

# Karakteristik Lelah Chopped Strand Mat/Polyester Composite

I Made Astika

Jurusan Teknik Mesin, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Badung  
e-mail: made.astika@me.unud.ac.id

---

## Abstrak

Komposit sebagai pengganti metal mempunyai keuntungan antara lain ringan, tahan korosi, umur lelah panjang dan memiliki sifat elastisitas yang tinggi. Banyak komponen dalam aplikasinya akan mengalami jutaan tegangan bolak-balik yang akan menyebabkan kelelahan pada material sehingga terjadi kerusakan seperti retak, delaminasi dan patah. Kekuatan komposit dipengaruhi oleh bentuk konstruksi, orientasi dan jenis serat serta perbandingan fraksi serat dalam komposit. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik lelah pada komposit dengan serat WR dan CSM. Bentuk konstruksi serat yang digunakan dalam penelitian ini adalah chopped strand mat dengan matriks Yukalac 157 BQTN-EX. Proses pembuatan komposit dengan teknik press hand lay-up. Fraksi volume serat dalam komposit adalah 40, 32 dan 24 %. Pengujian yang dilakukan adalah uji tarik dan uji fatik. Dari hasil penelitian terlihat bahwa bertambahnya fraksi volume serat dalam komposit menyebabkan naiknya umur lelah, batas lelah dan kekuatan tarik. Mode kegagalan lelah yang teramati secara makro adalah lepasnya serat dengan matriks (debonding), retaknya matriks (matrix cracking), terpisahnya lamina/delaminasi dan patah serat (fiber breaking)

Kata kunci: Komposit, chopped strand mat/polyester, karakteristik lelah

## Abstract

# Fatigue Characteristic of Chopped Strand Mat/Polyester Composite

The application of composite as an alternatif material to substitute of metal has better properties than metal such as light, high elasticity, corrosion and fatigue resistance. Some components in its application are subjected to millions of varying stress cycles that initiated to fatigue failure such as crack, delamination and fracture. The strength of composite is influenced by construction, fiber type, orientation and fiber fraction. The objective of this experiment is to investigate the fatigue characteristic on SCM composite. Material composite to be used is glass fiber with chopped strand mat (CSM) as fiber and Yukalac 157 BQTN-EX with 1% hardener (Mexpox) as matrix. The mold process was built with hand lay-up. Fiber volume fractions in composite are 40, 32 and 24 %. The tests to be done on composite are fatigue and tensile test. The research show that the increasing of fiber fraction in composite affects increasing of fatigue life, endurance limit and tensile strength. Fatigue failure modes of composite are debonding, matrix cracking, delamination and fiber fracture.

Keywords: Composite, Chopped strand mat/polyeste, Fatigue characteristic.

---

## 1. Pendahuluan

Penggunaan bahan komposit sebagai alternatif pengganti bahan logam dalam bidang rekayasa semakin meluas, tidak hanya sebagai panel di bidang transportasi tetapi juga pada bidang lainnya seperti properti dan arsitektur. Hal ini disebabkan karena keuntungan yang dimiliki oleh bahan komposit seperti konstruksi menjadi lebih ringan, tahan korosi dan kekuatannya dapat didesain sesuai dengan arah pembebanan.

Banyak komponen/peralatan seperti pegas daun, sudu turbin dan komponen pesawat terbang dalam aplikasinya akan mengalami beban dinamis. Beban yang berulang-ulang dengan frekwensi tertentu ini dapat menyebabkan terjadinya kegagalan lelah seperti terjadinya retak, delaminasi dan patah. Batas lelah, umur lelah dan jenis/mode kegagalan lelah suatu material yang digunakan pada suatu peralatan perlu diperhatikan agar dalam

penggunaannya tidak terjadi kegagalan material yang dapat mengakibatkan kecelakaan fatal.

## 2. Dasar Teori

Komposit dapat didefinisikan sebagai suatu material yang terdiri dari dua atau lebih material penyusun yang sifatnya sangat berbeda, dimana satu material sebagai fasa pengisi (*matrix*) dan yang lainnya sebagai fasa penguat. Dengan penggabungan tersebut didapat material yang sifatnya lebih baik dari material tunggal penyusunnya. Pada komposit dapat terbentuk *interphase* yaitu fasa di antara fasa matrik dan penguat yang dapat timbul akibat interaksi kimia dan efek dari proses produksi.

Dengan semakin berkembangnya teknologi komposit, memungkinkan komposit dapat didesain sedemikian rupa sesuai dengan karakteristik material yang diinginkan sehingga dapat dibuat menjadi lebih kuat, ringan, kaku, dan lebih tahan panas. Dengan

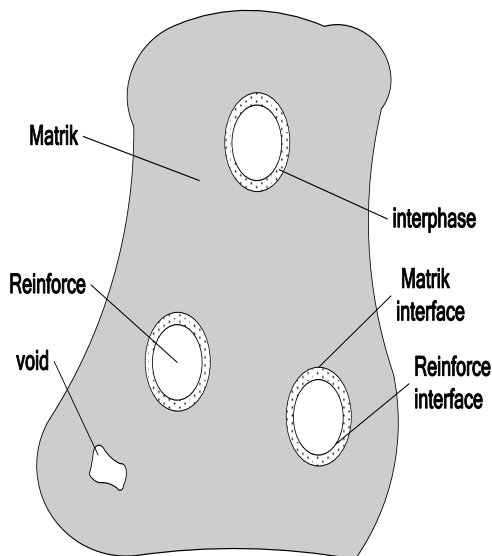
beberapa kelebihan tersebut, menyebabkan komposit banyak diaplikasikan dalam peralatan-peralatan berteknologi tinggi di bidang industri, transportasi, dan konstruksi bangunan.

### 2.1.1. Matriks

Dalam teknologi komposit, matriks dapat didefinisikan sebagai suatu material yang berfungsi sebagai pengisi dan pengikat yang mendukung, melindungi dan dapat mendistribusikan beban dengan baik ke material penguat komposit.

Berdasarkan fasa pengisi (*matrix*), komposit dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu:

1. PMC (*Polymers Matrix Composite*)  
Merupakan komposit yang menggunakan material polymer sebagai fasa pengisi (*matrix*). Contohnya: Fiberglass (GFRP) dan polymer diperkuat serat karbon (CFRP).
2. CMC (*Ceramics Matrix Composite*)  
Merupakan komposit yang menggunakan material keramik sebagai fasa pengisi (*matrix*). Contohnya: Carbon/ Gelas, Boron/SiC.
3. MMC (*Metals Matrix Composite*)  
Merupakan komposit yang menggunakan material logam (*metal*) sebagai pengisi (*matrix*). Contoh: Carbon/Aluminium, boron/Aluminium.



Gambar 1. Fasa - fase dalam komposit

### 2.1.2. Penguat

Penguat (*reinforce*) dalam teknologi komposit dapat didefinisikan sebagai suatu material yang berfungsi sebagai penguat utama yang memiliki sifat lebih kuat dari fasa pengisi (*matrix*) dan merupakan suatu konstruksi / rangka tempat melekatnya matriks.

Berdasarkan bentuk dari fasa penguatnya, komposit dapat dibagi menjadi tiga jenis yaitu:

1. FRC (*Fiber Reinforced Composite*), merupakan komposit yang fasa penguatnya berupa serat, contohnya: serat gelas dalam matriks polymer

(GFRP) dan serat karbon dalam matrik polymer (CFRP).

2. LRC (*Laminar Reinforced Composite*), merupakan komposit yang fasa penguatnya berupa lapisan (*laminat*), contohnya: Plywood.
3. PRC (*Particels Reinforced Composite*), merupakan komposit yang fasa penguatnya berupa partikel contohnya: Beton, merupakan bahan bangunan yang terbentuk dari kerikil dan pasir dalam matriks semen.

## 2.2. Komposit Berpenguat Serat Gelas (GFRP)

Komposit berpenguat serat gelas atau yang dalam teknologi komposit disebut *GFRP* digolongkan sebagai komposit yang menggunakan polymer sebagai matriks dan serat gelas sebagai penguat (PMC – FRC). Umumnya *GFRP* terdiri dari *unsaturated* resin polyester (UPRs) sebagai matriks, katalis atau pengeras, dan serat glass sebagai penguat. Untuk kebutuhan yang lebih spesifik dapat ditambahkan dengan material *additive*.

### 2.2.1. Polymer

Polymer berasal dari kata *poly* yang berarti banyak dan *mer* (*meros*) yang berarti bagian. Jadi polymer dapat didefinisikan sebagai suatu material yang molekulnya dibentuk dari beberapa bagian (*monomer*). Umumnya polymer terbentuk dari hidrokarbon dimana atom karbon (C) sebagai tulang punggung dalam rantai ikatan kimianya.

Berdasarkan sifatnya polymer dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu:

1. Polymer Thermoplastik, merupakan polymer yang dapat dibentuk kembali (*recycleable*) melalui proses pemanasan, contoh: Polyvinyl Chloride (PVC), Polyethylene (PE).
2. Polymer Thermoseting, merupakan polymer yang tidak dapat dibentuk kembali dengan proses pemanasan seperti halnya polymer thermoplastik, contoh: Polyester, Phenolic (PF).
3. Elastomer, merupakan polymer yang dapat kembali ke bentuk asal setelah tegangan yang diberikan dihilangkan, contoh: karet.

### 2.2.2. Serat

Dalam teknologi komposit, serat dapat didefinisikan sebagai suatu material yang memiliki perbandingan panjang lebih dari 100 kali dari diameternya, dengan panjang minimum 5 mm dan diameter  $2 - 13 \times 10^{-6}$  m. Serat dapat berupa serat panjang (*filamen*) atau serabut pendek (*staple*). Serat juga dapat berupa serat organik yang diperoleh dari alam dan serat sintetik yang sengaja dibuat dari berbagai senyawa kimia.

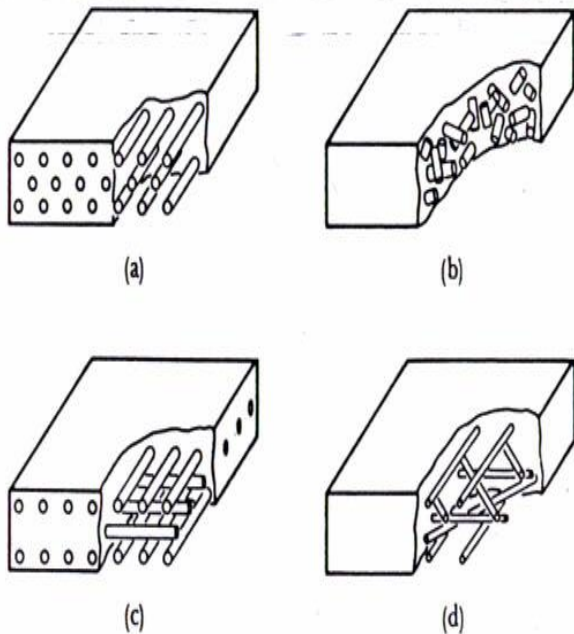
Serat gelas yang digunakan dalam *GFRP* merupakan serat sintetik yang dibuat dari bahan dasar silikon oksida ( $\text{SiO}_2$ ). Berdasarkan karakteristik dan fungsinya serat gelas dapat dibagi menjadi tiga jenis yaitu :

1. *E-class*, merupakan serat gelas yang didesain untuk peralatan-peralatan elektronik dan peralatan umum lainnya yang membutuhkan sifat isolator dan konduktifitas thermal yang rendah. Serat jenis ini paling banyak digunakan karena harganya relatif lebih murah.
2. *S-class*, merupakan serat gelas yang didesain khusus untuk peralatan yang membutuhkan kekuatan dan ketahanan terhadap panas yang tinggi.
3. *C-class*, merupakan serat gelas yang didesain khusus untuk peralatan yang membutuhkan ketahanan terhadap korosi yang tinggi.

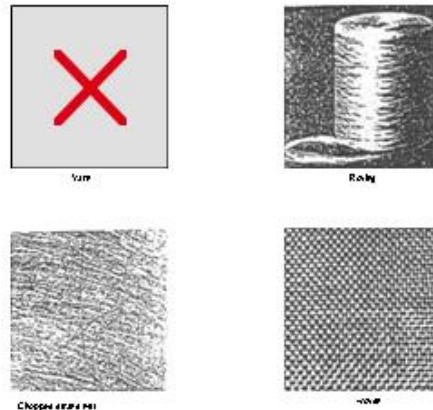
Dalam penggunaannya pada komposit sebagai penguat, serat dapat dibentuk dan disusun dengan beberapa orientasi yaitu : (a). *Unidirectional*, (b). *Random*, (c). *Layered bidirectional*, dan (d). *Layered multidirectional*.

### 2.2.3. Bentuk konstruksi serat

Serat gelas umumnya dibentuk berupa serat panjang kontinu (*yarn*), kumpulan serat yang panjang kontinyu (*roving*), kumpulan serat pendek dengan orientasi acak (*chopped strand mat*), dan serat panjang kontinu yang disusun seperti anyaman / kain (*woven roving*).



Gambar 2. Bentuk orientasi serat



Gambar 3. Bentuk konstruksi serat

### 3. Metode

Penelitian ini menggunakan bentuk konstruksi serat *Chopped Strand Mat* (CSM 450). Variasi fraksi serat dalam komposit dengan perbandingan volume antara matriks dan serat adalah 0,60 : 0,40 ; 0,68 : 0,32 ; 0,76 : 0,24.

Laminat dibuat dengan arah serat  $0^0/90^0$  sebanyak 6 lapis. Kode untuk laminat ini adalah  $[0/90/0/90/0/90]_6$  atau bisa ditulis  $[0^0]_6$ .

Tabel 1. Tebal komposit untuk masing-masing variasi

	Fraksi volume (matrik: fiber)	Fraksi berat (matrik: fiber)	Tebal fiber (mm)	Tebal resin (mm)	Tebal lamina (mm)	6 lapis (mm)
C	60 : 40	0,72 : 1	0,176	0,264	0,44	2,640
S	68 : 32	1 : 1	0,176	0,370	0,546	3,276
M	76 : 24	1,5 : 1	0,176	0,556	0,732	4,392

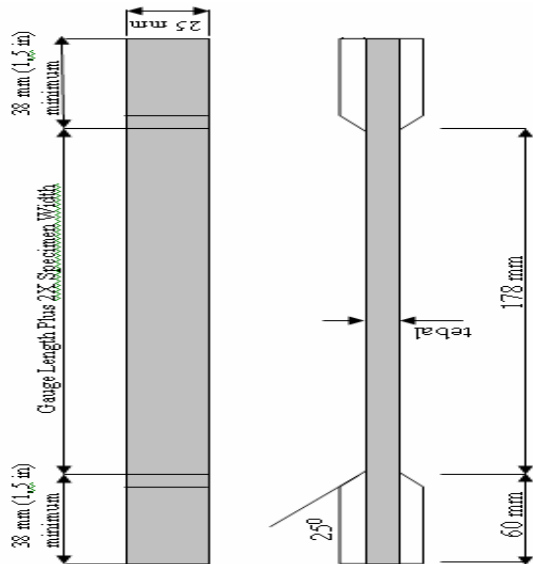
Proses pembuatan komposit sebagai berikut:

1. Sebelum proses pencetakan, cetakan dilapisi dengan gliserin secara tipis dan merata. Kemudian ditempatkan bingkai cetakan dengan tebal yang sesuai dengan tebal komposit yang akan dibuat.
2. Serat dipotong dan ditimbang sesuai dimensi cetakan
3. Resin ditimbang dengan perbandingan berat 1 : 1,5, 1 : 1 dan 1 : 0,72. Campuran resin yang digunakan dibuat dengan menambahkan *hardener* 1% dari volume resin dan diaduk secara merata.
4. Resin dituang ke dalam cetakan dan diratakan dengan kuas
5. Serat diletakkan diatas resin dan diratakan dengan roler. Untuk memperoleh homogenitas dan kekuatan yang baik, serat harus terbasahi secara sempurna oleh resin.
6. Langkah 4 dan 5 diulang sampai diperoleh 6 lamina

7. Cetakan ditutup dengan cetakan bagian atas dan diberi beban atau sisi-sisinya dijepit dengan binder penjepit
8. Komposit dibiarkan dalam cetakan selama satu hari
9. Komposit dilepas dari cetakan
10. Pengamatan komposit hasil cetakan
11. Setelah komposit berhasil dicetak dengan baik, dilanjutkan dengan pembuatan spesimen uji fatik dan uji tarik

**3.1. Spesimen Uji Tarik**

Pembuatan spesimen uji tarik mengikuti standar dari “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials” D 3039-76 dari *America Society for Testing and Material* (ASTM). Bentuk dan ukuran spesimen uji tarik adalah seperti gambar berikut.

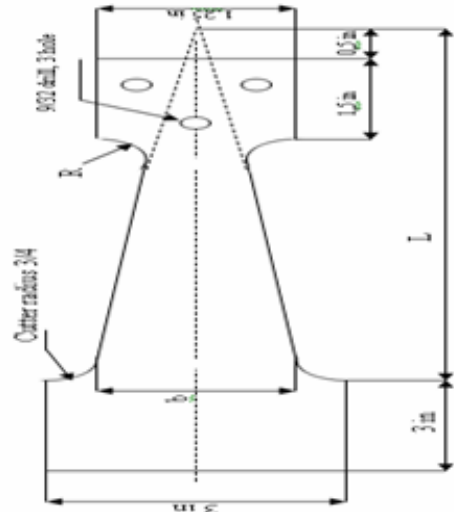


**Gambar 4. Spesimen uji tarik**

Uji tarik ini dilakukan untuk mendapatkan sifat mekanis dari material yang digunakan baik tegangan maksimum (*ultimate strength*) maupun tegangan luluh (*yield strength*). Tujuannya agar respon yang didapat dari pengujian tarik dapat digunakan dalam penentuan defleksi pada mesin uji lelah *reversed bending*.

**3.2. Spesimen Uji Fatik**

Pembentukan spesimen uji lelah berdasarkan standard yang telah ditetapkan pada *Instruction Manual Model LFE 150, Fatigue Dynamics, Inc Dearborn, Michigan*. Bentuk spesimen uji fatik adalah  $L = 150 \text{ mm}$  dan  $b = 50 \text{ mm}$ .



**Gambar 5. Spesimen uji fatik**

Mesin yang digunakan untuk pengujian lelah adalah mesin *reversed bending type LFE-150*. Pengujian dilakukan sampai material patah dengan pembebanan yang bervariasi yaitu  $0,8 \sigma_u$ ,  $0,6 \sigma_u$ ,  $0,4 \sigma_u$ , dan  $0,2 \sigma_u$ .

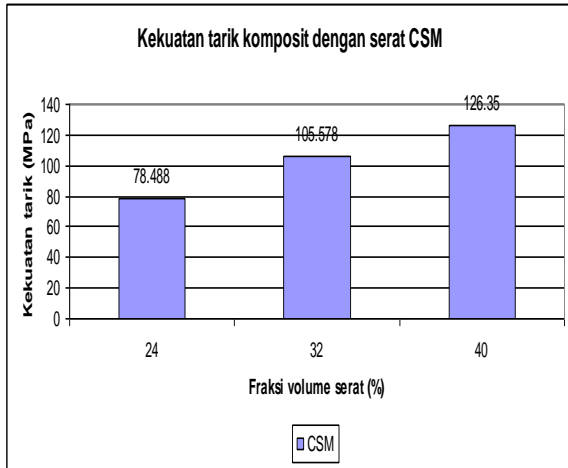
**4. Hasil dan Pembahasan**

**4.1. Hasil Uji Tarik**

Hasil pengujian tarik yang dilakukan berdasarkan standar ASTM D 3039-76 seperti ditampilkan pada tabel berikut:

**Tabel 2. Hasil uji tarik komposit dengan bentuk serat CSM**

Serat	Perbandingan (matriks/serat)	P(N)	$\sigma$ (MPa)
		8703.49	126.91
		8401.05	124.46
	60/40	8688.60	128.72
		8912.05	125.31
C			<b>126.350</b>
		8512.76	101.56
S	68/32	8739.23	105.93
		8974.35	108.78
M		8869.19	106.04
			<b>105.577</b>
		8215.19	77.98
	76/24	8156.03	75.87
		8562.38	79.65
		8648.38	80.45
			<b>78.488</b>

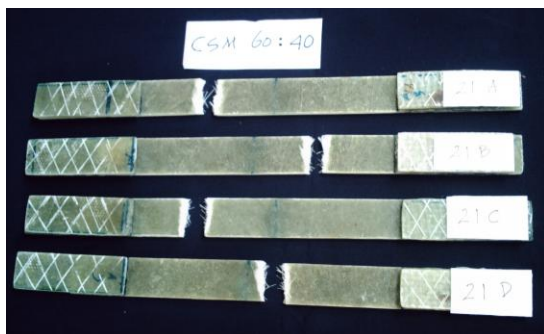


**Gambar 6. Grafik hubungan kekuatan tarik dengan fraksi serat dalam komposit**

Dari hasil uji tarik diketahui bahwa setiap spesimen dalam satu variabel (perbandingan matriks/serat) mempunyai harga beban maksimum yang berbeda. Hal ini kemungkinan disebabkan karena adanya gelembung udara yang terperangkap pada saat proses lay-up sehingga kekuatan komposit berkurang.

Selanjutnya didapatkan kekuatan tarik maksimum rata-rata dari setiap perbandingan yaitu semakin besar fraksi serat, kekuatan tarik komposit semakin besar pula. Hal ini dapat dijelaskan bahwa fungsi serat adalah sebagai penguat (*reinforced*) dan serat mempunyai kekuatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan matriks. Pada fraksi serat yang besar, maka serat akan menahan semua beban yang bekerja setelah matrik pecah/patah. Sedangkan pada fraksi serat yang kecil serat tidak dapat menahan beban lebih dan secara bersamaan dengan matriks akan mengalami kepatahan/putus. Sehingga semakin besar fraksi serat dalam komposit maka kekuatannya akan semakin besar.

Dengan peningkatan fraksi volume serat dari 24% menjadi 32% terjadi peningkatan kekuatan tarik sebesar 25,7%. Dan pada peningkatan fraksi volume serat dari 32% menjadi 40% diperoleh peningkatan kekuatan tarik sebesar 16,44%.



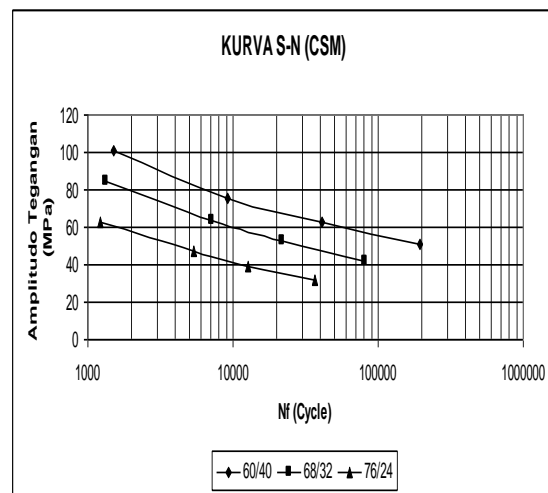
**Gambar 7. Spesimen setelah uji tarik**

**4.2. Hasil Uji Fatik**

Uji fatik dilakukan untuk mendapatkan karakteristik lelah dari komposit yaitu umur lelah, batas lelah (*endurance limit / fatigue limit*) dan mode kegagalan lelah atau jenis kerusakan yang terjadi. Tingkat tegangan yang diberikan adalah  $0,8 \sigma_u$ ,  $0,6 \sigma_u$ ,  $0,5 \sigma_u$  dan  $0,4 \sigma_u$ . Semua hasil yang didapatkan diplotkan dalam grafik tegangan-umur lelah (S-N Kurva). Dari hasil pengujian didapatkan data seperti pada tabel berikut:

**Tabel 3. Hasil uji fatik komposit dengan serat csm**

Serat	Perbandingan	$\sigma$	(MPa)	Defleksi (mm)	Sa (Ksi)	Umur lelah (Cycle)
C	60/40	0.8	$\sigma_u = 101.08$	27	14.66	1500
		0.6	$\sigma_u = 75.81$	20	11.00	9140
		0.5	$\sigma_u = 63.175$	17	9.16	40800
		0.4	$\sigma_u = 50.54$	14	7.33	194200
S	68/32	0.8	$\sigma_u = 84.462$	23	12.25	1320
		0.6	$\sigma_u = 63.347$	17	9.19	7160
M	76/24	0.5	$\sigma_u = 52.789$	14	7.66	21820
		0.4	$\sigma_u = 42.231$	12	6.13	81080
		0.8	$\sigma_u = 62.79$	16	9.11	1220
		0.6	$\sigma_u = 47.093$	12	6.83	5400
		0.5	$\sigma_u = 39.244$	10	5.69	12640
		0.4	$\sigma_u = 31.395$	8	4.55	36680



**Gamabr 8. Kurva S-N untuk komposit dengan serat CSM**

Dari data yang diperoleh tampak bahwa umur lelah semakin tinggi dengan bertambahnya fraksi serat dalam komposit. Hal ini disebabkan karena kemampuan serat menerima fluktuasi tegangan tarik dan tekan dalam matriks komposit.

Patah lelah pada komposit diawali oleh adanya pengintian retak yang disebabkan oleh cacat pada bahan seperti adanya kantong udara (*void*).

Nukleasi retak ini akan menyebabkan terbentuknya retak awal yang selanjutnya akan merambat sedikit demi sedikit pada setiap siklus pembebanan dan akan menghasilkan keretakan yang semakin lama semakin besar. Dengan rusaknya /pecahnya matriks maka kekuatan komposit akan berkurang yang selanjutnya akan menyebabkan kepatahan. Dengan semakin tinggi fraksi serat yang berarti kekakuannya lebih tinggi, maka transfer regangan dari serat ke matriks akan lebih kecil. Dengan demikian perambatan retak akan diperlambat sehingga rusaknya serat atau patah serat akan memerlukan waktu yang lebih lama. Oleh karena itu, semakin tinggi fraksi serat maka semakin tinggi pula kemampuan komposit menerima tegangan lelah.

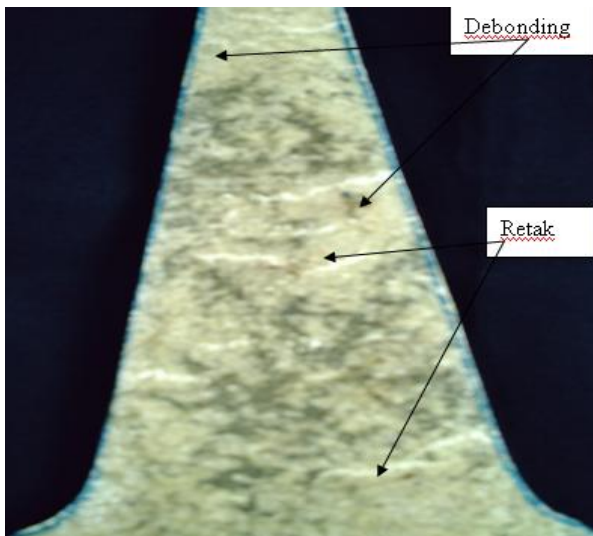
**4.3. Batas lelah**

Batas lelah (*endurance limit/fatigue limit*) dinyatakan sebagai besar tegangan kerja yang menghasilkan umur lelah tak terhingga. Pada material komposit (E-glass/epoxy) dengan R= 0,1, batas lelah adalah setelah siklus mencapai  $2 \cdot 10^6$  pada tegangan 60 Ksi. Dengan menggunakan kurva S-N dapat dicari besarnya tegangan yang menghasilkan umur lelah  $2 \cdot 10^6$  siklus.

**Tabel 4. Batas lelah komposit berpenguat serat gelas dengan base  $2 \cdot 10^6$  cycle**

Bentuk konstruksi serat	Perbandingan matriks : serat	Tegangan (MPa)
CSM	60 : 40	38
	68 : 32	29
	76 : 24	12

Gambar 9 memperlihatkan spesimen uji fatik setelah mencapai siklus  $2 \cdot 10^6$ . Pada gambar 8 terlihat lepasnya ikatan antara matriks (*debonding*) dan adanya retakan pada matriks.

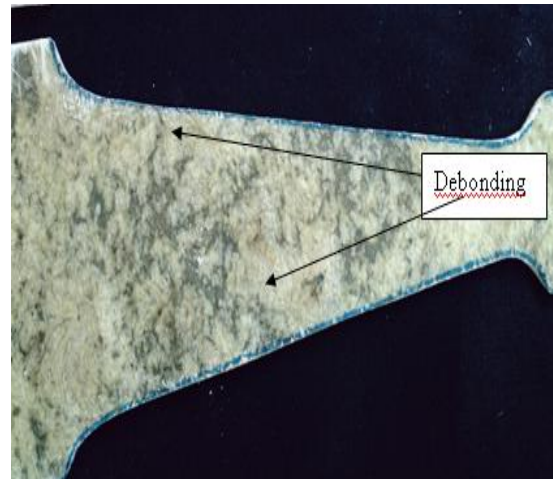


**Gambar 9. Sspesimen setelah uji fatik pada tegangan 38 mpa , siklus  $2 \cdot 10^6$**

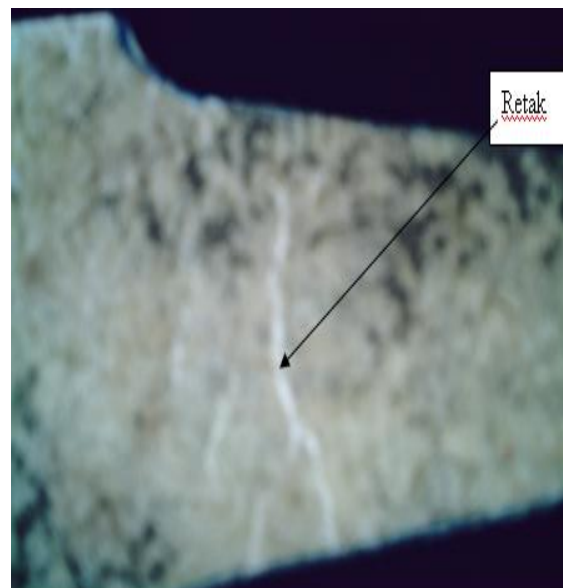
**4.4 Mode kegagalan lelah pada komposit**

Dari hasil pengamatan secara visual pada proses pengujian, tampak pada permukaan spesimen pola kerusakan yang terjadi diawali dengan lepasnya serat lamina matriks atau biasa disebut *debonding* pada lapisan terluar. Seiring dengan lamanya tegangan fluktuasi yang diberikan kerusakan berlanjut dengan terjadinya keretakan matriks (*matrix crack*) pada permukaan spesimen, yang dilanjutkan dengan lepasnya ikatan antar lamina / delaminasi. Adanya delaminasi ini tampak pada tepi ketebalan spesimen uji. Mode kegagalan terakhir yang teramati pada spesimen uji adalah patah serat, dan ini merupakan kriteria dimana material komposit dianggap gagal.

Jenis kerusakan pertama yang teramati adalah lepasnya ikatan antara serat dan matriks (*debonding*). Pada fraksi volume serat yang lebih rendah, *debonding* terjadi pada siklus yang lebih rendah.



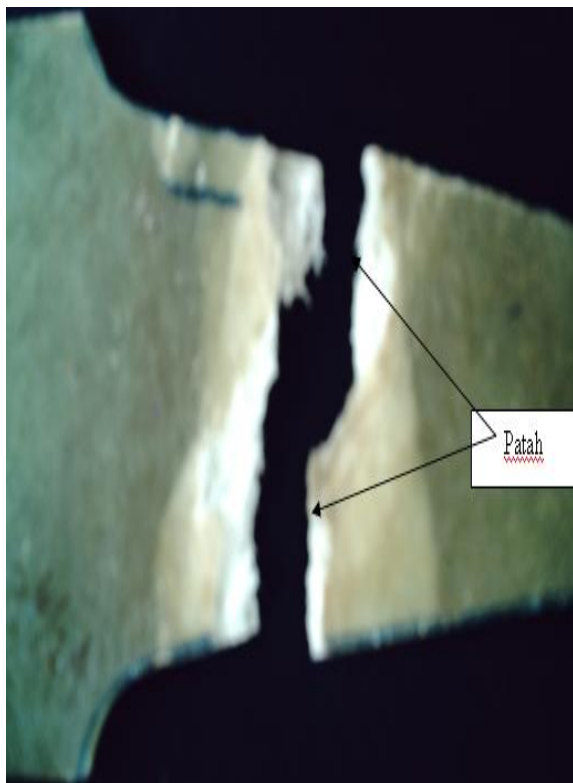
**Gambar 10. Debonding pada spesimen uji**



**Gambar 11. Rretak pada spesimen uji**



Gambar 12. Delaminasi pada spesimen uji



Gambar 13. Patah serat pada spesimen uji

## 5. Kesimpulan

1. Semakin besar fraksi volume serat dalam komposit akan menghasilkan kekakuan yang semakin tinggi sehingga akan meningkatkan kekuatan tarik, kekuatan lelah dan batas lelah.
2. Mode kegagalan lelah yang terjadi adalah: terlepasnya serat dari matriks (*debonding*), keretakan matriks (*matrix cracking*), terpisahnya lamina / delaminasi dan terputusnya serat (*fiber breaking*). Semakin besar fraksi volume serat, mode kegagalan lelah tersebut terjadi pada siklus yang lebih tinggi.

## Daftar Pustaka

- [1] Chawla, Krishan Kumar., 1987, *Composite Materials Science and Engineering*. Springer – Verlag, New York.
- [2] Daniel, Issac M, dan Ori Ishai., 1994, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press,inc, 200 Madison Avenue, New York.
- [3] D 3039-76., 1990, *Standard Test Method for Tensile Properties of Fibre Resin Composite*. ASTM Standard and Literature References for Composites Material, 2<sup>ed</sup>., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- [4] Freire, R. C. C. Jr., Aquino, E. M. F., 2005, *Fatigue Damage Mechanism and Failure Prevention in Fiberglass Reinforced Plastic*. Material Research, Vol 8, No. 1, pp. 45-49
- [5] Gdoutos, E. E., Pilakoutas, K., Rodopoulos, C. A., 2000, *Failure Analysis of Industrial Composite Materials*. Profesional Engineering Mc Graw-Hill
- [6] Indrawan, W. A., 1997, *Pengaruh Perbedaan Fraksi Volume Terhadap Kekuatan Lelah Woven Roving Glass/Epoxy*. Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin, ITS
- [7] Instruction Manual Model LFE-150. *Variable Speed Life, Fatigue and Endurance Testing Machine*. Fatigue Dynamics, Inc. P.O Box 2533, Dearborn, Michigan 48123
- [8] Paepegen, W. V., Degrieck, J., 2005, *Simulating Damage and Permanent Strain in Composites Under In-Plane Fatigue Loading*, International Journal of Computers and Structures, 83, pp.1930-1942
- [9] Roy, R., Sarkar, B. K., Bose, N. R., 2001, *Behavior of E-Glass Fibre Reinforced Vinylester Resin Composites Under Impact Fatigue*, Bull. Mater. Sci, Vol 24, No.2, pp. 137-142