Terbit *online* pada laman web jurnal : http://inomet.ft.unand.ac.id

INoMeT: Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal dan Termal

| ISSN (Online) 3025-2598 |

Artikel Penelitian

Studi Eksperimental Kekuatan Fatik Komposit Epoxy-Serat Kaca Akibat Beban Bending Putar Berulang

Devi Chandra [a], Ilhamdi [a], Raihan Salim [b]

[a] *Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang, 25163*
[b] *Alumni Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang, 25163*

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:
Diterima Redaksi: 01 Juni 2026
Revisi Akhir: 12 Juni 2026
Diterbitkan *Online*: 26 Juni 2026

KATA KUNCI

Serat Kaca
Epoxy Komposit
Bending Putar
Kurva S-N
Umur Fatik

KORESPONDENSI

E-mail: devichandra@eng.unand.ac.id

A B S T R A C T

Glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites are increasingly utilized in engineering applications due to their high specific strength, corrosion resistance, and ease of fabrication. However, many structural components are subjected to cyclic loading during service, making fatigue behavior an important consideration in design. This study experimentally investigates the fatigue strength of epoxy–glass fiber composites under rotary bending cyclic loading. Composite specimens were fabricated using the hand lay-up method with E-glass Chopped Strand Mat (CSM) reinforcement and Epoxchon 1011 epoxy resin at a resin-to-hardener ratio of 2:1. Fatigue tests were conducted using a rotary bending machine operating at a constant rotational speed of 1000 rpm under bending loads of 10, 12, 14, 16, and 18 gf. The corresponding nominal bending stresses were 0,047, 0,056, 0,066, 0,075, and 0,085 MPa, respectively. Three specimens were tested for each loading condition. The results revealed a significant decrease in fatigue life with increasing bending load. The average fatigue life decreased from 17.565 cycles at 10 gf to 1.449 cycles at 18 gf. The obtained S–N curve demonstrated an inverse relationship between stress amplitude and fatigue life. Fractographic observations showed matrix cracking, fiber pull-out, interlaminar delamination, and fiber fracture as dominant failure mechanisms. Large voids generated during the hand lay-up process acted as stress concentrators and accelerated crack initiation. The results provide baseline fatigue performance data for epoxy–E-glass composites subjected to rotary bending loading and can be used as a reference for the design of lightweight structural components under cyclic loading.

1. PENDAHULUAN

Komposit polimer berpenguat serat (Fiber Reinforced Polymer/FRP) telah berkembang menjadi salah satu material teknik yang banyak digunakan pada industri otomotif, dirgantara, kelautan, energi, dan konstruksi karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, serta kemudahan dalam proses manufaktur [1,2]. Di antara berbagai jenis FRP, komposit epoxy-serat kaca (Glass Fiber Reinforced Polymer/GFRP) merupakan material yang paling luas penggunaannya karena menawarkan kombinasi sifat mekanik yang baik dengan biaya produksi yang relatif rendah dibandingkan komposit serat karbon [3].

Peningkatan penggunaan komposit pada komponen struktural mengakibatkan kebutuhan yang semakin besar terhadap informasi mengenai perilaku material di bawah pembebanan dinamis. Dalam kondisi operasi aktual, banyak komponen mengalami pembebanan berulang atau siklik yang dapat menyebabkan kegagalan fatik meskipun tegangan kerja yang diterima masih berada di

https://doi.org/10.25077/inomet.4.1.7-12.2026

Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved

bawah kekuatan statiknya [4]. Kegagalan fatik merupakan salah satu penyebab utama kerusakan pada struktur dan komponen mekanik yang bekerja secara kontinu, seperti poros, baling-baling turbin, komponen suspensi kendaraan, struktur kelautan, serta komponen mesin berputar [5]. Berbeda dengan material logam, mekanisme kegagalan fatik pada material komposit bersifat lebih kompleks karena melibatkan interaksi antara serat penguat, matriks polimer, dan antarmuka serat-matriks [6]. Kerusakan umumnya diawali oleh terbentuknya retak mikro pada matriks (matrix cracking), kemudian berkembang menjadi pelepasan ikatan serat-matriks (debonding), delaminasi antar lapisan, fiber pull-out, hingga patahnya serat sebagai kegagalan akhir [7]. Kompleksitas mekanisme kerusakan tersebut menyebabkan perilaku fatik komposit sangat dipengaruhi oleh jenis serat, orientasi serat, fraksi volume serat, jenis matriks, metode fabrikasi, serta kondisi pembebanan [8].

Karakteristik fatik material umumnya direpresentasikan menggunakan kurva S–N (Stress–Number of Cycles) yang menggambarkan hubungan antara amplitudo tegangan dan jumlah siklus hingga kegagalan [9]. Informasi ini sangat penting dalam proses desain karena memungkinkan prediksi umur pakai komponen yang mengalami pembebanan siklik. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa peningkatan tegangan siklik menyebabkan penurunan umur fatik secara eksponensial yang umumnya mengikuti persamaan Basquin [10]. Penelitian mengenai perilaku fatik komposit GFRP telah banyak dilakukan. Shokrieh dan Lessard [11] melaporkan bahwa peningkatan tegangan siklik menyebabkan percepatan propagasi retak pada komposit serat kaca akibat kerusakan progresif pada matriks dan antarmuka serat-matriks. Suresh et al. [12] menunjukkan bahwa umur fatik komposit epoxy-serat kaca sangat dipengaruhi oleh kualitas ikatan serat-matriks dan kandungan porositas yang terbentuk selama proses manufaktur. Penelitian oleh Kumar and Swamy [13] menemukan bahwa keberadaan void dapat menurunkan umur fatik hingga lebih dari 30% karena berfungsi sebagai konsentrator tegangan yang mempercepat inisiasi retak.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak menggunakan metode pengujian tarik fatik (tension-tension fatigue) atau lentur tiga titik (three-point bending fatigue). Kajian mengenai perilaku fatik komposit epoxy-serat kaca akibat pembebanan bending putar (rotary bending fatigue) masih relatif terbatas, terutama untuk komposit yang dibuat menggunakan metode hand lay-up dengan penguat E-glass chopped strand mat (CSM). Padahal jenis pembebanan bending putar banyak dijumpai pada komponen berputar seperti poros, rotor, dan elemen transmisi yang mengalami kombinasi tegangan tarik dan tekan secara bergantian selama operasi [14]. Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada peningkatan sifat statik komposit, sedangkan data mengenai umur fatik dan mekanisme kegagalan akibat pembebanan siklik masih terbatas. Kurangnya data eksperimental tersebut menjadi kendala dalam pengembangan desain komponen berbahan komposit yang bekerja pada kondisi dinamis dan membutuhkan umur pakai yang panjang.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara eksperimental kekuatan fatik komposit epoxy-serat kaca akibat pembebanan bending putar berulang menggunakan rotary bending machine. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi beban untuk memperoleh hubungan antara tegangan lentur dan umur fatik yang direpresentasikan melalui kurva S–N. Selain itu, karakteristik patahan spesimen setelah pengujian juga dianalisis untuk mengidentifikasi mekanisme kegagalan yang dominan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan basis data karakteristik fatik komposit epoxy-serat kaca serta menjadi referensi dalam perancangan komponen struktural yang bekerja pada kondisi pembebanan siklik.

2. METODOLOGI

2.1. Bahan

Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan komposit epoxy-serat kaca sebagai material uji. Penguat yang digunakan adalah *E-glass Chopped Strand Mat* (CSM), sedangkan

 https://doi.org/10.25077/inomet.4.1.7-12.2026

matriks menggunakan resin epoxy Epoxchon 1011 dengan rasio pencampuran resin dan hardener sebesar 2:1.

2.2. Pembuatan Spesimen

Spesimen komposit dibuat menggunakan metode hand lay-up. Serat E-glass dipotong sesuai dimensi cetakan kemudian diimpregnasi menggunakan campuran resin epoxy dan hardener. Setelah proses laminasi selesai, spesimen dibiarkan mengalami curing pada suhu ruang selama 24 jam sebelum dilakukan pemotongan dan finishing.
Geometri dan dimensi specimen dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Geometri dan Dimensi Spesimen

2.3. Pengujian Fatik

Pengujian dilakukan di Laboratorium Departemen Teknik Mesin Universitas Andalas menggunakan Rotary Bending Fatique Machine dengan kecepatan putar konstan 1000 rpm seperti terlihat pada Gambar 2. Variasi beban yang diberikan adalah 10, 12, 14, 16, dan 18 gf. Setiap variasi beban diuji menggunakan tiga spesimen sehingga diperoleh data umur fatik yang representatif.
Pengamatan morfologi patahan dilakukan setelah pengujian menggunakan mikroskop optik untuk mengidentifikasi mekanisme kerusakan yang dominan.



Gambar 2. Mesin Uji Fatik Bending Putar

Berikut adalah langkah-langkah pengujian fatik:

1. Memasang spesimen pada Rotary Bending Fatigue Machine.
2. Menghidupkan mesin untuk memulai pengujian, pada saat yang bersamaan memulai penghitungan waktu dengan stopwatch
3. Memasang beban pada Rotary Bending Fatigue Machine
4. Saat material patah matikan stopwatch dan mesin besamaan.
5. Catat waktu dan Siklus yang diperoleh dari stopwatch dan Indicator section.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Umur Fatik Komposit Epoxy–Serat Kaca

Data hasil pengujian fatik pada variasi beban lentur 10, 12, 14, 16 dan 18 gf dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Hasil Pengujian Fatik

Beban (gf)	Tegangan (MPa)	Umur Fatik (Siklus)	Rata-rata Umur Fatik (Siklus)
10	0,047	17.612	17.565
		16.853	
		18.231	
12	0,056	12.505	12.655
		13.804	
		11.657	
14	0,066	8.205	8.471
		9.503	
		7.704	
16	0,075	5.456	5.520
		6.120	
		4.983	
18	0,085	1.304	1.449
		2.106	
		937	

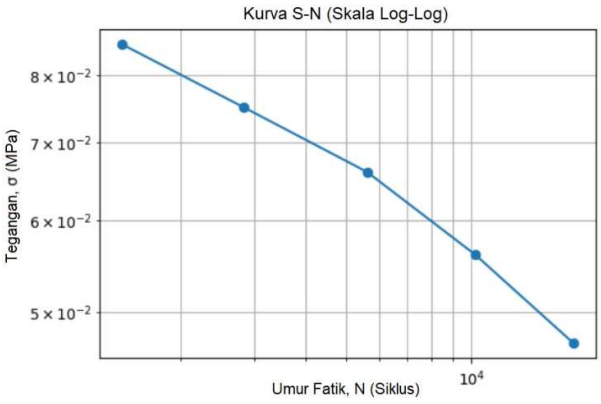
Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan beban lentur menyebabkan penurunan umur fatik komposit secara signifikan. Umur fatik tertinggi diperoleh pada beban 10 gf dengan rata-rata 17.565 siklus, sedangkan umur fatik terendah diperoleh pada beban 18 gf dengan rata-rata 1.449 siklus.
Penurunan umur fatik tersebut menunjukkan bahwa material semakin rentan mengalami kegagalan ketika amplitudo tegangan yang diterima

meningkat. Pada pembebanan siklik, kerusakan material terjadi secara bertahap melalui proses inisiasi retak, propagasi retak, dan akhirnya kegagalan total. Ketika tegangan lentur meningkat, laju akumulasi kerusakan juga meningkat sehingga jumlah siklus yang dapat ditahan material menjadi lebih sedikit.

Terlihat bahwa peningkatan tegangan dari 0,047 MPa menjadi 0,085 MPa menyebabkan penurunan umur fatik sekitar 91,75%. Fenomena ini menunjukkan bahwa tegangan merupakan parameter dominan yang mempengaruhi ketahanan fatik komposit epoxy-serat kaca.

3.2. Analisis Kurva S–N

Hubungan antara tegangan lentur dan umur fatik dianalisis menggunakan kurva S–N *(Stress–Number of Cycles*). Kurva ini merupakan metode yang paling umum digunakan untuk mengevaluasi perilaku fatik suatu material karena mampu menggambarkan hubungan antara tingkat tegangan yang diterima material dengan jumlah siklus hingga terjadi kegagalan. Kurva S-N dalam skala Log-log hasil pengujian ditunjukan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva S-N (skala log-log)

Berdasarkan data pengujian, hubungan antara tegangan lentur dan umur fatik mengikuti kecenderungan nonlinier. Oleh karena itu dilakukan transformasi logaritmik sehingga hubungan tersebut dapat direpresentasikan menggunakan persamaan Basquin:

$$\sigma = AN^B \qquad (1)$$

Dimana : σ adalah tegangan lentur (MPa)
A adalah konstanta material
N adalah umur fatik (siklus)
B adalah eksponen fatik

Dengan melakukan regresi linier terhadap data hasil pengujian yang telah ditransformasi ke skala logaritmik, maka diperoleh nilai A = 0,4625 dan nilai B = -0,2232, sehingga persamaan Basquin (1) menjadi :

$$\sigma = 0{,}4625N^{-0{,}2232} \qquad (2)$$

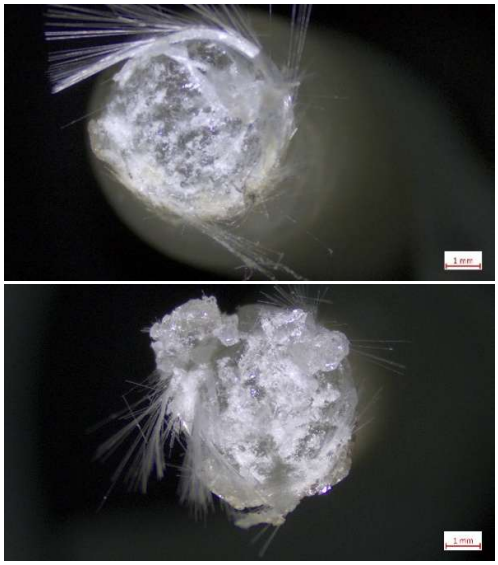
Dengan koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0{,}855$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sekitar 85,5% variasi umur fatik dapat dijelaskan oleh perubahan tegangan lentur yang diberikan. Kemiringan kurva yang bernilai negatif mengindikasikan bahwa peningkatan tegangan lentur menyebabkan penurunan umur fatik komposit epoxy-serat kaca secara signifikan. Hubungan ini sesuai dengan karakteristik umum material komposit yang mengalami percepatan inisiasi dan propagasi retak ketika menerima pembebanan siklik yang lebih tinggi.

.Pada grafik log-log terlihat bahwa data pengujian membentuk garis hampir lurus. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara tegangan dan umur fatik mengikuti hukum pangkat *(power law)* sebagaimana dijelaskan oleh persamaan Basquin. Kemiringan kurva yang bernilai negatif menunjukkan bahwa semakin besar tegangan yang diberikan, semakin rendah umur fatik material. Karakteristik tersebut sejalan dengan teori kegagalan fatik pada material komposit, di mana peningkatan tegangan siklik mempercepat proses inisiasi retak dan meningkatkan laju propagasi retak sehingga material mengalami kegagalan dalam jumlah siklus yang lebih sedikit.

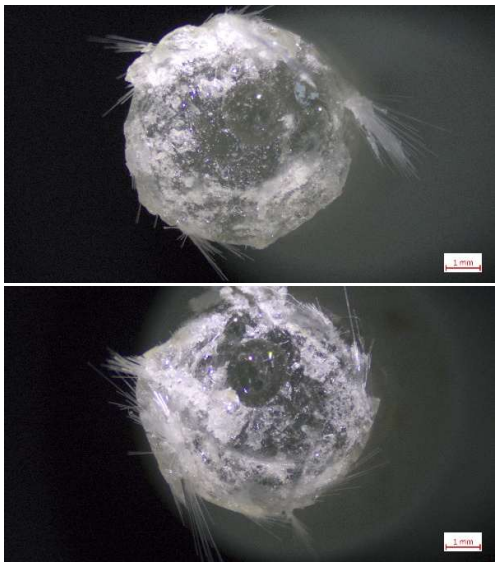
3.3. Mekanisme Kegagalan Fatik

Hasil pengamatan permukaan patahan pada pembebanan 12 gf dan 18 gf diperlihatkan pada Gambar 4 dan 5.

 https://doi.org/10.25077/inomet.4.1.7-12.2026



Gambar 4. Morfologi Permukaan Patahan Spesimen pada Beban 12 gf



Gambar 5. Morfologi Permukaan Patahan Spesimen pada Beban 18 gf

Gambar 4 dan 5 menunjukkan bahwa mekanisme kegagalan komposit tidak terjadi secara tiba-tiba, melainkan melalui beberapa tahapan kerusakan progresif. Kerusakan awal dimulai pada matriks epoxy berupa retak mikro *(matrix cracking)* akibat tegangan siklik yang berulang.

Retak mikro yang terbentuk kemudian berkembang menuju daerah antarmuka antara serat dan matriks. Ketika ikatan antarmuka mulai melemah, terjadi pelepasan ikatan *(debonding)* yang menyebabkan sebagian serat kehilangan kemampuan untuk mentransfer beban secara efektif. Akibatnya, tegangan terlokalisasi pada daerah tertentu sehingga mempercepat pertumbuhan retak.

Pada spesimen yang mengalami umur fatik lebih panjang (Gambar 4), banyak ditemukan fenomena *fiber pull-out*, yaitu tercabutnya serat dari matriks sebelum serat mengalami patah. Fenomena ini menunjukkan bahwa energi yang diperlukan untuk menyebabkan kegagalan relatif lebih besar sehingga proses kegagalan berlangsung secara bertahap.

Sebaliknya, pada spesimen yang menerima beban lebih tinggi (Gambar 5), permukaan patahan menunjukkan dominasi *fiber fracture* dan *delaminasi*. Delaminasi terjadi akibat terpisahnya lapisan-lapisan komposit karena tegangan geser antar lapisan yang terus meningkat selama pembebanan siklik. Kerusakan ini menyebabkan distribusi beban menjadi tidak merata sehingga kegagalan total terjadi lebih cepat.

Selain itu, pengamatan visual menunjukkan adanya porositas atau void pada beberapa spesimen. Void yang terbentuk selama proses fabrikasi *hand lay-up* berfungsi sebagai konsentrator tegangan *(stress concentrator)*. Keberadaan void mempercepat terjadinya inisiasi retak karena tegangan lokal di sekitar pori menjadi lebih tinggi dibandingkan tegangan nominal yang diterima spesimen.

3.4. Pengaruh Tegangan terhadap Umur Fatik

Hubungan antara tegangan lentur dan umur fatik yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa umur fatik menurun secara eksponensial terhadap peningkatan tegangan. Kecenderungan tersebut sesuai dengan karakteristik umum material komposit berbasis polimer yang tidak memiliki batas fatik (fatigue limit) yang jelas sebagaimana pada beberapa jenis baja.

Pada tegangan rendah, laju propagasi retak berlangsung relatif lambat sehingga material mampu menahan pembebanan hingga puluhan ribu siklus. Sebaliknya, pada tegangan tinggi laju propagasi retak meningkat secara signifikan sehingga umur fatik berkurang hingga hanya beberapa ribu siklus.

Nilai eksponen Basquin sebesar −0,2232 menunjukkan sensitivitas umur fatik terhadap perubahan tegangan. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan kecil pada

tegangan dapat menyebabkan penurunan umur fatik yang cukup besar. Oleh karena itu, dalam perancangan komponen berbahan komposit epoxy-serat kaca yang bekerja pada kondisi dinamis, pengendalian tingkat tegangan kerja menjadi faktor yang sangat penting untuk meningkatkan umur pakai struktur.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa komposit epoxy-serat kaca memiliki perilaku fatik yang mengikuti model Basquin dengan tingkat korelasi yang cukup tinggi ($R^2 = 0{,}855$) . Mekanisme kegagalan yang dominan meliputi retak matriks *(matrix cracking)*, pelepasan ikatan serat-matriks *(debonding)*, *fiber pull-out*, delaminasi antar lapisan, dan patahnya serat kaca (fiber fracture). Keberadaan void akibat proses fabrikasi hand lay-up turut berkontribusi terhadap penurunan umur fatik karena berfungsi sebagai titik konsentrasi tegangan yang mempercepat proses inisiasi retak.

4. KESIMPULAN

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian fatik komposit epoxy-serat kaca menggunakan metode rotary bending dengan variasi beban 10-18 gf, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan tegangan lentur menyebabkan penurunan umur fatik secara signifikan. Umur fatik rata-rata tertinggi diperoleh pada tegangan nominal 0,047 MPa sebesar 17.565 siklus, sedangkan umur fatik terendah diperoleh pada tegangan nominal 0,085 MPa sebesar 1.449 siklus.
2. Hubungan antara tegangan lentur dan umur fatik mengikuti persamaan Basquin: $\sigma = 0{,}4625N^{-0{,}2232}$ dan koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0{,}855$. Kurva S–N yang diperoleh menunjukkan bahwa umur fatik komposit epoxy-serat kaca menurun secara eksponensial seiring peningkatan tegangan pembebanan.
3. Pengamatan permukaan patahan menunjukkan bahwa kegagalan fatik komposit didominasi oleh retak matriks *(matrix cracking)*, pelepasan ikatan serat-matriks *(debonding)*, *fiber pull-out*, delaminasi antar lapisan, dan patahnya serat kaca *(fiber fracture)*. Kerusakan tersebut berkembang secara progresif selama pembebanan siklik hingga menyebabkan kegagalan total spesimen.

DAFTAR PUSTAKA

[1] W. D. Callister, D. G. Rethwisch, *"*Materials Science and Engineering-An Introduction," 10th ed. New Jersey, Wiley, 2018.

[2] K. K. Chawla, *"*Composite Materials: Science and Engineering," New York, Springer, 2012.

[3] P. K. Mallick, "Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design," 3th ed., CRC Press, 2007.

[4] S. Suresh, "Fatigue of Materials," 2nd ed., Cambridge University Press, 1998.

[5] R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, H. O. Fuchs, "Metal Fatigue in Engineering*"*, 2nd ed., Wiley, 2001.

[6] B. Harris, "Fatigue in Composites," Woodhead Publishing, 2003.

[7] R. Talreja, C. V. Singh, "Damage and Failure of Composite Materials," Cambridge University Press, 2012.

[8] A. P. Vassilopoulos, "Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures", Woodhead Publishing, 2010.

[9] J. Schijve, "Fatigue of Structures and Material," Springer, 2009.

[10] O. H. Basquin, "The Exponential Law of Endurance Tests,", ASTM Proceedings, 1910.

[11] M. M. Shokrieh, L. B. Lessard, "Progressive Fatigue Damage Modeling of Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, vol. 34, no. 13, pp. 1056-1080, 2000. https://doi.org/10.1177/002199830003401301

[12] C. H. Kumar, R. P. Swamy, "Experimental investigation on the rotating bending fatigue behaviour of glass and carbon fibre-reinforced epoxy composites," *Advances in Materials and Processing Technologies,* vol. 8, no. 3, pp. 2561–2575, 2022. https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1925070

[13] P. A. Carraro, L. Maragoni, M. Quaresimin, M. Ricotta, "Fatigue behaviour of glass/epoxy laminates in the presence of voids," *International Journal of Fatigue*, vol. 95, pp. 18–28, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.10.004

[14] A. P. Mouritz, "Fatigue of Fibre-Polymer Composites," Woodhead Publishing, 2020.