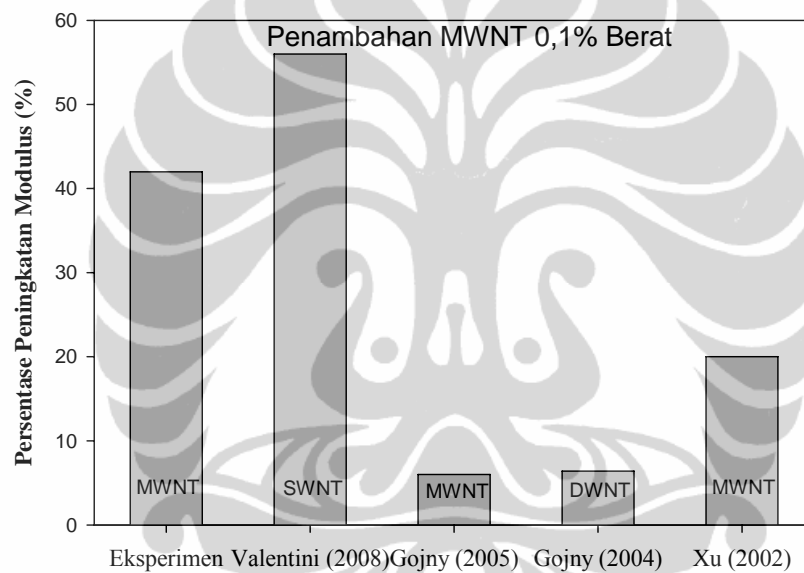
Gambar 4.17. Pengaruh MWNT terhadap Modulus Elastisitas Komposit Laminasi

Memperhatikan Tabel 4.11 dan Gambar 4.17 di atas dapat dilihat terjadi peningkatan modulus elastisitas sebesar 42% pada penambahan MWNT sebesar 0,1% berat terhadap resin Epoxy. Beberapa penelitian terdahulu dengan menggunakan matrik yang sama atau CNT yang sama menunjukkan hasil peningkatan sifat mekanik yang bervariasi besarnya. Xu (2002), dengan menambahkan 0,1% MWNT ke dalam Epoxy mampu meningkatkan sifat modulus elastisitas sebesar 20% (Spitalsky, 2010, p.381). Begitu pula, Valentini (2008) menambahkan SWNT sebanyak 0,1% ke dalam Epoxy dengan metode pencampuran sederhana dapat meningkatkan modulus elastisitas 56% (Spitalsky, 2010, p. 382). Gojny dalam penelitiannya menghasilkan peningkatan modulus elastisitas sebesar 6% pada sifat mekanik Epoxy dengan menambahkan 0,1% MWNT (Gojny, 2005). Penelitian lain yang dilakukan Gojny, mampu meningkatkan modulus elastisitas dari Bisphenol-A Epoxy sebesar 6,4% dengan menambahkan 0,1% DWNT (*Double Wall Nanotube*) (Gojny, 2004).

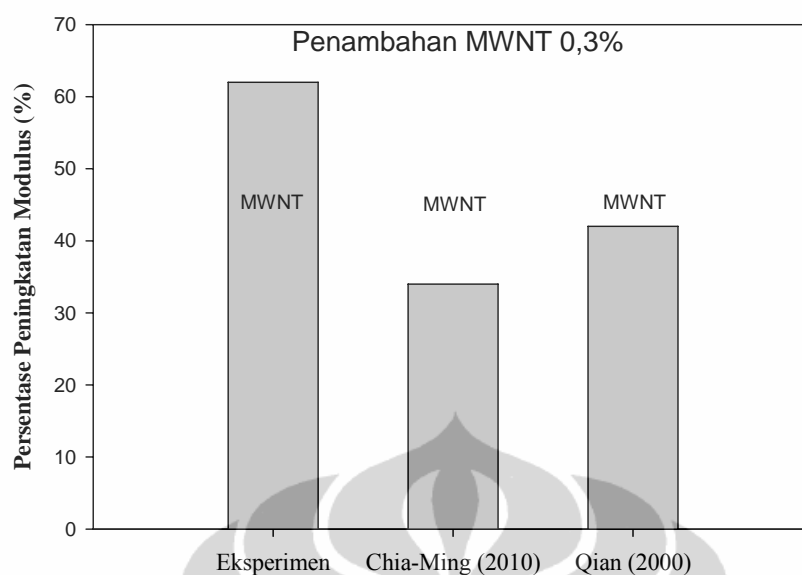
Penambahan MWNT sebesar 0,3% berat terhadap komposit laminasi Glass/Epoxy mampu meningkatkan modulus elastisitas sebesar 62%. Selanjut penambahan MWNT sebesar 1% berat tidak terlalu banyak pengaruhnya (lihat

Gambar 4.17). Pemanfaatan MWNT untuk meningkatkan modulus elastisitas matrik polistiren dilakukan oleh Qian (2000) dengan menambahkan 1% MWNT, modulus elastisitas Polistiren meningkat 42% ((Rahmat, 2011, p.80). Penelitian lain dengan memanfaatkan MWNT dilakukan oleh Chia-Ming, penambahan 1% berat matrik Polyvinylidene Flouride (PVDF) meningkatkan modulus elastisitas sebesar 34% (Chia-Ming, 2010).

Perbandingan persentase peningkatan kekuatan tarik antara hasil eksperimen dengan penelitian terdahulu dapat dilihat pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 berikut ini.



Gambar 4.18. Perbandingan Persentase peningkatan Modulus pada Penambahan MWNT 0,1%



Gambar 4.19. Perbandingan Persentase peningkatan Modulus pada Penambahan MWNT 0,3%

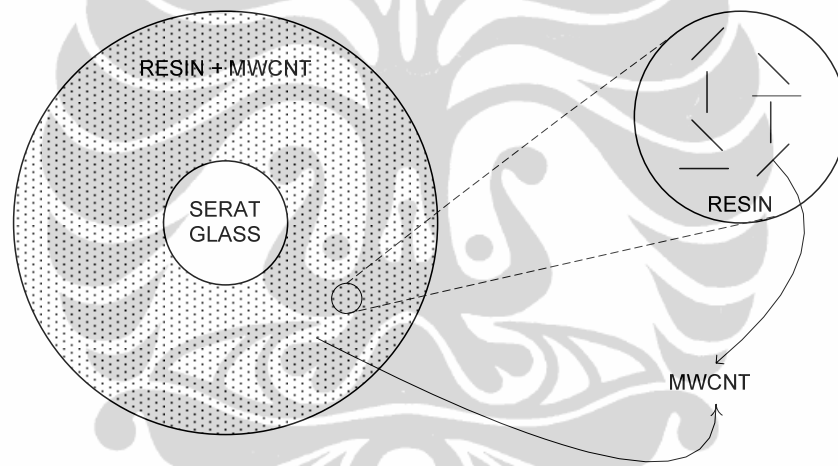
4.4. Pengembangan Model Mikromekanik

Dalam pengembangan model untuk memprediksi sifat mekanik ini, didasarkan pada beberapa asumsi berikut: ikatan *interface* sempurna, distribusi semua serat merata. Model mikromekanik digunakan untuk memprediksi sifat mekanik dari suatu komposit. Model mikromekanik yang sering digunakan adalah model ROM. Pada model ROM dapat digunakan baik untuk serat panjang kontinu ataupun serat pendek (partikel). Dalam hal ini MWNT dapat diperlakukan sebagai serat pendek. Untuk aplikasi pada serat panjang model ROM yang dipakai menggunakan persamaan (2.15), sedangkan untuk serat pendek atau CNT model ROM dimodifikasi oleh beberapa penulis.

Model mikromekanik lainnya yang sering digunakan adalah model Halpin – TSai. Model ini lebih kompleks dibandingkan dengan model ROM. Pada model ini tidak hanya memasukkan unsur prinsip fraksi dalam pencampuran, juga memasukan unsur kombinasi antara fraksi dan sifat serta faktor efisiensi panjang fiber.

Kedua model tersebut dikembangkan atas dasar teori komposit untuk dua komponen (matrik dan serat). Pada penelitian ini akan dikembangkan model mikromekanik untuk Komposit Hybrid yang mengandung tiga komponen (Matrik, serat Glass dan serat *Carbon Nanotube*). Komposit Hybrid, atau komposit yang mengandung dua atau lebih serat penguatan akan memperluas peluang peningkatan sifat mekanik dan dapat mengurangi biaya. Sifat mekanik komposit Hybrid dapat mengikuti model ROM atau bahkan tidak (Yiping, 1993). Jadi berdasarkan pada kedua model tersebut, ROM dan Halpin – Tsai, dikembangkan model mikromekanik untuk Komposit Hybrid.

4.4.1. Model I



Gambar 4.20. Model I (*hybride Composite*)

Secara fisik ukuran serat glass dengan CNT memiliki perbedaan yang sangat besar. Rasio diameter CNT terhadap serat glass mencapai $1,18 \times 10^{-3}$, sedangkan rasio panjang CNT terhadap serat glass mencapai $1,00 \times 10^{-4}$. Adanya perbedaan ukuran fisik yang cukup besar antara CNT dan serat glass, maka dapat diasumsikan bahwa penyebaran CNT di dalam matrik dapat dianggap sebagai matrik (campuran CNT dan Resin). Sehingga komposit yang tersusun dari serat glass, CNT dan Resin secara model dapat diasumsikan sebagai komposit dengan komponen penguatnya adalah serat glass dan pengikatnya matrik campuran CNT dan Resin. Bahkan Aveston dan Silwood (1976) dalam penelitiannya

menganalisis mekanika patahan komposit hybrid Carbon/Glas/Epoxy dengan mengasumsikan matriknya merupakan campuran Glass dan Epoxy. (Yiping, 1993, p.290)

Sehingga penghitungan sifat mekanik dari campuran CNT dengan Resin dapat menggunakan model persamaan Halpin – TSai (persamaan 2.22). Kemudian untuk menghitung sifat mekanik dari komposit Hybrid dapat menggunakan model ROM dengan menganggap campuran CNT dengan Resin merupakan suatu matrik. Sehingga secara formulasi Model I dapat mengikut persamaan berikut di bawah ini.

$$P = E_{glass} V_{glass} + (1 - V_{glass}) \left[\frac{1 + \xi \eta V_{cnt}}{1 - \eta V_{cnt}} \right] P_m \quad (4.3)$$

Validasi model persamaan (4.3) dilakukan dengan pendekatan teoritis dengan melihat logika matematis kesesuaiannya menurut teori yang berlaku. Secara teoritis suatu komposit dengan komposisi matrik dan serat tertentu sifat mekaniknya akan mengikuti model ROM, dimana komposisi yang besar akan menentukan sifat mekaniknya. Oleh karena itu model persamaan (4.3) akan diuji dengan menggunakan variasi data untuk melihat kecenderungan perubahan sifat mekanik berdasarkan jumlah fraksi sesuai dengan teori yang sudah ada. Pada saat fraksi serat (CNT dan Glass) sama dengan nol maka nilai sifat mekanik merupakan sifat mekanik matrik. Pada saat nilai $V_m = 0$ dan $V_f = 0$ maka sifat mekaniknya merupakan sifat mekanik dari pada CNT, demikian pula saat nilai $V_m = 0$ dan $V_{CNT} = 0$ maka sifat mekanik dari serat Glass yang bekerja. Sifat mekanik akan merupakan variasi dari ketiga komponennya pada saat komposisi masing-masing komponen berperan. Untuk memperlihatkan kecenderungan secara teoritis berlaku (valid) maka digunakan gambaran dengan menggunakan grafik hubungan antara Strain – Stress. Hasil validasi menunjukkan Model I secara teoritis dapat dikatakan valid dan dapat digunakan Uraian lengkap mengenai validasi teoritis untuk Model I dapat dilihat pada lampiran 1.

4.4.2. Model II : Modifikasi Halpin – TSai

Model II dikembangkan dengan menggunakan basis model persamaan Halpin – TSai. Pengembangan model dilakukan dengan pendekatan matematis.

Kutipan persamaan 2.22 :

$$P = \left[\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right] P_m$$

$$\eta = \frac{\frac{P_f}{P_m} - 1}{\frac{P_f}{P_m} + \xi}$$

Persamaan Halpin – TSai sebenarnya merupakan pengembangan dari Model ROM. Jika nilai $\xi = 0$, maka persamaan Halpin – TSai menjadi model invers dari ROM dan jika $\xi = \infty$, maka persamaan Halpin – TSai menjadi model ROM (Halpin, 1976; Tucker III, 1999).

Berdasarkan persamaan (2.22) dapat diuraikan sebagai berikut :

$$P = \frac{1 + \xi \left(\frac{(P_f/P_m) - 1}{(P_f/P_m) + \xi} \right) V_f}{1 - \left(\frac{(P_f/P_m) - 1}{(P_f/P_m) + \xi} \right) V_f} P_m$$

$$P = \frac{\left(\frac{P_f}{P_m} \right) + \xi + \xi \left(\frac{(P_f/P_m) - 1}{(P_f/P_m) + \xi} \right) V_f}{\left(\frac{P_f}{P_m} \right) + \xi - \left(\frac{(P_f/P_m) - 1}{(P_f/P_m) + \xi} \right) V_f} P_m$$

$$P = \frac{\left(\frac{P_f}{P_m} \right) + \xi + \xi \left(\frac{(P_f/P_m) - 1}{(P_f/P_m) + \xi} \right) V_f}{\left(\frac{P_f}{P_m} \right) + \xi - \left(\frac{(P_f/P_m) - 1}{(P_f/P_m) + \xi} \right) V_f} P_m$$

$$P = \frac{P_f + \xi P_m + \xi P_f V_f - \xi P_m V_f}{(P_f/P_m) + \xi - (P_f/P_m)V_f + V_f}$$

$$P = \frac{P_f + \xi(1 - V_f)P_m + \xi P_f V_f}{(1 - V_f)(P_f/P_m) + \xi + V_f}$$

$$P = \frac{P_f + \xi P_m V_m + \xi P_f V_f}{(P_f/P_m)V_m + \xi + V_f}$$

$$P = \frac{\xi P_m (P_m V_m + P_f V_f) + P_f P_m}{P_f V_m + P_m V_f + \xi P_m} \quad (4.4)$$

Hasil penguraian model Halpin – TSai dari persamaan (2.22) menjadi persamaan (4.4). Pada persamaan (4.4) dapat dilihat bahwa dasar dari penyusunan model ini adalah model ROM. Elemen pembilang pada persamaan (4.4) mengandung model ROM. Sementara pada bagian penyebut mengandung unsur invers dari model ROM. Model Mikromekanik Halpin – TSai selain memasukan unsur prinsip fraksi dalam pencampuran, juga memasukan unsur kombinasi antara fraksi dan sifat. Secara matrik unsur fraksi dan sifat dapat disajikan seperti pada Bagan berikut di bawah ini. Model Halpin – TSai memasukan faktor efisiensi panjang fiber ξ .

Bagan Matrik Elemen dalam Model

Halpin – TSai (Komposit : Dua Komponen)

	V_m	V_f	
P_m	$P_m V_m$	$P_m V_f$	ξP_m
P_f	$P_f V_m$	$P_f V_f$	$P_m P_f$

$$P = \frac{\xi P_m (P_m V_m + P_f V_f) + P_f P_m}{P_f V_m + P_m V_f + \xi P_m}$$

Dengan pendekatan analisis induktif, dapat dianalogkan untuk Model mikromekanik komposit Hybrid (3 komponen). Bagan matriknya dapat dibuat seperti pada Bagan di bawah ini.

Bagan Matrik Elemen dalam Model
Modifikasi Halpin – TSai (Komposit : Tiga Komponen)

	V_m	V_f	V_{CNT}	
P_m	$P_m V_m$	$P_m V_f$	$P_m V_{CNT}$	$\xi_1 \xi_2 P_m$
P_f	$P_f V_m$	$P_f V_f$	$P_f V_{CNT}$	$P_m P_f$
P_{CNT}	$P_{CNT} V_m$	$P_{CNT} V_f$	$P_{CNT} V_{CNT}$	$P_m P_{CNT}$

Berdasarkan Bagan Matrik di atas dan analogi dengan persamaan (4.4) maka Model Mikromekanik Komposit Hybrid dapat dibuat menjadi berikut :

$$P = \frac{\xi_1 \xi_2 P_m (P_m V_m + P_f V_f + P_{CNT} V_{CNT}) + P_f P_m + P_{CNT} P_m}{P_f V_m + P_{CNT} V_m + P_{CNT} V_f + P_m V_f + P_f V_{CNT} + P_m V_{CNT} + \xi_1 \xi_2 P_m} \quad (4.5)$$

$$P = \frac{\xi_1 \xi_2 (P_m V_m + P_f V_f + P_{CNT} V_{CNT}) + P_f + P_{CNT}}{P_f (1 - V_f - V_{CNT}) + P_{CNT} (1 - V_f - V_{CNT}) + P_{CNT} V_f + P_m V_f + P_f V_{CNT} + P_m V_{CNT} + \xi_1 \xi_2 P_m} P_m$$

$$P = \frac{\xi_1 \xi_2 (P_m (1 - V_f - V_{CNT}) + P_f V_f + P_{CNT} V_{CNT}) + P_f + P_{CNT}}{P_f - P_f V_f - P_f V_{CNT} + P_{CNT} - P_{CNT} V_f - P_{CNT} V_{CNT} + P_{CNT} V_f + P_m V_f + P_f V_{CNT} + P_m V_{CNT} + \xi_1 \xi_2 P_m} P_m$$

$$P = \frac{\xi_1 \xi_2 (P_m - P_m V_f - P_m V_{CNT} + P_f V_f + P_{CNT} V_{CNT}) + P_f + P_{CNT}}{(P_m - P_f) V_f + (P_m - P_{CNT}) V_{CNT} + P_f + P_{CNT} + \xi_1 \xi_2 P_m} P_m$$

$$P = \frac{\xi_1 \xi_2 [(P_f - P_m) V_f + (P_{CNT} - P_m) V_{CNT} + P_m] + P_f + P_{CNT}}{(P_m - P_f) V_f + (P_m - P_{CNT}) V_{CNT} + P_f + P_{CNT} + \xi_1 \xi_2 P_m} P_m$$

$$P = \frac{\xi_1 \xi_2 [(P_f - P_m) V_f + (P_{CNT} - P_m) V_{CNT} + P_m] + P_f + P_{CNT}}{-(P_f - P_m) V_f - (P_{CNT} - P_m) V_{CNT} + P_f + P_{CNT} + \xi_1 \xi_2 P_m} P_m$$

$$P = \frac{\xi_1 \xi_2 \left(\frac{P_f}{P_m} - 1 \right) V_f + \xi_1 \xi_2 \left(\frac{P_{CNT}}{P_m} - 1 \right) V_{CNT} + \xi_1 \xi_2 + \frac{P_f}{P_m} + \frac{P_{CNT}}{P_m}}{- \left(\frac{P_f}{P_m} - 1 \right) V_f - \left(\frac{P_{CNT}}{P_m} - 1 \right) V_{CNT} + \xi_1 \xi_2 + \frac{P_f}{P_m} + \frac{P_{CNT}}{P_m}} P_m$$

$$P = \frac{\left(\frac{P_f}{P_m} + \xi_1 \xi_2 \right) + \xi_1 \xi_2 \left(\frac{P_f}{P_m} - 1 \right) V_f + \xi_1 \xi_2 \left(\frac{P_{CNT}}{P_m} - 1 \right) V_{CNT} + \frac{P_{CNT}}{P_m}}{\left(\frac{P_f}{P_m} + \xi_1 \xi_2 \right) - \left(\frac{P_f}{P_m} - 1 \right) V_f - \left(\frac{P_{CNT}}{P_m} - 1 \right) V_{CNT} + \frac{P_{CNT}}{P_m}} P_m$$

$$P = \frac{\left(\frac{P_f}{P_m} + \xi_1 \xi_2 \right) + \xi_1 \xi_2 \left[\frac{\left(\frac{P_f}{P_m} - 1 \right)}{\left(\frac{P_f}{P_m} + \xi_1 \xi_2 \right)} V_f + \xi_1 \xi_2 \left[\frac{\left(\frac{P_{CNT}}{P_m} - 1 \right)}{\left(\frac{P_f}{P_m} + \xi_1 \xi_2 \right)} V_{CNT} + \frac{\left(\frac{P_{CNT}}{P_m} \right)}{\left(\frac{P_f}{P_m} + \xi_1 \xi_2 \right)} \right]}{\left(\frac{P_f}{P_m} + \xi_1 \xi_2 \right) - \left[\frac{\left(\frac{P_f}{P_m} - 1 \right)}{\left(\frac{P_f}{P_m} + \xi_1 \xi_2 \right)} V_f - \left[\frac{\left(\frac{P_{CNT}}{P_m} - 1 \right)}{\left(\frac{P_f}{P_m} + \xi_1 \xi_2 \right)} V_{CNT} + \frac{\left(\frac{P_{CNT}}{P_m} \right)}{\left(\frac{P_f}{P_m} + \xi_1 \xi_2 \right)} \right]} \right]} P_m$$

$$P = \frac{1 + \xi_1 \xi_2 \eta_1 V_f + \xi_1 \xi_2 \eta_2 V_{CNT} + \eta_3}{1 - \eta_1 V_f - \eta_2 V_{CNT} + \eta_3} P_m \quad (4.6)$$

dimana :

$$\eta_1 = \frac{(P_f/P_m) - 1}{(P_f/P_m) + \xi_1 \xi_2}$$

$$\eta_2 = \frac{(P_{CNT}/P_m) - 1}{(P_f/P_m) + \xi_1 \xi_2}$$

$$\eta_3 = \frac{(P_{CNT}/P_m)}{(P_f/P_m) + \xi_1 \xi_2}$$

$$\xi_1 = 2 \frac{l_{CNT}}{d_{CNT}}$$

$$\xi_2 = 2 \frac{l_{glass}}{d_{glass}}$$

Validasi persamaan (4.6) secara teoritis juga dilakukan dengan menggunakan simulasi data untuk perhitungan modulus elastisitas dengan berdasarkan pada pendekatan grafik hubungan antara stres – strain. Hasil validasi menunjukkan Model II secara teoritis dapat dikatakan valid dan dapat digunakan. Uraian lengkap mengenai validasi teoritis untuk Model II dapat dilihat pada lampiran 2.

4.4.3. Komparasi Model

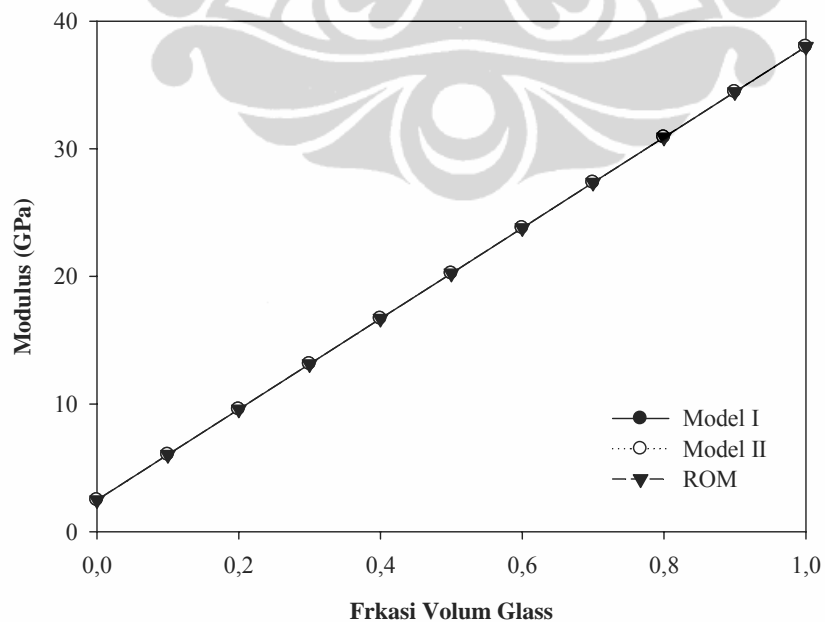
Untuk menguatkan validitas secara teoritis dari model mikromekanik yang dikembangkan maka dilakukan pengujian perbandingan antara model dengan model basis. Dalam hal ini model ROM dan persamaan Halpin – TSai, digunakan sebagai pembanding. Pengujian perbandingan dilakukan dengan menggunakan data simulasi untuk memperlihatkan perilaku model pengembangan sesuai dengan perilaku model basis.

4.4.3.1. Kondisi $V_{CNT} = 0$

Hasil pengujian dengan simulasi data untuk komposisi CNT sama dengan nol ($V_{CNT} = 0$) disajikan pada Tabel 4.12 dan Gambar 4.21.

Tabel 4.12. Simulasi data untuk pengujian model pada kondisi $V_{CNT} = 0$

V_m	V_{glass}	V_{CNT}	Modulus (GPa)		
			Model 1	Model 2	ROM
0,0	1,0	0	38,0	38,0	38,0
0,1	0,9	0	34,4	34,4	34,4
0,2	0,8	0	30,8	30,8	30,8
0,3	0,7	0	27,3	27,3	27,3
0,4	0,6	0	23,8	23,8	23,8
0,5	0,5	0	20,2	20,2	20,2
0,6	0,4	0	16,7	16,7	16,7
0,7	0,3	0	13,1	13,1	13,1
0,8	0,2	0	9,6	9,6	9,6
0,9	0,1	0	6,0	6,0	6,0
1,0	0,0	0	2,5	2,5	2,5

Gambar 4.21. Grafik Simulasi data pengujian model pada kondisi $V_{CNT} = 0$

Pada saat komposit tidak mengandung fraksi volum CNT, terlihat bahwa baik model I maupun model II sangat cocok dengan model ROM, bahkan grafiknya berhimpit. Untuk model I, dengan memperhatikan persamaan (4.3) dapat dipahami jika $V_{CNT} = 0$, model akan kembali ke model ROM, sehingga grafik pengujian berhimpit. Sedangkan untuk model II ternyata jika $V_{CNT} = 0$, persamaan dapat menghasilkan keluaran yang sama dengan model ROM. Sehingga dapat dikatakan model II memiliki kecenderungan validitas yang tinggi.

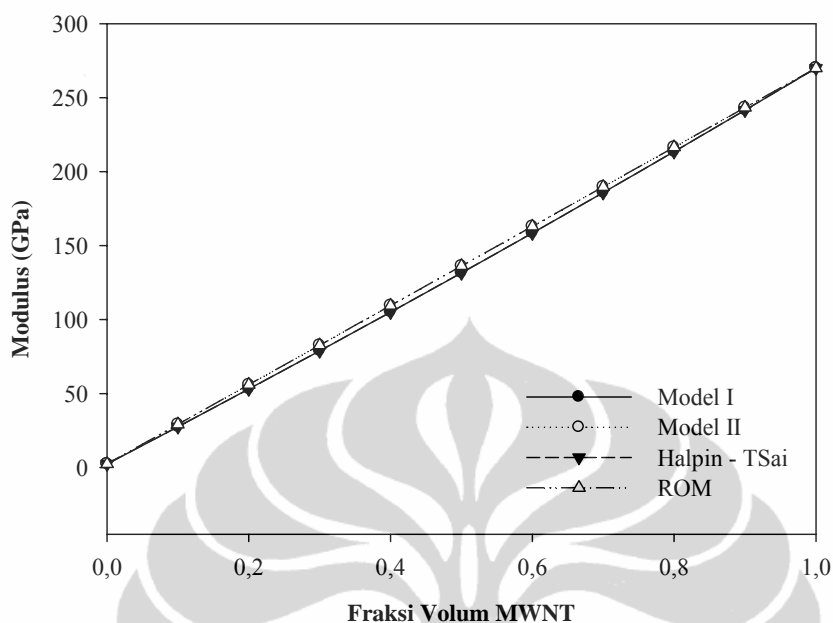
4.4.3.2. Kondisi $V_{glass} = 0$

Hasil pengujian dengan simulasi data untuk komposisi serat glass sama dengan nol ($V_{glass} = 0$) disajikan pada Tabel 4.13 dan Gambar 4.22.

Pada kondisi $V_{glass} = 0$, persamaan Halpin – TSai dapat digunakan untuk menghitung modulus elastisitas. Oleh karena itu pada kondisi ini juga ditampilkan perbandingan dengan model persamaan Halpin – TSai. Pada saat komposit tidak mengandung fraksi volum glass ($V_{glass} = 0$) kedua model pengembangan (model I dan model II) relatif hampir sama dengan model ROM dan persamaan Halpin – TSai. Kedua model yang sudah ada (ROM dan Halpin – TSai) pada saat $V_{glass} = 0$, berfungsi sebagai model atau persamaan untuk komposit dengan dua komponen, dan untuk keduanya pada dasarnya relatif sama (Gambar 4.22).

Tabel 4.13. Simulasi data untuk pengujian model pada kondisi $V_{glass} = 0$

V_m	V_{glass}	V_{CNT}	Modulus (GPa)			
			Model 1	Model 2	Halpin - TSai	ROM
0	0	1,0	270,0	270,0	270,0	270,0
0,1	0	0,9	241,5	243,2	241,5	243,3
0,2	0	0,8	213,5	216,5	213,5	216,5
0,3	0	0,7	185,8	189,7	185,8	189,7
0,4	0	0,6	158,5	162,9	158,5	162,9
0,5	0	0,5	131,6	136,2	131,6	136,2
0,6	0	0,4	105,1	109,5	105,1	109,5
0,7	0	0,3	78,9	82,7	78,9	82,7
0,8	0	0,2	53,1	55,9	53,1	55,9
0,9	0	0,1	27,6	29,2	27,6	29,2
1,0	0	0	2,5	2,5	2,5	2,5



Gambar 4.22. Grafik Simulasi data pengujian model pada kondisi $V_{\text{glass}} = 0$

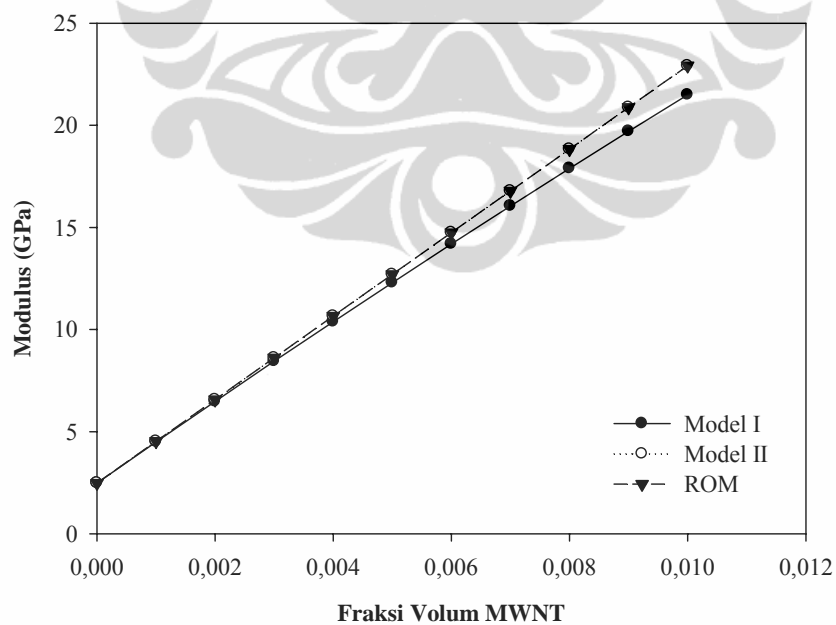
Model I relatif sangat cocok dengan model persamaan Halpin – TSai, hal ini dapat dipahami karena pada saat $V_{\text{glass}} = 0$, maka persamaan (4.3) pada model I akan kembali pada model persamaan Halpin – TSai. Untuk Model II relatif sangat cocok dengan model ROM dan cocok pula dengan persamaan Halpin – TSai. Sehingga dapat dikatakan model II memiliki kecenderungan validitas yang tinggi.

4.4.3.3. Komposit Hybrid ($V_{\text{glass}} \neq 0$; $V_{\text{CNT}} \neq 0$)

Selanjutnya dilakukan pula pengujian dengan kondisi komposit mengandung serat glass dan juga CNT (Komposit Hybrid). Hasil pengujian dengan simulasi data untuk komposisi hybrid ($V_{\text{glass}} \neq 0$; $V_{\text{CNT}} \neq 0$) disajikan pada Tabel 4.14 dan Gambar 4.23.

Tabel 4.14. Simulasi data untuk pengujian model pada kondisi $V_{\text{glass}} \neq 0$; $V_{\text{CNT}} \neq 0$

V_m	V_{glass}	V_{CNT}	Modulus (GPa)		
			Model 1	Model 2	ROM
1,000	0,000	0,000	2,482	2,482	2,482
0,949	0,050	0,001	4,495	4,525	4,525
0,898	0,100	0,002	6,483	6,569	6,569
0,847	0,150	0,003	8,446	8,612	8,612
0,796	0,200	0,004	10,385	10,656	10,656
0,745	0,250	0,005	12,298	12,699	12,699
0,694	0,300	0,006	14,186	14,742	14,743
0,643	0,350	0,007	16,049	16,786	16,786
0,592	0,400	0,008	17,888	18,829	18,829
0,541	0,450	0,009	19,701	20,873	20,873
0,490	0,500	0,010	21,490	22,916	22,916



Gambar 4.23. Grafik Simulasi data pengujian model pada kondisi $V_{\text{glass}} \neq 0$; $V_{\text{CNT}} \neq 0$

Pada kondisi $V_{\text{glass}} \neq 0$; $V_{\text{CNT}} \neq 0$ (komposit hybrid), Model II relatif sangat cocok dengan model ROM dan bahkan grafiknya berhimpit (Gambar 4.23), hal ini menunjukkan tingkat validitas Model II lebih tinggi dibandingkan dengan Model I.

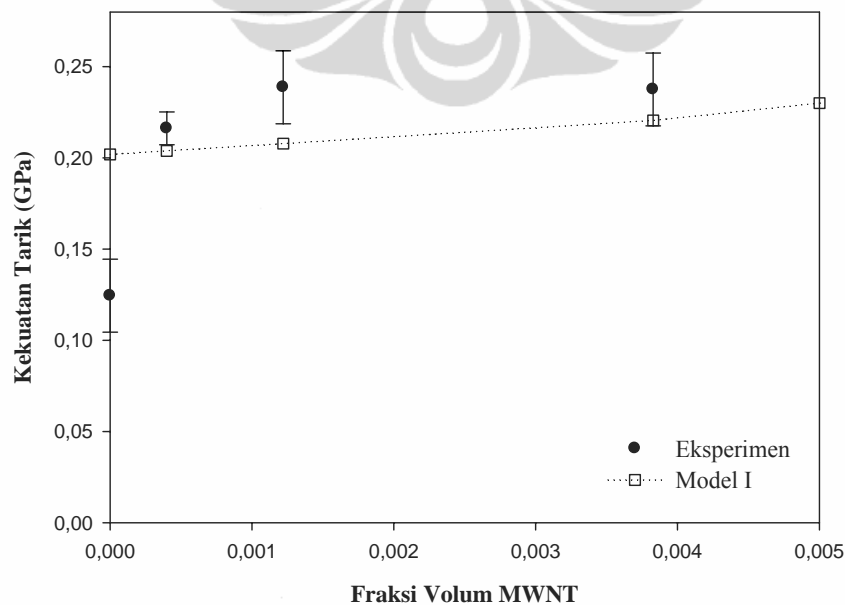
4.5. Komparasi Model dengan Hasil Eksperimen

4.5.1. Kekuatan tarik

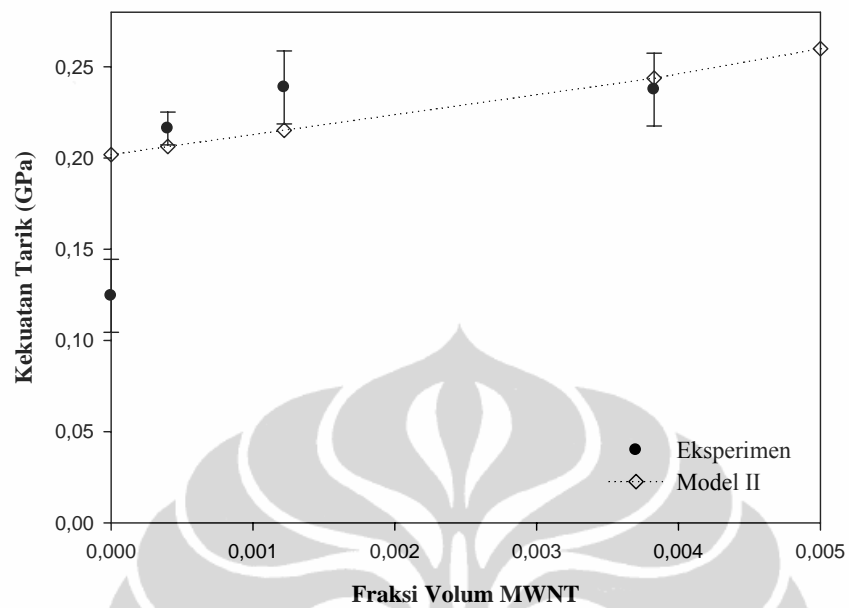
Perhitungan Kekuatan tarik dilakukan dengan menggunakan persamaan Model I (persamaan 4.3) dan Model II (persamaan 4.6). Hasil perhitungan nilai Kekuatan tarik dengan menggunakan model dan data hasil eksperimen untuk Kekuatan tarik komposit hybrid disajikan pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15. Kekuatan tarik Komposit Hybrid Hasil Eksperimen, Hasil Perhitungan Model I dan Model II

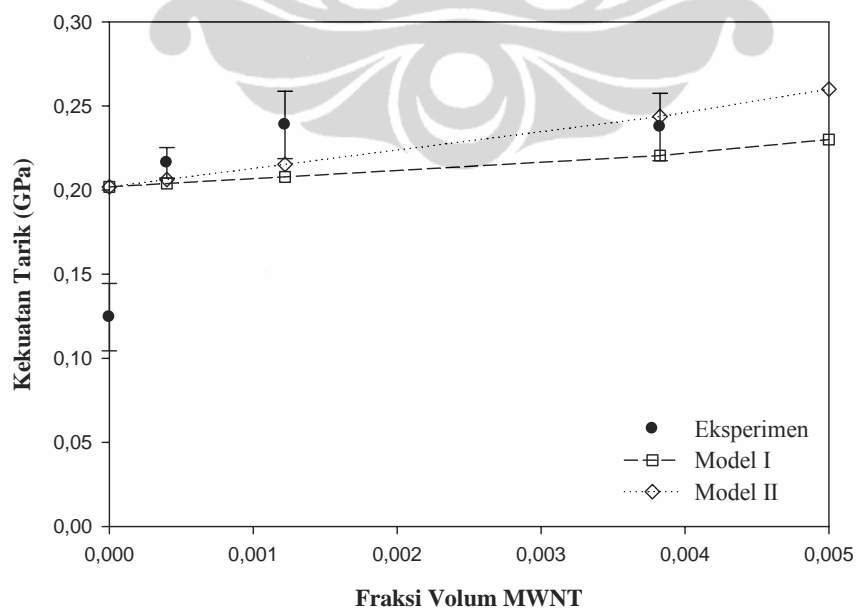
No	V_{glass}	MWNT		Kekuatan Tarik (GPa)		
		% Berat	V_{CNT}	Eksperimen	Model 1	Model 2
1	$0,31 \pm 0,01$	0	0	$0,12 \pm 0,02$	0,20	0,20
2	$0,28 \pm 0,03$	0,1	0,0004	$0,22 \pm 0,01$	0,20	0,21
3	$0,27 \pm 0,01$	0,3	0,0012	$0,24 \pm 0,02$	0,21	0,22
4	$0,31 \pm 0,02$	1,0	0,0038	$0,24 \pm 0,02$	0,22	0,24



Gambar 4.24. Perbandingan Kekuatan tarik Hasil Eksperimen dengan Model I



Gambar 4.25. Perbandingan Kekuatan tarik Hasil Eksperimen dengan Model II



Gambar 4.26. Perbandingan Kekuatan tarik Hasil Eksperimen dengan Model I dan Model II

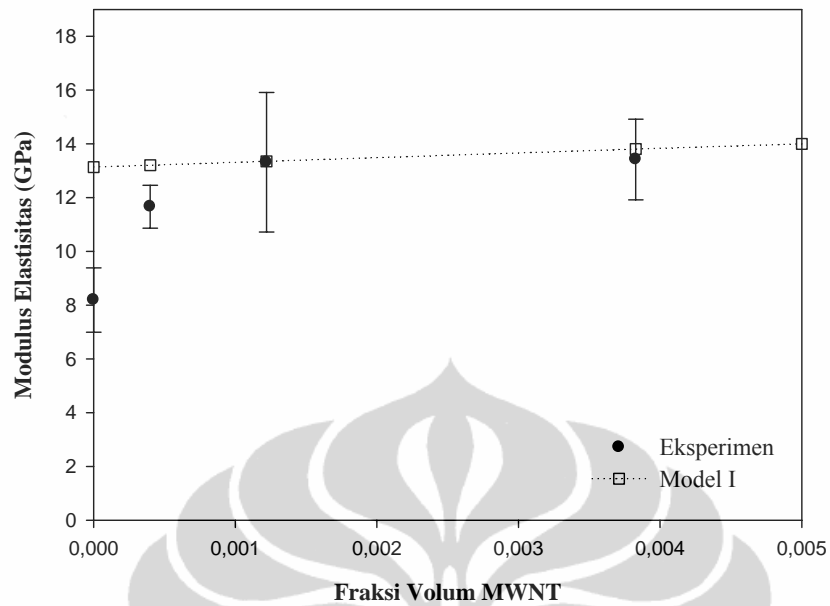
Memperhatikan hasil perbandingan nilai kekuatan tarik hasil eksperimen dengan nilai kekuatan tarik hasil perhitungan dengan model yang dikembangkan (Gambar 4.24, Gambar 4.25 dan Gambar 4.26) terlihat pada saat fraksi volum MWNT = 0, kekuatan tarik eksperimen lebih rendah dari model namun ketika ditambahkan MWNT, kekuatan tarik eksperimen lebih besar dari model. Hal ini dapat dikarenakan peningkatan kekuatan tarik eksperimen yang lebih besar dari model karena pengaruh CNT, sementara model yang dikembangkan berbasisi model mikromekanik. Memperhatikan pola kecenderungan yang sama untuk data eksperimen dan model, dapat dikatakan model valid untuk digunakan memprediksi sifat mekanik komposit hybrid.

4.5.2. Modulus Elastisitas

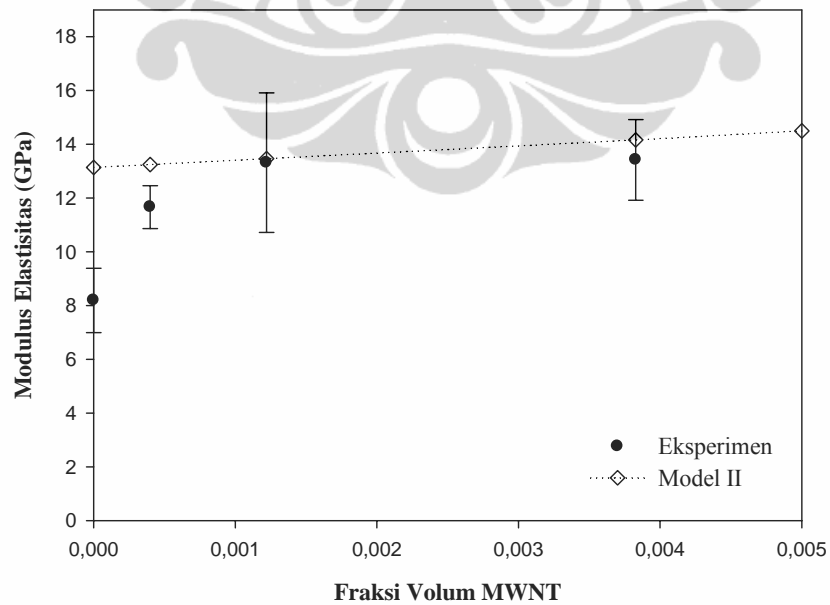
Hasil pengujian sampel komposit Hybrid dibandingkan dengan sifat mekanik yang dihitung dengan menggunakan persamaan Model I dan Model II. Perbandingan ini dilakukan untuk menguji validitas dari model yang dikembangkan. Perhitungan nilai modulus elastisitas menurut model yang dikembangkan (Model I dan Model II – Modifikasi Halpin – TSai), dihitung dengan menggunakan persamaan 4.3 dan 4.6. Hasil perhitungan nilai modulus elastisitas menurut model dan data hasil eksperimen modulus elastisitas komposit hybrid disajikan pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16. Modulus Elastisitas Komposit Hybrid Hasil Eksperimen, Hasil Perhitungan Model I dan Model II

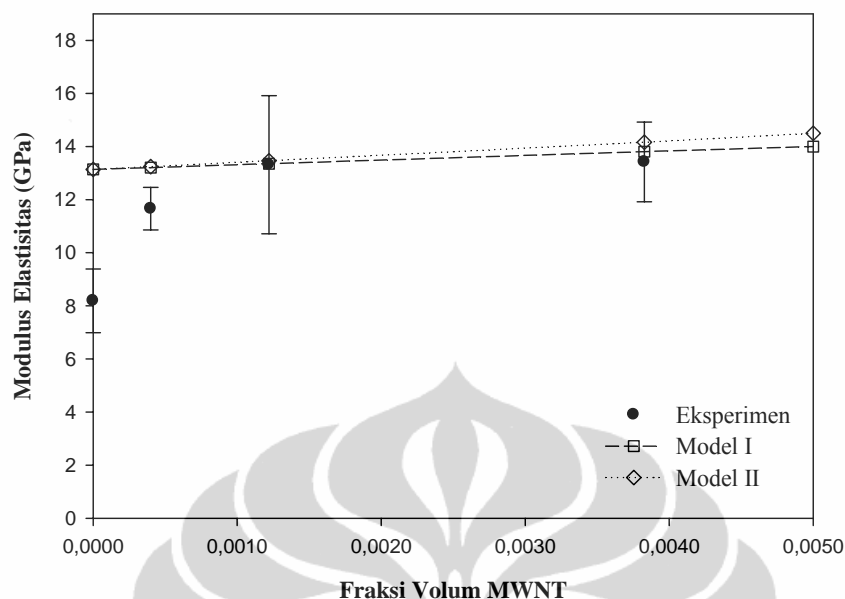
No	V_{glass}	MWNT		Modulus Elastisitas (GPa)		
		% Berat	V_{CNT}	Eksperimen	Model I	Model II
1	$0,31 \pm 0,01$	0	0	$8,2 \pm 1,2$	13,1	13,1
2	$0,28 \pm 0,03$	0,1	0,0004	$11,7 \pm 0,8$	13,2	13,2
3	$0,27 \pm 0,01$	0,3	0,0012	$13,3 \pm 2,8$	13,4	13,5
4	$0,31 \pm 0,02$	1,0	0,0038	$13,4 \pm 1,5$	13,8	14,2



Gambar 4.27. Perbandingan Modulus Elastisitas Komposit Hybrid Hasil Eksperimen dengan Model I



Gambar 4.28. Perbandingan Modulus Elastisitas Komposit Hybrid Hasil Eksperimen dengan Model II



Gambar 4.29. Perbandingan Modulus Elastisitas Komposit Hybrid Hasil Eksperimen dengan Model I dan Model II

Memperhatikan hasil perbandingan nilai modulus elastisitas hasil eksperimen dengan nilai modulus elastisitas hasil perhitungan dengan model yang dikembangkan (Gambar 4.27, Gambar 4.28 dan Gambar 4.29) dapat dikatakan kedua model memiliki tingkat validitas yang tinggi. Hal ini terlihat dari grafik di atas titik-titik hasil eksperimen sangat dekat dengan garis hasil perhitungan dengan menggunakan model. Bahkan beberapa titik hasil eksperimen berhimpit dengan garis grafik hasil perhitungan dengan menggunakan model

4.6. Komparasi Dengan Model Lain

4.6.1. Komposit Epoxy - MWNT

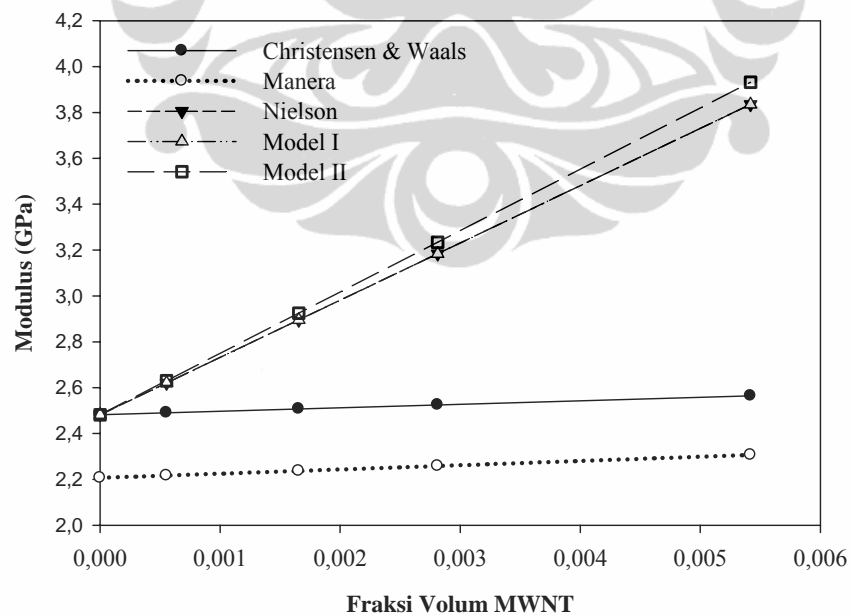
Model lain yang digunakan untuk membandingkan adalah model yang dikembangkan oleh Christensen and Waals (persamaan 2.20), Manera (persamaan 2.21) dan Nelson (persamaan 2.9). Model Christensen and Waals, Manera dan Nelson merupakan model untuk memprediksi modulus elastisitas pada komposit dengan satu serat. Sehingga pada perbandingan model tersebut dengan model

pengembangan (Model I dan Model II) untuk Komposit Campuran Epoxy – MWNT (Tanpa Glass), perhitungan modulus elastisitasnya menggunakan persamaan (4.3) dan persamaan (4.6) pada kondisi tanpa serat glass ($V_{\text{glass}} = 0$).

Hasil perhitungan modulus elastisitas untuk model pengembangan dan model lain (Christensen – Waals, Manera dan Nielson) dari komposit tanpa serat glass disajikan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17. Modulus Elastisitas Komposit Epoxy – MWNT (Tanpa Glass) Hasil Eksperimen, Perhitungan Model I, Model II dan Model Lain

V_m	V_{Glass}	V_{CNT}	Modulus (GPa)				
			Christensen & Waals	Manera	Nielson	Model I	Model II
1.000	0	0.000	2.48	2.21	2.48	2.48	2.48
0.999	0	0.001	2.49	2.22	2.62	2.62	2.63
0.998	0	0.002	2.51	2.23	2.89	2.89	2.92
0.997	0	0.003	2.53	2.26	3.18	3.18	3.23
0.995	0	0.005	2.56	2.31	3.83	3.83	3.93



Gambar 4.30. Perbandingan Modulus Komposit Epoxy – MWNT (Tanpa Glass) antara Model I, Model II dan Model Lain

Memperhatikan Gambar 4.30 dan data pada Tabel 4.17 terlihat bahwa model yang dikembangkan oleh Nelson sangat cocok dengan Model I dan Model II pada kondisi longitudinal, bahkan grafik untuk Model I **sangat berhimpit** dengan model Nelson. Hal ini menunjukkan bahwa model mikromekanik yang dikembangkan (Model I dan Model II) dapat dikatakan valid pada kondisi longitudinal.

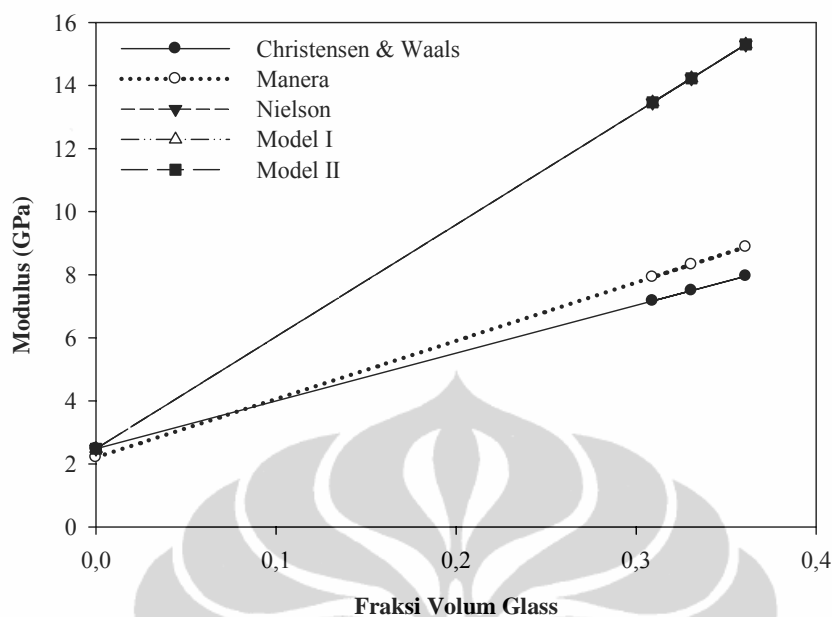
Dengan membandingkan model pengembangan terhadap model Christensen – Waals dan Manera serta model Nelson, dapat disimpulkan bahwa model pengembangan, memiliki tingkat validitas yang tinggi tidak hanya pada pendekatan teoritis tetapi juga pada pendekatan eksperimen dan dukungan model lain yang sudah ada.

4.6.2. Komposit Epoxy - Glass

Perbandingan model lain dengan model yang dikembangkan (Model I dan Model II) juga dilakukan untuk komposit Epoxy - Glass. Hasil perhitungan modulus elastisitas untuk model pengembangan dan model lain (Christensen – Waals, Manera dan Nelson) komposit tanpa MWNT disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18. Modulus Elastisitas Komposit Epoxy – Glass (Tanpa MWNT) Hasil Eksperimen, Perhitungan Model I, Model II dan Model Lain

V_m	V_{Glass}	V_{CNT}	Modulus (GPa)				
			Christensen & Waals	Manera	Nielson	Model I	Model II
1,00	0	0	2,48	2,21	2,48	2,48	2,48
0,64	0,36	0	7,95	8,87	15,30	15,30	15,30
0,69	0,31	0	7,17	7,92	13,46	13,46	13,46
0,67	0,33	0	7,49	8,32	14,22	14,23	14,23

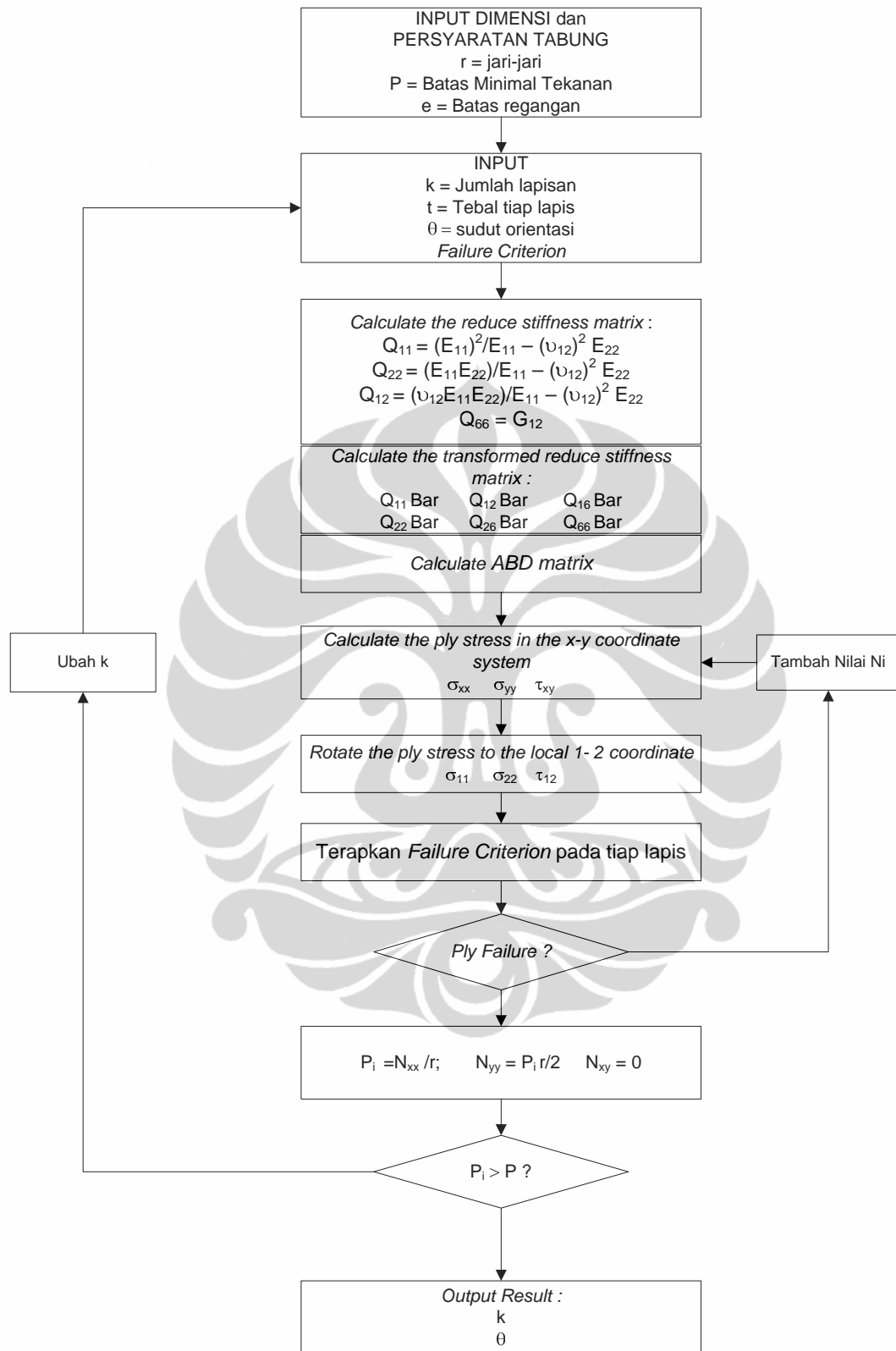


Gambar 4.31. Perbandingan Modulus Komposit Epoxy – Glass (Tanpa MWNT) antara Model I, Model II dan Model Lain

Memperhatikan Tabel 4.18 dan Gambar 4.31, dapat dilihat bahwa grafik Model I dan Model II berhimpit dengan Model Nielson dan memiliki kecenderungan yang sama dengan Model Christenesen – Waals dan Model Manera. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa pengembangan model yang dihasilkan (Model I dan Model II) layak digunakan untuk memprediksi sifat mekanik komposit dengan tiga komponen atau komposit Hybrid.

4.7. Simulasi Disain Lapisan Tabung

Untuk memperoleh jumlah lapisan laminasi pada tabung gas komposit maka dilakukan simulasi disain lapisan tabung. Simulasi disamping untuk mengetahui jumlah lapisan yang optimal, juga bertujuan untuk melihat perbandingan antara penggunaan MWNT dengan tanpa MWNT. Proses simulasi dilakukan berdasarkan *Classical Lamination Theory* (CLT). Selanjutnya untuk memprediksi kerusakan (*failure*) komposit laminasi pada tekanan tertentu digunakan metode *first ply failure analysis*. Sedangkan kriteria kerusakan yang digunakan adalah *Maximum Stress Criterion*. Kerangka pikir simulasi disain lapisan tabung mengikut alur diagram seperti pada Gambar 4.32



Gambar 4.32. Diagram Alir Simulasi Disain Lapisan Tabung

Dalam disain lapisan tabung persyaratan utama yang harus dipenuhi adalah bahwa material harus mampu menahan tekanan gas yang ada di dalamnya. Sifat material yang terkait dengan hal tersebut adalah kekuatan (Kekuatan tarik, σ) dan Modulus Elastisitas (E).

Analisis kekuatan material berdasarkan data *raw material* (Epoxy Resin, Fiberglass) menunjukkan bahwa Kekuatan tarik material tersebut masih jauh lebih besar dari tekanan gas. Sehingga dapat dikatakan dari sisi kekuatan, material tersebut dapat digunakan. Menurut PT Aptogaz, tekanan uap LPG berkisar 4 - 9 Kg/cm² untuk faktor keamanan kekuatan tabung gas harus mampu menahan 9 kali lipat dari tekanan LPG, atau sebesar 31 kg/cm² (0,003 GPa), sementara sifat kekuatan tarik untuk Epoxy 0,069 GPa dan fiberglass mencapai 0,512 GPa. Oleh karena itu komposit laminasi pun memiliki sifat kekuatan tarik yang dapat memenuhi persyaratan.

Komposit Laminasi	Kekuatan Tarik (Gpa)	Persyaratan^{*)} (Ketahanan Hidrostatik)	Keterangan
1 Lembar	0,29	0,003	Memenuhi syarat
2 Lembar	0,22		Memenuhi syarat

^{*)} Departemen Perindustrian, 2007

Sifat mekanik lainnya yang juga sangat penting adalah kemampuan material dalam menahan regangan sampai batas tertentu apabila material menerima gaya tertentu. Sifat ini berkaitan dengan nilai modulus elastisitas (E). Untuk dapat melihat potensi pemanfaatan material dari sifat modulus elastisitasnya perlu dilakukan simulasi disain lapisan tabung untuk mendapatkan jumlah lapisan minimum agar lapisan tabung mampu menahan tekanan sampai 0,008 GPa.

Simulasi disain lapisan tabung dilakukan untuk melihat pengaruh penggunaan MWNT pada disain laminasi untuk beberapa alternatif jumlah lapisan. Pendekatan yang dilakukan hanya membandingkan jumlah lapisan pada disain tabung, tanpa melihat pengaruh orientasi sudut. Komposit laminasi untuk tiap alternatif jumlah lapisan disimulasikan dengan disain komposit tanpa menggunakan MWNT dan disain komposit dengan menggunakan MWNT.

4.7.1. Berdasarkan Model Mikromekanik

Jumlah penambahan MWNT yang akan dilakukan simulasi adalah 0% dan 0,1% berat. Dalam simulasi disain lapisan tabung di sini menggunakan variasi orientasi sudut 0 dan 90. Hal ini diperlukan untuk dapat membandingkan dengan hasil eksperimen. Komposisi matrik dan serat yang menjadi dasar perhitungan simulasi disesuaikan dengan menggunakan fraksi volum pada eksperimen. Data fraksi volum dapat dilihat pada Tabel 4.19.

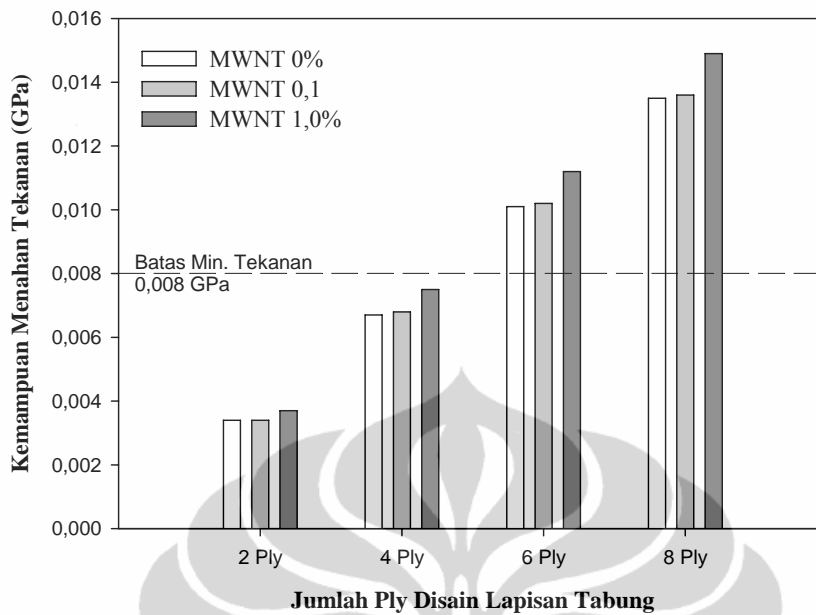
Tabel 4.19. Data Fraksi Komposit Hybrid Basis Perhitungan

Jumlah % Berat MWNT	Orientasi Sudut	V_{glass}	V_{CNT}
0	[0/90]	0,3	0
0,1	[0/90]	0,3	0,0004
1,0	[0/90]	0,3	0,004

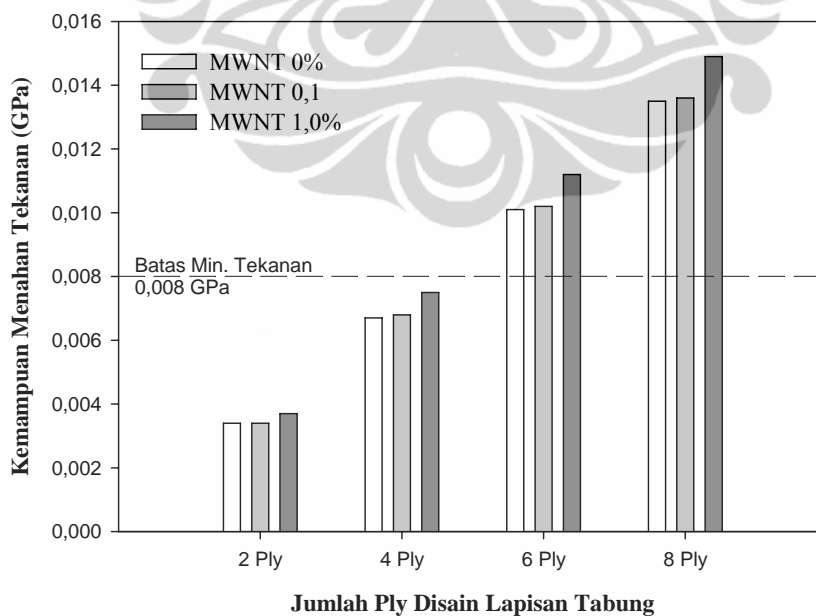
Selanjutnya tiap karakteristik di atas (Tabel 4.19) dilakukan simulasi disain tabung dengan variasi kombinasi jumlah lapisan 2 Ply, 4 Ply, 6 Ply dan 8 Ply. Berbasis data karakteristik material yang ada pada Tabel 4.19, maka dilakukan perhitungan nilai modulus elastisitas dengan menggunakan persamaan 4.3, untuk Model I dan persamaan 4.6 untuk Model II. Berdasarkan data modulus elastisitas maka selanjutnya dilakukan perhitungan kemampuan disain komposit dalam menahan tekanan, dengan menggunakan teori CLT. Hasil perhitungan kemampuan disain komposit dalam menahan tekanan untuk komposit hybrid untuk beberapa kombinasi jumlah lapisan yang dihitung berdasarkan Model I dan Model II disajikan pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20. Kemampuan menahan tekanan (P) Komposit Laminasi variasi jumlah lapisan dan %MWNT menurut Model I dan Model II

	% Berat MWNT	Kemampuan Menahan Tekanan (GPa)			
		8 Ply	6 Ply	4 Ply	2 Ply
Model I	0	0,0135	0,0101	0,0067	0,0034
	0,1	0,0136	0,0102	0,0068	0,0034
	1,0	0,0149	0,0112	0,0075	0,0037
Model II	0	0,0134	0,0101	0,0067	0,0034
	0,1	0,0137	0,0103	0,0069	0,0034
	1,0	0,0163	0,0123	0,0082	0,0041



Gambar 4.33. Perbandingan Kemampuan menahan tekanan Komposit Hybrid menurut Model I



Gambar 4.34. Perbandingan Kemampuan menahan tekanan Komposit Hybrid menurut Model II

Hasil simulasi dengan menggunakan data prediksi modulus elastisitas yang dihitung berdasarkan Model II dan Model I menunjukkan komposit laminasi akan memenuhi syarat minimal tekanan bila jumlah lapisan 6 Ply (Gambar 4.33 dan Gambar 4.34). Batas minimal kemampuan menahan tekanan yang digunakan sebesar 8×10^{-3} GPa. Penambahan MWNT sebesar 1,0% berat atau 0,4% volum akan meningkatkan kemampuan menahan tekanan.

4.7.2. Berdasarkan Eksperimen

4.7.2.1. Basis Sifat Mekanik 1 Lembar Glass

Selanjutnya dilakukan pula simulasi dengan menggunakan sifat mekanik hasil eksperimen dengan variasi MWNT dan kombinasi jumlah lembaran yang sama. Dasar sifat mekanik yang digunakan disajikan pada Tabel 4.21.

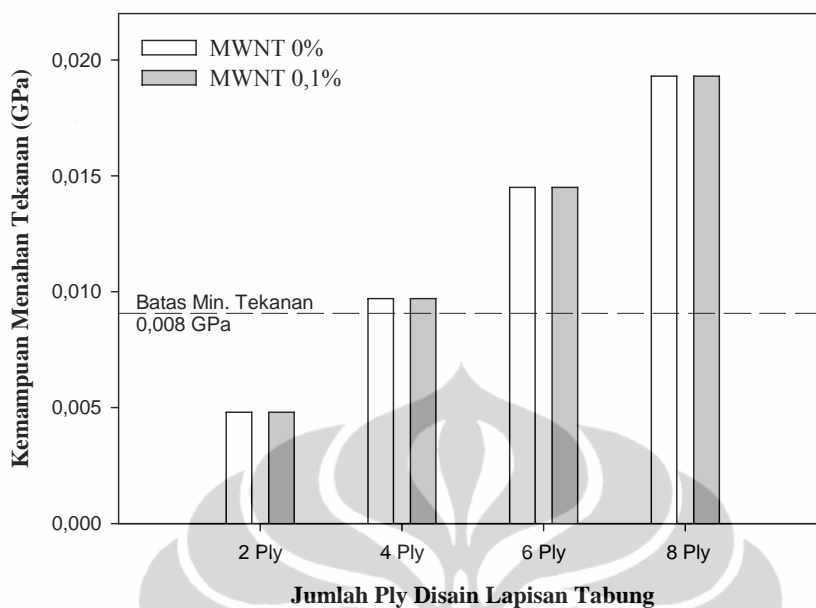
Tabel 4.21. Komposit Hybrid Basis Perhitungan Simulasi (Hasil Eksperimen 1 Lembar)

Jumlah % Berat MWNT	Orientasi Sudut	Modulus (GPa)	Kekuatan Tarik (GPa)
0	[0/90]	15,9	0,29
0,1	[0/90]	15,5	0,29

Berdasarkan data Modulus elastisitas di atas dilakukan simulasi disain tabung dengan menggunakan metode perhitungan CLT. Dalam eksperimen sampel laminasi dibuat dengan menggunakan serat glass *woven rovng*, oleh karena itu diasumsikan sifat mekanik untuk arah transversal dianggap sama dengan arah longitudinal. Hasil perhitungan kemampuan disain komposit dalam menahan tekanan untuk beberapa kombinasi jumlah lapisan yang dihitung berdasarkan pada data hasil eksperimen disajikan pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22. Kemampuan menahan tekanan Komposit Hybrid variasi jumlah lapisan dan %MWNT berdasar Hasil Eksperimen (Basis 1 Lembar)

Jumlah % Berat MWNT	Kemampuan Menahan Tekanan (GPa)			
	8 Ply	6 Ply	4 Ply	2 Ply
0	0,0193	0,0145	0,0097	0,0048
0,1	0,0193	0,0145	0,0097	0,0048



Gambar 4.35. Perbandingan Kemampuan menahan tekanan Komposit Hybrid (Basis 1 Lembar) menurut Hasil Eksperimen

Hasil simulasi dengan data eksperimen juga menunjukkan persyaratan teknis dari Kementerian Perindustrian minimal tekanan yang harus mampu ditahan, 0,008 GPa, dapat dipenuhi dengan jumlah lapisan komposit laminasi 4Ply.

4.7.2.2. Basis Sifat Mekanik 2 Lembar

Hal yang sama dilakukan simulasi dengan menggunakan sifat mekanik hasil eksperimen berbasis pada hasil eksperimen sifat mekanik komposit dengan 2 lembar serat glass.. Dasar sifat mekanik yang digunakan dalam simulasi ini disajikan pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23. Komposit Hybrid Basis Perhitungan Simulasi (Hasil Eksperimen Basis 2 Lembar)

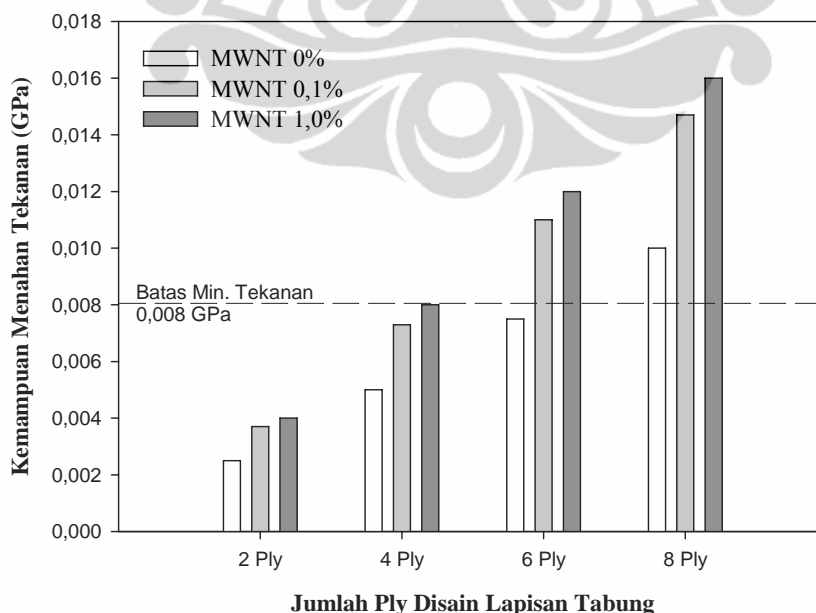
Jumlah % Berat MWNT	Orientasi Sudut	Modulus (GPa)	Kekuatan Tarik (GPa)
0	[0/90]	10,2	0,15
0,1	[0/90]	11,7	0,22
1,0	[0/90]	13,4	0,24

Berdasarkan data Modulus elastisitas di atas dilakukan simulasi disain tabung dengan menggunakan metode perhitungan CLT. Dalam eksperimen sampel laminasi dibuat dengan menggunakan serat glass *woven rovng*, oleh karena itu diasumsikan sifat mekanik untuk arah transversal dianggap sama dengan arah longitudinal.

Hasil perhitungan kemampuan disain komposit dalam menahan tekanan untuk komposit hybrid untuk beberapa kombinasi jumlah lapisan yang dihitung berdasarkan pada data hasil eksperimen disajikan pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24. Kemampuan menahan tekanan Komposit Hybrid variasi jumlah lapisan dan %MWNT berdasar Hasil Eksperimen (Basis 2 Lembar)

Jumlah % Berat MWNT	Kemampuan Menahan Tekanan (GPa)			
	8 Ply	6 Ply	4 Ply	2 Ply
0	0,0100	0,0075	0,0050	0,0025
0,1	0,0147	0,0110	0,0073	0,0037
1,0	0,0160	0,0120	0,0080	0,0040



Gambar 4.36. Perbandingan Kemampuan menahan tekanan Komposit Hybrid (Basis 2 Lembar) berdasar Hasil Eksperimen

Berdasarkan hasil eksperimen menunjukkan bahwa penambahan MWNT 0,1% dan 1,0% berat dapat meningkatkan kemampuan menahan tekanan melampaui batas minimal yang disyaratkan hingga jumlah lapisan 6 Ply dibandingkan tanpa penambahan MWNT. (lihat Tabel 4.24 dan Gambar 4.36).

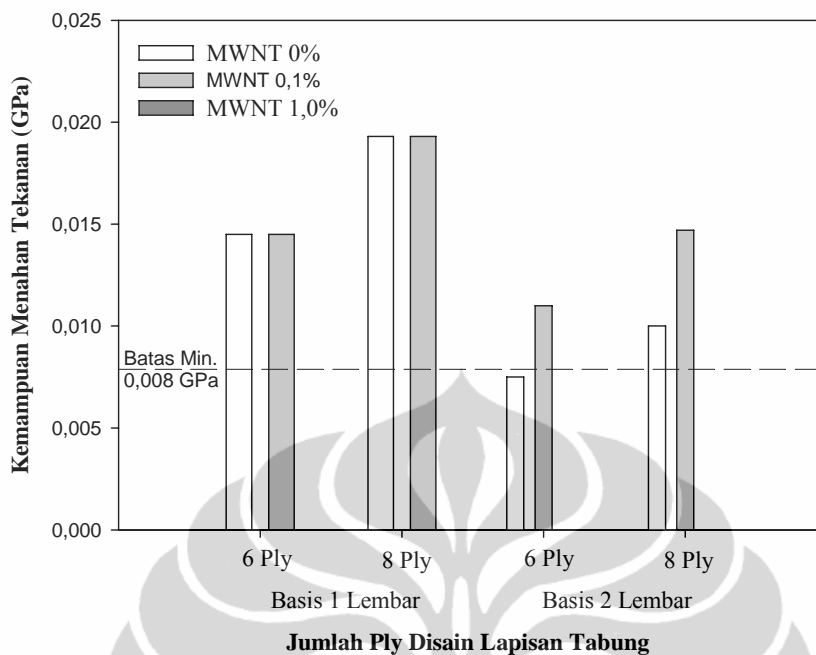
Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk ketentuan batas minimal tekanan yang harus dipenuhi yaitu 0,008 GPa dapat dicapai dengan jumlah lapisan 8 Ply. Dengan jumlah lapisan 6 Ply dapat memenuhi batas minimal bila dilakukan penambahan MWNT sebesar 0,1% berat, apabila tanpa penambahan MWNT batas minimal tidak terlampaui (0,0075 GPa). (lihat Tabel 4.24 dan Gambar 4.36)

4.7.3. Komparasi Basis 1 Lembar dan 2 Lembar

Hasil simulasi dengan menggunakan data hasil eksperimen, menunjukkan bahwa pada basis sifat mekanik 2 Lembar jumlah lapisan laminasi 6 Ply belum dapat memenuhi batas minimum kemampuan menahan tekanan. Batas minimal tekanan dapat dilampaui setelah ada penambahan MWNT sebesar 0,1%. Lain halnya dengan simulasi yang menggunakan basis sifat mekanik 1 Lembar. Dengan jumlah lapisan laminasi 6 Ply sudah dapat memenuhi batas minimal kemampuan menahan tekanan. (lihat Tabel 4.25 dan Gambar 4.37)

Tabel 4.25. Perbandingan Kemampuan Menahan Tekanan Basis 1 Lembar dan 2 Lembar

% Berat MWNT	Jumlah Lapisan Komposit Laminasi	Kemampuan Menahan Tekanan (GPa)	
		Basis 1 Lembar	Basis 2 Lembar
0	6 Ply	0,0145	0,0075
	8 Ply	0,0193	0,0100
0,1	6 Ply	0,0145	0,0110
	8 Ply	0,0193	0,0147



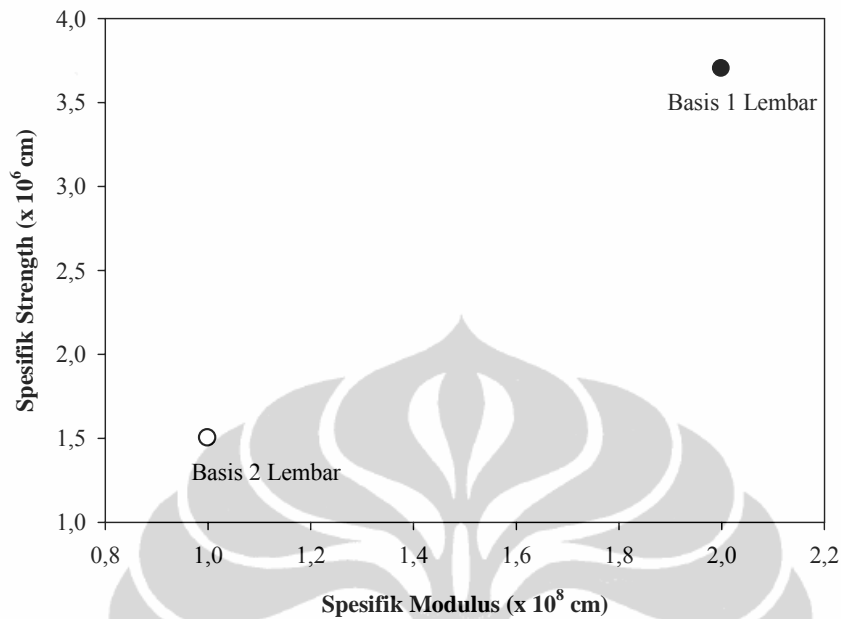
Gambar 4.37. Perbandingan Kemampuan Menahan Tekanan Basis 1 Lembar dengan 2 Lembar

Dari uraian kondisi di atas dapat dikatakan basis sifat mekanik 1 Lembar merupakan pilihan yang lebih baik dibandingkan dengan basis sifat mekanik 2 Lembar. Namun untuk dapat membandingkan maka perlu dilakukan perbandingan dengan melihat densiti dari material. Untuk itu dilakukan perbandingan sifat mekanik spesifik antara basis 1 Lembar dan basis 2 Lembar, baik untuk penambahan MWNT 0% maupun 0,1%.

Penambahan MWNT 0%

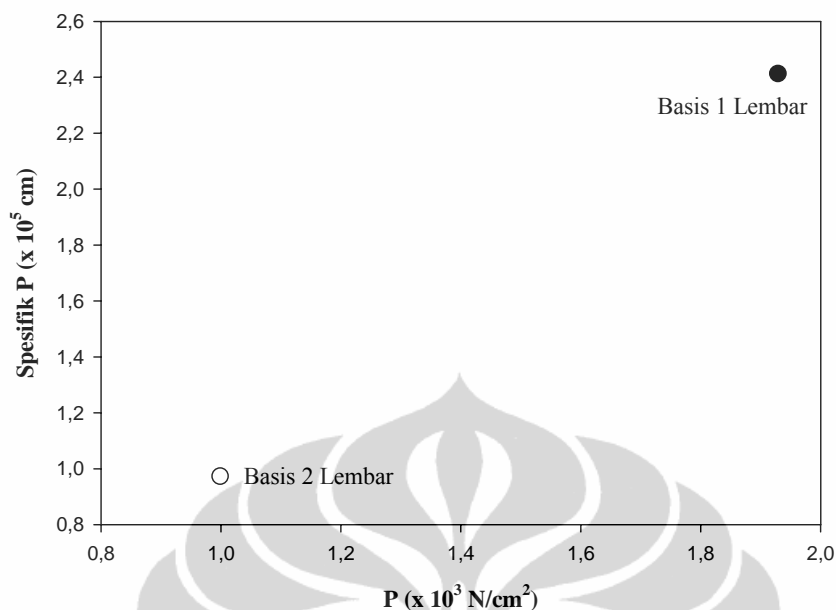
Tabel 4.26. Perbandingan Sifat Mekanik Spesifik, Kemampuan Menahan Tekanan untuk 8 Lapis antara Basis 1 Lembar dan 2 Lembar pada kondisi MWNT 0%

Basis	Densiti (gr/cm ³)	Strength (GPa)	Spesifik Strength(cm)	Modulus (GPa)	Spesifik Modulus(cm)	P (GPa)
1 Lembar	0,80	0,29	$3,7 \times 10^6$	15,9	$2,0 \times 10^8$	0,0193
2 Lembar	1,03	0,15	$1,5 \times 10^6$	10,2	$1,0 \times 10^8$	0,0100



Gambar 4.38. Perbandingan Sifat Mekanik Spesifik antara Basis 1 Lembar dan Basis 2 Lembar Pada Kondisi MWNT 0%

Dengan membandingkan spesifik sifat mekanik sangat terlihat bahwa basis 1 Lembar memiliki keunggulan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan basis 2 Lembar. Dari Gambar 4.38 terlihat selisih antara basis 1 Lembar dengan 2 Lembar mencapai 2 kali lipat baik untuk spesifik Modulus maupun spesifik Strength. Demikian pula dengan besarnya kemampuan menahan tekanan untuk basis 1 lembar memiliki sifat yang lebih baik dibandingkan dengan basis 2 lembar, bahkan mencapai 2 kali lipat untuk sifat spesifiknya (lihat Gambar 4.39).



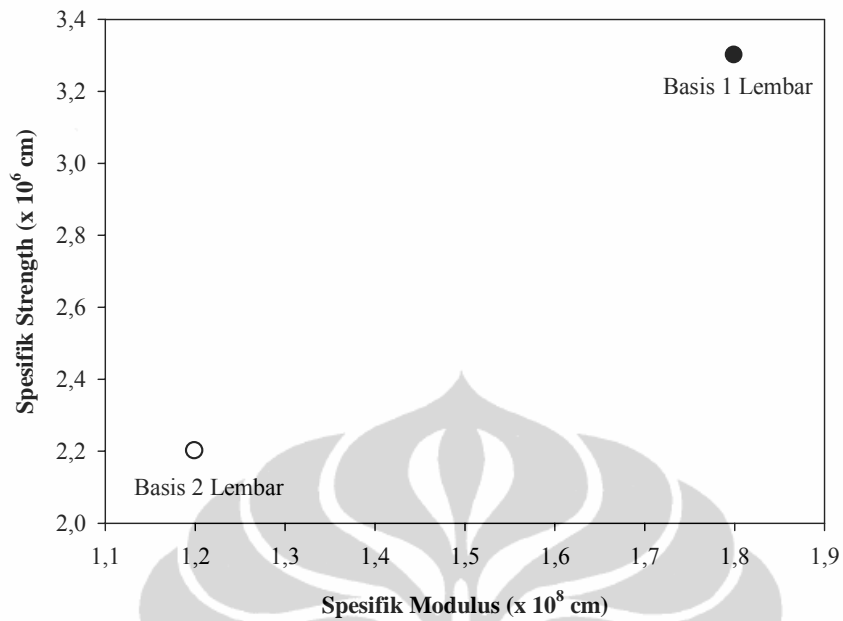
Gambar 4.39. Perbandingan Sifat Kemampuan Menahan Tekanan (P) antara Basis 1 Lembar dan Basis 2 Lembar Pada Kondisi MWNT 0%

Penambahan MWNT 0,1%

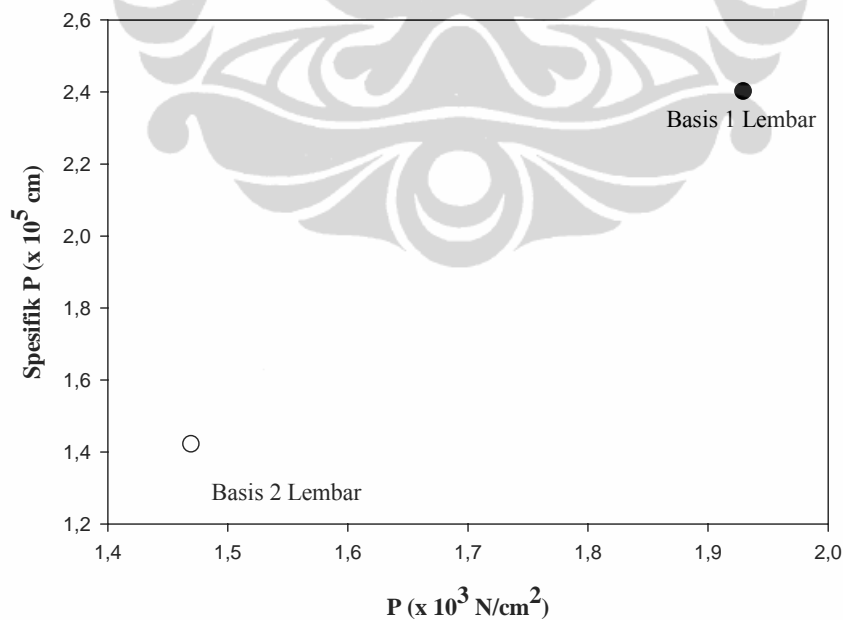
Untuk melihat perbandingan sifat mekanik spesifik hal sama juga dilakukan pada simulasi disain lapisan tabung dengan jumlah penambahan MWNT 0,1%. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 4.27, Gambar 4.40 dan Gambar 4.41.

Tabel 4.27. Perbandingan Sifat Mekanik Spesifik, Kemampuan Menahan Tekanan untuk 8 Lapis antara Basis 1 Lembar dan 2 Lembar pada kondisi MWNT 0,1%

Basis	Densiti (gr/cm ³)	Strength (GPa)	Spesifik Strength	Modulus (GPa)	Spesifik Modulus	P (GPa)
1 Lembar	0,90	0,29	3,3 x 10 ⁶	15,5	1,8 x 10 ⁸	0,0193
2 Lembar	1,03	0,22	2,2 x 10 ⁶	11,7	1,2 x 10 ⁸	0,0147



Gambar 4.40. Perbandingan Sifat Mekanik Spesifik antara Basis 1 Lembar dan Basis 2 Lembar Pada Kondisi MWNT 0,1%



Gambar 4.41. Perbandingan Sifat Kemampuan Menahan Tekanan (P) antara Basis 1 Lembar dan Basis 2 Lembar Pada Kondisi MWNT 0,1%

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan uraian pembahasan pada bab sebelumnya maka penelitian tentang Sintesis Komposit Hybrid Glass/Epoxy – MWNT dan Analisis dengan Model Mikromekanik, dapat disimpulkan bahwa :

- a. Penambahan MWNT dapat meningkatkan sifat mekanik komposit. Penambahan 0,1% berat MWNT dapat meningkatkan kekuatan tarik mencapai 91% dan modulus elastisitas sebesar 42%.
- b. Pengaruh peningkatan sifat mekanik hanya terjadi pada penambahan MWNT maksimum 0,3% berat. Penambahan MWNT di atas 0,3% tidak banyak berpengaruh pada sifat mekanik. Hal ini dapat dikarenakan adanya permasalahan teknis dalam melakukan dispersi MWNT, karena dengan jumlah MWNT semakin banyak akan menambah tingkat kesulitan untuk melakukan dispersi MWNT dengan baik.
- c. Modifikasi Model Mikromekanik untuk komposit Hybrid dapat dikatakan valid secara teoritis, dan mengikuti prinsip dasar perilaku komposit dengan mengacu pada model ROM (*Rule of Mixture*)
- d. Dibandingkan dengan hasil eksperimen, model mikromekanik memiliki kecenderungan yang sama, bahkan beberapa titik hasil eksperimen berhimpit dengan prediksi model.
- e. Modifikasi Model Mikromekanik Komposit Hybrid yang dikembangkan berlaku masih terbatas pada satu jenis CNT dengan nilai l/d tertentu
- f. Hasil eksperimen menunjukkan komposit hybrid memenuhi syarat untuk pembuatan tabung gas yaitu kekuatan tarik jauh lebih besar dari batas teknis (0,003 GPa). Persyaratan batas ketahanan pecah (0,008 GPa) dapat dipenuhi oleh komposit hybrid dengan 1 lembar serat Glass dan dengan jumlah lapisan sebanyak 6 Ply.

Sifat Mekanik	Komposit Hybrid	Persyaratan ^{*)}	Keterangan
Strength(GPa)	0,29	0,003	Ketahanan Hidrostatis
Modulus (GPa)	15,9		
P (GPa)	0,011 (6Ply)	0,008	Ketahanan Pecah
	0,015 (8Ply)		

^{*)} Departemen Perindustrian, 2007

5.2. Saran

Beberapa saran untuk penelitian lebih lanjut :

- Eksperimen lanjutan dapat dilakukan untuk mengetahui batasan-batasan pemenuhan ketepatan model terkait dengan jumlah penambahan MWNT. Hal ini karena keterbatasan dispersi yang dapat dilakukan sehingga mengakibatkan perilaku yang berlawanan dengan perilaku hubungan fraksi dengan sifat mekanik.
- Eksperimen lanjutan untuk disain tabung gas dengan target disain prototipe.
- Pembuatan prototipe sampel tabung gas komposit dengan disain yang telah dibuat akan sangat mendukung pengujian tabung untuk melihat validitas disain dan kondisi optimal yang telah didapat.
- Perlu dilakukan pengujian prototipe sampel tabung gas komposit sesuai standar yang ditentukan, agar hasil penelitian dapat dimanfaatkan oleh industri

DAFTAR REFERENSI

- Abe, Sumiyoshi., Stefan Thurner. (2005). Anomalous diffusion in view of Einstein's 1905 theory of Brownian motion. *Physica A*, **356**, 403 – 407
- Abe, Sumiyoshi., A.K. Rajagopal. (2007). Quantum subdynamics in view of Einstein's 1905 theory of Brownian motion. *Physica A*, **375**, 129 – 132
- Andrews, R., M.C. Weisenberger. (2004). Carbon nanotube polymer composites. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, **8**, 31 – 37
- ASTM D 2584 : Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins
- ASTM D 2586 : Standard Test Method for Hydrostatic Compressive Strength of Glass Reinforced Plastic Cylinders
- ASTM D 2924 : Standard Test Method for External Pressure Resistance of "Fiberglass" (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting Resin) Pipe.
- ASTM D 638 : Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
- Bakelite, Technical Information Bakelite® EPR 174, Bakelite Korea
- Bal, S and S S Samal. (2007 August). Carbon nanotube reinforced polymer composites –A state of the art. *Bull. Mater. Sci*, Vol. 30, No. 4, 379–386.
- Beakou, A. and Mohamed, A. (2001). Influence of variable scattering on the optimum winding angle of cylindrical laminated composites. *Composite Structure*, **53**, 287 – 293
- Belofsky, Harold. (1995), *Plastics : Product Design and Process Engineering*, Carl Hanser Verlag
- Burmann, Nicola J. (2007, September 27). *Tubing Through the Nano World: Nanotube Functionalization and Practical Applications*.
- Caba, Aaron C., (2005). Characterization of Carbon Mat Thermoplastic Composites: Flow and Mechanical Properties., Disertasi - Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia. hal. 19
- Callister, William D Jr. (1994). *Material Science and Engineering: An Introduction*. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc. New York.

- CASA, IDE 124 : Physical Test On Glassfiber/Epoxy Resin Prepregs and Laminates
- Chia-Ming Chang., Ying-Ling Liu. (2010). Functionalization of multi-walled carbon nanotubes with non-reactive polymer through an ozone-mediated process for the preparation of wide range of high performance polymer/carbon nanotube composites. *Carbon*, **48**, 1289 – 1297
- Choosing the right resin – Epoxy Resin. <http://www.evercoat.com/imgs/pis/EPOXYRESIN.pdf> 24/02/2012
- Christensen, R.M. (1976). Asymptotic modulus result for composites containing randomly oriented fibers. *Int. J. Solid Structure*, vol. **12**, 537 – 544
- Ciselli, Paola. (2007). The Potential of Carbon Nanotubes in Polymer Composites - Thesis. Eindhoven University of Technology. Italy
- Cohen, David., Susan C Mantell., Liyang Zhao. (2001). The effect of fiber volume fraction on filament wound composite pressure vessel strength *Composite: Part B*, **32**, 413 – 429
- Davis, Daniel., Bradley D. Whelan. (2010). An Experiment study of interlaminar shear fracture toughness of a nanotube reinforced composite., *Jurnal Composites: Part B xxx*, xxx–xxx
- Departemen Energi dan Sumberdaya Mineral (2007, November), *Blueprint program pengalihan minyak tanah ke LPG* (Dalam rangka pengurangan subsidi BBM),
- Departemen Perindustrian. (2007). Lampiran V Peraturan Menteri Perindustrian RI No: 04/M-IND/PER/1/2007.
- Deskripsi dan Penggunaan Universal Testing Machine <http://www.alatuji.com/article/detail/51/universal-testing-machine> 29 Feb 2012
- Eckold, G.C. (1985). A design method for filament wound GRP vessels and pipework. *Composites*, **16**, 41 – 47
- Esawi, Amal M.K., Mahmoud M. Farag. (2007). Carbon nanotube reinforced composites: Potential and current challenges., *Materials and Design*, **28**, 2394–2401

- Fidelus, J.D., E. Wiesel., F.H. Gojny., K. Schulte., H.D. Wagner. (2005). Thermo-mechanical properties of randomly oriented carbon/epoxy nanocomposites. *Composites: Part A*, **36**, 1555 – 1561
- Fiedler, Bodo., F.H. Gojny., Malte H.G. Wichmann., Mathias C.M. Nolte., Karl Schulte. (2006). Fundamental aspect of nano-reinforced composites. *Composites Science and Technology*, **66**, 3115 – 3125
- Frogley, Mark D., Diana Ravich., H. Daniel Wagner. (2003). Mechanical properties of carbon nanoparticle-reinforced elastomers. *Composites Science and Technology*, **63**, 1647 – 1654
- Gdoutos, E.E. (2000). *Failure Analysis of Industrial Composite Materials*, McGraw-Hill.
- Gheshlaghi, Reza Mohammadzadeh., Mohammad Hassan Hojjati., Hamid Reza Mohammadi Daniali. (2006, July). *Analysis of Composite Pressure Vessels*. Paper presented at the meeting of the 16th European Conference of Fracture, Alexandroupolis, Greece.
- Gibson, F Ronald. (1994). *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill
- Gojny, F.H. 1., M. H.G. Wichmann., U. Kopke., B. Fiedler, K. Schulte. (2004). Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content. *Composites Science and Technology*, **64**, 2363 – 2371
- Gojny, Florian H. 1., Malte H.G. Wichmann, Bodo Fiedler, Karl Schulte. (2005). Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study. *Composites Science and Technology*, **65**, 2300–2313
- Gu, W., Wu, H.F., Kampe, S.L and Lu, G.Q. (2000). Volume fraction effects on interfacial adhesion strength of glass-fiber-reinforced polymer composites. *Material Science and Engineering*, **A277**, 237 – 243
- Halpin, J.C and J.L. Kardos. (1976 May). The Halpin – TSai Equations: A Review. *Polymer Engineering and Science*, Vol 16, No. 5

- Han Gi Chae., Kumar, Satish (26 January 2006). Rigid Rod Polymeric Fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 100 (1): 791–802. doi:10.1002/app.22680.
- Haris B. (1983). *Development in GRP Technology 1*.
- Hilding, Jenny., Eric A. Grulke., Z. George Zhang., and Fran Lockwood. (2003). Dispersion of carbon nanotube in liquids. *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 24, No. 1, 1-41
http://jowo.jw.lt/pustaka/buku/Teknik/Teknik%20Konstruksi%20Kapal%20Baja%20Bag%202_txt.txt (13 Februari 2012)
- Hu, Hurang., Landon Onyebueke., Ayo Abatan. (2010). Characterizing and modeling mechanical properties of nanocomposites- Review and Evaluation. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 9, No.4, 275-319
- Ishai, O., L.J. Cohen. (1967). Elastic Properties of Filled and Porous Epoxy Composites. *Int. J. Mech. Science*, **9**, 539 – 546
- Jae-Sung Park., Chang-Sun Hong., Chun-Gon Kim., and Cheol-Ung Kim. (2002). Analysis of filament wound composite structure considering the change of winding angles through the thickness direction. *Composite Structure*, **55**, 63 – 71
- James, M Margolis. (1986). *Advanced Thermoset Composites, Industrial and Commercial Application*, Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York.
- Jha, Vineetkumar. (2008). Carbon Black Filler Reinforcement of Elastomer. Thesis. Departemenf of Materials, University of London. Queen Mary
- Joseph, P.V., G. Mathew., K. Joseph., G. Groeninckx., S. Thomas. (2003). Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Composites: Part A*, **34**, 275 – 290
- Jun Young Kim., Sang Il Han., Seungpyo Hong. (2008). Effect of modified carbon nanotube on the properties of aromatic polyester nanocomposites. *Polymer*, **49**, 3335 – 3345
- Kanagaraj, S., Fa´tima R. Varanda, Tatiana V. Zhil'tsova, Mo´nica S.A. Oliveira, & Jose´ A.O. Simo. (2007). Mechanical properties of high density

- polyethylene/carbon nanotube composites. *J. Composites Science and Technology*, **67**, 3071–3077
- Kroto et al. (1985). *Nature*, 318, 162
- Lachman, Noa., H. Daniel Wagner. (2010). Correlation between interfacial molecular structure and mechanics in CNT/epoxy nano-composites., *Jurnal Composites: Part A*, **41**, 1093–1098
- Lars Böger, Jan Sumfleth , Hannes Hedemann, Karl Schulte. (2010). Improvement of fatigue life by incorporation of nanoparticles in glass fibre reinforced epoxy. *Composites: Part A*, **41**, 1419–1424
- Lubin, George. (1982). *Handbook of Composites*. Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York.
- Mallick PK. (1993). *Fiber-reinforced composites*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker
- Martone, A., G. Faiella., V. Antonoucci., M. Giardano., M. Zarrelli. (2011). The effect of aspect ratio of carbon nanotubes on their effective reinforcement modulus in an epoxy matrix. *Composites Science and Technology*, **71**, 1117 – 1123
- Matthews, F.L, R.D Rawlings. (1995). *Composite Materials : Engineering and Science*. Chapman & Hall, London.
- Mengenal Tabung LPG http://www.mdp.co.id/uppdn2/dataproduk/bb_gas/lpg.htm
- Meng-Kao Yeh, Nyan-Hwa Tai, Yan-Jyun Lin. (2008). Mechanical properties of phenolic-based nanocomposites reinforced by multi-walled carbon nanotubes and carbon fibers. *Composites: Part A*, **39**, 677-684
- Min-Feng Yu; Lourie, Oleg; Dyer, Mark J.; Moloni, Katerina; Kelly, Thomas F.; Ruoff, Rodney S. (28 January 2000). Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load. *Science*, 287 (5453): 637–640. Bibcode 2000Sci...287..637Y. doi:10.1126/science.287.5453.637. PMID 10649994.
- Moniruzzaman, Mohammad and Karen I. Winey. (2006). Polymer Nanocomposites Containing Carbon Nanotubes. *Macromolecules*, **39**, 5194-5205

- Montazeri, Arash., Alireza Khavandi., Jafar Javadpour., Abbas Tcharkhtchi. (2010). Viscoelastic properties of multi walled carbon nanotube/epoxy composites using two different curing cycles. *Jurnal Material and Design*, **31**, 3383 – 3388
- Montazeri, Arash., et. all. (2010). Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites., *Jurnal Material and Design*, **31**, 4202 – 4208
- Montazeri, Arash., Nasser Montazeri. (2011). Viscoelastic and mechanical properties of multi walled carbon nanotube/epoxy composites with different nanotube content. *Jurnal Material and Design*, **32**, 2301 – 2307
- Mooney, M. (1951). The Viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *Journal of Colloid Science*, Volume 6, Issue 2, 162–170
- Nyan-Hwa Tai, Meng-Kao Yeh, & Tai-Hao Peng. (2008). Experimental study and theoretical analysis on the mechanical properties of SWNTs/phenolic composites. *Composites: Part B*, **39**, 926–932
- Omidi, Meisam., dkk. (2010). Prediction of the mechanical characteristics of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using a new form of the rule of mixtures. *Jurnal Carbon*, **32**, 3218 – 3228.
- Peng-Cheng Ma., Naveed A. Siddiqui., Gad Marom., Jang-Kyo Kim. (2010). Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Composites: Part A*, **41**, 1345 – 1367
- Peng Guo, Xiaohong Chen, Xinchun Gao, Huaihe Song *, Heyun Shen. (2007). Fabrication and mechanical properties of well-dispersed multiwalled carbon nanotubes/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, **67**, 3331–3337
- Polymer Data Handbook. Copyright # 1999 by Oxford University Press, Inc. All rights reserved. Hal 28 http://www.qmc.ufsc.br/~minatti/docs/20061/polymer_data_handbook.pdf (13 Februari 2012)
- PT. Aptogaz Indonesia, Mengenal Tabung LPG dan Kemasannya, www.aptogaz.com

- Rahmat, Meysam., Pascal Hubert. (2011). Carbon nanotube-polymer interactions in nanocomposites: A review. *Composite Science and Technology*, **72**, 72–84
- Raymond B Seymour. (1975). *Modern Plastic Technology*, Reston Publishing Company, USA
- Romhany, G. G Szebenyi. (2009). Interlaminar crack propagation in MWCNT/fiber reinforced hybrid composites., *eXPRESS Polymer Letters* Vol.3, No.3, 145–151.
- Sahoo, Nanda Gopal., Sravenda Rana., Jae Whan Cho., Lin Li., Siew Hwa Chan. (2010). Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes. *Progress in Polymer Science*, **35**, 837 – 867
- Sandler, J.K.W., S. Pegel., M. Cadek., F. Gojny., M. Van Es., J. Lohmar., W.J. Blau., K. Schulte., A.H. Windler., M.S.P. Shaffer. (2004). A comparative study of melt spun polyamide-12 fibres reinforced with carbon nanotubes and nanofibres. *Polymer*, **45**, 2001 – 2015
- SC Tjong. (2006). Structural and mechanical properties of polymer nanocomposites. *Materials Science and Engineering*, R.53, 73 – 197
- Seyhan, A. Tugrul., Metin Tanoglu., Karl Schulte. (2008). Mode I and mode II fracture toughness of E-glass non-crimp fabric/carbon nanotube (CNT) modified polymer based composites. *Jurnal Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 5151 – 5162
- Shao-Yun Fu., Guanshui Xu., Yiu-Wing Mai. (2002). On the elastic modulus of hybrid particle/short-fiber/polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, vol. **33**, issue **4**, 291 – 299
- Shao-Yun Fu., dkk. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. *Jurnal Composite: Part B*, **39**, 933 – 961
- Shimamura, Y., Y. Shibata., K. Tohgo, H. Araki., 2008., Fracture Toughness of Carbon Nanofiber Reinforced Polylactic Acid at Room and Elevated Temperatures., *ICCES vol.6*, no.3, pp.189-194.
- Siddiqui, Naveed A., Erin L. Li, Man-Lung Sham, Ben Zhong Tang, Shang Lin Gao, Edith Mäder, Jang-Kyo Kim. (2010). Tensile strength of glass fibres

- with carbon nanotube–epoxy nanocomposite coating: Effects of CNT morphology and dispersion state. *Composites: Part A*, **41**, 539–548.
- Sinnott, Susan B.; Andrews, Rodney (July 2001). Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties, and Applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 26 (3): 145–249. doi:10.1080/20014091104189.
- Spitalsky, Zdenko., Dimitrios Tasis., Konstantinos Papagelis., Costa Galiotis. (2010). Carbon nanotube-polymer composites: chemistry, processing, mechanical and electrical properties. *Progress in Polymer Science*, **35**, 357–401
- Standard IDE 124 (Casa) : *Physical Test on Glassfiber/Epoxy Resin Prepregs and Laminates*.
- Sumio Iijima. (1991). “Helical microtubules of graphitic carbon”, *Nature*, **354**, 56–58
- Tsu-Wei Chou, et.all. (2010). An assessment of the science and technology of carbon nanotube-based fibers and composites. *Composites Science and Technology*, **70**, 1–19
- Tucker III, Charles L., Erwin Liang. (1999). Stiffness predictions for unidirectional short-fiber composites: review and evaluation. *Composites Science and Technology*, **59**, 655 – 671
- Tuttle, Mark E. (2004). *Structural Analysis of Polymeric Composite Materials*, Marcel Dekker – USA.
- Valentini, Luca., D. Puglia., F. Carniato. E. Boccaleri., L. Marchese., J.M. Kenny. (2008). Use of plasma fluorinated single-walled carbon nanotubes for the preparation of nanocomposites with epoxy matrix. *Composites Science and Technology*, **68**, 1008 – 1014
- Verbeek, C.J.R. (2003). The influence of interfacial adhesion, particle size and size distribution on the predicted mechanical properties of particulate thermoplastic composites. *Materials Letters*, **57**, 1919 – 1924
- Vu-Khanh, T., J. Denault., P. Habib., A. Low. (1991). The effects of injection molding on the mechanical behavior of long-fiber reinforced PBT/PET blends. *Composites Science and Technology*, **40**, 423 – 435

- Wen-Xue Wang. (2009). Experimental investigation on test methods for mode II interlaminar fracture testing of carbon fiber reinforced composites. *Composites: Part A*, **40**, 1447–1455;
- Yiping Qiu., Peter Schwartz. (1993). Micromechanical behavior of kevlar-149/S-glass hybrid seven-fiber microcomposites. I: tensile strength of hybrid composites. *Composites Science and Technology*, **47**, 289 – 301
- Yiping Qiu., Peter Schwartz. (1993). Micromechanical behavior of kevlar-149/S-glass hybrid seven-fiber microcomposites. II: stochastic modeling of stress-rupture of hybrid composites. *Composites Science and Technology*, **47**, 303 – 315
- Young Seok Song, Jae Ryoun Youn. (2005). Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites. *J. Carbon*, **43**, 1378–1385
- Yuanxin Zhou., Farhana Pervin., Lance Lewis., Shaik Jeelani. (2008). Fabrication and characterization of carbon/epoxy composites mixed with multi-walled carbon nanotubes. *Material Science and Engineering*, **A.475**, 157 – 165
- Yunkai Lu. (2002). Mechanical Properties of Random Discontinuous Fiber Composites Manufactured from Wetlay Process., Thesis - Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia.

Lampiran 1: Validasi Teoritis Model I

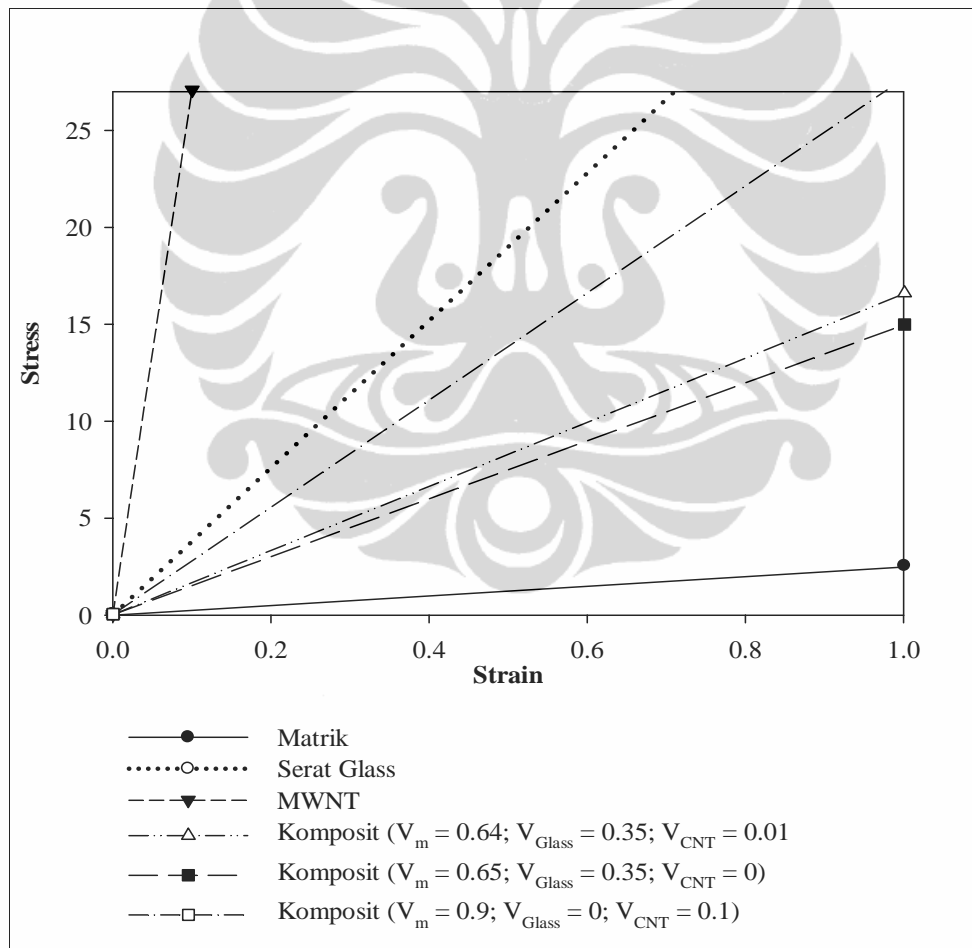
Grafik hubungan antara *Strain* – *Stress* digunakan untuk memvalidasi kebenaran secara matematis terhadap model pengembangan mikromekanik (model I) dengan persamaan model:

$$P = E_{glass} V_{glass} + (1 - V_{glass}) \left[\frac{1 + \xi \eta V_{cnt}}{1 - \eta V_{cnt}} \right] P_m \quad (L1.1)$$

Dari Gambar L1.1 dan Tabel L1.1 tersebut dilihat pada saat nilai fraksi serat (glass dan CNT) sama dengan nol, maka nilai sifat mekanik (Modulus) yang dihitung berdasarkan model persamaan (L1.1) akan sama dengan nilai modulus elastisitas dari matriknya. Begitu juga sebaliknya pada saat nilai $V_m = 0$ dan $V_f = 0$, dengan menggunakan persamaan (L1.1) hasil perhitungan nilai modulus elastisitas sama dengan modulus elastisitas dari CNT. Pada saat nilai $V_m = 0$ dan $V_{CNT} = 0$, dengan menggunakan persamaan (L1.1) hasil perhitungan nilai modulus elastisitas sama dengan modulus elastisitas dari serat glass. Hal ini menunjukkan model persamaan (L1.1) secara teoritis dapat dikatakan valid. Memperhatikan Gambar L1.1 dan Tabel L1.1 terlihat bahwa pada fraksi volum matrik 65 %, fraksi serat glass 35 % dan CNT 0%, maka sifat mekanik (modulus elastisitas) akan berada diantara sifat mekanik matrik dan serat glass. Pada saat ditambahkan CNT sehingga fraksi volumenya, matrik 64%, serat glass 35% dan CNT 1% maka sifata mekaniknya (modulus elastisitas) lebih besar. Hal ini menunjukkan secara teoritis perilaku model sudah sangat sesuai dengan perilaku teori yang ada.

Tabel L1.1. Data Simulasi untuk validasi Model I

Fraksi Volum			Modulus (Gpa)
V_m	V_f	V_{CNT}	
1,00	0,00	0,00	2,48
0,00	1,00	0,00	38,00
0,00	0,00	1,00	270,00
0,64	0,35	0,01	16,54
0,65	0,35	0,00	14,91
0,90	0,00	0,10	27,61



Gambar L1.1 Grafik Strain –Stress untuk validasi Model I

Lampiran 2: Validasi Teoritis Model II

Grafik hubungan antara *Strain* – *Stress* digunakan untuk memvalidasi kebenaran secara matematis terhadap model II (modifikasi Halpin – Tsai):

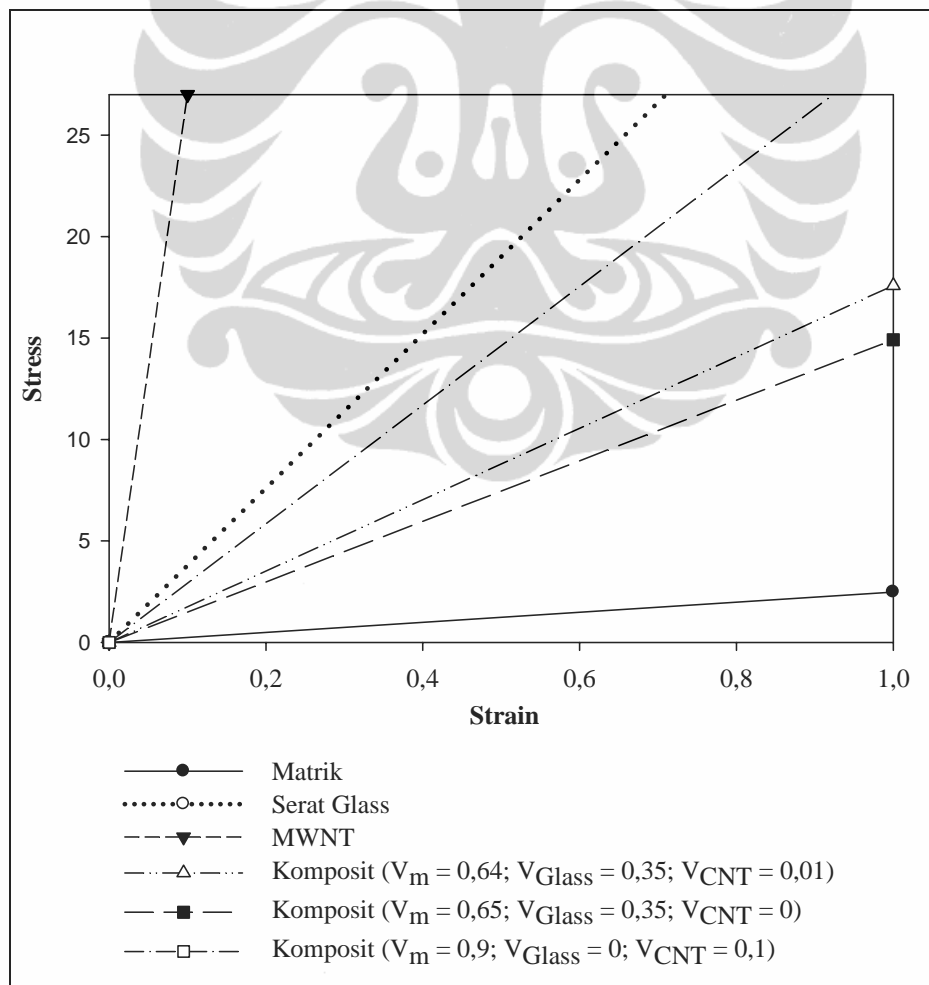
$$P = \frac{1 + \xi_1 \xi_2 \eta_1 V_f + \xi_1 \xi_2 \eta_2 V_{CNT} + \eta_3}{1 - \eta_1 V_f - \eta_2 V_{CNT} + \eta_3} P_m \quad (L2.1)$$

Dari Gambar dan Tabel tersebut dapat dilihat pada saat nilai fraksi serat (glass dan CNT) sama dengan nol, maka nilai sifat mekanik (Modulus) yang dihitung berdasarkan model persamaan (L2.1) akan sama dengan nilai modulus elastisitas dari matriknya. Begitu juga sebaliknya pada saat nilai $V_m = 0$ dan $V_f = 0$. dengan menggunakan persamaan (L2.1) hasil perhitungan nilai modulus elastisitas sama dengan modulus elastisitas dari CNT. Pada saat nilai $V_m = 0$ dan $V_{CNT} = 0$, dengan menggunakan persamaan (L2.1) hasil perhitungan nilai modulus elastisitas sama dengan modulus elastisitas dari serat glass. Hal ini menunjukkan model persamaan (L2.1) secara teoritis dapat dikatakan valid.

Memperhatikan Gambar L2.1 dan Tabel L2.1 terlihat bahwa pada fraksi volum matrik 65 %, fraksi serat glass 35 % dan CNT 0%, maka sifat mekanik (modulus elastisitas) akan berada diantara sifat mekanik matrik dan serat glass. Pada saat ditambahkan CNT sehingga fraksi volumenya, matrik 64%, serat glass 35% dan CNT 1% maka sifata mekaniknya (modulus elastisitas) lebih besar. Hal ini menunjukkan secara teoritis perilaku model II (modifikasi Hlapin – TSai) sudah sangat sesuai dengan perilaku teori yang ada.

Tabel L2.1. Data Simulasi untuk validasi Model II

Fraksi Volum			E (Gpa)
V_m	V_f	V_{CNT}	
1,00	0,00	0,00	2,48
0,00	1,00	0,00	38,00
0,00	0,00	1,00	270,00
0,64	0,35	0,01	17,59
0,65	0,35	0,00	14,91
0,90	0,00	0,10	29,23



Gambar L2.1. Grafik Strain –Stress untuk validasi Model II

Lampiran 3: Variasi Pembuatan Sampel

No. Sampel	I		II		III	
	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Lebar (mm)
S1000						
S1000 - 1	2,40	5,72	2,35	5,65	5,65	2,25
S1000 - 2	2,31	5,85	2,28	5,78	5,65	2,20
S1000 - 3	2,30	5,60	2,28	5,80	5,73	2,24
S1000 - 4	2,22	6,40	2,27	6,36	6,18	2,27
S1000 - 5	2,30	5,81	2,29	5,74	5,72	2,27
S1000 - 6	2,35	5,64	2,35	5,72	5,78	2,30
S11L0						
S11L0 - 1	0,10	7,40	0,09	7,38	7,70	0,07
S11L0 - 2	0,10	6,30	0,13	6,11	6,40	0,13
S11L0 - 3	0,12	7,26	0,12	7,70	7,56	0,14
S11L0 - 4	0,10	6,32	0,09	5,96	6,36	0,13
S11L0 - 5	0,04	5,33	0,04	5,76	5,10	0,11
S11L0 - 6	0,09	7,10	0,09	7,35	7,70	0,04
S11L0 - 7	0,12	7,80	0,06	7,38	6,40	0,06
S12L0						
S12L0 - 1	0,46	7,12	0,45	7,35	7,25	0,42
S12L0 - 2	0,43	7,04	0,40	7,10	7,30	0,38
S12L0 - 3	0,45	6,80	0,45	6,60	6,77	0,45
S12L0 - 4	0,48	6,74	0,48	6,69	7,09	0,43
S12L0 - 5	0,46	7,41	0,49	7,35	7,42	0,44
S12L0 - 6	0,44	5,33	0,43	5,76	5,10	0,43
S12L0 - 7	0,44	7,40	0,44	7,30	7,54	0,46
S13L0						
S13L0 - 1	1,17	7,16	1,16	7,02	7,27	1,15
S13L0 - 2	1,10	7,35	1,12	7,42	7,63	1,12
S13L0 - 3	1,24	7,16	1,18	6,75	7,16	1,12
S13L0 - 4	1,10	7,04	1,15	6,94	7,18	1,06
S13L0 - 5	1,20	6,26	1,15	5,86	6,12	1,16
S13L0 - 6	1,02	6,82	1,08	6,76	7,21	1,12
S13L0 - 7	1,01	6,55	1,11	6,47	6,84	1,16

(Lanjutan)

S14L0						
S14L0 - 1	1,34	6,32	1,31	6,65	6,00	1,30
S14L0 - 2	1,42	6,47	1,44	6,58	6,74	1,44
S14L0 - 3	1,56	6,70	1,53	6,64	6,80	1,52
S14L0 - 4	1,60	6,88	1,58	6,53	6,80	1,61
S14L0 - 5	1,60	7,20	1,62	7,33	7,50	1,60
S14L0 - 6	1,59	7,19	1,58	6,98	7,46	1,59
S14L0 - 7	1,58	7,04	1,58	7,00	7,09	1,60
S11L01						
S11L01 - 1	0,18	6,95	0,19	7,12	7,26	0,17
S11L01 - 2	0,25	6,84	0,21	7,50	7,80	0,22
S11L01 - 3	0,32	6,00	0,35	6,00	6,35	0,35
S11L01 - 4	0,34	6,40	0,36	5,93	6,25	0,32
S11L01 - 5	0,31	6,95	0,31	7,18	6,93	0,28
S11L01 - 6	0,22	7,05	0,28	6,93	7,40	0,26
S11L01 - 7	0,25	6,12	0,31	6,06	6,00	0,27
S12L01						
S12L01 - 1	0,70	7,00	0,68	6,94	7,25	0,72
S12L01 - 2	0,76	7,40	0,78	7,01	7,23	0,78
S12L01 - 3	0,80	6,66	0,82	6,44	6,68	0,80
S12L01 - 4	0,83	7,50	0,86	7,50	7,60	0,86
S12L01 - 5	0,85	6,56	0,85	6,54	6,60	0,88
S12L01 - 6	0,80	7,02	0,82	7,60	7,70	0,82
S12L01 - 7	0,85	7,04	0,81	7,32	7,56	0,83
S13L01						
S13L01 - 1	1,78	6,84	1,78	6,91	7,16	1,66
S13L01 - 2	1,70	5,50	1,82	6,58	5,78	1,84
S13L01 - 3	1,72	6,48	1,74	5,88	6,30	1,62
S13L01 - 4	1,70	6,64	1,70	6,17	6,74	1,60
S13L01 - 5	1,58	7,17	1,62	7,11	7,38	1,66
S13L01 - 6	1,63	7,50	1,64	7,30	7,74	1,50
S14L01						
S14L01 - 1	1,90	7,21	1,96	7,12	7,32	1,98
S14L01 - 2	1,98	6,70	2,02	6,13	6,44	2,02
S14L01 - 3	2,02	7,24	2,06	7,32	7,50	2,05
S14L01 - 4	2,00	7,40	2,06	7,15	7,43	2,05
S14L01 - 5	2,13	7,57	2,11	7,42	7,56	2,03
S14L01 - 6	2,02	7,39	2,02	7,06	7,41	2,06
S14L01 - 7	2,00	6,83	2,06	6,80	6,66	2,04

(Lanjutan)

S12L03						
S12L03 - 1	0,63	6,82	0,65	6,76	7,40	0,57
S12L03 - 2	0,51	7,40	0,57	7,54	7,42	0,55
S12L03 - 3	0,60	7,30	0,58	7,58	7,80	0,55
S12L03 - 4	0,50	7,43	0,54	7,14	7,10	0,57
S12L03 - 5	0,53	6,73	0,46	6,40	6,47	0,43
S12L03 - 6	0,61	6,55	0,63	6,30	6,64	0,63
S12L05						
S12L05 - 1	0,60	7,31	0,60	7,22	7,39	0,60
S12L05 - 2	0,62	6,00	0,64	6,60	7,00	0,65
S12L05 - 3	0,56	7,09	0,56	6,94	7,09	0,55
S12L05 - 4	0,53	7,06	0,48	7,32	7,48	0,45
S12L05 - 5	0,60	6,75	0,60	6,31	6,02	0,60
S12L05 - 6	0,66	7,06	0,62	6,84	7,35	0,62
S12L05 - 7	0,54	7,34	0,55	7,00	7,16	0,50
S12L10						
S12L10 - 1	0,62	6,93	0,58	7,00	7,50	0,52
S12L10 - 2	0,60	6,32	0,58	6,32	6,84	0,58
S12L10 - 3	0,64	5,84	0,65	5,60	5,96	0,66
S12L10 - 4	0,52	6,57	0,61	6,20	6,68	0,60
S12L10 - 5	0,55	6,86	0,58	6,74	7,05	0,60
S12L10 - 6	0,60	6,70	0,66	6,90	7,30	0,62
S12L10 - 7	0,66	6,84	0,62	6,68	6,76	0,61
S13L03						
S13L03 - 1	1,29	6,98	1,29	6,82	7,00	1,29
S13L03 - 2	1,40	7,60	1,40	7,27	7,50	1,39
S13L03 - 3	1,35	7,70	1,35	7,49	7,70	1,35
S13L03 - 4	1,12	7,20	1,14	6,95	7,40	1,12
S13L03 - 5	1,11	7,06	1,10	7,27	7,35	1,06
S13L03 - 6	1,25	7,10	1,25	7,20	7,40	1,27
S13L03 - 7	1,32	7,00	1,35	6,78	7,06	1,34
S13L03 - 8	1,20	7,92	1,20	7,75	7,60	1,16

(lanjutan)

S13L05						
S13L05 - 1	1,42	6,54	1,43	6,36	6,44	1,40
S13L05 - 2	1,50	7,24	1,50	7,06	7,02	1,48
S13L05 - 3	1,46	7,80	1,44	7,42	7,40	1,42
S13L05 - 4	1,33	7,55	1,38	7,30	7,62	1,34
S13L05 - 5	1,24	6,73	1,30	6,61	6,92	1,27
S13L05 - 6	1,48	6,82	1,48	7,04	7,48	1,43
S13L05 - 7	1,50	6,82	1,49	6,83	7,38	1,49
S13L05 - 8	1,40	7,35	1,38	7,30	7,47	1,34
S13L10						
S13L10 - 1	1,53	8,06	1,58	7,68	7,70	1,56
S13L10 - 2	1,60	6,24	1,66	6,16	6,19	1,63
S13L10 - 3	1,53	7,00	1,53	6,62	6,96	1,56
S13L10 - 4	1,54	6,95	1,59	6,74	6,47	1,59
S13L10 - 5	1,56	6,96	1,60	6,80	6,98	1,60
S13L10 - 6	1,53	6,55	1,58	6,01	6,22	1,58

Lampiran 4: Perhitungan Fraksi Pembuatan Sampel

Kode Sampel	Berat (gr)			Fraksi Berat			Fraksi Volume		
	Resin	Glass	MWNT	Resin	Glass	MWNT	Resin	Glass	MWNT
S10000	125	0	0	1,0	0	0,000	1,0	0	0
S11L00	23,6	14,4	0	0,6	0,4	0,000	0,8	0,2	0
S12L00	43,2	28,8	0	0,6	0,4	0,000	0,8	0,2	0
S13L00	68,9	43,6	0	0,6	0,4	0,000	0,8	0,2	0
S14L00	86,4	57,7	0	0,6	0,4	0,000	0,8	0,2	0
S11L01	40,8	14,5	0,04	0,7	0,3	0,001	0,9	0,1	0,0005
S12L01	60,5	28,3	0,061	0,7	0,3	0,001	0,8	0,2	0,0005
S13L01	79,6	42,8	0,081	0,6	0,3	0,001	0,8	0,2	0,0005
S14L01	100,6	56,7	0,108	0,6	0,4	0,001	0,8	0,2	0,0005
S12L03	39,9	27,7	0,119	0,6	0,4	0,002	0,8	0,2	0,001
S12L05	40,1	28,1	0,208	0,6	0,4	0,003	0,8	0,2	0,002
S12L10	40,7	27	0,391	0,6	0,4	0,006	0,8	0,2	0,004
S13L03	80,4	37,5	0,24	0,7	0,3	0,002	0,8	0,2	0,001
S13L05	80	37,4	0,403	0,7	0,3	0,003	0,8	0,2	0,002
S13L10	80	38,8	0,794	0,7	0,3	0,007	0,8	0,2	0,005

Lampiran 5: Data *Burn off test*

Test – 1

No.	Kode Sampel	Berat (gr)							Fraksi Berat			Fraksi Volum		
		W ₀	W ₁	W ₁ - W ₀	W ₂	Epoxy Resin	Glass	MWNT	Epoxy Resin	Glass	MWNT	Epoxy Resin	Glass	MWNT
1	3	4	5	6=5-4	7	8=7-5	9	10	11	12	13	14	15	16
1	S11L00 - 5	25,1532	25,4672	0,3140	25,3216	0,1456	0,1684	0	0,4637	0,5363	0,0000	0,6577	0,3423	0,0000
2	S12L00 - 2	21,3912	22,0056	0,6144	21,7260	0,2796	0,3348	0	0,4551	0,5449	0,0000	0,6498	0,3502	0,0000
3	S13L00 - 2	22,9525	24,0232	1,0707	23,4848	0,5384	0,5323	0	0,5028	0,4972	0,0000	0,6921	0,3079	0,0000
4	S14L00 - 3	24,3154	25,7633	1,4479	25,0774	0,6859	0,7620	0	0,4737	0,5263	0,0000	0,6667	0,3333	0,0000
5	S11L01 - 7	25,9962	26,5075	0,5113	26,1928	0,3147	0,1963	0,000315	0,6155	0,3839	0,00062	0,7805	0,2191	0,0004
6	S12L01 - 3	24,9490	25,8633	0,9143	25,3501	0,5132	0,4006	0,000513	0,5613	0,4381	0,00056	0,7397	0,2598	0,0004
7	S13L01 - 6	25,8387	27,0138	1,1751	26,4304	0,5834	0,5911	0,000583	0,4965	0,5030	0,00050	0,6866	0,3130	0,0004
8	S14L01 - 6	25,4999	27,3818	1,8819	26,3556	1,0262	0,8547	0,001026	0,5453	0,4542	0,00055	0,7271	0,2725	0,0004
9	S12L03 - 2	24,3268	25,0001	0,6733	24,7186	0,2815	0,3910	0,000845	0,4181	0,5807	0,00125	0,6148	0,3842	0,0010
10	S12L05 - 7	25,6855	26,5519	0,8664	26,1578	0,3941	0,4703	0,00197	0,4549	0,5429	0,00227	0,6494	0,3488	0,0018
11	S12L10 - 7	23,1199	23,8950	0,7751	23,4974	0,3976	0,3735	0,003976	0,5130	0,4819	0,00513	0,7001	0,2960	0,0039
12	S13L03 - 4	22,5928	23,9694	1,3766	23,2230	0,7464	0,6280	0,002239	0,5422	0,4562	0,00163	0,7245	0,2743	0,0012
13	S13L05 - 7	24,8368	26,3298	1,4930	25,4154	0,9144	0,5740	0,004572	0,6125	0,3845	0,00306	0,7780	0,2198	0,0022
14	S13L10 - 3	21,3683	22,7649	1,3966	21,9156	0,8493	0,5388	0,008493	0,6081	0,3858	0,00608	0,7746	0,2211	0,0043

(lanjutan)

Test – 2

No.	Kode Sampel	Berat (gr)							Fraksi Berat			Fraksi Volum		
		W ₀	W ₁	W ₁ - W ₀	W ₂	Epoxy Resin	Glass	MWNT	Epoxy Resin	Glass	MWNT	Epoxy Resin	Glass	MWNT
1	3	4	5	6 = 5 - 4	7	8 = 7 - 5	9	10	11	12	13	14	15	16
1	S11L00 - 5	25,1534	25,3712	0,2178	25,2777	0,0935	0,1243	0	0,4293	0,5707	0,0000	0,6257	0,3743	0,0000
2	S12L00 - 2	21,3907	21,7722	0,3815	21,6074	0,1648	0,2167	0	0,4320	0,5680	0,0000	0,6283	0,3717	0,0000
3	S13L00 - 2	22,9512	23,6912	0,7400	23,3213	0,3699	0,3701	0	0,4999	0,5001	0,0000	0,6895	0,3105	0,0000
4	S14L00 - 3	24,3151	25,2164	0,9013	24,7843	0,4321	0,4692	0	0,4794	0,5206	0,0000	0,6718	0,3282	0,0000
5	S11L01 - 7	25,9960	26,3660	0,3700	26,1137	0,2523	0,1174	0,000252	0,6819	0,3174	0,00068	0,8264	0,1731	0,0005
6	S12L01 - 3	24,9488	25,4711	0,5223	25,2055	0,2656	0,2564	0,000266	0,5085	0,4910	0,00051	0,6969	0,3028	0,0004
7	S13L01 - 6	25,8385	26,5241	0,6856	26,1959	0,3282	0,3571	0,000328	0,4787	0,5208	0,00048	0,6711	0,3285	0,0004
8	S14L01 - 6	25,4995	26,5349	1,0354	25,9438	0,5911	0,4437	0,000591	0,5709	0,4285	0,00057	0,7472	0,2524	0,0004
9	S12L03 - 2	24,3261	24,7103	0,3842	24,5553	0,1550	0,2287	0,000465	0,4034	0,5954	0,00121	0,6003	0,3987	0,0010
10	S12L05 - 7	25,6852	26,0904	0,4052	25,9208	0,1696	0,2348	0,000848	0,4186	0,5793	0,00209	0,6151	0,3831	0,0017
11	S12L10 - 7	23,1197	23,5281	0,4084	23,3311	0,1970	0,2094	0,00197	0,4824	0,5128	0,00482	0,6739	0,3224	0,0038
12	S13L03 - 4	22,5925	23,3228	0,7303	22,9157	0,4071	0,3220	0,001221	0,5574	0,4409	0,00167	0,7366	0,2622	0,0012
13	S13L05 - 7	24,8366	25,6489	0,8123	25,1446	0,5043	0,3055	0,002522	0,6208	0,3761	0,00310	0,7841	0,2137	0,0022
14	S13L10 - 3	21,3681	22,2901	0,9220	21,6949	0,5952	0,3208	0,005952	0,6456	0,3480	0,00646	0,8012	0,1943	0,0045

Lampiran 6: Data Rata-rata *Burn off test*

No.	Kode Sampel	Fraksi Volum								
		Test 1			Test 2			Rata-rata		
		Epoxy Resin	Glass	MWNT	Epoxy Resin	Glass	MWNT	Epoxy Resin	Glass	MWNT
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	S11L00 - 5	0,6577	0,3423	0,0000	0,6257	0,3743	0,0000	0,6417	0,3583	0,0000
2	S12L00 - 2	0,6498	0,3502	0,0000	0,6283	0,3717	0,0000	0,6390	0,3610	0,0000
3	S13L00 - 2	0,6921	0,3079	0,0000	0,6895	0,3105	0,0000	0,6908	0,3092	0,0000
4	S14L00 - 3	0,6667	0,3333	0,0000	0,6718	0,3282	0,0000	0,6692	0,3308	0,0000
5	S11L01 - 7	0,7805	0,2191	0,0004	0,8264	0,1731	0,0005	0,8035	0,1961	0,0004
6	S12L01 - 3	0,7397	0,2598	0,0004	0,6969	0,3028	0,0004	0,7183	0,2813	0,0004
7	S13L01 - 6	0,6866	0,3130	0,0004	0,6711	0,3285	0,0004	0,6788	0,3208	0,0004
8	S14L01 - 6	0,7271	0,2725	0,0004	0,7472	0,2524	0,0004	0,7371	0,2624	0,0004
9	S12L03 - 2	0,6148	0,3842	0,0010	0,6003	0,3987	0,0010	0,6075	0,3914	0,0010
10	S12L05 - 7	0,6494	0,3488	0,0018	0,6151	0,3831	0,0017	0,6323	0,3660	0,0018
11	S12L10 - 7	0,7001	0,2960	0,0039	0,6739	0,3224	0,0038	0,6870	0,3092	0,0038
12	S13L03 - 4	0,7245	0,2743	0,0012	0,7366	0,2622	0,0012	0,7306	0,2682	0,0012
13	S13L05 - 7	0,7780	0,2198	0,0022	0,7841	0,2137	0,0022	0,7811	0,2168	0,0022
14	S13L10 - 3	0,7746	0,2211	0,0043	0,8012	0,1943	0,0045	0,7879	0,2077	0,0044

Lampiran 7: Data Uji Tarik

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S1000 - 1	2,28	5,67	2,385	73,502	1540,915	95,02
2	S1000 - 2	2,26	5,76	2,467	69,905	1416,809	91
3	S1000 - 3	2,27	5,71	2,29	69,119	1509,149	89,59
4	S1000 - 5	2,29	5,76	2,334	75,085	1608,503	99,04
5	S1000 - 6	2,33	5,71	2,245	73,698	1641,380	98,05
	Mean	2,286	5,722	2,3442	72,262	1543,351	94,54
	STDEV	0,027	0,038	0,086	2,598	88,095	4,18

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S11L0 - 1	0,27	7,49	0,9667	310,587	16064,289	62,81
2	S11L0 - 3	0,27	7,51	0,9098	317,700	17459,873	64,42
3	S11L0 - 4	0,27	6,21	0,9005	271,366	15067,539	45,5
4	S11L0 - 5	0,27	5,4	0,966	328,601	17008,324	47,91
5	S11L0 - 6	0,27	7,38	0,8737	240,440	13759,850	47,91
	Mean	0,27	6,798	0,92334	293,739	15871,975	53,71
	STDEV	0	0,952	0,041	36,792	1496,486	9,11

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S12L0 - 2	0,832	7,15	0,4535	100,171	11044,263	59,59
2	S12L0 - 3	0,832	6,72	0,6592	128,187	9722,940	71,67
3	S12L0 - 4	0,832	6,84	0,8107	164,860	10167,773	93,82
4	S12L0 - 6	0,832	5,4	0,9333	197,160	10562,515	88,58
5	S12L0 - 7	0,832	7,41	0,8313	160,662	9663,293	99,05
	Mean	0,832	6,704	0,7376	150,208	10232,157	82,542
	STDEV	0,000	0,777	0,187	37,138	582,174	16,44

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S13L0 - 2	1,686	7,47	0,8519	142,349	8354,781	179,28
2	S13L0 - 3	1,686	7,02	0,6706	126,228	9411,576	149,4
3	S13L0 - 5	1,686	6,08	0,4876	91,134	9345,123	93,42
4	S13L0 - 6	1,686	6,93	1,102	149,675	6791,063	174,88
5	S13L0 - 7	1,686	6,62	0,8009	112,890	7047,688	126
	Mean	1,686	6,824	0,7826	124,455	8190,046	144,596
	STDEV	0,000	0,515	0,227	23,470	1236,488	35,735

(Lanjutan)

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S14L0 - 1	2,014	6,32	0,9298	191,696	10308,459	244
2	S14L0 - 2	2,014	6,6	1,013	172,956	8536,820	229,9
3	S14L0 - 3	2,014	6,71	0,946	192,024	10149,257	259,5
4	S14L0 - 4	2,014	6,74	0,8457	134,076	7926,942	182
5	S14L0 - 6	2,014	7,21	1,032	180,222	8731,710	261,7
	Mean	2,014	6,716	0,9533	174,195	9130,638	235,42
	STDEV	0	0,322	0,074	23,830	1047,078	32,51

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S11L01 - 1	0,18	7,11	0,964	330,364	17136,846	42,28
2	S11L01 - 3	0,34	6,12	0,945	218,666	11570,849	45,5
3	S11L01 - 5	0,3	7,02	0,918	288,699	15724,344	60,8
4	S11L01 - 6	0,25	7,13	0,872	350,126	20073,743	62,41
5	S11L01 - 7	0,28	6,06	1,056	272,867	12919,819	46,3
	Mean	0,27	6,688	0,951	292,144	15485,120	51,458
	STDEV	0,06	0,548	0,068	51,491	3381,685	9,402

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S12L01 - 3	0,81	6,59	0,882	210,382	11923,734	112,3
2	S12L01 - 4	0,85	7,53	0,942	212,015	11259,410	135,7
3	S12L01 - 5	0,86	6,57	1,001	212,382	10608,485	120
4	S12L01 - 6	0,81	7,44	0,904	214,556	11873,600	129,3
5	S12L01 - 7	0,83	7,31	0,916	231,569	12634,725	140,5
	Mean	0,832	7,088	0,929	216,181	11659,991	127,56
	STDEV	0,023	0,470	0,046	8,730	763,450	11,476

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S13L01 - 1	1,74	6,97	1,102	182,638	8286,671	221,5
2	S13L01 - 2	1,79	5,95	1,003	189,381	9440,717	201,7
3	S13L01 - 3	1,69	6,22	1,168	206,435	8837,101	217
4	S13L01 - 5	1,62	7,22	0,771	152,526	9896,546	178,4
5	S13L01 - 6	1,59	7,51	0,693	148,733	10735,709	177,6
	Mean	1,686	6,774	0,947	175,942	9439,349	199,24
	STDEV	0,083	0,664	0,207	24,718	946,170	20,734

(Lanjutan)

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S14L01 - 1	1,95	7,22	1,009	203,921	10105,091	287,1
2	S14L01 - 2	2,01	6,42	1,000	178,469	8926,129	230,3
3	S14L01 - 3	2,04	7,35	1,077	212,152	9849,189	318,1
4	S14L01 - 4	2,04	7,33	0,951	184,175	9688,302	275,4
5	S14L01 - 6	2,03	7,29	1,054	199,207	9450,033	294,8
	Mean	2,014	7,122	1,018	195,585	9603,749	281,14
	STDEV	0,038	0,396	0,049	13,966	447,641	32,426

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S12L03 - 1	0,62	6,99	0,982	255,434	13011,106	110,7
2	S12L03 - 2	0,54	7,45	0,831	280,139	16861,635	112,7
3	S12L03 - 3	0,58	7,56	0,732	256,112	17501,163	112,3
4	S12L03 - 5	0,47	6,53	1,029	342,446	16639,731	105,1
5	S12L03 - 6	0,62	6,5	0,973	205,831	10572,800	82,95
	Mean	0,566	7,006	0,909	267,992	14917,287	104,75
	STDEV	0,063	0,497	0,124	49,633	2997,158	12,560

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S12L05 - 3	0,56	7,04	0,648	209,365	16167,170	82,54
2	S12L05 - 4	0,49	7,29	1,010	294,225	14565,579	105,1
3	S12L05 - 5	0,6	6,36	0,675	168,816	12510,413	64,42
4	S12L05 - 6	0,63	7,08	0,917	219,375	11965,471	97,85
5	S12L05 - 7	0,53	7,17	0,779	251,125	16120,489	95,43
	Mean	0,562	6,988	0,806	228,581	14265,824	89,068
	STDEV	0,055	0,364	0,156	47,019	1969,635	16,006

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S12L10 - 1	0,57	7,14	0,812	226,571	13948,001	92,21
2	S12L10 - 2	0,59	6,49	0,728	226,084	15534,180	86,57
3	S12L10 - 3	0,65	5,8	0,999	278,780	13948,756	105,1
4	S12L10 - 6	0,63	6,97	0,959	229,328	11961,585	100,7
5	S12L10 - 7	0,63	6,76	0,970	226,918	11698,030	96,64
	Mean	0,614	6,632	0,894	237,536	13418,110	96,244
	STDEV	0,033	0,525	0,118	23,090	1590,618	7,216

(Lanjutan)

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S13L03 - 3	1,35	7,63	1,068	209,504	9808,258	215,8
2	S13L03 - 4	1,13	7,18	0,783	271,773	17354,574	220,5
3	S13L03 - 5	1,09	7,23	0,926	235,005	12685,118	185,2
4	S13L03 - 6	1,26	7,23	0,909	245,779	13516,238	223,9
5	S13L03 - 8	1,19	7,76	0,876	231,526	13210,407	213,8
	Mean	1,204	7,406	0,913	238,717	13314,919	211,84
	STDEV	0,104	0,269	0,103	22,701	2695,532	15,408

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S13L05 - 1	1,42	6,45	0,851	225,570	13257,933	206,6
2	S13L05 - 4	1,35	7,49	1,091	281,561	12903,785	284,7
3	S13L05 - 6	1,46	7,11	0,995	212,993	10706,417	221,1
4	S13L05 - 7	1,49	7,01	0,766	187,747	12250,237	196,1
5	S13L05 - 8	1,37	7,37	1,043	228,882	10972,298	231,1
	Mean	1,418	7,086	0,949	227,351	12018,134	227,92
	STDEV	0,059	0,405	0,136	34,347	1139,049	34,452

No.	Kode Sampel	Thickness (mm)	Width (mm)	Displacement (mm)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus (MPa)	Max Load (Kg)
1	S13L10 - 2	1,63	6,2	0,907	167,326	9227,216	169,1
2	S13L10 - 3	1,54	6,86	0,699	127,314	9109,500	134,5
3	S13L10 - 4	1,57	6,72	0,780	119,048	7631,258	125,6
4	S13L10 - 5	1,59	6,91	0,849	157,005	9242,122	172,5
5	S13L10 - 6	1,56	6,26	0,865	148,480	8582,681	145
	Mean	1,578	6,59	0,820	143,835	8758,555	149,34
	STDEV	0,034	0,337	0,082	20,213	685,269	20,794

Lampiran 8: Data Densiti

No.	Kode Sampel	Dimensi (mm)			Berat (gr)	Volume (cm ³)	Densiti (gr/cm ³)
		t	p1	p2			
1	S10000	3,90	18,03	18,04	0,9622	1,269	0,759
2	S11L00	0,80	18,50	18,45	0,2194	0,273	0,803
3	S12L00	1,11	18,25	18,35	0,3848	0,372	1,035
4	S13L00	1,90	18,60	18,50	0,7420	0,654	1,135
5	S14L00	2,30	18,30	18,00	0,9036	0,758	1,193
6	S11L01	1,20	18,50	18,60	0,3730	0,413	0,903
7	S12L01	1,45	18,75	18,80	0,5249	0,511	1,027
8	S13L01	1,80	18,45	18,55	0,6892	0,616	1,119
9	S14L01	2,80	18,00	17,95	1,0358	0,905	1,145
10	S12L03	1,15	18,30	18,60	0,3907	0,391	0,998
11	S12L05	1,15	18,45	18,45	0,4066	0,391	1,039
12	S12L10	1,22	18,10	17,95	0,4142	0,396	1,045
13	S13L03	1,95	18,75	18,65	0,7325	0,682	1,074
14	S13L05	2,18	18,60	18,70	0,8150	0,758	1,075
15	S13L10	2,50	18,45	18,35	0,9223	0,846	1,090