

**EVALUASI PENGGUNAAN METODE VARI (VACUUM  
ASSISTED RESIN INFUSION) PADA KOMPOSIT EPOXY-E  
GLASS DAN KARAKTERISASI MIKRO UNTUK APLIKASI  
SUDU TURBIN ANGIN**

**SKRIPSI**

oleh

**ANDES RIZKY**

**0305020128**



**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS INDONESIA  
2010**

**EVALUASI PENGGUNAAN METODE VARI (VACUUM ASSISTED RESIN INFUSION) PADA KOMPOSIT EPOXY-E GLASS DAN KARAKTERISASI MIKRO UNTUK APLIKASI SUDU TURBIN ANGIN**

**SKRIPSI**

**Diajukan Untuk Melengkapi Persyaratan Memperoleh Gelar Sarjana**

oleh

**ANDES RIZKY  
0305020128**



**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS INDONESIA  
2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Andes Rizky**

**NPM : 0305020128**

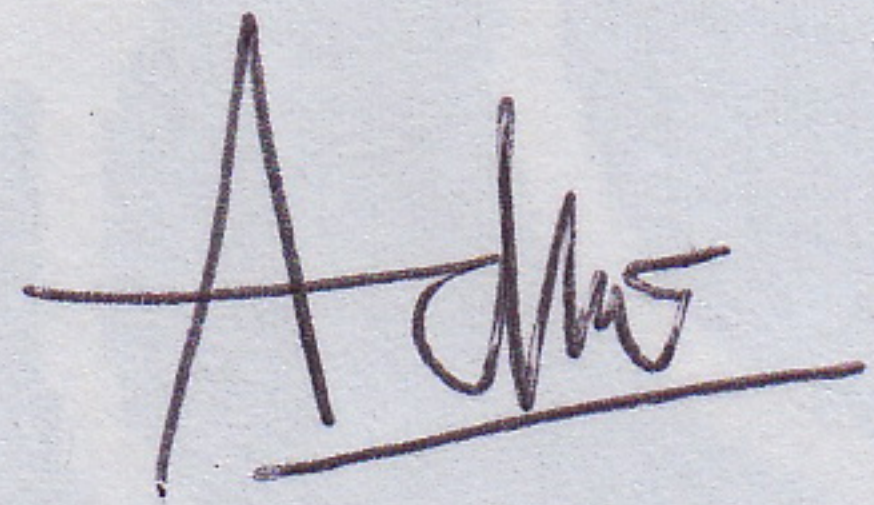
**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 20 Juni 2010**

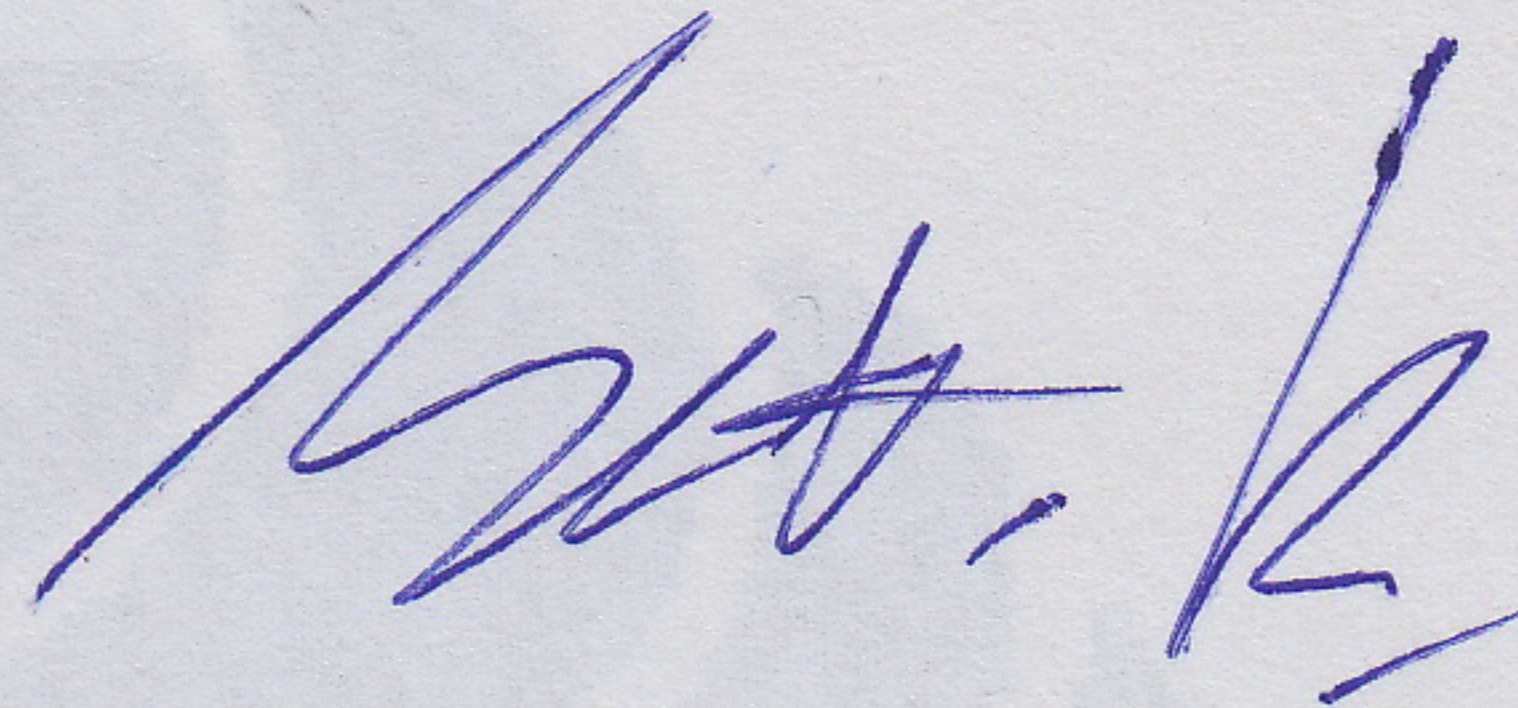
## HALAMAN PENGESAHAN

Nama Mahasiswa : Andes Rizky  
NPM : 0305020128  
Departemen : Fisika  
Peminatan : Material dan Zat Mampat  
Tanggal Sidang : 29 Juni 2010  
Judul Skripsi : Evaluasi Penggunaan Metode VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion) Pada Komposit Epoxy-E Glass dan Karakterisasi Mikro untuk Aplikasi Sudu Turbin Angin

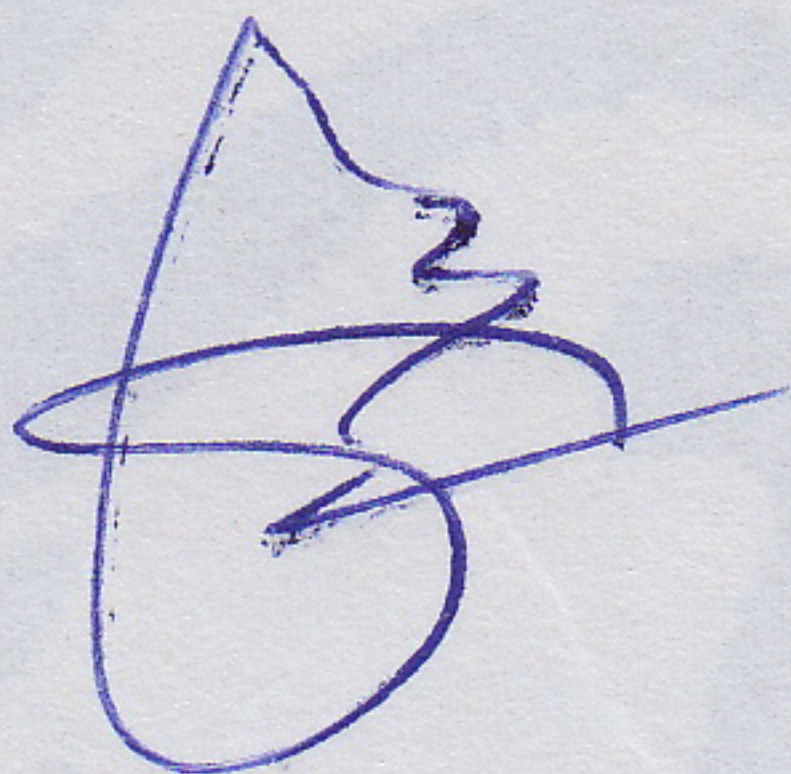
Skripsi ini telah diperiksa dan disetujui oleh



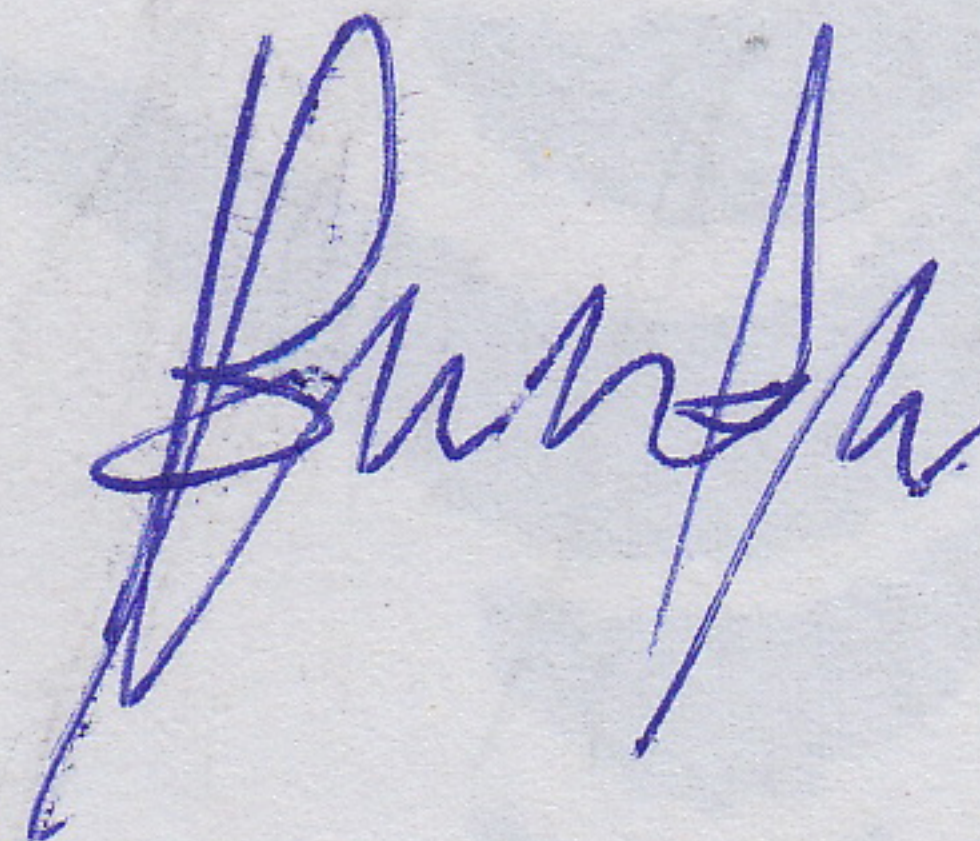
Dra. Ariadne L. Juwono, M.Eng,PhD.  
Pembimbing I



Ir. Seto Roseno, Bsc(Hons),Msc  
Pembimbing II



Dr. Soehardjo Poertadji  
Penguji I



Dr. Ir. Nandang Suhendra, Msc.  
Penguji II

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, yang selalu memberikan anugrah kepada penulis, memberikan kesehatan, dan telah menuntun penulis dalam menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa, selesainya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dorongan dan doa yang tulus dari banyak pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini. Tanpa itu semua sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang setulus - tulusnya kepada:

1. Ibunda tercinta Despriyanti yang selalu memberikan pelajaran penting bahwa hidup itu tidak mudah dan hanya orang-orang luar biasa yang dapat melewatinya dengan gagah, adik-adikku, Audy Jefri dan Ridho Bramasta yang dengan tingkah dan lelucon mereka menyejukkan hati penulis.
2. Keluarga besar Mardjan yang memberikan dukungan penuh, motivasi dan pembelajaran hidup.
3. Dra. Ariadne L. Juwono, M.Eng, PhD selaku pembimbing pertama yang memberikan bimbingan tanpa lelah dan menuntun penulis untuk tampil lebih baik dan teratur.
4. Ir. Seto Roseno BSc (Hons), MSc, selaku pembimbing ke dua yang telah membimbing dan mengajari penulis menyelesaikan kasus dengan cara yang sederhana.
5. Rizka Yuliana (Kodok Belo), kekasih yang telah menemani penulis dengan setia, sabar menghadapi emosi jiwa yang terkadang tak terkendali, terima kasih untuk senyum, semangat, dan harapan-harapan yang dirangkai dengan indah, “Kapan Melodi Senja terbit bagai fajar??”
6. Anggota Tim Penelitian Komposit, Asrikin Sahilan ‘oki jelly’ Breda, dan Satrio ‘Turtle’ Febrianto yang menemani penulis susah, senang, miskin

kaya, naik taxi sampai jalan kaki, makan sphagheti sampai hanya minum oki jelly, semua kita lakukan dengan gembira dalam keadaan apapun.

7. Useless Member : Arya (jadi pejabat yang baik) , Bayu (Awas dominasi wanita!), Catra (Cuci gudang lagi cat), Indra manusia panas, Andi Sagiler, Miftah si raja Tebar Pesona, Gery yang kurang steril, Novari pebisnis handal, Nanda sang penderita siksa cinta, Subhan Guevara, dan Mela Astatira yang tidak pernah dianggap wanita. Kalian semua telah menemani penulis sampai saat ini, semoga persahabatan ini tidak lekang oleh musim dan bencana.
8. Hendrik PK yang telah menemani penulis di kamar penuh inspirasi. Kita banyak dibicarakan orang, namun.. sudahlah.. lupakanlah..
9. Teman-teman Fisika 04,05,06,07,08 yang berada di got atau lapangan basket, terimakasih untuk lawakan-lawakan segar yang selalu ditampilkan sepanjang hari. Yusuf Hadi untuk tumpangan tidur, Rotua Preketek untuk pinjaman internet, Rangga Rezki sepupu yang gemar ber-MLM, Gemy dan para maho lainnya, serta tak tertinggal Zaky Ikhsan dengan selir-selir khayalannya, “gapai cita-cita kalian kawan!”
10. Tim Film Children of Dream yang selalu membawa atmosfer semangat meraih cita-cita, Danang Pramudya, produser dan sahabat penulis yang telah menjadi teman berbagi dalam ketenangan. Mari kita selesaikan film kita dan tunjukkan bahwa Indonesia punya film yang bermutu dan itu buatan kita!
11. JOHN,GEORGE,PAUL,RINGO, terima kasih atas musik rock n roll yang telah menemani penulis siang, malam, pagi, ke siang lagi “Never Ending Beatles!”. Terimakasih Bob Dylan untuk lirik-lirik yang menguatkan dan tiupan harmonika yang menyejukkan. Terima kasih untuk semua seniman yang telah mewarnai hari-hari penulis dan menghapus perasaan negatif.
12. Seluruh dosen dan civitas akademika Fisika Universitas Indonesia atas segala ilmu dan bantuan teknis selama perkuliahan. Khususnya untuk Mba Ratna yang selalu sabar mengurus segala administrasi.

13. Terima kasih untuk semua pribadi yang secara sadar ataupun tidak, telah menjadi 'guru' dalam kehidupan penulis. Semoga Allah mengganjar setiap keikhlasan dari setiap amal shaleh kalian.

Semoga skripsi ini dapat berguna bagi siapa saja yang mengkajinya, serta dapat dikembangkan dan disempurnakan agar lebih bermanfaat untuk kepentingan orang banyak.

Jakarta, 20 Juni 2010

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

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

Nama : Andes Rizky  
NPM : 0305020128  
Program Studi : Fisika Material dan Zat Mampat S1  
Departemen : Fisika  
Fakultas : Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam  
Jenis karya : Skripsi

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

**EVALUASI PENGGUNAAN METODE VARI (VACUUM ASSISTED  
RESIN INFUSION) PADA KOMPOSIT EPOXY-E GLASS DAN  
KARAKTERISASI MIKRO UNTUK APLIKASI SUDU TURBIN ANGIN**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*Database*), merawat, dan memublikasikan 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 : Depok  
Pada tanggal : 20 Juni 2010

Yang menyatakan

(Andes Rizky)



## ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian untuk membuat material komposit dengan menggunakan epoxy sebagai matriks dan *woven roving* E-Glass sebagai fiber. Pembuatan material menggunakan metode *Vacuum Assisted Resin Infusion* (VARI). Material dibuat dengan struktur serat terjalin  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $-45^\circ$  yang disusun sebanyak tujuh lapis. Uji tarik dilakukan untuk mengukur kekuatan mekanik material dan membandingkannya dengan hasil perhitungan menggunakan MATLAB 7.0.1. Pengujian dilanjutkan dengan penyinaran ultraviolet-A pada panjang gelombang 340nm yang lama penyinarannya divariasikan selama 10 jam, 20 jam, dan 30 jam. Kemudian, dilakukan kembali uji tarik dan didapatkan penurunan kuat tarik maksimum sebesar 28,22% sesudah penyinaran 30 jam, sedangkan modulus elastisitas relatif tidak berubah. Kerusakan yang terjadi akibat penyinaran pada permukaan fiber dan matriks dilihat dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

Kata kunci: *fiber glass, komposit, VARI, ultraviolet-A, uji tarik, SEM*

## ABSTRACT

*An experiment to make composites using epoxy as a matrix and woven roving E-Glass as a fiber was produced by a Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) method. The laminate systems consisted of seven woven fiber laminas with a pattern of  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , and  $-45^\circ$  degrees of orientation. Tensile properties of composites were obtained and compared with the result of MATLAB 7.0.1 program calculation. The specimens were exposed by an ultraviolet-A ( $\lambda=340\text{nm}$ ) with exposure period of 10, 20, and 30 hours. The environmental tested specimens were followed by tensile test. The Ultimate Tensile Stress (UTS) of the composite decreased by 28,22% after 30 hours exposure. However, there was no reduction in the stiffness values. The Failure surfaces of specimen were observed using Scanning Electron Microscope. Failure was dominated with matrix rupture in transverse direction.*

*Keywords: composite, VARI, ultraviolet-A, tensile test, SEM*

## DAFTAR ISI

|   | Halaman   |
|---|-----------|
| HALAMAN JUDUL .....                             | i         |
| HALAMAN PERNYATAN ORISINALITAS .....            | ii        |
| HALAMAN PENGESAHAN .....                        | iii       |
| KATA PENGANTAR .....                            | iv        |
| LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....  | vii       |
| ABSTRAK.....                                    | viii      |
| ABSTRACT.....                                   | viii      |
| DAFTAR ISI.....                                 | ix        |
| DAFTAR TABEL .....                              | xii       |
| DAFTAR GAMBAR .....                             | xii       |
| <b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>                  | <b>1</b>  |
| 1.1 Latar Belakang .....                        | 1         |
| 1.2 Pembatasan Masalah .....                    | 3         |
| 1.3 Tujuan Penelitian.....                      | 3         |
| 1.4 Metodologi Penelitian .....                 | 4         |
| 1.5 Sistematika Penulisan.....                  | 4         |
| <b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>              | <b>6</b>  |
| 2.1 Material Komposit .....                     | 6         |
| 2.2 Sifat Mekanik Komposit.....                 | 8         |
| 2.2.1 Kekuatan Tarik .....                      | 8         |
| 2.2.2 Kekuatan Lengkung.....                    | 23        |
| 2.2.3 Ketahanan Lingkungan.....                 | 25        |
| 2.3 Metode Vacuum Assisted Resin Infussion..... | 32        |
| 2.4 Turbin Angin .....                          | 34        |
| 2.5 Pemilihan Material .....                    | 36        |
| <b>BAB 3 METODE EKSPERIMEN .....</b>            | <b>43</b> |
| 3.1 Pemilihan Material .....                    | 43        |
| 3.2 Pembuatan Spesimen.....                     | 44        |
| 3.3 Pengujian Spesimen.....                     | 47        |
| <b>BAB 4 HASIL DAN ANALISA.....</b>             | <b>50</b> |
| 4.1 Hasil Pengujian.....                        | 50        |
| 4.2 Analisa Data .....                          | 54        |
| 4.2.1 Analisa Uji Lingkungan .....              | 55        |
| 4.2.2 Analisa Uji Tarik .....                   | 57        |
| <b>BAB 5 PENUTUP.....</b>                       | <b>64</b> |
| 6.1 Kesimpulan.....                             | 64        |
| 6.2 Saran.....                                  | 65        |

DAFTAR ACUAN .....67



## Daftar Tabel

|   |    |
|---|----|
| Tabel 2.1 Beberapa macam jenis fiber dan kekuatannya.....                         | 10 |
| Tabel 2.2 Hasil uji lengkung dengan variasi lama penyinaran dan jenis fiber ..... | 31 |
| Tabel 2.3 Variasi densitas dan arah serat pada komposit WR.....                   | 36 |
| Tabel 4.1 Perbandingan sifat mekanik dari perhitungan dan eksperimen .....        | 61 |



## Daftar Gambar

|  |    |
|--|----|
| Gambar 1.1 Diagram proses VARI.....  | 2  |
| Gambar 2.1 Susunan serat fiber menurun kontinuitas dan arahnya.....                | 7  |
| Gambar 2.2 Komposit lamina dengan desain susunan serat bervariasi .....            | 8  |
| Gambar 2.3 Kurva tekanan-regangan pada material komposit.....                      | 9  |
| Gambar 2.4 Transfer beban dari matriks ke permukaan fiber .....                    | 11 |
| Gambar 2.5 Pengaruh panjang fiber terhadap distribusi tegangan .....               | 12 |
| Gambar 2.6 Arah tegangan dan regangan pada sumbu ortotropik.....                   | 14 |
| Gambar 2.7 Tegangan dan regangan pada pendekatan <i>plane stress</i> .....         | 16 |
| Gambar 2.8 Sumbu utama material yang dirotasikan terhadap sumbu global.....        | 16 |
| Gambar 2.9 Sistem lamina pada komposit .....                                       | 19 |
| Gambar 2.10 Skema transformasi rotasi.....   | 20 |
| Gambar 2.11 Deformasi pada lamina .....  | 22 |
| Gambar 2.12 Diagram uji kuat tarik .....   | 23 |
| Gambar 2.13 Diagram uji lengkung.....  | 24 |
| Gambar 2.14 Pengaruh ultraviolet terhadap penurunan kekuatan mekanik komposit..... | 27 |
| Gambar 2.15 Temperatur transisi gelas yang terjadi pada polimer .....              | 28 |
| Gambar 2.16 Degradasi permukaan pada permukaan komposit HDPE-fiber .....           | 29 |
| Gambar 2.17 Hubungan antara lebar degradasi permukaan dengan lama penyinaran.....  | 29 |
| Gambar 2.18 Hubungan antara kuat lengkung material dengan lama penyinaran          | 31 |
| Gambar 2.19 Diagram VARI.....  | 33 |
| Gambar 2.20 Desain ideal sudu turbin angin.....                                    | 35 |
| Gambar 2.21 Orientasi arah serat fiber untuk setiap bagian sudu turbin angin....   | 35 |
| Gambar 2.22 Data kuat tarik maksimum Epoxy-E Glass .....                           | 37 |
| Gambar 2.23 Data modulus elastisitas Epoxy-E Glass.....                            | 37 |
| Gambar 2.24 Data kuat tarik maksimum Renlam.....                                   | 38 |
| Gambar 2.25 Data modulus elastisitas Renlam.....                                   | 38 |
| Gambar 2.26 Hasil SEM untuk fiber-epoxy.....                                       | 40 |
| Gambar 2.27 Grafik kuat lengkung terhadap persen massa.....                        | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Gambar 2.28 Data kuat lengkung maksimum Epoxy-E Glass.....                           | 41 |
| Gambar 2.29 Data kuat lengkung maksimum Renlam .....                                 | 42 |
| Gambar 3.1 Struktur RENLAM M-1 .....   | 44 |
| Gambar 3.2 Struktur Hardener REN HY 956.....   | 44 |
| Gambar 3.3 Diagram alat untuk membuat spesimen dengan menggunakan metode VARI.....   | 44 |
| Gambar 3.4 Alat untuk membuat spesimen dengan metode VARI.....                       | 45 |
| Gambar 3.5 Pengolesan resin epoxy .....  | 46 |
| Gambar 3.6 Susunan serat fiber asimetris.....  | 46 |
| Gambar 3.7 Persiapan untuk proses vakum.....   | 47 |
| Gambar 3.8 Mesin pengujian UV STP Serpong.....                                       | 48 |
| Gambar 3.9 Bagian spesimen yang dilihat dengan menggunakan SEM .....                 | 49 |
| Gambar 4.1 Hasil penyinaran spesimen epoxy-E Glass dengan ultraviolet .....          | 51 |
| Gambar 4.2 Kuat tarik pada regangan 0,2% terhadap waktu penyinaran ultraviolet ..... | 52 |
| Gambar 4.3 Kuat tarik maksimum terhadap waktu penyinaran ultraviolet .....           | 52 |
| Gambar 4.4 Modulus elastisitas terhadap lama penyinaran ultraviolet .....            | 53 |
| Gambar 4.5 Hasil uji SEM material komposit yang telah disinari ultraviolet.....      | 54 |
| Gambar 4.6 Ikatan polimer epoxy sebelum terkena penyinaran.....                      | 55 |
| Gambar 4.7 Distribusi modulus elastisitas arah-x .....                               | 59 |
| Gambar 4.8 Distribusi kuat tarik arah-x pada regangan0.002.....                      | 59 |

## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Energi alternatif mengambil peran yang sangat penting dalam kelangsungan hidup saat ini. Makin menurunnya persediaan minyak bumi dan batu bara mengakibatkan banyak negara berlomba-lomba untuk mencari sumber energi terbarukan. Salah satu sumber energi alternatif yang banyak dikembangkan saat ini adalah energi angin.

Penggunaan energi angin banyak dilakukan di daerah dengan intensitas angin yang besar. Pantai-pantai Indonesia adalah salah satu tempat yang tepat untuk mengembangkan turbin-turbin angin. Kecepatan angin dan intensitasnya sangat besar karena Indonesia adalah negara kepulauan dengan perbedaan suhu yang tidak terlalu besar antara daratan dan lautannya.

Turbin angin digerakkan oleh kipas besar yang terhubung dengan instalasi turbin di dalamnya. Pergerakan turbin menghasilkan energi yang ditransfer ke generator pembangkit listrik. Melalui proses ini, dihasilkan listrik dengan potensial yang cukup besar.

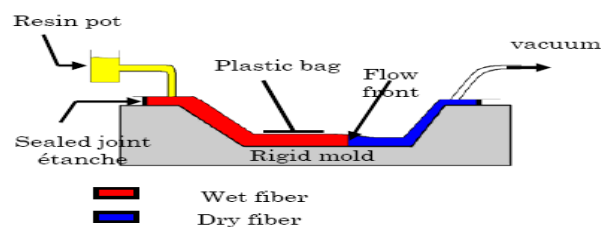
Penempatan turbin angin di lepas pantai atau di lingkungan terbuka menyebabkan kipas penggerak mengalami kontak langsung dengan lingkungan sekitar. Oleh karena itu, material sudu turbin angin haruslah tahan pada semua beban dan gangguan yang berasal dari lingkungan sekitar. Beban dan gangguan ini dapat berupa angin yang terlalu besar, hujan, sinar matahari, kelembaban, asam, dan sebagainya.

Pemilihan material yang tahan terhadap beban dan gangguan dengan intensitas besar sangat perlu dilakukan. Selain itu, material yang dipilih harus ringan agar dapat bergerak dengan energi angin seminimal mungkin. Material harus mempunyai kelenturan yang bagus agar dapat dibentuk sesuai dengan aerodinamika yang diperlukan[1]. Dengan kondisi-kondisi ini, maka material komposit menjadi satu-satunya material yang memenuhi semua kondisi di atas.

Berbagai penelitian tentang bahan komposit dan komposisinya dengan menggunakan uji mekanik dan termal banyak menghasilkan ide pembuatan sudu turbin angin. Salah satu komposisi bahan yang banyak dikembangkan adalah komposit berbasis glass fiber – epoxy resin. Penggunaan bahan ini dapat menghasilkan material yang ringan, namun tahan terhadap tekanan yang tinggi.

Proses pembuatan komposit bermacam-macam, namun proses pembuatan pada penelitian ini adalah proses Vacuum Assisted Resin Injection (VARI), yang ditunjukkan Gambar 1.1. Proses ini menggunakan tekanan rendah. Dibandingkan dengan proses konvensional seperti misalnya RTM (Resin Transfer Molding), proses VARI lebih ekonomis karena tidak melibatkan tekanan tinggi. Selain itu, proses VARI dapat mengurangi efek pengotoran yang banyak terjadi pada proses non-vakum dan menimbulkan kurang optimalnya sifat material komposit [2]. Dalam proses VARI, fiber kering diletakkan antara *fix mold* dan *plastic bag*. Kemudian resin diinjeksikan setelah ruang di dalam *plastic bag* bertekanan rendah dan proses berlanjut sampai seluruh bagian fiber terbasahi oleh resin.

Figure - 1: Schematics of the VARI process



Gambar 1.1 Diagram proses VARI



## 1.2 Pembatasan Masalah

Pembuatan material dengan menggunakan metode VARI menghasilkan material komposit dengan karakteristik kekuatan mekanik yang bagus. Metode ini dapat dibuat dengan cara yang sederhana. Pengujian kuat tarik dilakukan untuk mengetahui seberapa baik metode VARI yang didesain secara sederhana untuk menghasilkan material dengan kekuatan yang optimal. Setelah itu, pengujian lingkungan dilakukan dengan menyinari material menggunakan ultraviolet-A. Kemudian, dilakukan uji tarik untuk melihat pengaruh penyinaran terhadap kekuatan mekanik. Analisa mikroskopis dilakukan dengan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) untuk melihat perubahan komposisi material. Pengujian-pengujian ini dilakukan untuk melihat apakah dengan menggunakan proses VARI sederhana, material yang dihasilkan dapat memenuhi spesifikasi sesuai standar yang dipakai.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengaplikasikan material komposit untuk pembuatan sudu turbin angin.
2. Mencari spesifikasi bahan material dan komposisi yang cocok untuk pembuatan sudu turbin angin.
3. Menerapkan teknologi VARI dalam pembuatan sudu turbin angin.
4. Mendapatkan analisa mikroskopis tentang pengaruh lingkungan terhadap kekuatan mekanik.

## 1.4 Metode Penelitian

Penelitian ini berlangsung dengan beberapa tahapan. Tahap pertama adalah pemilihan material. Pada tahapan ini, dilakukan studi mendalam tentang material komposit sehingga dapat memilih material yang sesuai untuk dijadikan spesimen uji. Setelah itu, dilakukan pembuatan spesimen dengan menggunakan metode VARI. Pengujian dilakukan pada tahap selanjutnya, kemudian tahapan terakhir adalah analisa kekuatan melalui mikroanalisis dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

Material yang digunakan adalah komposit yang merupakan gabungan antara glass woven fiber WR dengan berat per-area sebesar  $400 \text{ gr/mm}^2$  sebagai penguat dan epoxy RENLAM sebagai matriksnya. Pembuatan material dibuat dengan menggunakan proses VARI sederhana. Uji tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan mekaniknya dan dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan MATLAB 7.0.1. Setelah itu, dilakukan uji penyinaran dengan menggunakan ultraviolet-A untuk melihat pengaruh penyinaran pada perubahan fisik material. Lalu, uji tarik kembali dilakukan untuk mengetahui besar pengaruh penyinaran terhadap penurunan kekuatan mekanik material. Analisa dilakukan dengan mengacu pada pengaruh perubahan komposisi atau struktur yang mengakibatkan perubahan sifat mekanik. Analisa ini dilakukan secara mikroskopis dengan bantuan SEM untuk melihat penyebab penurunan kekuatan material.

## 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi terdiri atas lima bab. Bab 1 (Pendahuluan) adalah bagian yang membahas tentang latar belakang dari penelitian, tujuan, metode yang digunakan dan juga pembatasan masalah pada penelitian yang dilakukan. Bab 2 (Tinjauan Pustaka) membahas secara garis besar teori dasar yang berhubungan

dengan penelitian. Bab 3 (Metode Eksperimen) membahas tentang tahapan penelitian, mulai dari pemilihan material sampai ke pengujian secara lengkap. Bab 4 (Hasil dan Analisa) membahas tentang hasil pengujian dan analisa data pengujian. Bab 5 (Penutup) adalah bagian terakhir yang berisi kesimpulan penelitian dan saran yang mendukung penelitian agar memberikan hasil yang lebih baik lagi untuk pengembangannya.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

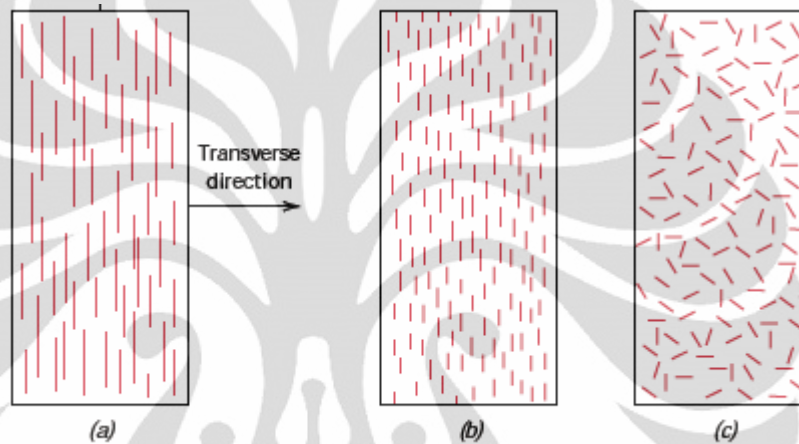
#### 2.1 Material Komposit

Material komposit adalah material yang disusun dari dua atau lebih campuran material yang berbeda sifat fisis dan kimianya sampai menjadi satu kesatuan dengan sifat yang sama[3]. Pada material komposit, pencampuran material-material penyusunnya dilakukan dalam skala makroskopis. Material komposit banyak digunakan dalam industri karena karakteristiknya yang mudah disesuaikan dengan kebutuhan dan prosesnya yang relatif ramah lingkungan.[3]

Material komposit tersusun dari dua komponen dasar, yaitu matriks dan penguat. Matriks adalah komponen yang fraksi volumenya selalu lebih besar dari penguatnya. Sedangkan penguat adalah komponen yang ditambahkan untuk menambah kekuatan matriks. Penguat dapat berupa partikel yang tersebar atau serat-serat pada arah tertentu. Penguat yang berupa serat-serat dan mempunyai arah tertentu dinamakan fiber.

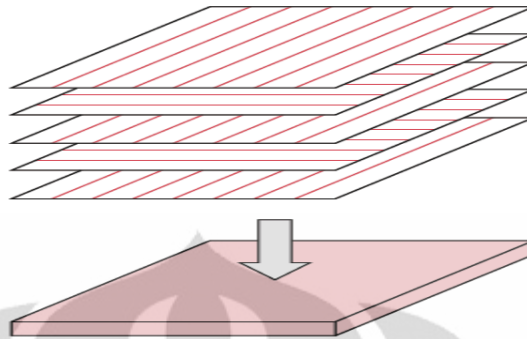
Jenis fiber yang digunakan dan struktur seratnya sangat menentukan karakteristik mekanik dari material komposit. Eksperimen yang dilakukan Griffith pada tahun 1920 untuk mengukur kekuatan tarik dari *glass fiber* memberikan hasil bahwa kekuatan tarik untuk struktur fiber semakin besar seiring dengan kecilnya diameter fiber [4]. Hal ini karena semakin kecil diameter, kekuatan kohesif antar fiber akan mendekati harga kekuatan kohesif antar lapisan atom – atomnya, sedangkan untuk diameter fiber yang lebih besar, kekuatan kohesifnya menurun mendekati harga struktur *bulk* nya.

Arah serat fiber sangat menentukan kekuatan mekanik komposit pada arah tertentu[3]. Beberapa jenis susunan serat fiber dapat dilihat pada Gambar 2.1. Arah serat kontinyu memiliki serat panjang yang tidak putus dan terarah pada satu arah tertentu. Arah serat yang tidak kontinyu memiliki serat-serat pendek yang terputus-putus, terkadang susunan seperti ini bersifat acak.



Gambar 2.1. Susunan serat fiber menurut kontinuitas dan arahnya, Susunan kontinyu terarah (a), susunan tidak kontinyu terarah (b), dan susunan tidak kontinyu acak (c).[3]

Struktur komposit bermacam-macam. Salah satu desain susunan komposit adalah lamina. Komposit lamina adalah komposit yang disusun dari lembaran-lembaran yang memiliki kekuatan pada arah tertentu[3]. Lembaran-lembarannya direkatkan dengan menyesuaikan arah-arahnya agar mendapatkan hasil kekuatan yang diinginkan (Gambar 2.2). Struktur ini relatif mudah dibuat dibandingkan desain lainnya seperti *sandwich* dan *honeycomb*, sehingga dalam proses pembuatannya, desain ini relatif lebih murah.



Gambar 2.2 Komposit lamina dengan desain susunan serat bervariasi [3].

## 2.2 Sifat Mekanik Komposit

Sifat mekanik komposit yang dapat dilihat dan diukur dalam skala makroskopik. Sifat ini biasanya dinamakan makromekanik. Dapat dikatakan bahwa sifat makromekanik timbul dari susunan fiber dan matriksnya secara global[5]. Yang merupakan sifat mekanik adalah, kekuatan tarik (*tensile strenght*), kuat tekan (*compression strenght*), kelengkungan (*flexural strenght*), dan masih banyak lagi. Sifat – sifat mekanik ini yang menentukan apakah suatu bahan komposit layak atau tidak digunakan untuk aplikasi tertentu.

### 2.2.1 Kekuatan Tarik

Sifat kuat tarik suatu material komposit adalah kekuatan untuk mengatasi gaya tarik persatuan luas permukaan yang diterima[3]. Secara sederhana kuat tarik (tegangan) yang bekerja pada suatu material dirumuskan oleh persamaan;

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana  $F$  adalah beban yang diberikan dengan satuan Newton (N) dan  $A$  adalah luas permukaan di mana beban bekerja ( $m^2$ ). Tegangan pada suatu sistem akan menyebabkan terjadinya regangan, yaitu perubahan panjang atau perubahan ukuran benda. Regangan dirumuskan dengan persamaan

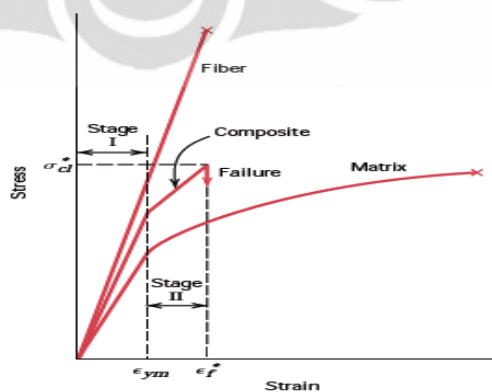
$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana  $\varepsilon$  adalah regangan (meter),  $l$  adalah panjang akhir benda dan  $l_0$  adalah panjang awal benda.

Dari dua besaran ini didapatkan suatu besaran lain yang dinamakan sifat elastisitas benda, atau lebih umum dinamakan modulus. Modulus elastisitas adalah sifat mekanik material yang menunjukkan seberapa besar material untuk kembali ke bentuknya semula setelah diberikan tegangan tertentu. Modulus elastisitas benda dirumuskan sebagai

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots(2.3)$$

Hubungan antara tegangan dan regangan dapat dilihat pada Gambar 2.3. Pada gambar ini terlihat bahwa kekuatan mekanik dari komposit berasal dari gabungan antara fiber dan matriksnya.



Gambar 2.3 Kurva tekanan-regangan pada material komposit [3].

Kuat tarik dari komposit lamina ditentukan dari jenis fiber, panjang fiber, orientasi arah, dan kontinuitasnya [3]. Jenis pemilihan bahan fiber menentukan sifat komposit yang dihasilkan. Beberapa bahan yang sering digunakan dan karakteristiknya ditunjukkan dalam Tabel 2.1. Dari tabel ini dapat dilihat karakteristik setiap fiber. Mulai dari berat spesifik, sampai modulus elastisitas. Sebagai contoh, Kevlar adalah jenis fiber yang mempunyai karakteristik mekanik terbaik. Selain paling ringan, bahan ini mempunyai kekuatan lebih tinggi dibanding fiber lainnya, seperti E-Glass. Namun, bahan Kevlar sangat mahal dan sulit didapat. Biasanya bahan ini digunakan untuk aplikasi pertahanan dan kemiliteran.

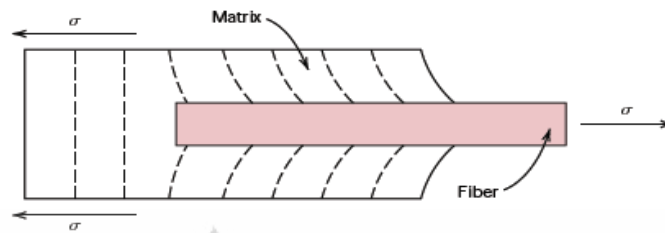
Pada pembuatan spesimen untuk aplikasi sudu turbin angin, fiber E-Glass banyak digunakan karena ekonomis dan mudah didapat. Selain itu, E-Glass mempunyai berat spesifik yang kecil, sehingga cocok untuk aplikasi *aerospace*.

Tabel 2.1 Beberapa macam jenis fiber dan kekuatannya.

| <i>Material</i>       | <i>Specific Gravity</i> | <i>Tensile Strength [GPa (10<sup>6</sup> psi)]</i> | <i>Specific Strength (GPa)</i> | <i>Modulus of Elasticity [GPa (10<sup>6</sup> psi)]</i> | <i>Specific Modulus (GPa)</i> |
|-----------------------|-------------------------|--|--------------------------------|---|-------------------------------|
| <b>Whiskers</b>       |                         |  |                                |   |                               |
| Graphite              | 2.2                     | 20<br>(3)  | 9.1                            | 700<br>(100)  | 318                           |
| Silicon nitride       | 3.2                     | 5-7<br>(0.75-1.0)                                  | 1.56-2.2                       | 350-380<br>(50-55)                                      | 109-118                       |
| Aluminum oxide        | 4.0                     | 10-20<br>(1-3)                                     | 2.5-5.0                        | 700-1500<br>(100-220)                                   | 175-375                       |
| Silicon carbide       | 3.2                     | 20<br>(3)  | 6.25                           | 480<br>(70)   | 150                           |
| <b>Fibers</b>         |                         |  |                                |   |                               |
| Aluminum oxide        | 3.95                    | 1.38<br>(0.2)                                      | 0.35                           | 379<br>(55)   | 96                            |
| Aramid (Kevlar 49)    | 1.44                    | 3.6-4.1<br>(0.525-0.600)                           | 2.5-2.85                       | 131<br>(19)   | 91                            |
| Carbon*               | 1.78-2.15               | 1.5-4.8<br>(0.22-0.70)                             | 0.70-2.70                      | 228-724<br>(32-100)                                     | 106-407                       |
| E-Glass               | 2.58                    | 3.45<br>(0.5)                                      | 1.34                           | 72.5<br>(10.5)  | 28.1                          |
| Boron                 | 2.57                    | 3.6<br>(0.52)                                      | 1.40                           | 400<br>(60)   | 156                           |
| Silicon carbide       | 3.0                     | 3.9<br>(0.57)                                      | 1.30                           | 400<br>(60)   | 133                           |
| UHMWPE (Spectra 900)  | 0.97                    | 2.6<br>(0.38)                                      | 2.68                           | 117<br>(17)   | 121                           |
| <b>Metallic Wires</b> |                         |  |                                |   |                               |
| High-strength steel   | 7.9                     | 2.39<br>(0.35)                                     | 0.30                           | 210<br>(30)   | 26.6                          |
| Molybdenum            | 10.2                    | 2.2<br>(0.32)                                      | 0.22                           | 324<br>(47)   | 31.8                          |
| Tungsten              | 19.3                    | 2.89<br>(0.42)                                     | 0.15                           | 407<br>(59)   | 21.1                          |

Sumber [3]





Gambar 2.4 Transfer beban dari matriks ke permukaan fiber [3]

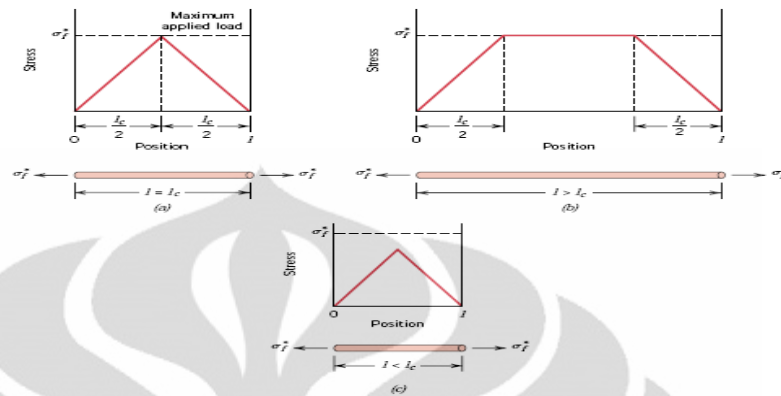
Sifat mekanik juga ditentukan oleh seberapa besar gaya atau beban yang ditransfer oleh matriks ke fibernya [3]. Gambar 2.4 menunjukkan bagaimana regangan terjadi pada ujung fiber jika diberikan tegangan yang searah dengan fiber. Beban yang ditransfer melalui matriks dialami lebih dulu pada permukaan fiber.

Panjang fiber menentukan sejauh mana suatu komposit dapat menahan beban maksimum pada arah tertentu. Dalam desain komposit, biasanya pengukuran panjang maksimum fiber dapat dihitung melalui persamaan;

$$I_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana  $\sigma_f^*$  adalah kuat tarik maksimum fiber,  $d$  adalah diameter fiber, dan  $\tau_c$  adalah kuat ikatan antara matriks dan fiber.  $I_c$  adalah panjang kritis fiber yang berfungsi untuk menentukan desain komposit agar sifat kelenturan dan kekuatannya dapat diprediksi lebih awal.

Posisi transfer beban pada fiber ditunjukkan oleh Gambar 2.5. Dari gambar ini terlihat perbedaan titik beban maksimum yang bergantung pada panjang fiber. Jika panjang fiber,  $I$  sama dengan panjang kritisnya, maka beban maksimum akan terpusat pada titik tengah fiber. Ketika panjang  $I > I_c$ , beban maksimum akan terdistribusi ke fiber lebih baik. Namun, jika  $I < I_c$ , maka beban maksimum akan menurun, atau fiber akan hancur jika bebannya ditambah.



Gambar 2.5 Pengaruh panjang fiber terhadap distribusi tegangan, untuk  $l=lc$ , tegangan terpusat pada sumbu fiber (a), untuk  $l>lc$ , tegangan terdistribusi dengan baik sepanjang fiber(b), untuk  $l<lc$ , tegangan fiber tidak dapat menerima tegangan maksimum (c) [3].

Arah dan konsentrasi fiber dapat dilihat pada Gambar 2.1. Arah fiber mempengaruhi beban yang diterima oleh komposit. Untuk komposit yang mempunyai orientasi dan konsentrasi satu arah (ikatan antara fiber dan matriks sempurna), deformasi yang dialami fiber dan matriks mempunyai besar yang sama. Beban fiber dan matriks dapat dituliskan dalam persamaan:

$$F_c = F_m + F_f \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan  $F_c$  adalah beban yang dialami komposit,  $F_m$  adalah beban matriks, dan  $F_f$  adalah beban yang dialami fiber. Tegangan (*stress*) yang dialami komposit memenuhi persamaan:

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \dots\dots\dots(2.6)$$

Untuk keadaan ideal, maka jika Persamaan (2.6) dibagi dengan luas penampang komposit, persamaannya menjadi:

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \dots\dots\dots(2.7)$$

Keadaan *isostrain* terjadi jika masing-masing komponen mengalami pergeseran yang sama, sehingga untuk beban longitudinal berlaku persamaan:

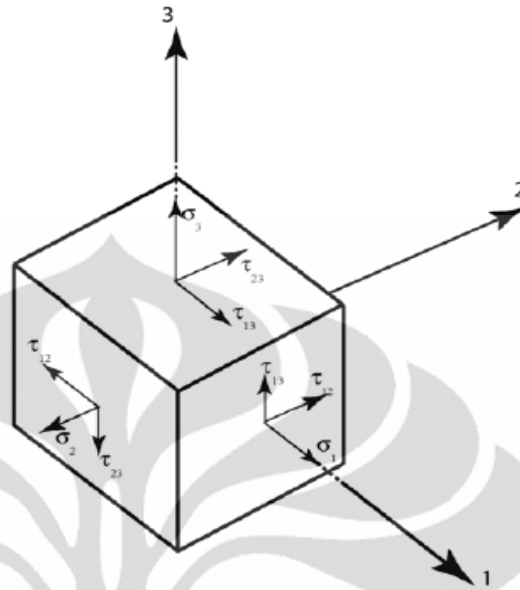
$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \dots\dots\dots(2.8)$$

Dan untuk beban transversal berlaku persamaan:

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m} \dots\dots\dots(2.9)$$

Analisa teoritis lebih jauh menunjukkan bahwa ketiga besaran, yaitu tegangan, regangan, dan modulus elastisitas adalah tensor yang arahnya dapat ditentukan. Penggunaan tegangan dan regangan sebagai tensor diakibatkan karena struktur fiber yang tidak selalu isotropis [6]. Analisa kekuatan mekanik dengan menggunakan tensor sangat rumit karena melibatkan semua arah beban. Namun, dengan menggunakan pendekatan sumbu ortotropik, yaitu dengan meletakkan sistem komposit pada sumbu yang saling tegak lurus, analisa sifat mekanik menjadi lebih mudah[6].

Tegangan yang dialami suatu material pada sistem sumbu ortotropik mempunyai komponen tensor pada arah 1, 2, dan 3 yang serupa dengan arah x, y, dan z pada sumbu kartesian. Gambar 2.6 memperlihatkan arah tegangan dan regangan yang dialami material. Secara umum, material mengalami regangan pada arah longitudinal dan transversal ketika diberikan beban pada satu arah. Regangan longitudinal ( $\epsilon_1$ ) adalah regangan yang searah dengan arah beban, sedangkan regangan transversal ( $\epsilon_2$ ) adalah regangan yang tegak lurus dengan arah beban. Selain itu, pada bidang normal dari arah beban, material mengalami regangan geser ( $\gamma_{12}$ ) .



Gambar 2.6 Arah regangan dan arah tegangan pada sumbu ortotropik [6]

Arah tegangan juga mempunyai tiga bagian, yaitu tegangan pada arah longitudinal ( $\sigma_1$ ), transversal ( $\sigma_2$ ), dan tegangan geser ( $\tau_{12}$ ). Semua arah ini dikumpulkan dalam satu matriks, dan hubungan regangan-tegangan pada Persamaan 2.3 menjadi;

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana E adalah komponen modulus elastisitas untuk setiap arah. Misalnya, komponen  $E_{11}$  adalah modulus elastisitas pada tegangan longitudinal 1 dan regangan longitudinal 1, komponen  $E_{12}$  adalah modulus elastisitas pada tegangan longitudinal 1 dan regangan transversal 2, dan seterusnya. Modulus geser G adalah modulus elastisitas yang terjadi ketika material mengalami regangan geser.

*Poisson's ratio*  $\nu$  adalah perbandingan regangan yang terjadi pada setiap arah yang saling tegak lurus. Misalnya, ketika suatu material komposit mengalami regangan  $\varepsilon_1$ , maka sistem ini akan mengalami regangan  $\varepsilon_2$  dengan hubungan;

$$\varepsilon_2 = -\nu_{12}\varepsilon_1 \dots\dots\dots(2.11)$$

Hubungan tegangan-regangan didapatkan dengan menggunakan invers dari matriks modulus elastisitas, sehingga Persamaan 2.4 menjadi;

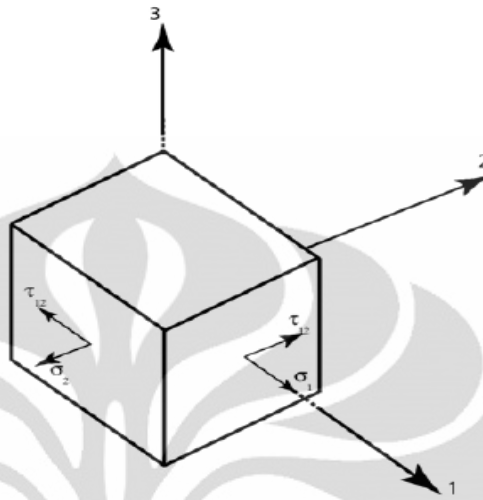
$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.12)$$

$C$  disebut *stiffness coefficient* yang merupakan invers dari matriks pada Persamaan 2.10. Dengan menggunakan Persamaan 2.12, sistem material pada sumbu ortotropik dapat dihitung dengan cara yang lebih sederhana.

Analisa dengan menggunakan sumbu ortotropik, dapat disederhanakan lagi dengan menganggap bahwa fiber mempunyai nilai panjang dan lebar yang besar jika dibandingkan dengan tebalnya. Dengan asumsi ini, maka komponen tegangan pada arah 3 dapat dihilangkan, sehingga komponen yang dihitung adalah komponen 1 dan 2. Sehingga, persamaan (2.12) dapat dituliskan dengan persamaan;

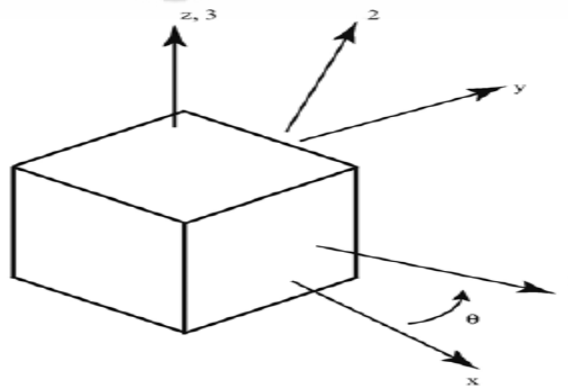
$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.13)$$

Komponen tegangan dan regangan berkurang karena beban dianggap hanya terjadi pada dua dimensi saja, pendekatan ini disebut *plane stress approximation*. Istilah ini digunakan karena beban dianggap hanya mempengaruhi satu daerah bidang saja (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Tegangan dan regangan pada pendekatan *plane stress* [6]

Dengan menggunakan pendekatan *plane stress*, maka sistem komposit dapat diletakkan pada sumbu kartesian (sumbu global). Analisa dengan menggunakan sumbu global pada suatu sistem komposit memberikan nilai regangan dan tegangan pada arah tertentu yang dinyatakan dengan sudut antara sumbu global dan sumbu utama material. (Gambar 2.8). Sumbu utama material diberi indeks 1,2, dan 3 yang menunjukkan arah serat fiber. Sumbu utama material ini kemudian di rotasikan sejauh  $\theta$  terhadap sumbu kartesian.



Gambar 2. 8 Sumbu utama material yang dirotasikan terhadap sumbu global [6]

Tegangan yang dialami oleh sistem pada sumbu utama material dapat dianggap sebagai hasil operasi perkalian matriks transformasi dengan matriks tegangan pada sumbu global. Transformasi ini ditunjukkan oleh persamaan sebagai berikut;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.14)$$

Matriks T adalah matriks transformasi yang mempunyai komponen-komponen sudut sebagai berikut;

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.15)$$

Matriks pada Persamaan 2.15 mempunyai komponen m dan n, di mana m adalah  $\cos \theta$  dan n adalah  $\sin \theta$ . Dengan melakukan operasi invers pada matriks T, maka didapatkan hubungan tegangan pada sumbu global terhadap sumbu utama material sebagai berikut;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.16)$$

Di mana invers matriks T adalah;

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.17)$$

Regangan pada sumbu utama material juga dapat dinyatakan dengan regangan pada sumbu global menggunakan matriks transformasi T. Regangan pada sumbu utama material dinyatakan dengan persamaan;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.18)$$

Dengan cara yang sama pada persamaan 2.18, regangan pada sumbu global dapat dinyatakan dengan regangan sumbu utama melalui persamaan;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.19)$$

Hubungan antara tegangan dan regangan dinyatakan sebelumnya secara sederhana pada Persamaan 2.13 . Konstanta elastisitas dinyatakan dalam bentuk matriks, dengan orde 3x3 pada sumbu ortotropik. Hubungan tegangan dan regangan pada sumbu global dapat dituliskan dalam bentuk sebagai berikut;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.20)$$

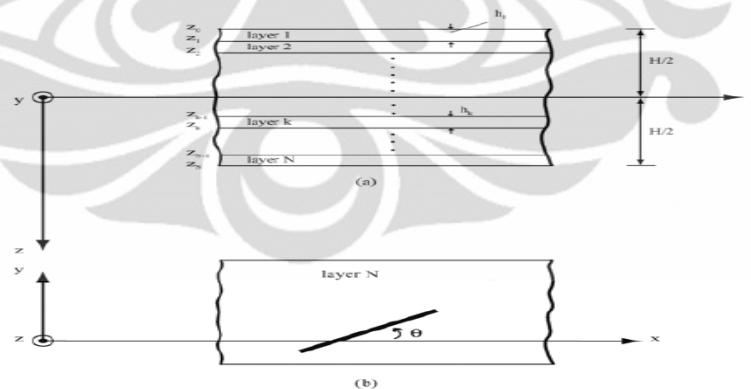
Komponen-komponen Q-bar adalah konstanta elastisitas yang telah mengalami transformasi rotasi. Transformasi ini dioperasikan pada matriks Q dengan operasi sebagai berikut;



$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 2Q_{66} \end{bmatrix} [T] \dots \dots \dots (2.21).$$

Transformasi matriks  $Q$  menjadi  $Q$ -bar selanjutnya digunakan untuk menganalisa sifat mekanik pada sistem lamina yang terdiri dari beberapa lembaran. Gambar 2.9 menunjukkan sistem lamina pada suatu material komposit. Material terdiri dari lembaran-lembaran yang bertumpuk pada arah- $z$  koordinat kartesian. Tebal material dinotasikan dengan  $H$ , dan tebal tiap lembaran lamina dinotasikan dengan  $h$ . Setiap lembaran mempunyai ketebalan yang berbeda-beda, ketebalan dari lembaran  $k$ , dinotasikan dengan  $h_k$ .

Sumbu pusat koordinat dimulai dari bagian tengah sistem komposit. Arah ketebalan dimulai dari  $-H/2$  sampai  $+H/2$ . Lapisan pertama adalah lapisan yang berada pada sumbu  $z$  yang paling negatif, sedangkan lapisan  $N$  adalah lapisan yang berada pada sumbu  $z$  positif.



Gambar 2. 9 Sistem lamina pada komposit, dengan bagian-bagian tiap lapisan (a), dan transformasi rotasi material (b) [6]

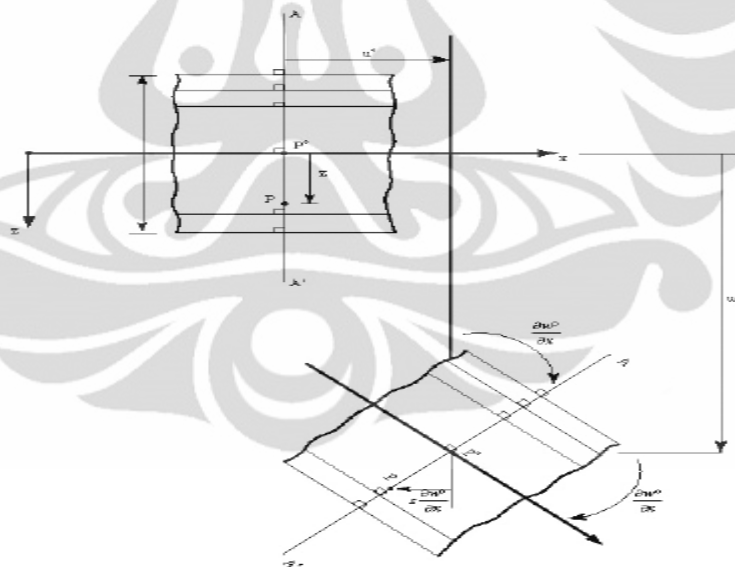
Gambar 2.10 menunjukkan area potongan pada bidang  $x$ - $z$  di mana terjadi elongasi pada titik  $P$  yang berada di bawah titik  $P_0$ , di mana titik-titik ini membentuk garis  $AA'$ . Garis  $AA'$  akan mewakili bidang permukaan  $x$ - $z$ . Translasi horizontal titik

$P_0$  pada arah sumbu  $x$  dinamakan  $u_0$  dan translasi vertikal pada arah  $y$  adalah  $w_0$ . Transformasi rotasi pada titik  $P_0$  di sumbu  $y$  memberikan transformasi elongasi sebesar  $\partial w_0 / \partial x$ . Karena titik  $P_0$  berada pada garis  $AA'$ , dan garis ini mewakili bidang  $x-z$ , maka bidang  $x-z$  juga memiliki persamaan transformasi elongasi sebagai berikut;

$$z = \frac{\partial w_0}{\partial x} \dots\dots\dots(2.22).$$

Translasi horizontal pada titik  $P$  pada sumbu kartesian yang dinyatakan dalam translasi arah  $x$ , adalah  $u(x,y,z)$ , di mana hubungan antara  $u(x,y,z)$  dan  $u_0(x,y)$  memenuhi persamaan;

$$u(x, y, z) = u^0(x, y) - z \frac{\partial w^0(x, y)}{\partial x} \dots\dots\dots(2.23)$$



Gambar 2.10 Skema transformasi rotasi dan pengaruhnya terhadap perubahan translasi lamina [6]

Translasi vertikal pada titik  $P$  juga dapat dinyatakan dengan translasi horizontal, translasi vertikal ini memenuhi persamaan;

$$v(x, y, z) = v^0(x, y) - z \frac{\partial w^0(x, y)}{\partial y} \dots\dots\dots(2.24)$$

Persamaan translasi keseluruhan dapat dikumpulkan menjadi satu dan mewakili translasi sistem lamina pada setiap sumbu, hal ini dapat dituliskan dalam bentuk persamaan;

$$u(x, y, z) = u^0(x, y) - z \frac{\partial w^0(x, y)}{\partial x} \dots\dots\dots(2.25 a)$$

$$v(x, y, z) = v^0(x, y) - z \frac{\partial w^0(x, y)}{\partial y} \dots\dots\dots(2.25 b)$$

Translasi pada sumbu z atau pada daerah ketebalan dapat dihitung dengan persamaan;

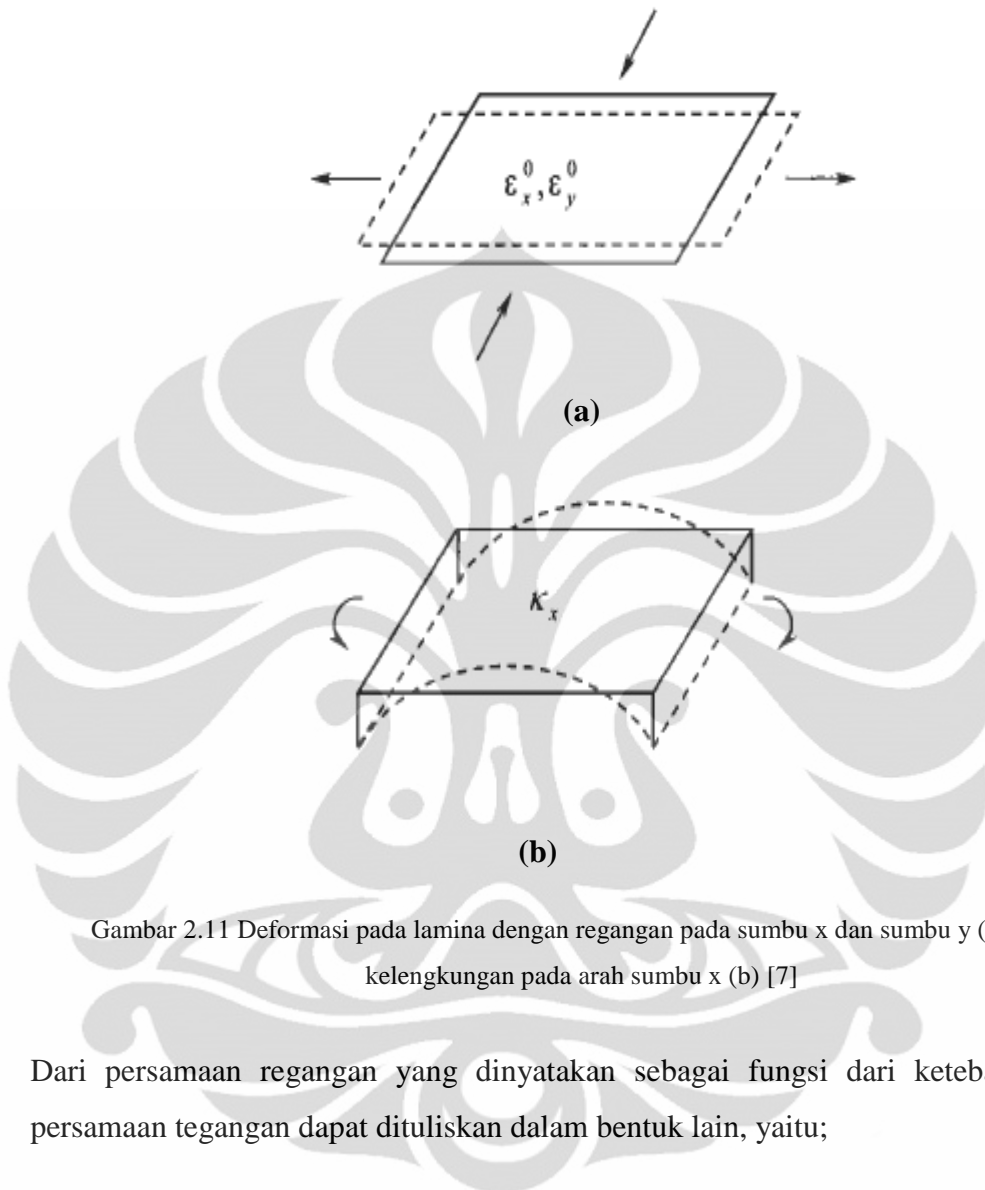
$$w(x, y, z) = w^0(x, y) \dots\dots\dots(2.26)$$

Persamaan 2.25 dapat digunakan untuk menghitung regangan pada sistem lamina di setiap arah sumbu global. Regangan pada arah sumbu x dapat dituliskan dengan persamaan;

$$\varepsilon_x(x, y, z) \equiv \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial x} = \frac{\partial u^0(x, y)}{\partial x} + z \frac{\partial^2 w^0(x, y)}{\partial x^2} \dots\dots\dots(2.27)$$

$$\varepsilon_x(x, y, z) = \varepsilon_x^0(x, y) + z k_x^0(x, y) \dots\dots\dots(2.28)$$

Dari Persamaan 2.28, regangan pada arah x mempunyai dua komponen, yaitu regangan horizontal  $\varepsilon_{0x}$  dan kelengkungan pada arah horizontal,  $k_{0x}$ . Gambar 2.11 Menunjukkan bagaimana regangan horizontal, regangan vertikal, dan kelengkungan terjadi.



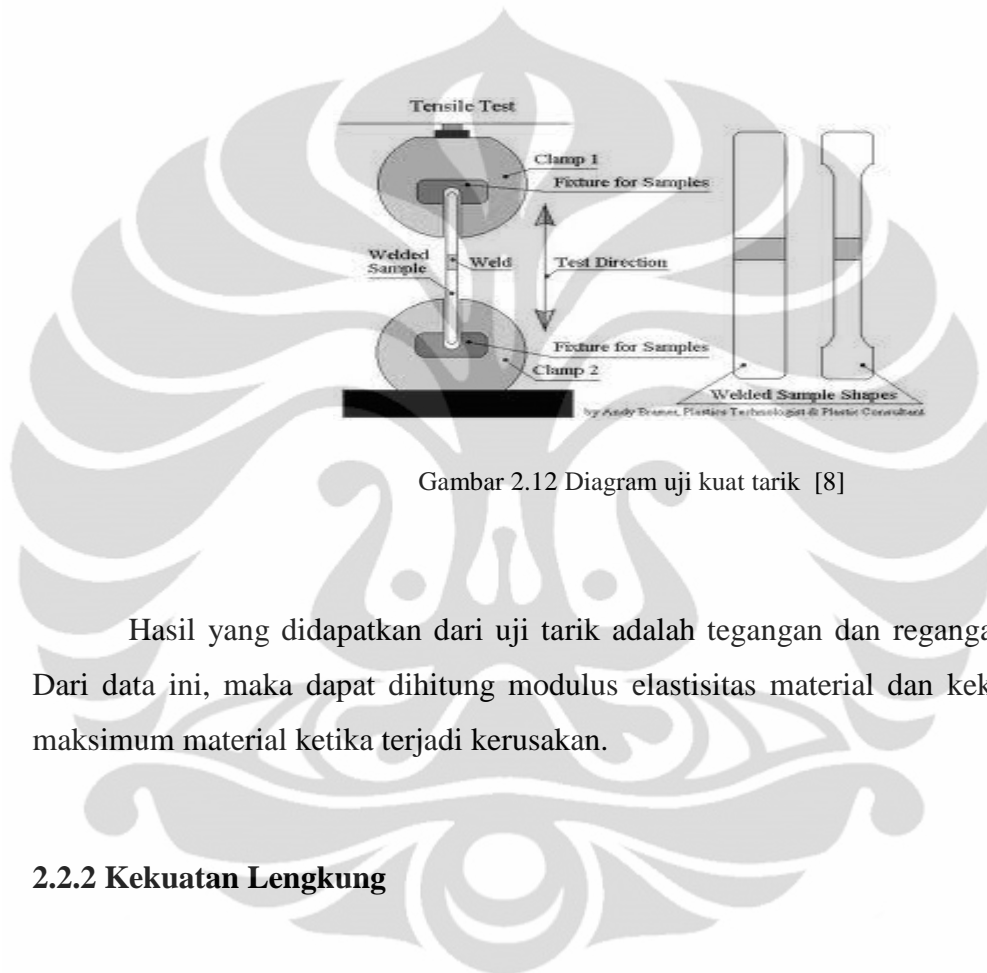
Gambar 2.11 Deformasi pada lamina dengan regangan pada sumbu x dan sumbu y (a), serta kelengkungan pada arah sumbu x (b) [7]

Dari persamaan regangan yang dinyatakan sebagai fungsi dari ketebalan, maka persamaan tegangan dapat dituliskan dalam bentuk lain, yaitu;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 + zk_x^0 \\ \epsilon_y^0 + zk_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 + zk_{xy}^0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.29)$$

Persamaan 2.29 juga dapat dituliskan pada sistem sumbu utama material. Persamaan ini mewakili keseluruhan sistem pada komposit lamina dengan ketebalan total  $z$ . Sehingga, dari persamaan 2.29, dapat dicari fungsi persebaran tegangan pada setiap ketebalan lembaran yang dinyatakan sebagai fungsi posisi.

Untuk mengukur kuat tarik dari material komposit, dilakukan uji tarik pada spesimen material tersebut. Diagram spesimen untuk pengukuran kuat tarik dapat dilihat pada Gambar 2.12. Beban diberikan dari dua arah secara bersamaan. Spesimen dapat berbentuk tulang atau persegi panjang dengan ketebalan tertentu.



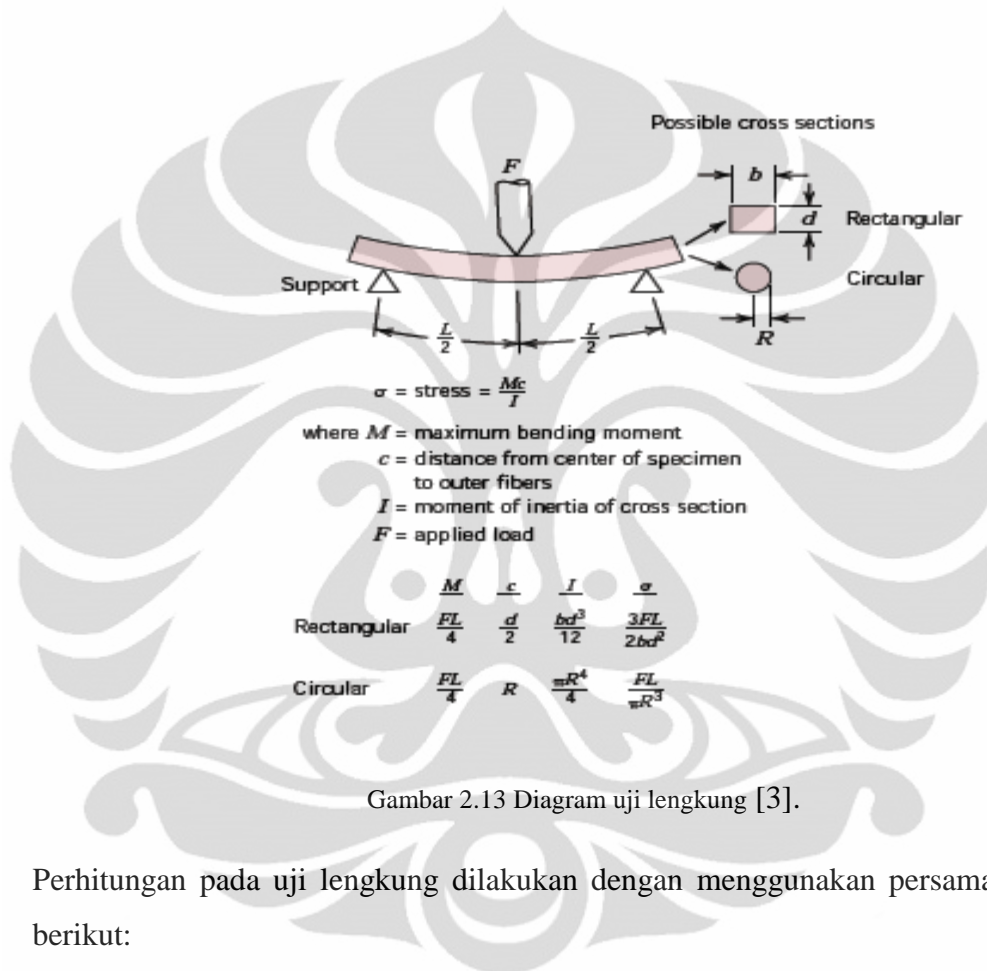
Gambar 2.12 Diagram uji kuat tarik [8]

Hasil yang didapatkan dari uji tarik adalah tegangan dan regangan material. Dari data ini, maka dapat dihitung modulus elastisitas material dan kekuatan tarik maksimum material ketika terjadi kerusakan.

### 2.2.2 Kekuatan Lengkung

Selain uji tarik, sifat mekanik komposit juga ditentukan dari besar kuat lengkungnya. Kuat lengkung adalah kekuatan suatu material untuk menahan beban yang diberikan pada beberapa titik tertentu [3]. Skema uji lengkung ditunjukkan oleh Gambar 2.13. Desain spesimen untuk uji lengkung berbeda dengan desain uji tarik. Pada uji lengkung, perhitungan momen inersia diperlukan untuk mendapatkan hasil uji. Hal ini menyebabkan desain spesimen pada uji lengkung biasanya berbentuk batang silinder atau batang balok, sehingga momen inersianya mudah untuk dihitung.

Uji lengkung mempunyai dua macam jenis pengujian, yaitu dengan menggunakan dua penopang pada alasnya dan satu beban pada bagian pusat massanya yang dinamakan *three point bending test* atau pengujian dengan menggunakan dua penopang pada alasnya dan dua beban yang dinamakan *four point bending test*.



Gambar 2.13 Diagram uji lengkung [3].

Perhitungan pada uji lengkung dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_{fs} = \frac{3F_f L}{2bd^2} \dots\dots\dots(2.30)$$

Persamaan 2.30 digunakan untuk menghitung kuat lengkung untuk spesimen dengan penampang persegi, sedangkan untuk spesimen dengan penampang silinder, persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut;

$$\sigma_{fs} = \frac{F_f L}{\pi R^3} \dots\dots\dots(2.31)$$

Uji lengkung ini juga berguna untuk mengetahui pengaruh kondisi permukaan. Jika permukaan spesimen lebih lemah dibanding bagian dalamnya, maka uji lengkung ini berguna untuk mengetahui sejauh mana efek permukaan terhadap kekuatan mekanik material.

### 2.2.3 Ketahanan Lingkungan

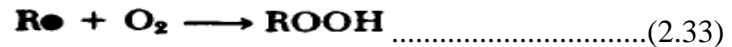
Uji ketahanan lingkungan pada komposit biasanya digunakan untuk material komposit yang dipakai pada lingkungan terbuka. Sebagai contoh, turbin angin dipakai di lepas pantai, di mana terdapat intensitas perubahan cuaca yang signifikan. Selain itu, daerah lepas pantai mengalami intensitas cahaya matahari yang besar. Uji lingkungan dengan menggunakan sinar ultraviolet digunakan untuk mengetahui efek penyinaran pada kekuatan mekanik komposit [9].

Fotodegradasi pada beberapa jenis polimer termoplastik dapat mengubah morfologinya. Hal ini disebabkan reaksi berantai dan reaksi *cross-link* pada rantai polimer. Sinar UV yang mempunyai energi besar dapat menyebabkan lepasnya rantai polimer karena mempunyai jangkauan energi yang sebanding dengan energi disosiasi ikatan kovalen pada rantai-rantai polimer yang berharga 290-460 kJ/mol [10].

Ketika polimer disinari ultraviolet dengan energi  $h\nu$  ( $h$  adalah konstanta Planck, dan  $\nu$  adalah frekuensi ultraviolet), rantai RH akan terlepas dan menghasilkan radikal bebas R melalui reaksi [10];



Selanjutnya, radikal bebas R dapat dengan mudah mengikat oksigen melalui reaksi:



Reaksi ini berlangsung pada permukaan, sebagian reaksi lainnya menghasilkan peroksi radikal yang mengikat proton sesuai reaksi:



Reaksi pada Persamaan 2.33 berulang sampai batas tertentu dimana oksidasi berhenti terjadi. Hidroperoksida yang dihasilkan pada persamaan reaksi 2.34 dapat terdekomposisi menjadi radikal alkoksi melalui reaksi:

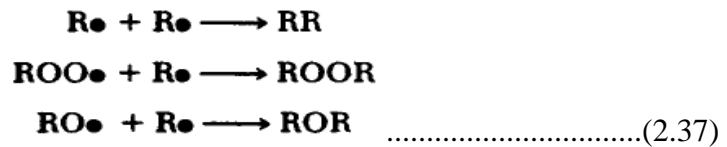


Dan kemungkinan disosiasi lain juga terjadi dengan persamaan;



Selain itu, pengaruh UV juga dapat menyebabkan perubahan warna yang diakibatkan disosiasi menjadi rantai baru melalui proses *cross-link*;

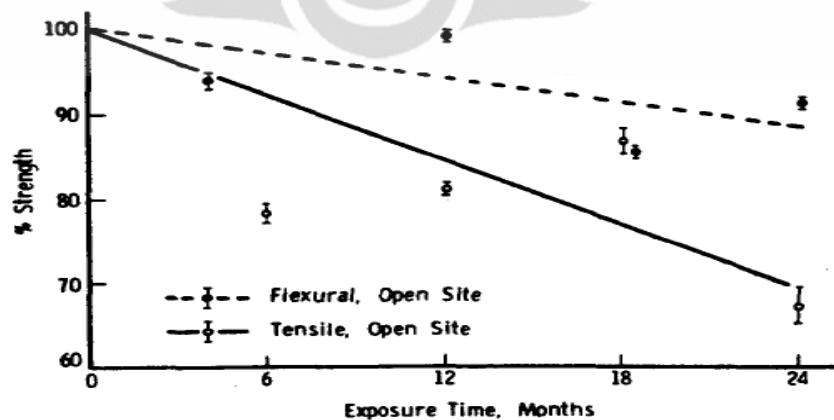




Proses ini menyebabkan terhambatnya mobilisasi molekul sehingga sifat elastis bahan menjadi berkurang. Polimer menjadi lebih getas (*brittle*), dan retakan mudah merambat.

Perubahan karakteristik mekanik ini menyebabkan penurunan kuat tarik dan kuat lengkung dari komposit yang mengandung polimer termoplastik sebagai matriksnya. Data yang didapatkan oleh Roylance (1978) pada Gambar 2.14 menunjukkan penurunan kekuatan mekanik pada komposit polimer-fiber.

Penyinaran merusak ikatan antara fiber dengan resin dan merusak ikatan polimer sebagai matriks. Perubahan ini dialami sebagian besar oleh bagian yang langsung kontak dengan sumber cahaya. Dengan kata lain, permukaan atas dari material yang disinari UV akan mengalami kerusakan terbesar. Kerusakan ini juga dialami pada permukaan bawah, namun besarnya berbeda. Sedangkan bagian dalam komposit tidak mengalami kerusakan yang besar [10].

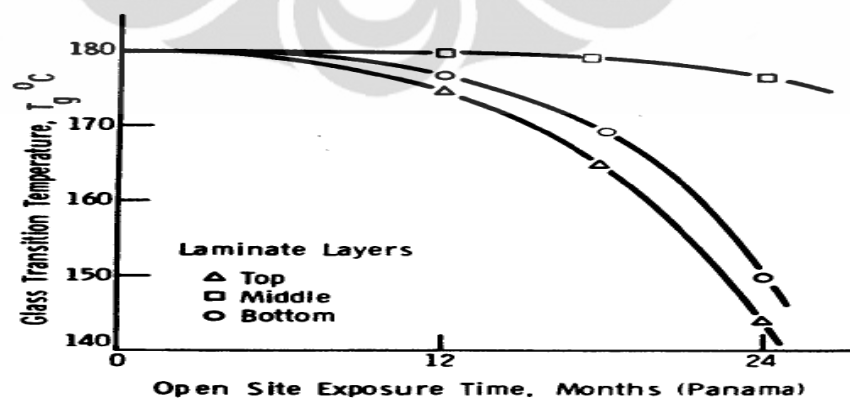


Gambar 2.14 Pengaruh ultraviolet terhadap penurunan kekuatan mekanik komposit [10]

Gambar 2.15 memperlihatkan bagaimana pengaruh penyinaran UV terhadap perubahan temperatur transisi gelas pada polimer. Temperatur transisi gelas erat hubungannya dengan sifat getas suatu polimer. Jika temperatur transisi gelas suatu material polimer kecil, maka material tersebut akan cepat berubah menjadi lebih getas.

Penelitian yang dilakukan oleh Roylance membuktikan bahwa bagian permukaan mengalami degradasi temperatur yang besar. Hal ini membuktikan bahwa reaksi yang berlangsung pada permukaan sangat besar efeknya pada komposit yang mengalami penyinaran berkepanjangan [10].

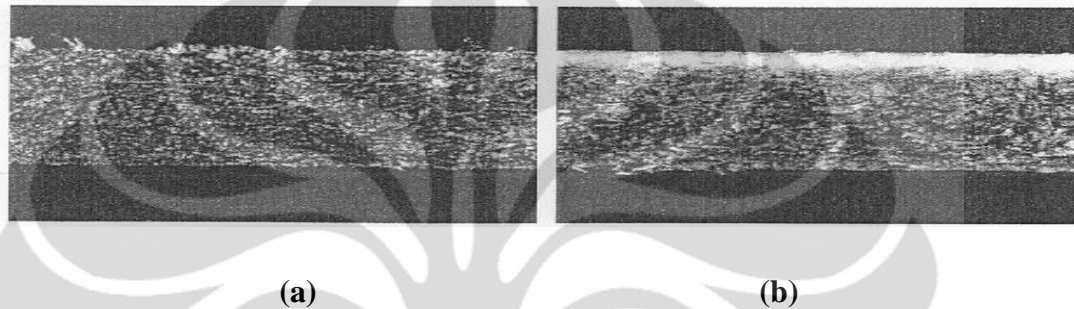
Degradasi permukaan dapat dilihat secara mikroskopis dengan menggunakan SEM (Scanning Electron Microscope). Dengan mengetahui besarnya lebar degradasi permukaan, maka kita dapat meramalkan penurunan kekuatan mekanik. Penelitian yang dilakukan oleh Lundin, dkk memberikan informasi tentang pengaruh degradasi permukaan terhadap kekuatan mekanik komposit. Lundin menggunakan HDPE (High Density Polyethylene) sebagai matriks dan fiber alam seperti serat kayu dan serat kenaf sebagai material yang diuji [11].



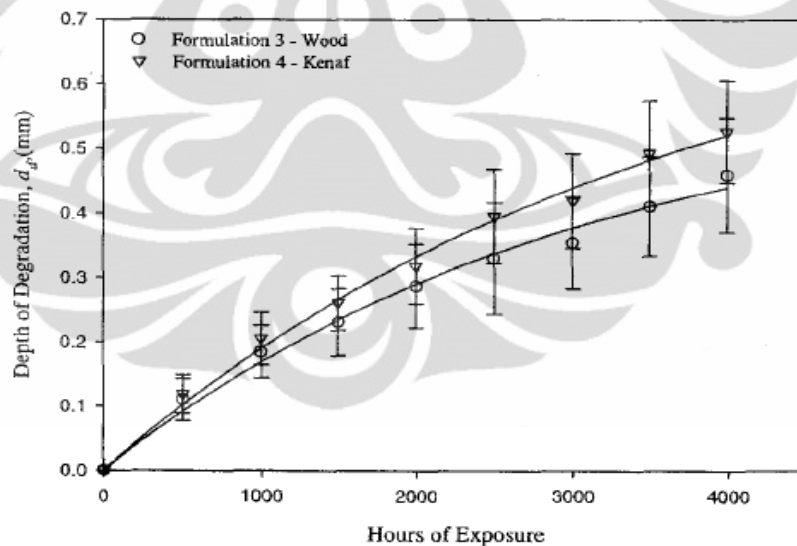
Gambar 2.15 Temperatur transisi gelas yang terjadi pada polimer yang diberikan penyinaran langsung.

[10]

Degradasi permukaan dilihat melalui SEM dan besar lebar degradasi diukur langsung seperti pada gambar 2.16. Setelah dilakukan pengukuran, maka didapatkan grafik yang menunjukkan pengaruh lama penyinaran terhadap lebar degradasi permukaan (Gambar 2.17).



Gambar 2.16 Degradasi permukaan pada permukaan komposit HDPE-fiber. Keadaan sebelum dilakukan penyinaran (a) dan keadaan permukaan setelah penyinaran 4000 jam (b).[11]



Gambar 2.17. Hubungan antara lebar degradasi permukaan dengan lama penyinaran menggunakan UV.[11]

Lundin dkk melakukan perhitungan untuk memprediksi penurunan kekuatan mekanik komposit. Dari grafik yang didapatkan, Lundin dkk membuat persamaan degradasi permukaan, yaitu:

$$d_d = a(1 - e^{-bt}) \dots\dots\dots(2.38)$$

Di mana a dan b adalah parameter yang nilainya didapatkan dari eksperimen. Dengan menganggap bahwa kepadatan lengkungan bernilai nol pada bagian yang terdegradasi, momen inersia dari komposit dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$I_e = \frac{1}{12} b(d_e)^3 \dots\dots\dots(2.39)$$

$d_e$  adalah lebar efektif yang didapatkan dari selisih lebar tebal spesimen dengan lebar degradasi permukaan:

$$d_e = d_t - d_d \dots\dots\dots(2.40)$$

Dengan menggunakan momen inersia sebagai fungsi dari lebar degradasi permukaan, maka Lundin dkk dapat membuat suatu persamaan yang berhubungan dengan kuat lengkung komposit. Modulus elastisitas dan kuat lengkung komposit memenuhi persamaan:

$$E = \frac{PL^3}{48I_e \delta} \dots\dots\dots(2.41)$$

Kuat lengkung dari material adalah:

$$\sigma = \frac{PLd_e}{8I_e} \dots\dots\dots(2.42)$$

Di mana P adalah beban yang diberikan, L adalah panjang penyangga, dan  $\delta$  adalah defleksi lengkungan.

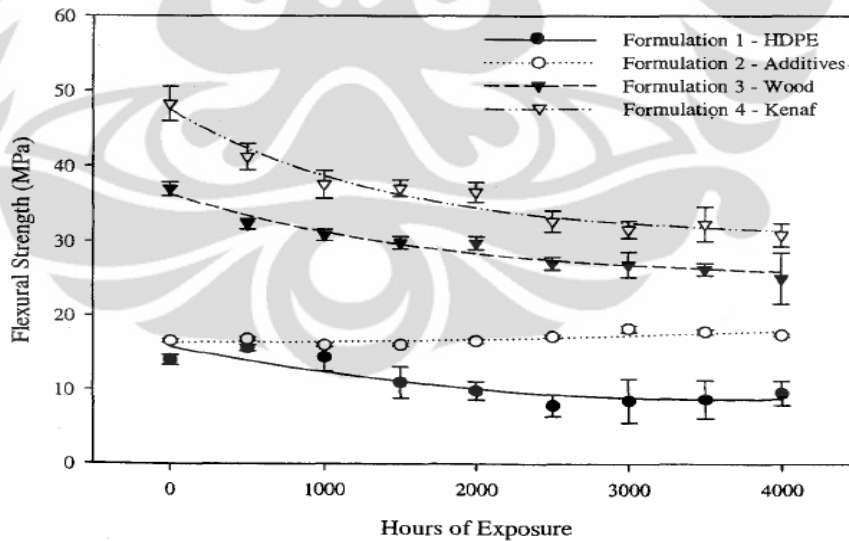
Tabel 2.2. Hasil uji lengkung dengan variasi lama penyinaran dan jenis fiber

| Formulation                         | Flexural strength (MPa) at various exposure times |            |           |           |           |
|-------------------------------------|---|------------|-----------|-----------|-----------|
|                                     | 0 h   | 1.000 h    | 2.000 h   | 3.000 h   | 4.000 h   |
| High-density polyethylene           |   |            |           |           |           |
| Exposed surface on compression side | 14.0 <sup>b</sup> (4.7)                           | 15.8(6.8)  | 9.4(16.5) | 5.6(6.5)  | 8.1(6.1)  |
| Exposed surface on tension side     | 14.0(4.7)   | 13.0(11.0) | 10.2(6.1) | 11.4(4.0) | 10.9(8.9) |
| Additives                           |   |            |           |           |           |
| Exposed surface on compression side | 16.5(1.3)   | 16.0(1.4)  | 16.6(1.2) | 17.9(1.9) | 17.3(1.4) |
| Exposed surface on tension          | 16.5(1.3)   | 16.0(1.4)  | 16.4(1.8) | 18.5(1.2) | 17.3(1.4) |
| Wood (50%)                          |   |            |           |           |           |
| Exposed surface on compression side | 36.9(2.4)   | 30.8(2.4)  | 29.7(3.0) | 25.3(3.6) | 26.2(4.0) |
| Exposed surface on tension side     | 36.9(2.4)   | 30.8(2.4)  | 29.7(3.0) | 28.4(2.6) | 24.8(7.4) |
| Kenaf (50%)                         |   |            |           |           |           |
| Exposed surface on compression side | 48.2(4.8)   | 37.6(5.0)  | 36.5(3.6) | 31.6(3.6) | 31.5(4.6) |
| Exposed surface on tension side     | 48.2(4.8)   | 37.6(5.0)  | 36.5(3.6) | 31.6(3.6) | 30.1(4.4) |

<sup>a</sup>Values are averages. Coefficient of variation values (%) are given in parentheses.

<sup>b</sup>Fifteen replications for each condition.

Sumber : [11]



Gambar 2.18. Grafik hubungan antara kuat lengkung material dengan lama penyinaran dengan berbagai jenis fiber [11]

Melalui serangkaian uji lengkung pada spesimen yang telah disinari UV, maka Lundin dkk. mendapatkan hasil seperti Gambar 2.18 dan Tabel 2.2. Hasil uji lengkung ini memberikan informasi bahwa degradasi permukaan memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap sifat mekanik.

### 2.3 Metode Vacuum Assisted Resin Infusion

Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) adalah metode pembuatan material komposit yang menggunakan aplikasi tekanan rendah untuk mengatur jalannya resin menjadi lamina. Material yang menjadi matriks diletakkan di sebuah cetakan, kemudian dilakukan proses vakum untuk menarik aliran resin ke dalam matriks. Setelah lembaran-lembaran antara resin dan matriks terbentuk, maka tabung vakum akan menghisap sisa-sisa resin yang masih tertinggal, sehingga lembaran yang terbentuk mempunyai ketebalan yang sama.

Metode VARI menghasilkan material komposit yang mempunyai rasio fiber-resin yang tinggi dibandingkan dengan metode *hand lay-up*. Metode *hand lay-up* menggunakan cara manual untuk mengalirkan resin, sedangkan pada metode VARI aliran resin dilakukan oleh tekanan vakum yang konstan. Penggunaan tekanan vakum konstan ini yang mengatur distribusi resin agar tetap dalam suatu jumlah tertentu. Hal ini menyebabkan rasio fiber – resin menjadi tinggi sehingga menghasilkan material komposit yang lebih kuat dan ringan.

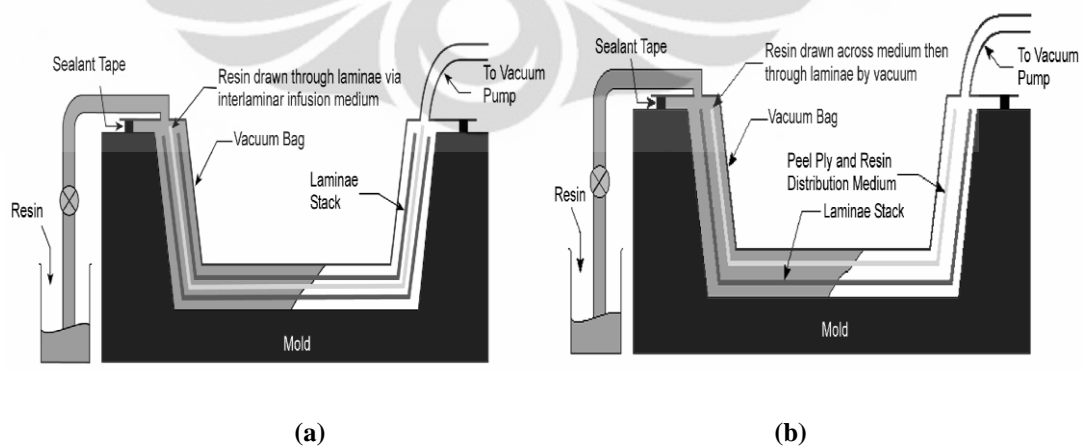
Beberapa langkah dasar dalam proses VARI adalah sebagai berikut :

1. Material yang berfungsi sebagai matriks diletakkan dalam suatu cetakan yang dilapisi vacuum bag.
2. Resin cair yang berfungsi sebagai filler dituangkan dalam suatu wadah yang terhubung dengan cetakan dan mesin vakum.

3. Tekanan udara yang ada di dalam cetakan diturunkan oleh mesin vakum.
4. Resin dialirkan dengan menggunakan aplikasi tekanan rendah.
5. Proses *curing* dilakukan setelah resin membentuk lamina.

Metode VARI dibagi dua jenis, yaitu Metode *Surface Infusion* dan metode *Interlaminar Infusion* [12]. Pada *surface infusion*, resin dialirkan melewati bagian permukaan lamina. Pada *interlaminar infusion*, resin dilalirkan melalui ruang antar lamina (Gambar 2.19a). Pada *surface infusion*, kerugian terbesar terdapat pada biaya yang disebabkan persiapan pengoperasian mesin, dan kompleksitas yang meningkat jika metode ini diaplikasikan untuk skala besar.

Metode *interlaminar infusion* memiliki banyak keuntungan jika diaplikasikan dalam skala besar. Resin dialirkan di antara lamina sehingga ketebalan resin terjaga pada ruang antar lamina (Gambar 2.19b). Selain itu, proses pengaliran resin lebih cepat karena melewati ruang yang sudah dijaga ketebalannya. Proses yang lebih terjaga ini juga menyebabkan material sisa yang terbuang semakin berkurang.



Gambar 2.18. Diagram Surface Infusion VARI (a) dan Diagram Interlaminar Infusion VARI [12]

## 2.4 Turbin Angin

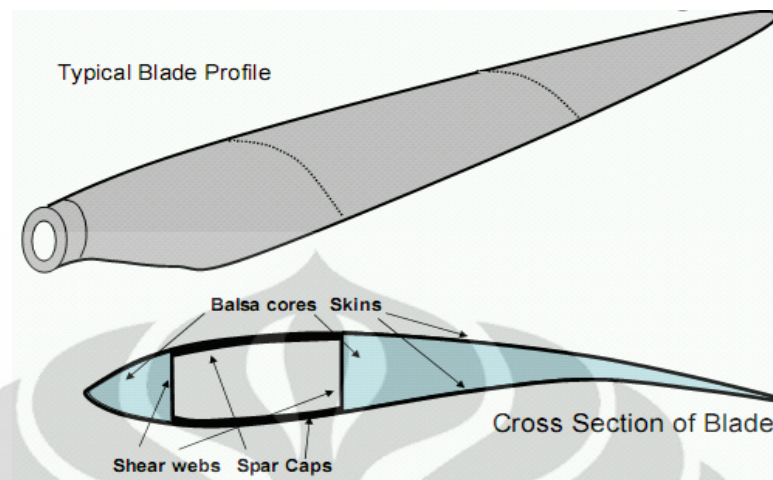
Penggunaan turbin angin sebagai salah satu bagian penting dari solusi krisis energi menjadi fenomena khusus saat ini. Turbin angin yang dipasang di banyak lepas pantai membantu beberapa negara untuk menghemat energinya. Hingga tahun 2003 lalu, pertumbuhan pembuatan turbin angin lepas pantai naik hingga 25% dari total sumber energi alternatif. Diperkirakan penggunaan energi angin sebagai pembangkit listrik ini mencapai 12% dari total keseluruhan energi listrik pada tahun 2020 dan 23% pada tahun 2040 [13].

Turbin angin memiliki spesifikasi pembuatan yang unik. Hal ini terjadi karena penempatan turbin angin yang berbeda dengan generator pembangkit lainnya. Spesifikasi ini menyangkut pada bahan material yang digunakan untuk pembuat sudu turbin anginnya. Material sudu turbin angin ini harus mempunyai beberapa karakteristik mekanik dan mikromekanik tertentu agar efektif penggunaannya.

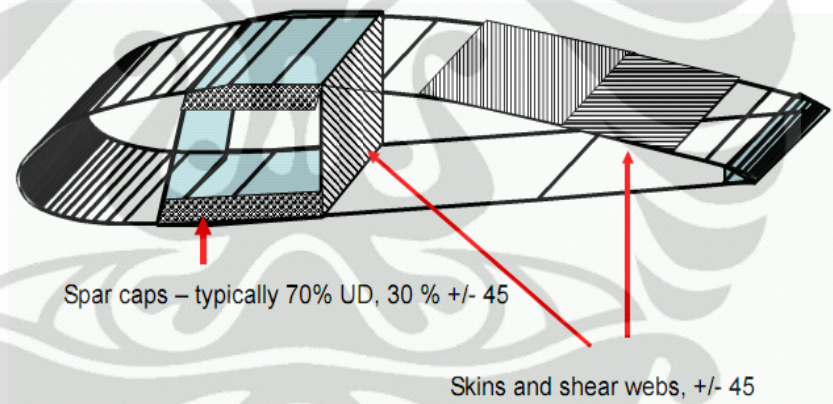
Penggunaan material komposit untuk sudu turbin sangat menjanjikan. Material komposit mempunyai sifat yang dapat di kondisikan dengan keadaan tempat dimana turbin angin diletakkan. Beberapa pemilihan material didasarkan pada karakteristik yang dibutuhkan. Karakteristik utama yang dibutuhkan adalah berat yang ringan dan modulus elastisitas yang tinggi [13].

Material komposit yang terdiri dari campuran epoxy – fiber glass memenuhi kriteria untuk dijadikan bahan material sudu turbin angin. Desain sudu turbin angin ideal dapat dilihat pada Gambar 2.20.





Gambar 2.20 Desain ideal sudu turbin angin [13]



Gambar 2.21 Orientasi arah serat fiber untuk setiap bagian sudu turbin angin [13]

Sudu turbin angin ideal mempunyai struktur aerodinamis yang memungkinkan untuk menerima beban angkat dengan merata. Struktur konfigurasi material berbeda-beda untuk setiap komponen sudu seperti terlihat pada Gambar 2.21

Karena turbin angin biasanya ditempatkan pada tempat terbuka dan sering mengalami kontak dengan lingkungan luar, maka pemilihan material sangat penting

untuk pembuatan turbin dalam skala besar. Selain memilih material berdasarkan kekuatannya, dibutuhkan juga material komposit yang ekonomis dan mudah didapat.

## 2.5 Pemilihan Material

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) telah melakukan serangkaian pengujian pada beberapa jenis material komposit. Dan dari data pengukuran yang dilakukan pada tahun 2008 [14], didapatkan data – data untuk pengukuran modulus elastisitas, kuat tarik, dan uji lengkung WR Epoxy Resin dan WR Renlam adalah sebagai berikut.

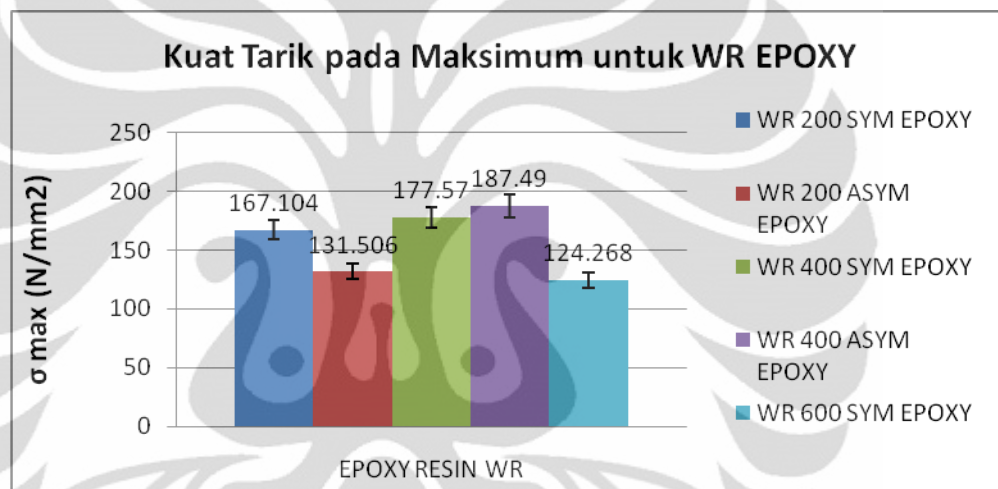
WR Epoxy resin adalah spesimen komposit yang menggunakan Epoxy sebagai matriks dan E-Glass sebagai fiber. Sedangkan WR Renlam adalah komposit yang menggunakan Renlam sebagai matriks dan E-Glass sebagai fiber. Masing-masing material komposit ini divariasikan menurut densitas massa fiber dan arah serat fiber (Tabel 2.3).

Tabel 2.3 Variasi densitas dan arah pada komposit WR

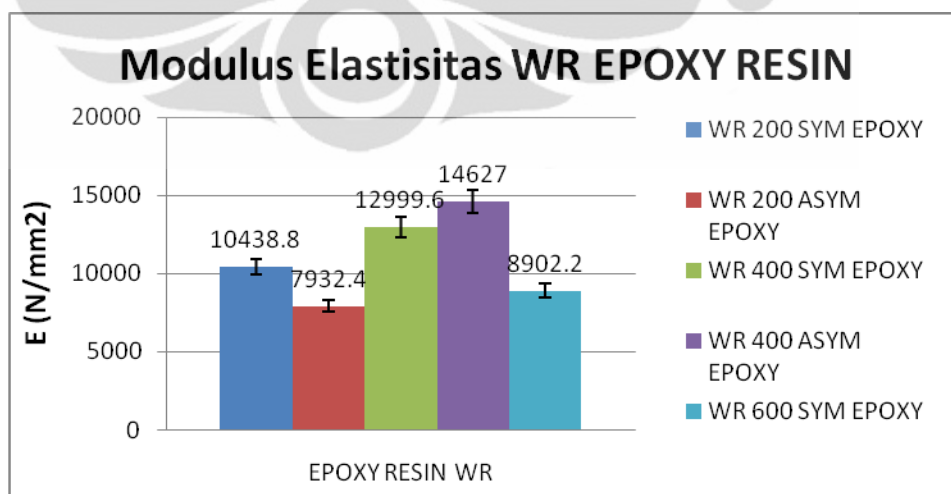
| Nama Spesimen | Susunan                                       | Kerapatan            |
|---------------|---|----------------------|
| WR 200 SYM    | Arah serat simetris dengan sudut +45, 0, +45  | 200gr/m <sup>2</sup> |
| WR 400 SYM    | Arah serat simetris dengan sudut +45, 0, +45  | 400gr/m <sup>2</sup> |
| WR 600 SYM    | Arah serat simetris dengan sudut +45, 0, +45  | 600gr/m <sup>2</sup> |
| WR 200 ASYM   | Arah serat asimetris dengan sudut -45, 0, +45 | 200gr/m <sup>2</sup> |
| WR 400 ASYM   | Arah serat asimetris dengan sudut -45, 0, +45 | 400gr/m <sup>2</sup> |
| WR 600 ASYM   | Arah serat asimetris dengan sudut -45, 0, +45 | 600gr/m <sup>2</sup> |

Sumber : [14]

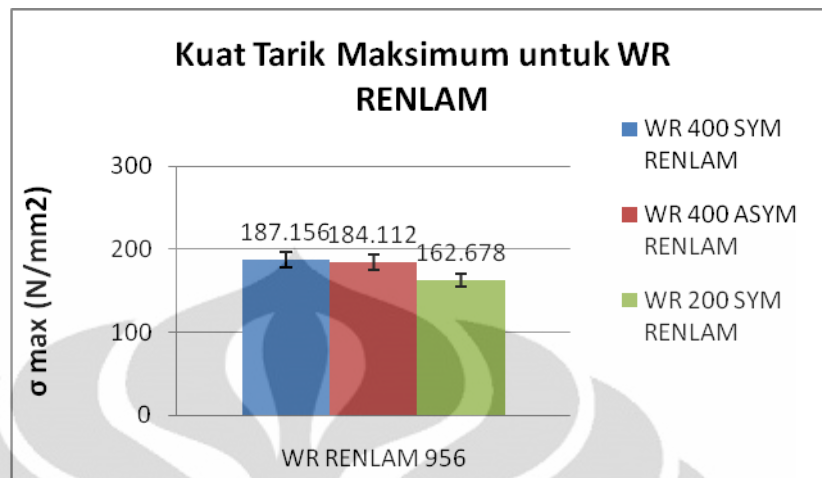
Data pengukuran kuat tarik maksimum untuk komposit jenis epoxy-E Glass ditunjukkan oleh Gambar 2.22. Sedangkan data batang modulus elastisitasnya ditunjukkan oleh Gambar 2.23. Kelompok epoxy-Renlam mempunyai diagram batang kuat tarik maksimum pada Gambar 2.24, dan diagram modulus elastisitas pada Gambar 2.25.



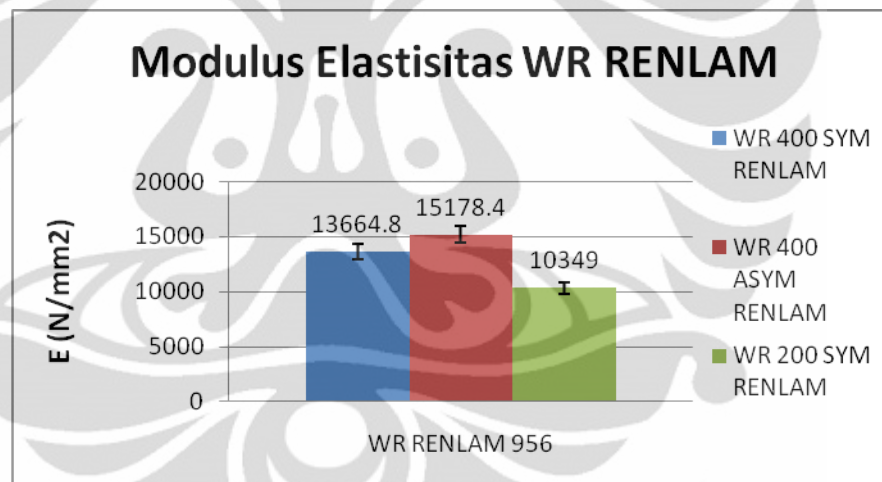
Gambar 2.22 Data kuat tarik maksimum Epoxy-E Glass [14]



Gambar 2.23 Data modulus elastisitas Epoxy-E Glass[14]



Gambar 2.24 Data kuat tarik maksimum Renlam[14]



Gambar 2.25 Data modulus elastisitas Renlam[14]

Dari data-data di atas, dapat dilihat bahwa pada kelompok WR Epoxy Resin, nilai modulus dan kuat tarik tertinggi dimiliki oleh WR 400 Asimetris epoxy. Kelompok WR Renlam juga memiliki hasil yang sama, di mana nilai kuat tarik dan modulus elastisitas tertinggi dimiliki oleh WR 400 Asimetris Renlam. Hal ini menjadi

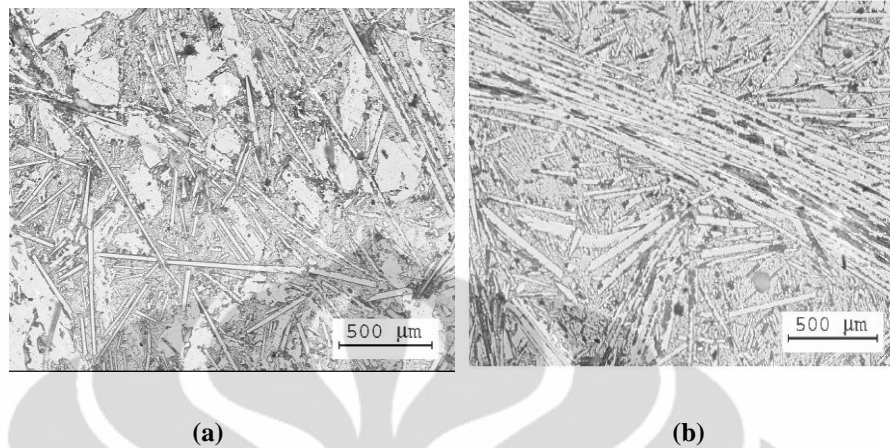
menarik karena dari kedua kelompok resin, ternyata komposit dengan struktur WR 400 Asimetris yang memiliki nilai terbaik.

Dari hasil pengukuran ini, dapat dianalisa bahwa pada WR 200 yang mempunyai kerapatan  $200 \text{ gr/m}^2$  memiliki kuat tarik maksimum  $167,104 \text{ N/mm}^2$  dan  $131,506 \text{ N/mm}^2$  untuk kelompok Epoxy simetris dan asimetris. Pada WR 200 ini, fiber terdispersi baik, namun kuantitas kerapatannya masih relatif kecil, sehingga menghasilkan kuat tarik yang didominasi oleh matriksnya.

Pada WR 400, kuat tarik dan modulus elastisitas mempunyai nilai tertinggi. Sebagai contoh, untuk kelompok epoxy resin simetris dan asimetris, nilai kuat tarik maksimum adalah  $177,57 \text{ N/mm}^2$  dan  $187,49 \text{ N/mm}^2$ . Nilai ini disebabkan kerapatan fiber mencapai titik optimum, sehingga perbandingan antara matriks dan fiber pada keadaan ini menghasilkan sifat campuran komposit yang optimum. Seluruh fiber terdispersi dengan baik pada WR 400. Desain susunan serat fiber pada WR 400 Asymetris adalah susunan terbaik, karena struktur komposit lamina yang asimetris akan mempunyai arah serat yang berlawanan, sehingga akan menguatkan ketahanan terhadap gaya tarik pada satu arah tertentu.

Pada WR 600, kuat tarik dan modulus elastisitasnya menurun. Sebagai contoh untuk epoxy resin semetris kuat tarik maksimumnya adalah  $124,268 \text{ N/mm}^2$ . Kerapatan pada WR 600 adalah  $600 \text{ gr/m}^2$ , kerapatan yang tinggi ini justru menyebabkan penumpukan serat pada arah tertentu, sehingga terjadi persebaran distribusi fiber. Persebaran ini menyebabkan pada ruang tertentu terdapat kerapatan yang kecil, sehingga kerusakan akan menjalar dengan cepat di bagian ini.

Semakin besar persen massa fiber, kemungkinan terjadi penggumpalan semakin besar. Hal ini diuji oleh J. Myalski yang melihat penggumpalan melalui studi SEM. (Gambar 2.26). Penggumpalan fiber pada arah tertentu mengakibatkan penurunan kuat tarik maksimum komposit [15]. Hal ini yang menyebabkan penurunan kuat tarik pada spesimen WR 600.

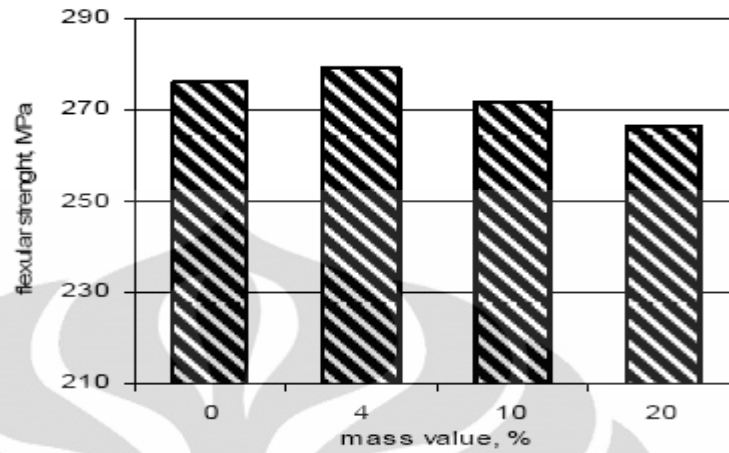


Gambar 2.26 Hasil SEM untuk fiber-epoxy dimana tidak terdapat penumpukan fiber (a), dan fiber-epoxy dengan tumpukan fiber pada arah tertentu (b) [15]

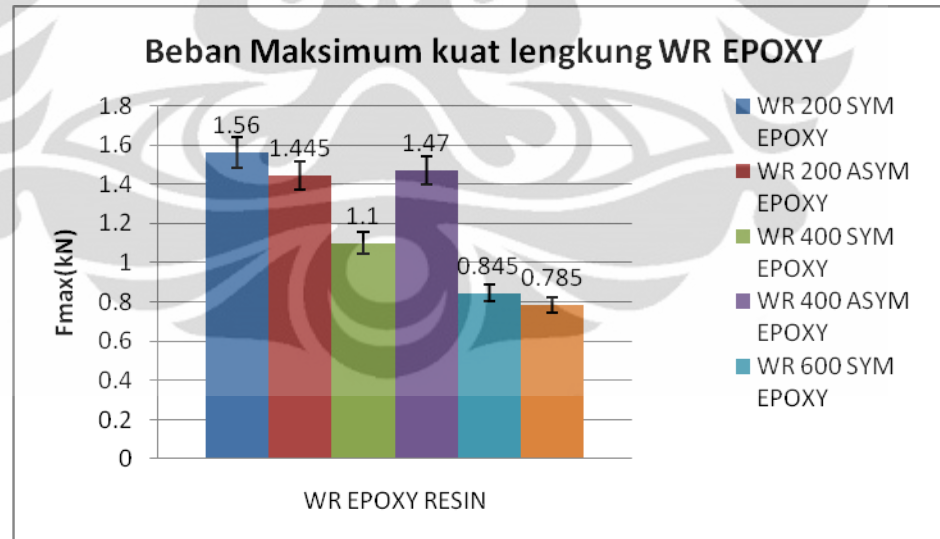
Data pengukuran terhadap uji lengkung juga ditampilkan dalam bentuk diagram batang. Gambar 2.28 menunjukkan diagram batang kuat lengkung untuk kelompok Epoxy-E Glass, sedangkan Gambar 2.29 adalah diagram batang untuk kuat lengkung Renlam-E Glass.

Hasil uji lengkung menunjukkan bahwa kelompok WR 200 mempunyai kuat lengkung yang paling besar, diikuti oleh WR400, dan terakhir WR600. Pengaruh kerapatan fiber juga berpengaruh besar dalam menentukan kekuatan lengkung dari komposit. Data yang diperoleh dari BPPT ini cocok dengan data yang di dapatkan J.Myalski yang mengatakan bahwa sifat mekanik dipengaruhi oleh persen massa dan penumpukan fiber pada arah tertentu. Data J.Myalski untuk kuat lengkung dapat dilihat pada Gambar 2.27.

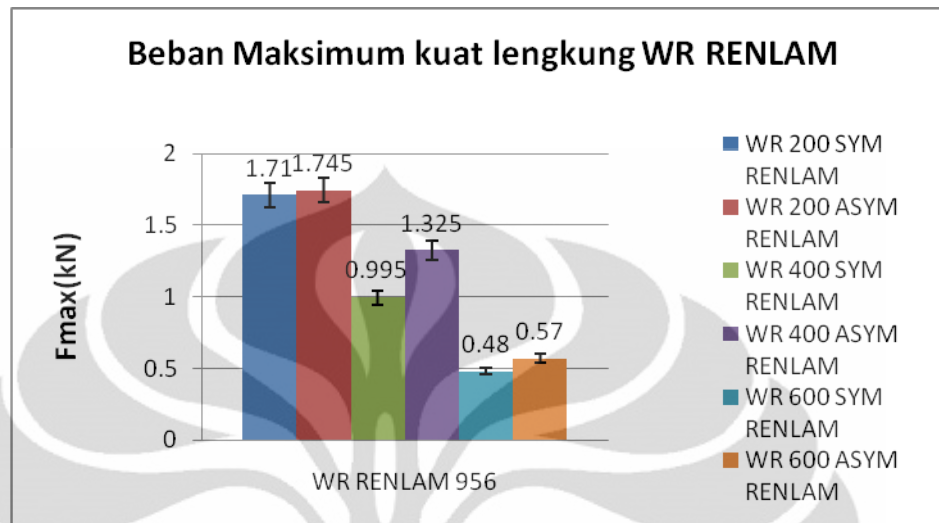
Dari Gambar 2.27 terlihat kenaikan kuat lengkung pada penambahan persen massa penguat sampai 4%, kemudian kuat lengkung menurun dari persen massa penguat sebanyak 10%.



Gambar 2.27 Grafik kuat lengkung terhadap persen massa [15]



Gambar 2.28 Data kuat lengkung maksimum Epoxy-E Glass [14]



Gambar 2.29 Data kuat lengkung maksimum Renlam [14]

Dari data-data ini dapat disimpulkan bahwa WR400 mempunyai sifat yang paling baik untuk diaplikasikan menjadi material dasar penyusun sudu turbin angin. WR 400 mempunyai modulus elastisitas tinggi dan kuat tarik yang tinggi. Selain itu, kuat lengkungnya juga cukup besar sehingga diperkirakan dapat bertahan pada kondisi dimana lingkungannya banyak dipengaruhi tekanan konstan di berbagai titik.

WR 400 Asimetris RENLAM lebih mudah didapat dan lebih ekonomis, perbandingan kekuatannya pun tidak terlalu besar terhadap WR 400 Asymetris Epoxy. Dengan alasan ini maka dipilihlah WR 400 Asimetris RENLAM untuk diuji lebih lanjut menggunakan penyinaran UV.



## BAB 3

### METODE EKSPERIMEN

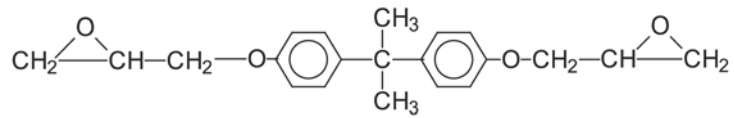
Dalam penelitian ini, dengan jangka waktu tujuh bulan yang dimulai dari bulan Juli 2009 sampai Pebruari 2010. Pemilihan material dilakukan dengan melihat hasil uji dari data Badan Pengkajian dan Pengembangan Teknologi (BPPT). Setelah menganalisa data, maka dipilihlah WR 400 RENLAM asimetris sebagai bahan yang dibuat kembali untuk pengujian lingkungan.

Setelah memilih bahan material, dilakukan pembuatan kembali dengan metode VARI. Proses pembuatan menghasilkan 15 spesimen yang telah dipotong untuk proses pengujian selanjutnya. Dari 15 spesimen ini dibagi masing-masing lima spesimen untuk pengujian lingkungan dengan tiga variasi lama penyinaran.

Setelah dilakukan uji lingkungan dengan penyinaran ultraviolet, spesimen dikondisikan untuk pengujian tarik untuk melihat pengaruh penyinaran pada sifat mekanik komposit. Selain itu kerusakan spesimen akibat penyinaran dilihat secara mikroskopis dengan Scanning Electron Microscope (SEM).

#### 3.1 Pemilihan Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah komposit lamina epoxy resin-E Glass. Epoxy RENLAM M (Gambar 3.1) digunakan sebagai matriks dengan penambahan penguat (hardener) REN HY 956 (Gambar 3.2). Sedangkan material fiber adalah glass fiber Woven Roving 400 gr/m<sup>2</sup>. Untuk *released agent* pada proses VARI digunakan *wax mirror glaze* dan PVA.



Gambar 3.1 Struktur RENLAM M-1 [16]



Gambar 3.2 Struktur Hardener REN HY 956 [16]

### 3.2 Pembuatan Spesimen

Pembuatan spesimen dilakukan di PT. Gilang Lemindo Sejahtera ( Alam Sutera, Serpong). Metode yang digunakan adalah metode Vacuum Assisted Resin Infussion (VARI). Diagram alat yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram alat untuk membuat spesimen dengan menggunakan metode VARI

Langkah-langkah pembuatan material komposit dengan menggunakan metode VARI adalah sebagai berikut;

1. Mempersiapkan cetakan, lalu mengoleskannya dengan *wax mirror glaze*, dan sudut – sudut cetakan dioleskan *gelcoat* agar tidak rapuh. Alat yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.4.
2. Menimbang material yang digunakan. Total berat komposit adalah 808 gram, dengan berat resin 330 gram dan jumlah tujuh lapisan fiber adalah 478 gram.
3. Mengoleskan resin epoxy yang sudah dicampur dengan *hardener* dengan perbandingan 2:1 sesuai spesifikasi yang telah diberikan pada data RENLAM –M / NHY 956. Proses pengolesan dapat dilihat pada Gambar 3.5

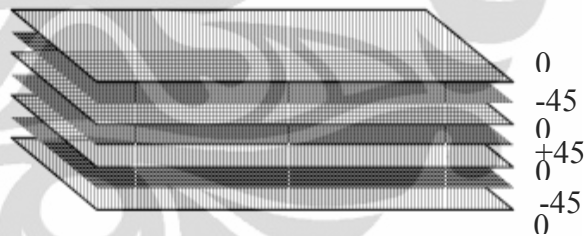


Gambar 3.4 Alat untuk membuat spesimen dengan metode VARI



Gambar 3.5 Pengolesan resin epoxy

4. Menuangkan resin pada serat fiber sampai membasahi seluruh permukaan serat. Proses ini dilanjutkan berulang-ulang sampai mendapatkan tujuh lapis lamina dengan susunan 0/45/0/45/0/45/0 asimetris (Gambar 3.6)



Gambar 3.6 Susunan serat fiber asimetris

5. Setelah semua lapisan selesai, maka permukaan ditutupi dengan kain nilon, lalu ditutupi kaos atau blacu, dibungkus dengan "plastic bagging" dan direkatkan dengan perekat, (Gambar 3.7).



Gambar 3.7 Persiapan untuk proses vakum

6. Melakukan proses vakum dengan kapasitas  $\frac{1}{4}$  HP (*air dissipation* 1,5 CFM, tekanan 5 Pa), proses vakum dilakukan selama 6 jam, dengan tekanan 0,2 bar, dan suhu ruang.
7. Melakukan penimbangan setelah proses vakum, dari hasil pengukuran berat, resin yang tersedot adalah 250 gram, sehingga yang ada di dalam material adalah 80 gram. Perbandingan berat resin : serat = 80 : 478 atau sekitar 1 : 6.

### 3.3 Pengujian Spesimen

Spesimen yang telah dibuat, terlebih dahulu dikondisikan pada temperatur ruang dan tekanan atmosfer. Setelah beberapa hari pengkondisian, spesimen langsung diuji dengan pengujian sebagai berikut :

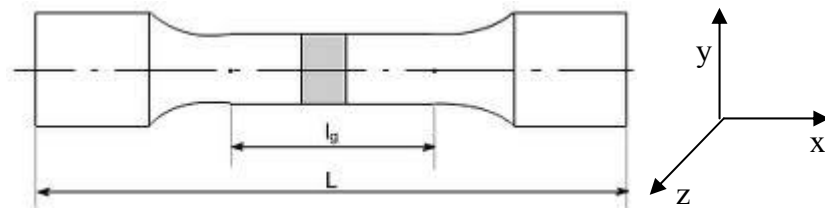
1. Pengujian lingkungan dengan melakukan penyinaran UV (Gambar 3.8) di Sentra Teknologi Polimer Serpong dengan menggunakan pedoman ASTM G53-96. Alat yang digunakan adalah QUV Accelerated Weathering Tester -Model QUV/Basic. Alat ini menggunakan lampu ultraviolet UVA-340

( $\lambda=340$  nm) dengan lama penyinaran yang divariasikan, yaitu 10, 20, dan 30 jam.

2. Pengujian tarik yang dilakukan di Laboratorium Uji Konstruksi Serpong, dengan menggunakan standar ASTM D 638, mesin yang digunakan adalah RME 100, dengan beban maksimum rata – rata 10,5 kPa. Arah serat yang diuji adalah arah longitudinal (searah dengan arah fiber longitudinal). Hal ini dilakukan untuk mengetahui ketahanan tarik longitudinal pada material. Dengan mengetahui nilai penurunan kuat tarik, maka dapat dianalisa besarnya pengaruh lama penyinaran terhadap kekuatan mekanik material.
3. Setelah diuji tarik, dilakukan uji SEM (Scanning Electron Microscope) di Laboratorium SEM Program Studi Pascasarjana Ilmu Material Departemen Fisika Universitas Indonesia, Salemba. Uji SEM digunakan untuk melihat kerusakan pada permukaan atau ikatan antara fiber dengan matriks akibat penyinaran ultraviolet. Bagian spesimen yang dilihat dapat dilihat pada gambar 3.9



Gambar 3.8 Mesin pengujian UV STP Serpong



(a)



(b)

Gambar 3.9 Bagian spesimen (diarsir hitam) yang dilihat dengan menggunakan SEM, tampak atas pada bagian (a), dan tampak samping pada bagian (b)

## BAB 4

### HASIL DAN ANALISA

Pengujian material terdiri dari uji lingkungan dan uji mekanik. Uji lingkungan dengan menggunakan sinar ultraviolet memberikan hasil kualitatif berupa perubahan warna. Hasil penyinaran ini kemudian diuji lagi dengan melakukan uji tarik untuk mengetahui nilai kuantitatif kekuatan mekanik setelah penyinaran. Kemudian, dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dapat dilihat perubahan yang terjadi pada struktur komposit dan membantu analisa mikroskopis.

#### 4.1 Hasil Pengujian

Pengujian dengan penyinaran ultraviolet pada spesimen WR400 Asimetris RENLAM menyebabkan spesimen mengalami perubahan warna. Perubahan warna paling banyak terjadi pada permukaan atas spesimen dan kepekatan perubahan warna terjadi pada spesimen yang disinari selama 30 jam (Gambar 4.1).

Walaupun terjadi perubahan warna yang pekat, tidak terjadi kerusakan seperti pecah atau retak pada semua spesimen. Hal ini menunjukkan spesimen tahan dalam kondisi penyinaran ultraviolet yang cukup lama.



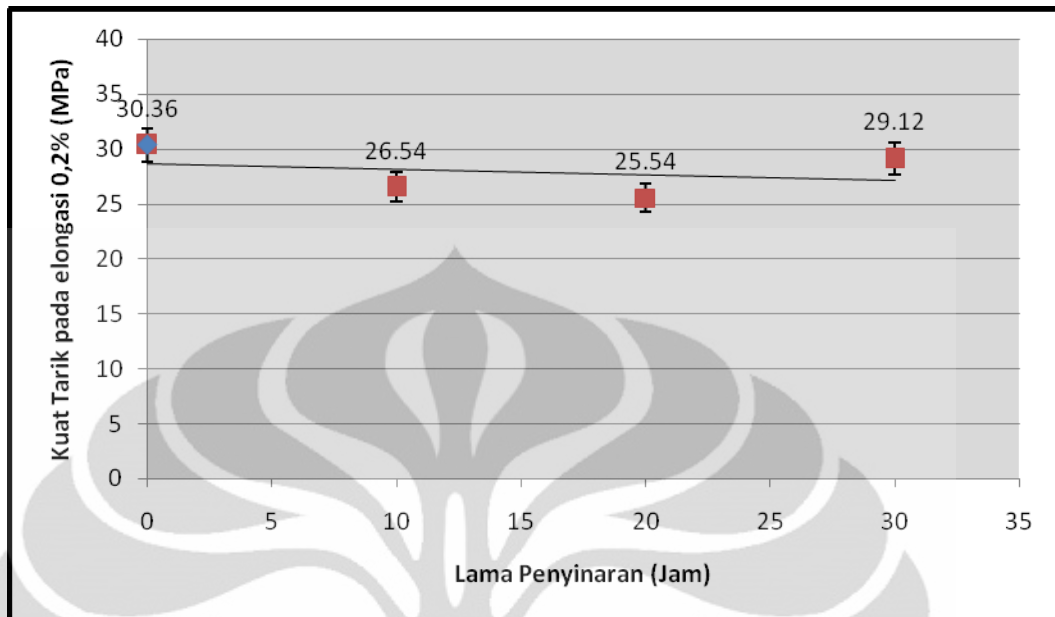


Gambar 4.1 Hasil penyinaran spesimen epoxy-E Glass dengan ultraviolet

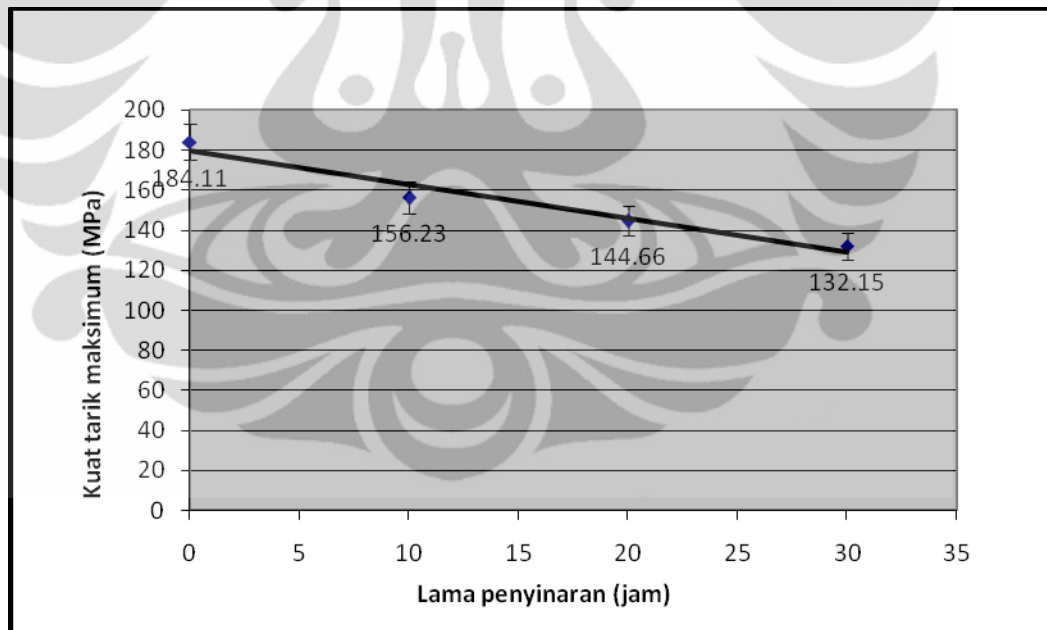
Setelah dilakukan uji lingkungan dengan melakukan penyinaran ultraviolet, spesimen dikondisikan terlebih dahulu pada suhu  $25^{\circ}\text{C}$  dan tekanan satu atmosfer. Setelah dikondisikan selama dua hari, uji tarik dilakukan dengan mengikuti kaidah ASTM D 638.

Spesimen ditarik sampai regangan 0,2% dan dilanjutkan hingga mengalami kerusakan pada regangan 1,2%. Penyinaran ultraviolet ternyata mempengaruhi hasil uji tarik sehingga menyebabkan penurunan kuat tarik pada regangan 0.2% yang ditunjukkan oleh Gambar 4.2, sedangkan kuat tarik maksimum spesimen dapat dilihat pada Gambar 4.3. Kuat tarik maksimum menurun secara linier terhadap lama penyinaran.

Sebelum disinari, kuat tarik spesimen pada regangan 0,2% adalah 30,36 MPa, dengan kuat tarik maksimum adalah 184,11 MPa. Spesimen yang disinari selama 10, 20, dan 30 jam berturut-turut mempunyai kuat tarik 26,54 MPa, 25,54 MPa, dan 29,12 MPa. Sedangkan kuat tarik maksimum untuk spesimen yang telah disinari selama 10,20, dan 30 jam adalah 156,23 MPa, 144,66 MPa, dan 132,15 MPa.

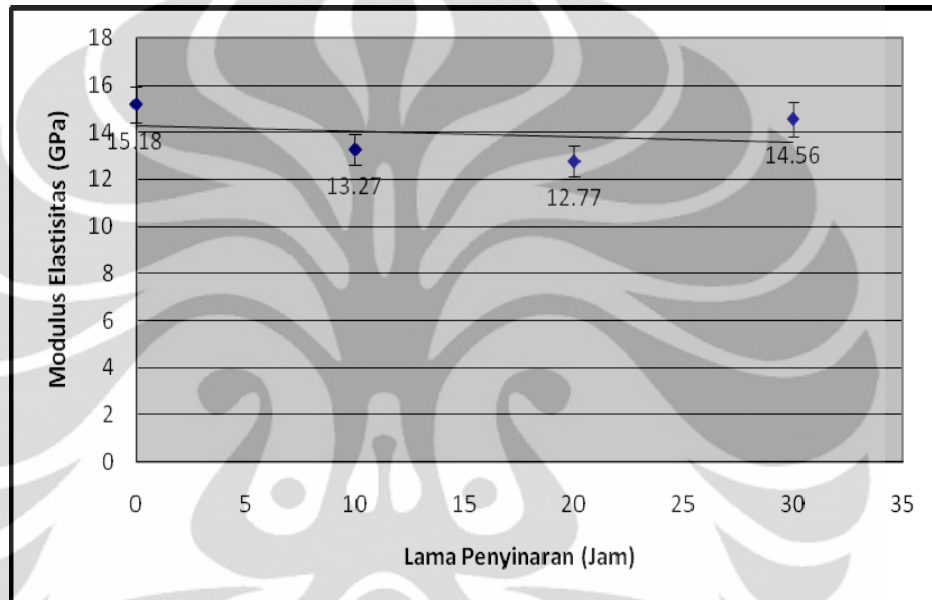


Gambar 4.2 Kuat tarik pada regangan 0,2% terhadap waktu penyinaran ultraviolet



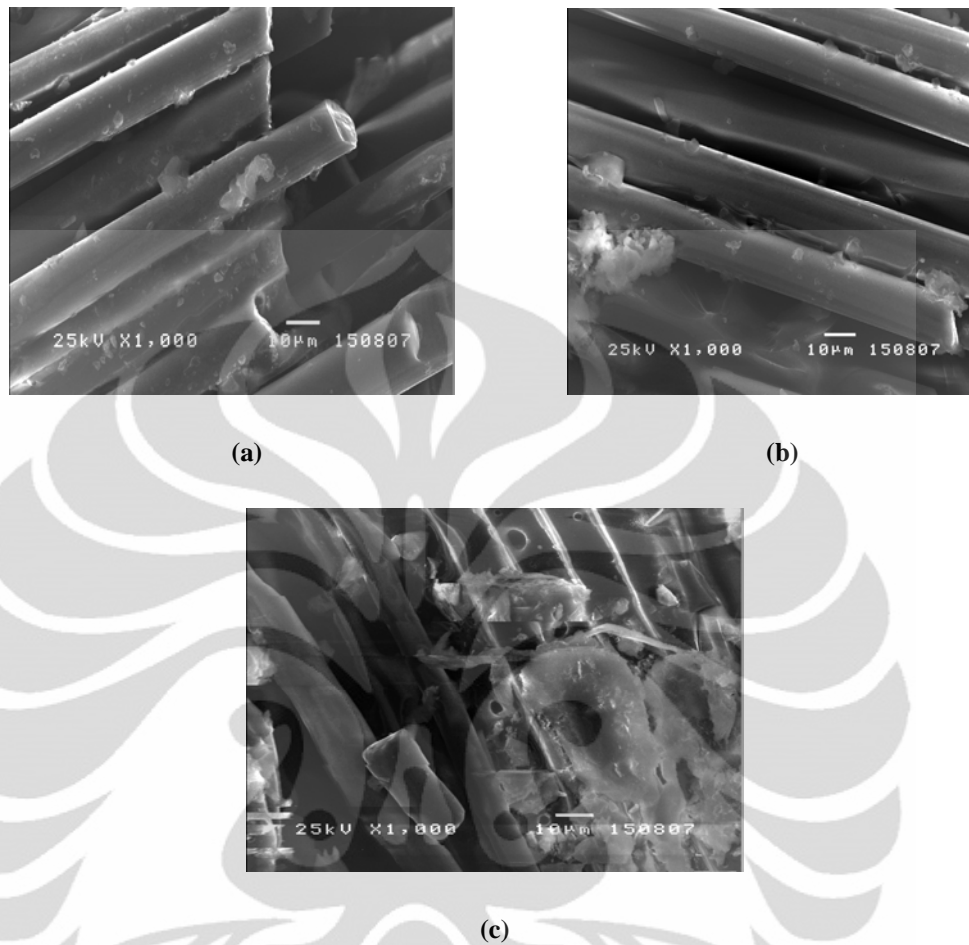
Gambar 4.3 Kuat tarik maksimum terhadap waktu penyinaran ultraviolet

Grafik modulus elastisitas dan lama penyinaran yang ditunjukkan oleh Gambar 4.4. Sebelum disinari dengan ultraviolet, modulus elastisitas material adalah 15,18 GPa. Setelah disinari dengan ultraviolet, selama 10 jam, 20 jam, dan 30 jam, modulus elastisitas menurun menjadi 13,27 GPa , 12,77 GPa, dan 14,56 GPa.



Gambar 4.4 Modulus elastisitas terhadap lama penyinaran ultraviolet

Setelah dilakukan uji tarik, bagian patahan spesimen dilihat dengan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM). Perbesaran yang digunakan adalah 1000 kali untuk setiap spesimen yang diberikan variasi penyinaran ultraviolet. Gambar 4.5 memperlihatkan bagian patahan yang dilihat dengan SEM. Bagian ini dilihat untuk mengetahui pengaruh penyinaran ultraviolet terhadap permukaan resin dan fiber.



Gambar 4.5 Hasil uji SEM material komposit yang telah disinari ultraviolet selama 10 jam (a), 20 jam (b), dan 30 jam (c).

## 4.2 Analisa data

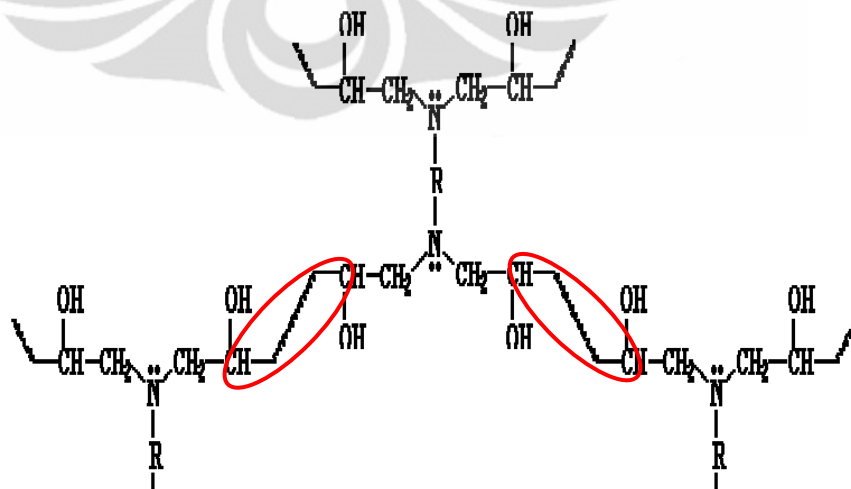
Analisa dibagi menjadi analisa kualitatif dan analisa kuantitatif. Analisa kualitatif dari uji lingkungan mengacu pada analisa kimia dan analisa dari SEM. Analisa kuantitatif mengacu dari data uji tarik dengan variasi lama penyinaran.

#### 4.2.1 Analisa uji lingkungan

Penyinaran spesimen dilakukan secara terus-menerus dengan menggunakan sinar ultraviolet yang mempunyai panjang gelombang 340 nm dan menghasilkan energi foton yang memenuhi persamaan;

$$E = \frac{hc}{\lambda} \dots\dots\dots(4.1)$$

di mana  $h$  adalah konstanta Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  Js), dan  $c$  adalah cepat rambat cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s). Dari persamaan ini dapat dihitung energi yang dihasilkan lampu yaitu,  $5,84 \times 10^{-19}$  J atau 352 kJ/mol. Energi ini mampu memutuskan salah satu jenis rantai ikatan pada epoxy yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6. Sesuai dengan Persamaan 2.13, terdapat kemungkinan molekul yang putus akibat penyinaran ultraviolet. Ikatan C-H (dilingkari merah pada Gambar 4.6) mempunyai kemungkinan untuk putus dengan penyinaran ultraviolet, karena ikatan ini hanya mempunyai energi disosiasi sebesar 339 kJ/mol.



Gambar 4.6 Ikatan polimer epoxy sebelum terkena penyinaran [17]

Penyinaran dengan menggunakan ultraviolet menyebabkan putusnya ikatan C dengan H sehingga menghasilkan radikal CH, sesuai dengan persamaan sebagai berikut;



Radikal CH dapat dengan mudah melepaskan ion H dengan reaksi;

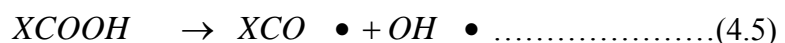


Selanjutnya, radikal-radikal ini dapat bereaksi dengan oksigen, dimana radikal H dapat menghasilkan H<sub>2</sub>O atau molekul OH, sedangkan radikal XC bereaksi dengan oksigen bebas dengan persamaan sebagai berikut;



Kehadiran hidroperoksida ini menurunkan kekuatan resin. Penurunan kekuatan resin mempengaruhi juga ikatan antara permukaan resin dengan fiber, seperti yang dinyatakan oleh Roylance dalam penelitiannya dengan menggunakan material epoxy-kenaf fiber [4].

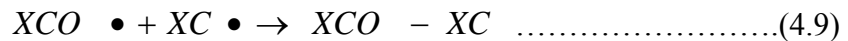
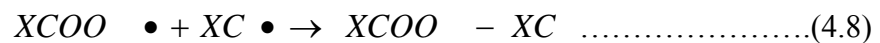
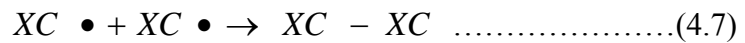
Reaksi *cross-link* juga mungkin terjadi sebagai reaksi sampingan ketika hidroperoksida terdekomposisi menjadi radikal XCOO seperti persamaan reaksi sebagai berikut;



dan,



Radikal-radikal ini akan saling berikatan membentuk *cross-link* dengan kemungkinan persamaan reaksi sebagai berikut;



Perubahan warna pada spesimen yang telah disinari membuktikan terjadinya *cross-link* pada rantai polimer. Struktur ikatan cross-link ini yang seharusnya membuat kekuatan longitudinal pada benda menurun.

Uji tarik pada spesimen yang disinari dengan ultraviolet dilakukan untuk mengetahui secara kuantitatif penurunan kekuatan tarik dan modulus elastisitas dari komposit karena melemahnya ikatan permukaan antara resin dengan fiber.

#### 4.2.2 Analisa uji tarik

Spesimen yang dibuat melalui metode VARI mempunyai panjang fiber yang lebih panjang dari panjang kritisnya dan arah serat fiber bersifat kontinyu. Dengan pendekatan ini, maka komposit dapat memenuhi persamaan;

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \dots\dots\dots(4.7)$$

Dari Persamaan 4.7 dapat dihitung berapa kuat tarik longitudinal keseluruhan dari komposit. Fraksi volume fiber  $V_f$  dapat dihitung dengan menggunakan hubungan antara massa jenis dengan volume sesuai dengan persamaan sebagai berikut;

$$V_f = \frac{\frac{m_f}{\rho_f}}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m}} \dots\dots\dots(4.8)$$

Dengan massa jenis fiber E-Glass adalah  $2500 \text{ kg/m}^3$  [3] dan massa dari fiber setelah dilakukan proses vakum adalah 0,48 kg. Massa jenis epoxy RENLAM adalah  $1100 \text{ kg/m}^3$ , dengan massa setelah proses vakum adalah 0,08 kg.

\ Dengan menggunakan Persamaan 4.8, maka dapat dihitung fraksi volume fiber adalah 0,72 dan fraksi volume matriks dapat dihitung melalui persamaan;

$$V_m = (1 - V_f) \dots\dots\dots(4.9)$$

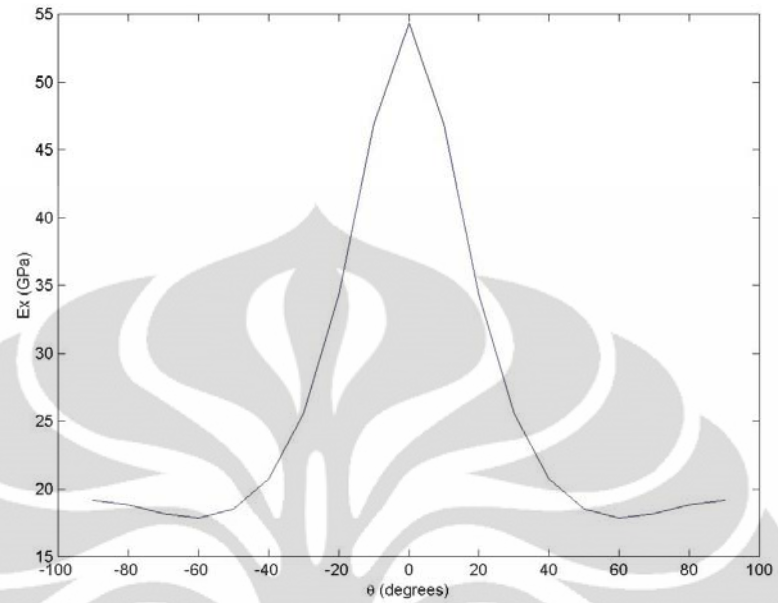
Dari Persamaan 4.9, dapat dihitung bahwa fraksi volume matriks adalah 0,28.

Dengan menggunakan MATLAB 7.0.4, dan memasukkan parameter awal dari tinjauan referensi [3], nilai modulus elastisitas pada arah-x ( $E_x$ ) dan kuat tarik pada arah-x ( $\sigma_x$ ) untuk spesimen WR400 dapat dihitung dan diplot dengan variasi arah sudut fiber dari  $-90^\circ$  sampai  $90^\circ$ . Grafik distribusi modulus elastisitas dan kuat tarik pada arah-x terhadap arah sudut fiber untuk satu lapisan lamina dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.

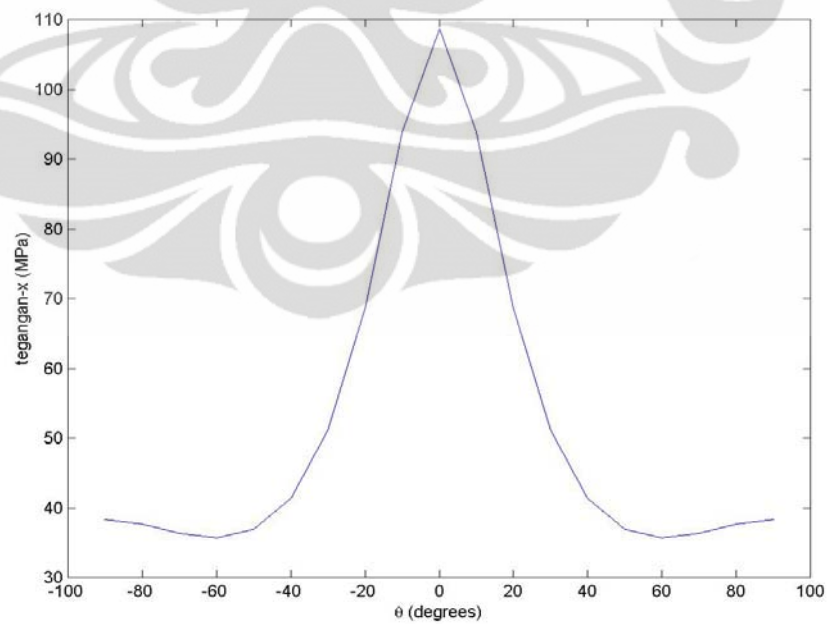
Gambar 4.7 menunjukkan distribusi  $E_x$  untuk setiap arah fiber. Dari grafik ini dapat disimpulkan bahwa nilai  $E_x$  menurun setiap peningkatan arah sudut fiber. Penurunan ini terjadi sampai sudut  $60^\circ$ , kemudian nilai  $E_x$  meningkat lagi sampai sudut  $90^\circ$ . Peningkatan nilai  $E_x$  ini disebabkan karena fiber dianggap bersifat isotropis, sehingga nilai modulus longitudinal fiber dan modulus transversal fiber dianggap sama.

Pada regangan 0.002, dapat dihitung nilai kuat tarik arah-x dengan mengalikan nilai modulus elastisitas dengan regangan arah-x. Gambar 4.8 menunjukkan penurunan nilai  $\sigma_x$  untuk setiap arah sudut fiber. Karakteristik persebaran  $\sigma_x$  identik dengan yang dimiliki  $E_x$ , sehingga peningkatan yang sama juga terjadi pada sudut  $60^\circ$  sampai  $90^\circ$ .





Gambar 4.7 Distribusi modulus elastisitas pada arah-x terhadap arah sudut fiber



Gambar 4.8 Distribusi kuat tarik arah-x pada regangan 0.002 terhadap arah sudut fiber

Analisa lebih lanjut dilakukan dengan menjumlahkan seluruh tegangan pada keseluruhan lembaran lamina. Dengan menganggap bahwa setiap lembaran memiliki ketebalan yang sama, maka analisa keseluruhan dapat dihitung dengan persamaan;

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(4.10)$$

Matriks N adalah matriks tegangan total dari komposit. Matriks ini dihubungkan dengan matriks A yang merupakan matriks modulus elastisitas total dari komposit. Komponen-komponen pada matriks A memenuhi persamaan;

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ijk} (z_k - z_{k-1}) \dots\dots\dots(4.11)$$

Faktor ketebalan spesimen dimasukkan dalam bentuk selisih batas lembaran  $z_k - z_{(k-1)}$ . Dengan mengacu pada Gambar 2.9, nilai ketebalan per-lamina dapat dihitung, sehingga komponen-komponen matriks A dapat diketahui.

Tabel 4.1 memperlihatkan hasil perhitungan dengan menggunakan MATLAB 7.0.1 untuk setiap lamina dan kuat mekanik total yang dibandingkan dengan hasil eksperimen uji tarik. Hasil perhitungan menggunakan asumsi bahwa serat *woven roving* memiliki penurunan kekuatan mekanik 37% dari serat *unidirectional*[7].

Perbedaan nilai modulus elastisitas dan kuat tarik pada regangan 0,2% ini disebabkan beberapa faktor. Perhitungan dengan menggunakan MATLAB 7.0.1 didasarkan pada asumsi bahwa fiber terdispersi secara ideal. Selain itu, asumsi dasar dari perhitungan tidak memperhitungkan adanya penumpukkan fiber dan penggumpalan matriks. Perhitungan ini juga didasarkan bahwa fiber tidak putus sepanjang spesimen. Ikatan antara permukaan fiber dan matriks juga dianggap ideal tanpa kehadiran pengotor, seperti molekul-molekul yang teroksidasi, debu, dan banyak lagi pengotor lainnya.

Tabel 4.1 Perbandingan sifat mekanik dari perhitungan dan eksperimen

| <b>Kuat Mekanik Komposit (<math>V_f=70\%</math>)</b> | Modulus Elastisitas (GPa) | Kuat tarik pada $\varepsilon=0.2\%$ (MPa) | Kuat tarik maksimum (MPa) |
|--|---------------------------|---|---------------------------|
| MATLAB $0^\circ$                                     | 54,36                     | 108,7                                     | 652,32                    |
| MATLAB $45^\circ$                                    | 19,34                     | 38,7                                      | 232,08                    |
| MATLAB Total longitudinal                            | 19,86                     | 48  | 288,89                    |
| MATLAB Total transversal                             | 19,86                     | 40,82                                     | 242,94                    |
| Eksperimen   | 15,18                     | 30,36                                     | 184,12                    |

Namun, pada spesimen yang dibuat dengan menggunakan metode VARI sederhana, parameter keadaan ideal tidak seluruhnya dipenuhi. Dalam pembuatan spesimen, pemberian resin dilakukan secara manual, sehingga dari proses ini, kemungkinan partikel-partikel pengotor untuk masuk ke dalam sistem komposit sangat besar. Walaupun pada langkah akhir dilakukan proses vakum untuk meratakan resin dan membuang pengotor, namun tekanan pompa vakum yang kurang kuat mungkin menyebabkan sebagian pengotor tidak terbuang dan menempel bersama spesimen.

Selain itu, ikatan permukaan antara matriks dengan fiber tidak ideal. Penggumpalan matriks atau fiber menyebabkan distribusi ikatan antara matriks dengan fiber tidak merata, sehingga pada arah transversal, terjadi perbedaan sebesar 25% antara hasil perhitungan dengan eksperimen. Tinjauan literatur mendapatkan hasil yang dapat diperbandingkan dengan eksperimen [18]. Nilai modulus elastisitas transversal dari tinjauan literatur adalah 22 GPa [7], di mana pada eksperimen didapatkan nilai modulus elastisitas adalah 15.18 GPa.

Spesimen yang telah dibuat, kemudian disinari dengan menggunakan sinar ultraviolet A dengan panjang gelombang 340nm. Penyinaran dilakukan selama 10

jam, 20 jam, dan 30 jam. Penyinaran ini mengakibatkan sebagian ikatan pada matriks terlepas sehingga mengurangi kekuatan mekanik komposit.

Dari hasil SEM pada Gambar 4.3, dapat dilihat bahwa terjadi penggumpalan resin di beberapa titik dekat permukaan fiber. Penggumpalan ini diduga akibat resin yang berubah menjadi radikal oksida dan bereaksi menjadi hidropersida yang reaksi selanjutnya menghasilkan air. Resin yang berubah ini menggumpal dan menurunkan adhesi fiber dengan resin. Penurunan adhesi ini menyebabkan komposit melemah pada arah vertikal dan sudut  $45^\circ$ .

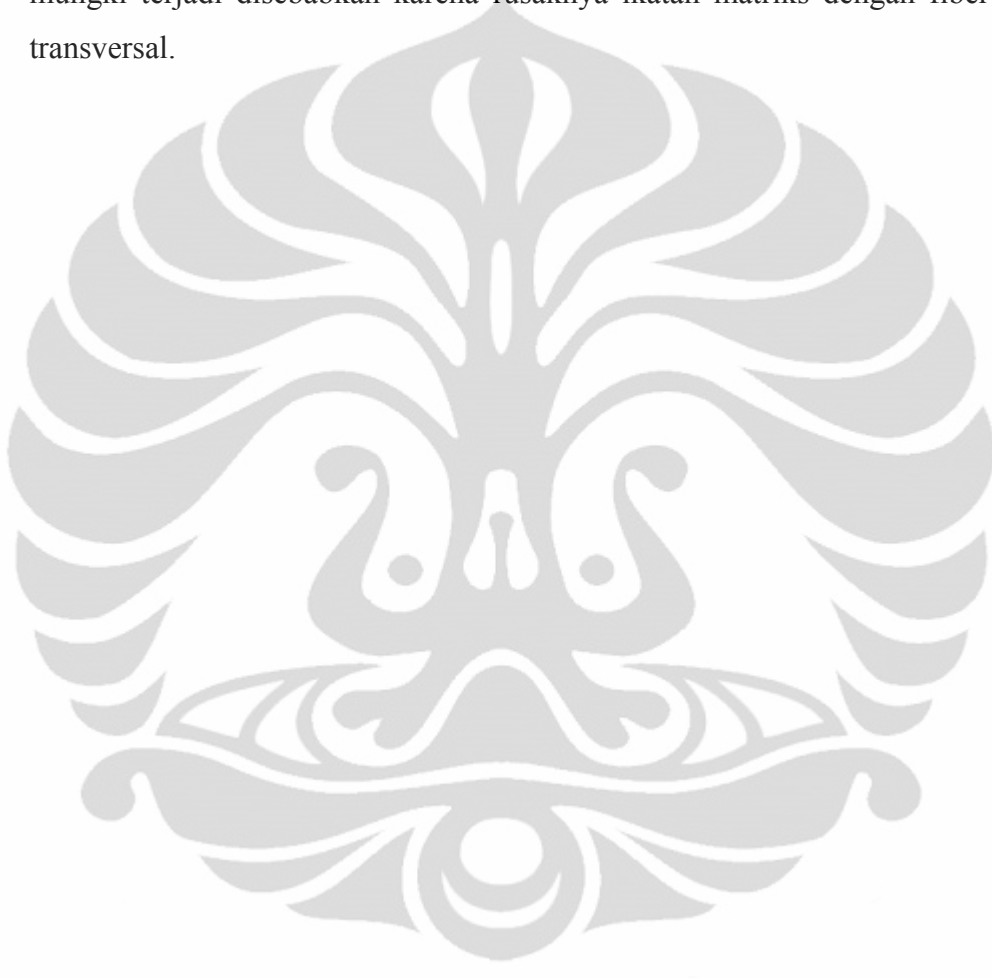
Penurunan kuat tarik dan modulus elastisitas dapat dianggap linier. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Roylance, penurunan ini diakibatkan berubahnya sebagian resin menjadi hidropersida dan reaksi *cross link* yang menyebabkan material menjadi lebih getas [10].

Energi ikat permukaan antara matriks dan fiber adalah faktor penting dalam pembuatan komposit untuk aplikasi sudu turbin angin. Turbin angin biasanya diletakkan di lapangan terbuka, baik itu pada daerah pantai atau dataran terbuka. Iklim Indonesia yang tropis dengan tingkat pencahayaan matahari yang banyak menyebabkan material yang akan diletakkan pada lapangan terbuka harus tahan terhadap penyinaran ultraviolet.

Hasil pembuatan material komposit dengan menggunakan metode VARI cukup representatif untuk dijadikan acuan pada desain sudu turbin angin. Material ini tahan terhadap penyinaran ultraviolet A sampai penyinaran 30 jam yang setara dengan kondisi luar di Panama selama 2 tahun [10]. Penurunan kuat tarik maksimum adalah sebesar 28.22%, sedangkan modulus elastisitas relatif tidak berubah.

Dari hasil perbandingan dengan eksperimen yang dilakukan Roylance, maka dapat diperkirakan bahwa material yang dibuat dengan metode VARI sederhana dapat mempertahankan kuat tarik maksimumnya sampai 50% setelah 46 bulan atau 3 tahun 6 bulan penyinaran pada lingkungan berkarakteristik seperti di Panama.

Penurunan ini masih dapat diterima jika sudu turbin angin diletakkan di lapangan terbuka di dataran Jawa dan pulau-pulau lain yang mempunyai tingkat pencahayaan yang tinggi. Perbaikan-perbaikan pada material nantinya harus difokuskan pada ikatan antara matriks dan fiber. Kerena kerusakan yang paling mungki terjadi disebabkan karena rusaknya ikatan matriks dengan fiber pada arah transversal.



## **BAB 5**

### **PENUTUP**

Setelah dilakukan pembuatan material komposit dengan bahan Epoxy RENLAM M1 dan hardener REN HY 956 sebagai matriks, serta woven roving E-Glass sebagai fiber menggunakan metode VARI sederhana, didapatkan material komposit dengan spesifikasi yang kuat mekaniknya mendekati nilai perhitungan dan nilai acuan referensi. Pengujian dan analisa dilanjutkan dengan melakukan uji penyinaran menggunakan sinar ultraviolet A ( $\lambda=340$  nm). Setelah penyinaran, spesimen kemudian diuji tarik sehingga didapatkan penurunan kekuatan tarik maksimum setelah penyinaran.

#### **5.1 Kesimpulan**

Material yang dibuat menggunakan metode VARI sederhana mempunyai karakteristik mekanik yang hasilnya mendekati nilai perhitungan dan nilai acuan referensi. Perbedaan modulus elastisitas dan kuat tarik komposit antara hasil perhitungan dan eksperimen adalah 25% untuk. Perbedaan nilai sebesar 25% masih dapat diterima jika penggunaan material ini nantinya digunakan untuk sudu turbin dengan ukuran sudu yang kecil, misalnya dengan panjang 3 meter yang mungkin digunakan pada pembangkit listrik di desa-desa terpencil. Perbedaan kuat mekanik yang didapatkan dalam eksperimen terhadap hasil perhitungan menunjukkan bahwa metode VARI sederhana yang digunakan dalam proses pembuatan masih perlu disempurnakan untuk menghindari efek kehadiran pengotor dan penumpukkan resin atau fiber.

Hasil pengujian dengan penyinaran ultraviolet A, dan uji tarik setelah penyinaran dilakukan analisa penurunan kekuatan mekanik dari material, kesimpulan

Penyinaran menggunakan ultraviolet A dengan energi 352 kJ/mol berkemungkinan memutuskan ikatan C-H pada rantai epoxy yang hanya mempunyai energi disosiasi sebesar 339kJ/mol. Pemutusan ikatan ini berlangsung seiring penyinaran. Kemungkinan terjadi cross-link yang membuat spesimen berubah warna sebanding dengan lama penyinaran. Hal ini dapat terlihat dari spesimen yang disinari 30 jam yang mempunyai perubahan warna terbesar

Penurunan kekuatan mekanik pada spesimen yang disinari dengan ultraviolet A menunjukkan disebabkan oleh produk hasil cross-link pada matriks. Reaksi ini menyebabkan material matriks menjadi lebih getas, sehingga mempengaruhi kekuatan mekanik material. Penurunan kekuatan mekanik yang terjadi adalah penurunan kuat tarik maksimum sebesar 28,22% setelah penyinaran 30 jam. Sementara, modulus elastisitas relatif tidak berubah. Dari hasil analisa kuat tarik, maksimum, material ini diperkirakan akan mencapai kerusakan sebesar 50% pada penyinaran selama 42 bulan atau 3 tahun 6 bulan.

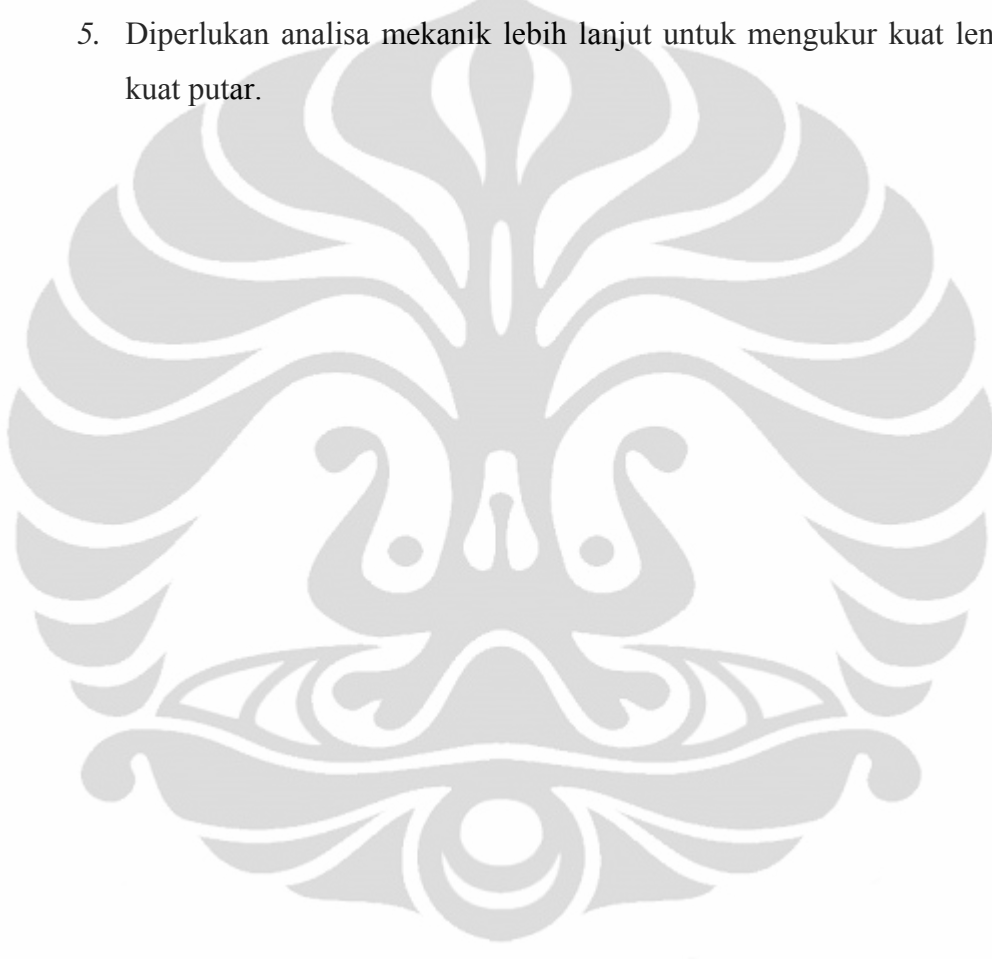
## 5.2 Saran

Setelah melakukan pembuatan material, pengujian, dan proses analisa, maka ada beberapa evaluasi untuk metode VARI sederhana dalam pembuatan material komposit untuk sudu turbin angin :

1. Pembuatan material sebaiknya dilakukan pada suhu dan tekanan standar yaitu  $25^{\circ}$  dan tekanan 1atm untuk menjaga kestabilan atmosfer. Selain itu lingkungan pembuatan harus lebih steril. Untuk mendapatkan ini, pembuatan selanjutnya dapat dilakukan dalam suatu ruangan laboratorium khusus yang steril.
2. Dengan adanya pelemahan pada arah transversal, diperlukan penambahan serat pada arah  $90^{\circ}$ . Cara yang paling ekonomis mungkin dapat dilakukan

dengan penambahan serat *fabric cross-link* [0/90] di antara lembaran *woven roving*.

3. Diperlukan penambahan lapisan pelindung ultraviolet.
4. Diperlukan analisa mikroskopik lebih lanjut dengan menggunakan *laser pyrolysis* pada sistem komposit.
5. Diperlukan analisa mekanik lebih lanjut untuk mengukur kuat lengkung dan kuat putar.





## DAFTAR ACUAN

- [1] William A. Edelstein, 2008, Rensselaer Polytechnic Institute, New York, *Wind Energy* . [http://www.aps.org/policy/reports/occasional/upload/wind\\_energy.pdf](http://www.aps.org/policy/reports/occasional/upload/wind_energy.pdf) 12 April 2010, 12:30.
- [2] A. Goren, C. Atas, 2008, *Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding*, [http://www.archivesme.org/vol\\_34/2/34210.pdf](http://www.archivesme.org/vol_34/2/34210.pdf). 10 April 2010, 10:00
- [3] William D. Callister, Jr. 2001. Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*.
- [4] Courtney, T. H. 2000. McGraw-Hill, Boston, *Mechanical Behavior of Materials*.
- [5] Norhidayah Rasin. 2009. Universiti Teknologi Malaysia, *Normalized Transverse Modulus and Constitutive Equation of Symmetrical Fiber Reinforced Composite Laminates*.
- [6] George Z. Voyiadjis and Peter I. Kattan. 2005. Springer, Berlin, *Mechanics of Composite Materials with MATLAB*.
- [7] Valery V. Vasiliev. 2001. ELSEVIER SCIENCE Ltd. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, *Mechanics and Analysis of Composite Materials*.
- [8] <http://www.plasticmag.com/welding.asp?fIssue=Mar/Apr-02&aid=3501>, 16 Juni 2010, 09:30.
- [9] Liesl K. Massey. 2007. William Andrew, Inc, U.S.A, *The Effects of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers : Second Edition*

[10] David Roylance and Margaret Roylance. 1978. Polymer Engineering and Science, vol 18, no. 4 ; *Weathering of Fiber-Reinforced Epoxy Composites*.

[11] Thomas Lundin, et all. 2004. Journal of Materials in Civil Engineering, *Accelerated Weathering of Natural Fiber-Filled Polyethylene Composites*.

[12] Patrick E. Mack, CCT and Mitchell D. Smith. 2003. Verdant Technologies, Inc, Rhode Island, *Advanced in Vacuum Infusion Processing Using Spacer Fabrics as Engineered Reinforcing Interlaminar Infusion Media*.

[13] Henrik Stiesdal. 1999. BONUS ENERGY A/S, USA, *The Wind Turbine Component and Operation*.

[14] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. 2008. Pusat Teknologi Material-BPPT, Jakarta, *Laporan Hasil Uji Tarik, Geser, Lengkung, dan Tekan Statis Spesimen FRP*.

[15] J.Myalski. 2005. Department of Alloys and Composite Materials Technology, Faculty of Materials Science and Metallurgy, Silesian University of Technology, Poland, *Properties of Laminates Containing Polymer Glass Fiber Recyclates*.

[16] <http://www.epoxyhardnersanddilutents.com/epoxy-hardeners.html> 16 Juni 2010, 13:00

[17] [http://www.absoluteastronomy.com/topics/Fusion\\_bonded\\_epoxy\\_coating](http://www.absoluteastronomy.com/topics/Fusion_bonded_epoxy_coating) 16 Juni 2010, 12:00

[18] Gay Suong V, Hoa Stephen, W. Tsai. 2003, CRC Press LLC, *Composite Materials Design and Applications*.