

**PENGARUH RASIO TEGANGAN DAN AMPLITUDE STRESS
TERHADAP KARAKTERISTIK PERAMBATAN RETAK PADA
*FIBER METAL LAMINATES***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI KONSTRUKSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan

memperoleh gelar Sarjana Teknik



DANI TRI SUBEKTI

NIM. 125060200111051

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2017

LEMBAR PENGESAHAN
PENGARUH RASIO TEGANGAN DAN *AMPLITUDE STRESS*
TERHADAP KARAKTERISTIK PERAMBATAN RETAK PADA
FIBER METAL LAMINATES

SKRIPSI
TEKNIK MESIN KONSENTRASI KONSTRUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



DANI TRI SUBEKTI
NIM. 125060200111051

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen Pembimbing
pada tanggal 2 Februari 2017

Dosen Pembimbing I

Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M. Eng.
NIP. 19710310 199802 1 001

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Sofyan Arief Setyabudi, ST., M. Eng.
NIP. 19731124 199802 1 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1



Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.
NIP. 19750802 199903 2 002

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar – benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur – unsur jiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang – undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 2 Februari 2017

Mahasiswa,



Dani Tri Subekti
NIM. 125060200111051



JUDUL SKRIPSI:

PENGARUH RASIO TEGANGAN DAN *AMPLITUDE STRESS* TERDADAP
KARAKTERISTIK PERAMBATAN RETAK PADA *FIBER METAL LAMINATES*

Nama Mahasiswa : Dani Tri Subekti

NIM : 125060200111051

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Konstruksi

KOMISI PEMBIMBING :

Dosen Pembimbing 1 : Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M. Eng.

Dosen Pembimbing 2 : Dr. Eng. Sofyan Arief Setyabudi, ST., M. Eng.

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng.

Dosen Penguji 2 : Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D.

Dosen Penguji 3 : Francisca Gayuh Utami Dewi, ST., MT.

Tanggal Ujian : 11 Januari 2017

SK Penguji : 044/UN10.6.62/AK/2017



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Terima Kasih Kepada Ayahanda dan Ibunda Tercinta

Beserta Kakak

Skripsi Tui Saya Persembahkan Untuk Kemajuan Teknologi Bangsa Indonesia



PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini berjudul “Pengaruh rasio tegangan dan *amplitude stress* terhadap karakteristik perambatan retak pada *fiber metal laminates*”. Skripsi ini ditulis sebagai bentuk dokumentasi dan hasil akhir dari proses perkuliahan yang telah penulis laksanakan. Laporan ini juga diajukan sebagai persyaratan kelulusan sarjana jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.

Dalam menyelesaikan proses penelitian ini penulis menyadari bahwa bantuan dari berbagai pihak, untuk itu penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar – besarnya kepada semua pihak diantaranya:

1. Kepada Ibunda Chotima dan Ayahanda Sunyoto serta kakak tercinta Rudi dan Cucuk Basuki yang telah memberi do'a dukungan beserta segala hal yang saya butuhkan dalam hidup ini pada umumnya dan pada skripsi ini khususnya.
2. Bapak Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng. selaku Ketua jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
3. Bapak Purnami, ST., MT. selaku sekertaris jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya sekaligus ustazd saya yang saya kagumi.
4. Ibu Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. selaku ketua program studi S1 jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
5. Bapak Ir. Djarot Darmadi, MT., Ph.D selaku ketua kelompok konsentrasi konstruksi.
6. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo ST., M. Eng selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, saran, dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
7. Bapak Dr. Eng. Sofyan Arief Setyabudi ST., M. Eng selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, saran, dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
8. Seluruh dosen jurusan dan staff Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah mengajarkan ilmu selama penulis kuliah.
9. Sugiatni Ningrum yang membantu memberikan ide dan masukan pada awal mengerjakan skripsi.
10. Divisi aerokreasi dan studio elemen mesin Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
11. Keluarga besar laboratorium riset mahasiswa mesin Universitas Brawijaya.



12. Teman – teman Admiral beserta semua pihak yang telah banyak membantu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih ada kekurangan. Untuk itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang dapat membantu pengembangan penelitian ini ke depannya maupun untuk penulis pribadi. Semoga skripsi ini bisa bermanfaat untuk banyak pihak baik bagi penulis, teman – teman mahasiswa, dosen, dan juga bagi perkembangan keilmuan teknik mesin.

Malang, Februari 2017

Penulis

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR ISI

Halaman

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
DAFTAR SIMBOL	x
RINGAKSAN.....	xi
SUMMARY	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelum.....	5
2.2 Komposit	5
2.3 <i>Laminates Composite</i>	6
2.4 <i>Fiber Glass</i>	8
2.5 <i>Matriks</i>	9
2.5.1 <i>Polymer Matrix Composite</i>	9
2.5.2 Katalis	11
2.6 Metode Pembuatan.....	11
2.6.1 <i>Hand Lay-Up</i>	11
2.7 <i>Aluminium</i>	12
2.8 <i>Head Treatment</i>	13
2.9 Tegangan dan Regangan	14
2.9.1 Tegangan	14
2.9.2 Regangan	15
2.9.3 Hubungan Tegangan dan Regangan (<i>Hooke Low</i>)	15
2.10 <i>Fatigue</i>	15

2.11	Beban Siklus	16
2.11.1	Komponen Beban Siklus	16
2.12	Mekanisme Pertumbuhan Retak	19
2.13	Faktor Intensitas Tegangan	21
2.14	Hipotesa	24
BAB III METODE PENELITIAN		25
3.1	Metodologi Penelitian	25
3.2	Waktu dan Tempat Penelitian	25
3.3	Variabel Penelitian	25
3.3.1	Variabel Bebas	25
3.3.2	Variabel Terikat	25
3.3.3	Variabel Terkontrol	26
3.4	Peralatan dan Bahan Penelitian	26
3.4.1	Peralatan	26
3.4.2	Bahan	31
3.5	Bentuk dan Dimensi Spesimen	33
3.6	Instalasi Penelitian.....	34
3.7	Rancangan Penelitian	34
3.7.1	Pembuatan Spesimen	34
3.7.2	Pengujian Spesimen Uji Tarik	36
3.7.3	Pengujian Spesimen Uji <i>Fatigue</i>	37
3.7.4	Pengolahan Data	38
3.8	Diagram Alir	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Data Hasil Penelitian	41
4.2	Grafik dan Pembahasan.....	42
4.2.1	Grafik Hubungan Tegangan Maksimum Sama Terhadap Tegangan Amplitudo Beda	42
4.2.2	Grafik Hubungan Tegangan Amplitudo Sama Terhadap Ratio Tegangan Beda	44
4.2.3	Hubungan Ratio Tegangan Terhadap Tegangan Amplitudo Beda	47
4.2.4	Hubungan Jumlah Siklus Terhadap Pembebanan	48

BAB V PENUTUP51

5.1	Kesimpulan.....	51
5.2	Saran	51

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Sifat Mekanik Fiber Glass	8
Tabel 2.2	Perbandingan Sifat Mekanik <i>Thermoset</i> dan <i>Thermoplastic</i>	11
Tabel 3.1	Spesifikasi Dapur Listrik	27
Tabel 3.2	Spesifikasi <i>Machine Press</i>	28
Tabel 3.3	Spesifikasi <i>Hydrolic Servo Pulser</i>	29
Tabel 3.4	Spesifikasi <i>Extensometer</i>	30
Tabel 3.5	Spesifikasi Kamera <i>Dino-Lite Microscope</i>	30
Tabel 3.6	Data Properties Produk <i>Epoxy</i>	31
Tabel 3.7	Data Hasil Uji Tarik	37
Tabel 4.1	Data Jumlah Siklus Hasil Pengujian <i>Fatigue</i>	41
Tabel 4.2	Contoh Data Jumlah Siklus dan Panjang Retak dari Hasil Pengujian <i>Fatigue</i>	41



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
	Gambar 2.1 Klasifikasi Komposit.....	6
	Gambar 2.2 Perbedaan antara lamina dan laminates	7
	Gambar 2.3 Proses <i>hand lay-up</i>	12
	Gambar 2.4 Terjadinya tegangan regangan	14
	Gambar 2.5 Beban berfluktuasi dengan konstan amplitudo	16
	Gambar 2.6 Pengaruh tegangan rata-rata terhadap <i>fatigue crack growth life</i>	18
	Gambar 2.7 Skematik tegangan amplitudo dengan umur material	18
	Gambar 2.8 Pengaruh tegangan amplitudo terhadap kurva panjang retak dan jumlah siklus pada rasio tegangan nol	19
	Gambar 2.9 Mode pembukaan retak	19
	Gambar 2.10 Skematik prilaku pertumbuhan retak	20
	Gambar 2.11 Karakteristik Kerusakan/kelelahan pada material komposit dan logam	21
	Gambar 2.12 Sistem koordinat 3 dimensi untuk daerah ujung retak	21
	Gambar 2.13 Faktor geometri untuk 3 kasus pada plat pembebahan Tarik	22
	Gambar 2.14 Skema tegangan pada <i>fiber metal laminates</i>	23
	Gambar 3.1 Dapur listrik	27
	Gambar 3.2 <i>Machine prss</i>	28
	Gambar 3.3 <i>Hydroulic servo pulser</i>	29
	Gambar 3.4 <i>Extensometer</i>	30
	Gambar 3.5 Kamera <i>dino-lite microscope</i>	31
	Gambar 3.6 <i>Araldite standart</i>	32
	Gambar 3.7 <i>Glass fiber woven roving</i>	32
	Gambar 3.8 Bentuk dan susunan spesimen	33
	Gambar 3.9 Dimensi spesimen (mm).....	33
	Gambar 3.10 Instalasi penelitian uji <i>fatigue</i>	34
	Gambar 3.11 Beban Penekanan pada spesimen	35
	Gambar 3.12 Ciri-ciri penampang yang gagal	35
	Gambar 3.13 Ciri-ciri penampang yang berhasil	36
	Gambar 4.1 Grafik hubungan jumlah siklus dengan panjang retak pada tegangan maksimum yang sama yaitu 17,5 MPa.....	42

Gambar 4.2 Grafik hubungan panjang retak dengan laju perambatan retak pada tegangan maksimum yang sama yaitu 17,5 MPa.....	42
Gambar 4.3 Grafik hubungan jumlah siklus dengan panjang retak pada tegangan maksimum yang sama yaitu 28 MPa.....	43
Gambar 4.4 Grafik hubungan panjang retak dengan laju perambatan retak pada tegangan maksimum yang sama yaitu 28 MPa.....	43
Gambar 4.5 Grafik hubungan jumlah siklus dengan panjang retak pada tegangan amplitudo yang sama yaitu 7 MPa	44
Gambar 4.6 Grafik hubungan panjang retak dengan laju perambatan retak pada tegangan amplitudo yang sama yaitu 7 MPa	45
Gambar 4.7 perambatan retak pada $R = 0.2$ (a) sebelum kedua ujung retak menyatu, (b) saat kedua ujung retak menyatu dan pembebahan terus berlanjut	46
Gambar 4.8 Grafik hubungan jumlah siklus dengan panjang retak pada rasio tegangan yang sama yaitu $R = 0$	47
Gambar 4.9 Grafik hubungan panjang retak dengan laju perambatan retak pada rasio tegangan yang sama yaitu $R = 0$	47
Gambar 4.10 Grafik hunbungan perbandingan rasio tegangan terhadap jumlah siklus	48
Gambar 4.11 patahan spesimen (a) spesimen kondisi $R = 0.3$ (b) spesimen kondisi $R = 0.5$	49
Gambar 4.12 Grafik hunbungan perbandingan tegangan amplitudo terhadap jumlah siklus	49



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Patahan pada spesimen $R = 0$, $S_{max} = 14$ MPa
Lampiran 2	Patahan pada spesimen $R = 0.2$, $S_{max} = 17.5$ MPa
Lampiran 3	Patahan pada spesimen $R = 0.3$, $S_{max} = 21$ MPa
Lampiran 4	Patahan pada spesimen $R = 0.4$, $S_{max} = 24$ MPa
Lampiran 5	Patahan pada spesimen $R = 0.5$, $S_{max} = 28$ MPa
Lampiran 6	Patahan pada spesimen $R = 0$, $S_{max} = 17.5$ MPa
Lampiran 7	Patahan pada spesimen $R = 0$, $S_{max} = 21$ MPa
Lampiran 8	Patahan pada spesimen $R = 0$, $S_{max} = 28$ MPa
Lampiran 9	Patahan pada spesimen fiber epoxy $R = 0$, $S_{max} = 17.5$ MPa
Lampiran 10	Patahan pada spesimen fiber epoxy $R = 0.2$, $S_{max} = 17.5$ MPa
Lampiran 11	Diagram tegangan regangan
Lampiran 12	Diagram hubungan jumlah siklus terhadap panjang retak
Lampiran 13	Diagram hubungan panjang retak terhadap laju perambatan retak
Lampiran 14	Data hasil penelitian pada kondisi $S_{mean} = 7$ MPa saat $R = 0$
Lampiran 15	Data hasil penelitian pada kondisi $S_{mean} = 10.5$ MPa saat $R = 0.2$
Lampiran 16	Data hasil penelitian pada kondisi $S_{mean} = 14$ MPa saat $R = 0.3$
Lampiran 17	Data hasil penelitian pada kondisi $S_{mean} = 17$ MPa saat $R = 0.4$
Lampiran 18	Data hasil penelitian pada kondisi $S_{mean} = 21$ MPa saat $R = 0.5$
Lampiran 19	Data hasil penelitian pada kondisi $S_a = 8.75$ MPa saat $R = 0$
Lampiran 20	Data hasil penelitian pada kondisi $S_a = 10.5$ MPa saat $R = 0$
Lampiran 21	Data hasil penelitian pada kondisi $S_a = 12$ MPa saat $R = 0$.
Lampiran 22	Data hasil penelitian pada kondisi $S_a = 14$ MPa saat $R = 0$
Lampiran 23	Data hasil penelitian pada kondisi $S_{mean} = 10.5$ MPa saat $R = 0.2$ di Aluminium
Lampiran 24	Data hasil penelitian pada kondisi $S_{mean} = 10.5$ MPa saat $R = 0.2$ di <i>Fiber Reinforced Composites (Fiber Epoxy)</i>



DAFTAR SIMBOL

Besaran dasar	Satuan dan singkatannya	Simbol
Tegangan	Megapascal atau MPa	S
Regangan		ϵ
Gaya	Newton atau N	P
Luas	Meter kuadrat atau m^2	A
Panjang	Meter atau m	L
Modulus elastisitas	Gigapascal atau gpa	E
Tegangan maksimum	Megapascal atau MPa	Smax
Tegangan minimum	Megapascal atau MPa	Smin
Mean stress	Megapascal atau MPa	Sm
Tegangan amplitudo	Megapascal atau MPa	Sa
Rasio tegangan	Meter atau m	R
Panjang retak	Meter atau m	a
Panjang inisial retak		a_0
Siklus		N
Laju perambatan retak	Millimeter per siklus atau mm/N	da/dN
Faktor intensitas tegangan	$MPa\sqrt{m}$	K
Faktor intensitas tegangan transfer	$MPa\sqrt{m}$	K_{br}
Faktor geometri		F

RINGKASAN

Dani Tri Subekti, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2017, *Pengaruh Rasio Tegangan dan Amplitudo Stress terhadap Karakteristik Perambatan Retak pada Fiber Metal Laminates*, Dosen Pembimbing: Anindito Purnowidodo dan Sofyan Arief Setyabudi.

Komposit merupakan gabungan dari dua atau lebih material yang memiliki sifat yang berbeda, yang mana tersusun oleh fase matrik dan penguat. Banyaknya penggunaan material ini dikarenakan memiliki sifat yang tidak dimiliki oleh logam pada umumnya. Saat ini penggunaan komposit telah meluas meliputi peralatan olahraga, elektronik, kontruksi, biomedis, bodi kapal laut, infrastruktur industri, otomotif hingga digunakan dalam bidang *aerospace*. *Fiber metal laminates* (FMLs) adalah suatu konsep material hybrid yang memiliki resistensi fatigue yang baik dan kuat daripada *fiber reinforced composites* dengan *ductility* logam paduan (aluminium). Selain itu, FMLs memiliki sifat mekanik dan toleransi kerusakan properties material yang lebih baik daripada material dasar penyusunnya. Beberapa penelitian pun dilakukan untuk mengetahui fenomena kegagalan struktur dari material *fiber metal laminates*.

Pada penelitian ini untuk mengetahui pengaruh rasio tegangan dan amplitude stress terhadap karakteristik perambatan retak pada fiber metal laminates. Metode yang digunakan adalah penelitian eksperimental. Variabel bebasnya adalah rasio tegangan sebesar $R = 0$, $R = 0.2$, $R = 0.3$, $R = 0.4$, dan $R = 0.5$ dan tegangan amplitudo yaitu 7 MPa, 8.75 MPa, 10.5 MPa, 12 MPa, dan 14 MPa, dengan variabel terikat yang diamati adalah panjang retak dan laju perambatan retak. Sedangkan variabel yang dikontrol yaitu pembuatan spesimen menggunakan metode *hand lay-up* dengan diberi beban penekanan sebesar 0.89 kg/cm^2 Selama 20 detik, menggunakan serat sintetis jenis *woven e-glass* orientasi serat $0^\circ/90^\circ$ dimana 0° sejajar arah roll aluminium, pola pembebahan sinusoidal dengan konstan amplitudo menggunakan frekuensi pembebahan 4 Hz.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pada tegangan amplitudo yang sama, semakin meningkat rasio tegangan maka umur material semakin pendek kecuali pada rasio tegangan 0.2 yang disebabkan oleh karakteristik material penyusunnya. Untuk laju perambatan retaknya mengalami perubahan sedikit terhadap pengaruh rasio tegangan. Sedangkan pada rasio tegangan yang sama, semakin besar tegangan amplitudo umur material semakin pendek dan laju perambatan retak semakin meningkat pula.

Kata kunci: *Fiber Metal Laminates*, Rasio Tegangan, Tegangan Amplitudo, Umur Material (Siklus), Laju Perambatan Retak



SUMMARY

Dani Tri Subekti, Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, February 2017, *The Effect of Stress Ratio and Amplitude Stress in Fiber Metal Laminates on Fatigue Crack Growth behavior*, Academic Supervisor: Anindito Purnowidodo and Sofyan Arief Setyabudi.

The composite is a combination of two or more materials have different properties, which is composed by a phase matrix and reinforcement. The large number of uses of this material because it has properties not possessed by metal in general. Currently the use of composites has expanded include sports equipment, electronics, construction, biomedical, body naval ships, infrastructure, automotive industry to use in the field of aerospace. Fiber metal laminates (FMLs) is a concept hybrid material that has good fatigue resistance and high strength of fiber reinforced composites with the ductility of metal alloy (aluminium). In addition, FMLs has mechanical properties and damage tolerance properties of the material better than basic material constituting. Any number of studies conducted to know the phenomena of failure structure in fiber metal laminates material.

In this research to know the effect of stress ratio and amplitude stress in fiber metal laminates on fatigue crack growth behavior. The method used was experimental research. The independent variable is the stress ratio of $R = 0$, $R = 0.2$, $R = R = 0.3$, 0.4 , and $R = 0.5$ and amplitude stress i.e. 7 MPa , 8.75 MPa , 10.5 MPa , 12 MPa , and 14 MPa , with the observed variable is the crack length and the crack growth rate. While the variables that controlled that is making the specimen using the method of hand lay-up with being given a burden the emphasis of 0.89 kg/cm^2 for 20 seconds, using synthetic fibers woven type of fiber e-glass orientation $0^\circ/90^\circ$ where 0° parallel the direction of roll aluminium, patterns of loading is sinusoidal with constant amplitude using the frequency was 4 Hz .

The results of this research show that the same amplitude stress, increasing the stress ratio then age of the material will be shorter except on then stress ratio 0.2 caused by the characteristics of the materials constituting. For the crack growth rate changed little against the influence of stress ratio. While at the same stress ratio, the greater amplitude stress then age material is getting short and the crack growth rate will be increasing

Keywords: Fiber Metal Laminates, Stress Ratio, Amplitude Stress, Cycles, Crack Growth Rate



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan ilmu dan teknologi, penggunaan material komposit mulai banyak dikembangkan didunia manufaktur. Komposit merupakan gabungan dari dua atau lebih material yang memiliki sifat yang berbeda, yang mana tersusun oleh fase matrik dan penguat (Mallick, 2007). Banyaknya penggunaan material ini dikarenakan memiliki sifat yang tidak dimiliki oleh logam pada umumnya seperti masa jenis rendah, kekuatan yang tinggi, kekakuan tinggi, ketahanan terhadap kelelahan yang baik, ketahanan terhadap *creep* yang baik, kemudahan dalam pembentukan, dimensi stabil, kekuatan yang dapat diatur dan resistensi korosi yang tinggi (Deborah, 2010). Saat ini penggunaan komposit telah meluas meliputi peralatan olahraga, elektronik, kontruksi, biomedis, bodi kapal laut, infrastruktur industri, otomotif hingga digunakan dalam bidang *aerospace* (Deborah, 2010). Dalam bidang *aerospace*, komposit biasanya digunakan dalam pembuatan bodi pesawat. Jenis komposit yang digunakan dalam pembuatannya adalah *Fiber Metal Laminates* (FMLs) (Yi Huang, 2015). Namun, dengan adanya beban dinamis yang dihasilkan oleh getaran mesin dan getaran akibat perubahan tekanan atmosfer di udara dapat menyebabkan terjadinya kegagalan struktur (*fatigue*) (Mouritz, 2012). Beberapa contoh kecelakaan akibat kegagalan struktur berdasarkan data dari *Aviation Safety Network* yaitu Aloha Airlines Boeing 737-297 *flight* 243 april 28, 1998 kerusakan pada *fuselage* dikarenakan retakan dan mengakibatkan 65 penumpang beserta awak pesawat luka parah, China Airlines boing 747-209B *flight* C1611 mei 25 2002, kerusakan dikarenakan kegagalan struktur dibagian bawah *fuselage* dan mengakibatkan 225 korban jiwa, Qantas Boeing 747-438 Juni 25, 2008 kerusakan *fuselage* dikarenakan retakan, Southwest Airlines Boeing 737-3H4 *flight* 2294 juli 13, 2009 lubang pada *fuselage* dikarenakan retakan, dan Southwest Airlines 737-300 *flight* 812 april 1, 2011 lubang pada tengah *fuselage* dikarenakan retakan yang mengakibatkan 118 penumpang dan awak pesawat. Sehingga pemilihan material yang sesuai untuk membuat badan pesawat penting dilakukan untuk meminimalisir dampak terburuk (kecelakaan udara) akibat kegagalan struktur.

Fiber metal laminates (FMLs) adalah suatu konsep material *hybrid* yang memiliki resistensi *fatigue* yang baik dan kuat daripada *fiber reinforced composites* dengan *ductility* logam paduan (aluminium). Selain itu, FMLs memiliki sifat mekanik dan toleransi

kerusakan properties material yang lebih baik daripada material dasar penyusunnya. Hal ini dikarenakan, sebagian tegangan diarea ujung retak pada aluminium tertransfer ke komposit sehingga laju perambatan retak pada alumunium menurun (S.U. Khan, 2011). Hal ini didukung oleh penelitian Albedah *et al.*, (2016) yang menyatakan bahwa dengan penambalan komposit pada suatu retakan dapat menurunkan laju perambatan retak pada Al 2024 T3 dan Al 7075 T6.

Beberapa penelitian pun dilakukan untuk mengetahui fenomena kegagalan struktur dari material *fiber metal laminates*. Khan *et al.*, (2011) dalam penelitian tentang *Delamination in fiber metal laminates (GLARE) during fatigue crack growth under variable amplitude loading*, penelitiannya bertujuan untuk mengetahui perubahan beban amplitudo terhadap pembentukan delaminasi *fiber metal laminates*. Dari hasil Penyelidikan ini telah menunjukkan bahwa variasi beban sedikit mengubah bentuk delaminasi. Dan menjelaskan bahwa transisi dalam bentuk delaminasi tidak berpengaruh secara signifikan pada laju pertumbuhan retak pada lapisan logam. Kemudian dari penelitian Khan et al., ini disempurnakan oleh penelitian dari Yi Huang et al., (2015) tentang *Delamination and fatigue crack growth behavior in fiber metal laminates (GLARE) under single overloads*, penelitiannya bertujuan untuk mengetahui efek dari variasi *single overloads* terhadap pembentukan delaminasi dan laju perambatan retak pada *fiber metal laminates*. Hasil dari penelitian ini menjelaskan ketika $K_{tip,ol}$ lebih kecil tidak ada perubahan jelas dalam pembentukan delaminasi dan laju pertumbuhan retak pun kembali dengan cepat ketingkat aslinya setelah *overload* dibagian logam. Tetapi ketika $K_{tip,ol}$ menjadi lebih besar perubahan yang jelas terjadi pada pembentukan pola delaminasi dan tingkat pertumbuhan retak setelah *overload* tidak dapat kembali ke keaslinya meskipun retak tumbuh diluar zona plastis yang berlebihan dengan besar pengurangan laju pertumbuhan retak menjadi lebih besar dengan meningkatnya rasio overload (R_{ol}). Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui fenomena dan meningkatkan sifat FMLs dalam meminimalisir kegagalan struktur material serta umur kelelahan.

Dari latar belakang diatas dan penelitian yang telah ada, maka perlu penelitian lebih lanjut tentang kegagalan struktut pada material *fiber metal laminates*. Sehingga timbul gagasan untuk penelitian tentang pengaruh rasio tegangan dan *amplitude stress* yang diharapkan mampu mengetahui karakteristik perambatan retak pada *Fiber Metal Laminates*. Mean Stress memiliki pengaruh yang sangat besar pada laju pertumbuhan retak. Hal ini berhubungan dengan rasio tegangan (R) yang mana efek dari meningkatkan rasio tegangan memiliki kecenderungan untuk meningkatkan pertumbuhan retak pada rasio

tegangan positif ($R \geq 0$). Sedangkan untuk tegangan amplitudo juga berpengaruh pada karakteristik pertumbuhan retak (Stephens, 2000).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh rasio tegangan terhadap karakteristik perambatan retak pada *Fiber Metal Laminates*?
2. Bagaimana pengaruh *amplitude stress* terhadap karakteristik perambatan retak pada *Fiber Metal Laminates*?

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam penelitian ini tidak melebar dan lebih teratur maka perlu diberikan batasan masalah. Batasan masalah penelitian ini yaitu:

1. Aluminium diasumsikan isotropik.
2. Pembuatan spesimen menggunakan *metode hand lay-up* dengan penambahan beban penekanan.
3. Pencampuran *epoxy* dan katalis dengan kecepatan pengadukan konstan.
4. Perlakuan spesimen dengan kertas gosok dianggap sama.
5. *Temperature* dan kelembapan selama proses pembuatan spesimen dan pengujian dianggap konstan atau sesuai dengan kondisi laboratorium.

1.4 Tujuan Penulisan

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisa pengaruh rasio tegangan terhadap karakteristik perambatan retak pada *Fiber Metal Laminates*.
2. Menganalisa pengaruh *amplitude stress* terhadap karakteristik perambatan retak pada *Fiber Metal Laminates*.

1.5 Manfaat Penelitian

Diharapkan dari penelitian ini dapat memberikan manfaat berupa:

1. Memberikan suatu gambaran tentang pentingnya prediksi kegagalan struktur material yang diakibatkan beban dinamis.



2. Memberikan informasi efekrasio tegangan dan *amplitude stress* pada *Fiber Metal Laminates*.
3. Menjadi sumbangsih dan masukan yang berguna dalam ilmu pengetahuan kususnya dibidang studi teknik mesin.
4. Dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya tentang *Fiber Metal Laminates*.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Khan *et al.*, (2011) dalam penelitian tentang *Delamination in fiber metal laminates (GLARE) during fatigue crack growth under variable amplitude loading*, penelitiannya bertujuan untuk mengetahui perubahan beban amplitudo terhadap pembentukan delaminasi *fiber metal laminates*. Penelitian ini dilakukan dengan membuat 5 jenis variasi pembebanan amplitudo yaitu konstan, *single overload*, *multiple block overload*, *block loading low-high*, dan *block loading high-low* pada spesimen GLARE 3-4/3-0.3 dan GLARE 3-5/4-0.4. Spesimen menggunakan tipe *center-crack tension* dengan panjang inisial retak ($2a_0$) 5 mm dan sebuah lubang dengan diameter 3 mm. Dari hasil Penyelidikan ini telah menunjukkan bahwa variasi beban sedikit mengubah bentuk delaminasi. Dan menjelaskan bahwa transisi dalam bentuk delaminasi tidak berpengaruh secara signifikan pada laju pertumbuhan retak pada lapisan logam.

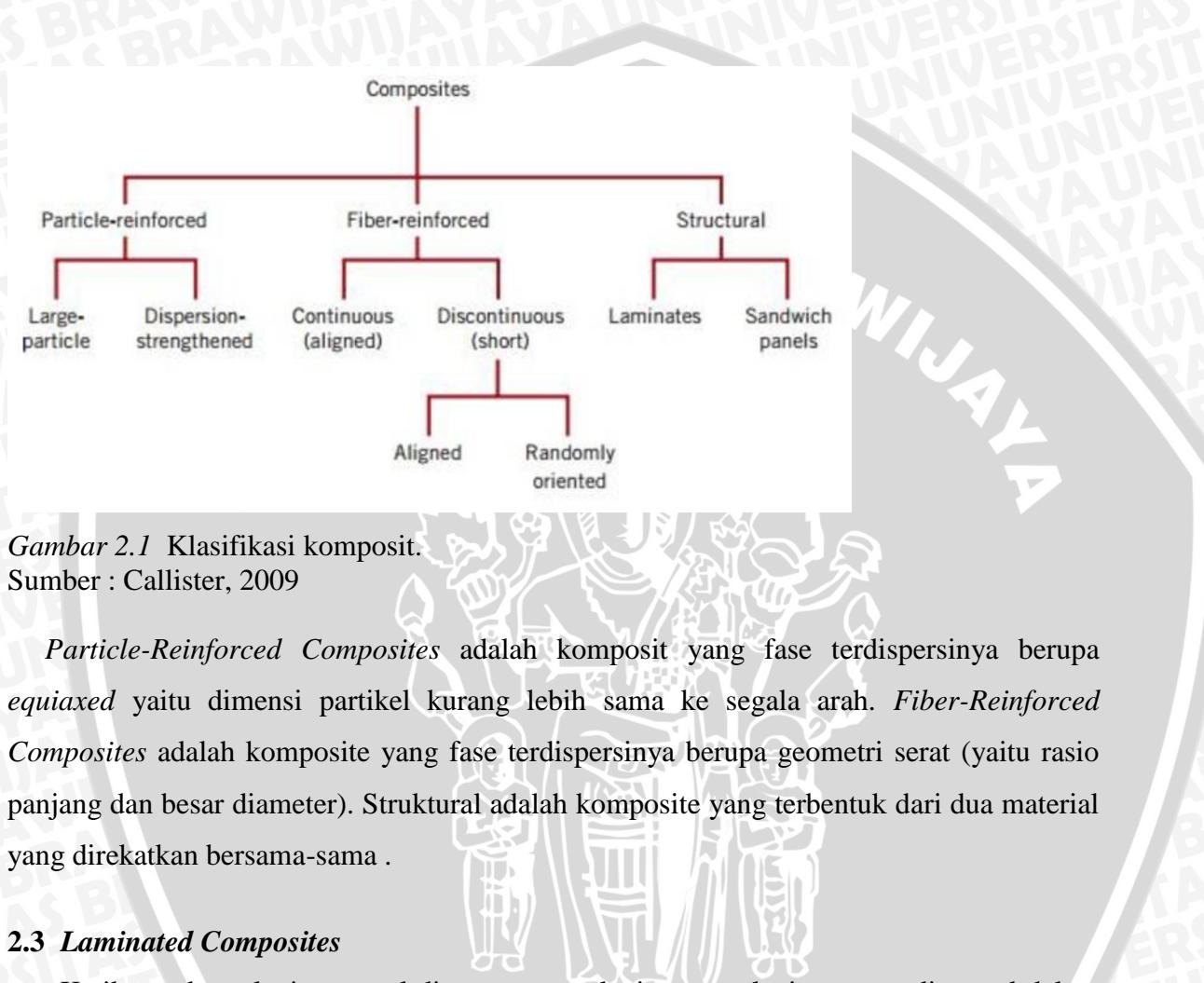
Yi Huang *et al.*, (2015) dalam penelitian tentang *Delamination and fatigue crack growth behavior in fiber metal laminates (GLARE) under single overloads*, penelitiannya bertujuan untuk mengetahui efek dari variasi *single overloads* terhadap pembentukan delaminasi dan laju perambatan retak pada *fiber metal laminates*. Penelitian ini dilakukan pada GLARE 2-2/1-0.3 menggunakan tipe *middle-tension* dengan dimensi 270 mm dan lebar 75 mm dengan panjang inisial retak ($2a_0$) 10 mm dan sebuah lubang dengan diameter 6 mm. Hasil dari penelitian ini menjelaskan ketika $K_{tip,ol}$ lebih kecil tidak ada perubahan jelas dalam pembentukan delaminasi dan laju pertumbuhan retak pun kembali dengan cepat ketingkat aslinya setelah *overload* dibagian logam. Tetapi ketika $K_{tip,ol}$ menjadi lebih besar perubahan yang jelas terjadi pada pembentukan pola delaminasi dan tingkat pertumbuhan retak setelah *overload* tidak dapat kembali ke keaslinya meskipun retak tumbuh diluar zona plastis yang berlebihan dengan besar pengurangan laju pertumbuhan retak menjadi lebih besar dengan meningkatnya rasio *overload* (R_{ol}).

2.2 Komposit

Komposit merupakan gabungan dari dua atau lebih material yang memiliki sifat yang berbeda, yang mana tersusun oleh fase matrik dan penguat (Mallick, 1997). Perbedaan material pembentuk ini akan membuat sebuah material baru yaitu komposit yang memiliki

sifat mekanik dan karakteristik yang berbeda dari material pembentuknya (Schwartz, 1984).

Berdasarkan jenis penguatnya, komposit diklasifikasikan menjadi 3 jenis, yaitu *Particle-Reinforced Composites*, *Fiber-Reinforced Composites* dan *Structural-Composites* (Callister, 2009).



Gambar 2.1 Klasifikasi komposit.

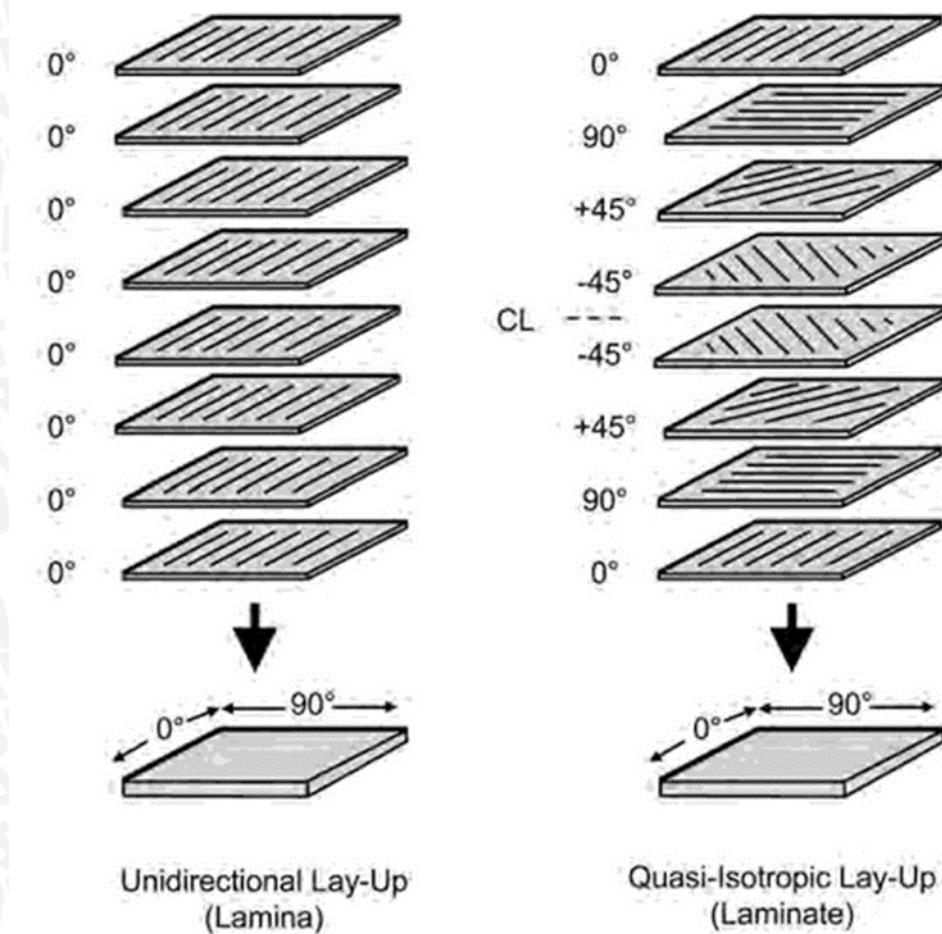
Sumber : Callister, 2009

Particle-Reinforced Composites adalah komposit yang fase terdispersinya berupa *equiaxed* yaitu dimensi partikel kurang lebih sama ke segala arah. *Fiber-Reinforced Composites* adalah komposite yang fase terdispersinya berupa geometri serat (yaitu rasio panjang dan besar diameter). Struktural adalah komposite yang terbentuk dari dua material yang direkatkan bersama-sama .

2.3 *Laminated Composites*

Ketika terdapat lapis tunggal dimana semua lapisan atau lapisan yang ditempel dalam orientasi yang sama, lapisan itu disebut sebagai sebuah lamina. Ketika lapisan itu ditempel pada sudut yang bervariasi, lapisan tersebut disebut *laminate* seperti yang terlihat pada Gambar 2.2. *Continous fiber composite* secara normal merupakan material *laminated* yang mana lapisan tunggal tersebut berorientasi ke arah yang akan meningkatkan kekuatan ke arah beban utama. *Unidirectional* (0°) lamina sangat kuat dan kaku pada arah 0° . Akan tetapi, lamina sangat lemah pada arah 90° karena beban yang harus dipindahkan oleh *polymeric matriks* yang lebih lemah (Campbell, 2010).





Gambar 2.2 Perbedaan antara lamina dan laminates
Sumber : Campbell, 2010

Fiber metal laminates (FMLs) merupakan komposit laminate hybrid yang tersusun dari paduan logam tipis dengan fiber reinforced adhesives. FMLs paling komersial yang tersedia yaitu *aramid-reinforced aluminium laminate* (ARALL) berdasarkan serat penguatnya aramid, *glass-reinforced aluminium laminate* (GLARE) berdasarkan serat penguatnya fiber glass, dan *carbon-reinforced aluminium laminate* (CARALL) berdasarkan serat penguatnya carbon. FMLs banyak digunakan pada bidang aerospace karena memiliki sifat material kekuatan yang tinggi, resistansi *fatigue* yang baik, toleransi yang baik terhadap perambatan retak, resistansi korosi yang baik, ketahanan terhadap impact yang baik, tahan api, *blunt notch strength*, *formability* dan *repairability*. Karena memiliki sifat material yang baik tersebut maka FMLs digunakan sebagai struktur badan pesawat komersial.

2.4 Fiber Glass

Serat gelas (*fiber glass*) adalah material yang tersusun atas untaian serta dari kaca. *Fiber glass* terbuat dari berbagai jenis kaca, tergantung dari penggunaannya. Komposisi utama *fiber glass* adalah silika dengan sisanya adalah oksida-oksida unsur dengan jumlah bervariasi seperti alumunium (Al), kalsium (Ca), magnesium (Mg), Natrium (Na) dan unsur-unsur lainnya. Serat kaca adalah yang paling umum dari semua serat penguat untuk dijadikan komposit matriks polimer (PMC). Fungsi utama serat dalam komposit adalah sebagai berikut (Mazumdar, 2002)

1. Untuk membawa beban. Dalam komposit struktur, 70-90% beban diterima oleh serat.
2. Untuk memberikan kekakuan, kekuatan, stabilitas panas, dan sifat struktur lainnya dalam komposit.
3. Menyediakan penghantaran atau insulasi elektrik, tergantung pada jenis serat atau serbuk yang digunakan.

Tabel 2.1
Sifat Mekanik *Fiber Glass*

Property	Value	Test Method
<i>Tensile Strength</i>	12,000 Psi	ASTM D 638
<i>Flexural Strength</i>	20,000 Psi	ASTM D 790
<i>Flexural modulus</i>	$0,9 \times 10^6$ Psi	ASTM D 790
<i>Compressive Strength</i>	17,000 Psi	ASTM D 695
<i>Thermal Expansion</i>	10×10^{-6} ($^{\circ}$ F)	
<i>Specific gravity</i>	1.5	

Sumber : Architectural Fiberglass, Inc (2012)

Serat gelas dapat dibedakan menjadi *E-glass*, *S-glass* dan *C-glass*. Dua jenis serat kaca yang biasa digunakan dalam komposit polimer diperkuat serat (FRP) industri adalah *E-glass* yang memiliki resistansi elektrik yang baik dan *S-glass* karena memiliki kekuatan yang tinggi. Jenis lain, yang dikenal sebagai *C-glass*, digunakan dalam aplikasi kimia yang membutuhkan ketahanan korosi yang lebih besar untuk asam daripada dari *E-glass*. Berdasarkan bentuknya, *fiber glass* dibedakan menjadi :

1. *Chopped Strand Mat* berbentuk serat acak dianyam secara bertindih dan tidak teratur kesegala arah. Jenis serat ini lebih fleksibel bila dibandingkan dengan bentuk lainnya.
2. *Roving*, berbentuk gulungan benang panjang yang digulung mengelilingi silinder roll.
3. *Woven roving* (WR), berbentuk anyaman seperti tikar, serat teranyam dibuat saling tindih secara selang seling dengan arah vertikal dan horizontal (0° dan 90°). Serat jenis

ini lebih kaku dibandingkan jenis serat lainnya, lebih sulit dibentuk mengikuti lekukan *mold*.

2.5 Matriks

Matriks merupakan bagian komposit yang membungkus dan mengelilingi bagian serat penguat, matriks inilah yang berfungsi melindungi serat penguat (*reinforcement*). Matriks harus memiliki kemampuan memanjang (*elongation*) yang tinggi dan modulus elastisitas lebih rendah dari serat penguat (Mazumdar, 2002). Menurut Mallick dan Mazumdar, fungsi utama dari matriks adalah sebagai berikut :

1. Matriks menjaga serat tetap ditempatnya, serta memberikan kekakuan dan bentuk terhadap struktur komposit yang terbentuk, dan menahan terjadinya retak.
2. Matriks mengikat serat atau penguat dengan membentuk ikatan yang koheren dengan serat dan matriks juga mendistribusikan tegangan beban ke dalam serat.
3. Matriks melindungi serat terhadap keadaan lingkungan yang merugikan, seperti bahan kimia yang berakibat korosi, dan kerusakan mekanik.

Berdasarkan matriks penyusunnya, komposit dibagi menjadi 3 bagian utama, *Polymer Matrix Composite*, *Ceramics Matrix Composite* dan *Metal Matrix Composite*. *Polymer Matrix Composite* akan dibahas pada bab ini karena merupakan jenis matriks yang digunakan dalam penelitian.

Matriks berperan penting dalam kekuatan tarik dan daya dukung dari struktur komposit. Matriks memberikan dukungan lateral terhadap kemungkinan terjadinya *buckling* pada beban tekan, sehingga mempengaruhi sampai batas tertentu dari kekuatan tekan bahan komposit. Interaksi antara serat dan matriks juga penting dalam merancang toleransi kerusakan pada struktur. Akhirnya, pengolahan dan cacat dalam bahan komposit sangat bergantung pada karakteristik pengolahan matriks. Misalnya, untuk polimer *epoxy* digunakan sebagai matriks dalam berbagai komposit kedirgantaraan, karakteristik pengolahan meliputi viskositas cairan, suhu menyebuhkan dan waktu curing (Mallick, 2007).

2.5.1 Polymer Matrix Composite

Polymer matrix composite (PMC) terdiri dari resin polimer sebagai matriks, dengan serat sebagai media penguat. *Polymer matrix composite* (PMC) merupakan jenis komposit yang paling banyak digunakan dalam aplikasi komposit, komposit ini adalah jenis

komposit dengan penggunaan terbesar dikarenakan kemudahan fabrikasi, dan biaya yang dihabiskan untuk membuat jenis komposit ini (Callister, 2009).

Polymer matrix composite diklasifikasikan menjadi 2 jenis utama yaitu *thermoset*, dan *thermoplastic* (Matthew, 1994) :

1. Thermoset

Jenis resin *thermoset* termasuk *irreversible* yang berarti tidak dapat mengikuti perubahan suhu. Sekali terjadi pengerasan , bahan *thermoset* tidak dapat dilunakkan dan dipakai kembali. Pemanasan yang tinggi tidak dapat melunakkan *thermoset* tetapi akan membentuk arang dan terurai. Contoh dari *thermoset* yaitu *Epoxy, phenolics, polyesters, vinyl ester, cyanate esters, bismaleimide* (BMI) and *Polyimide, Polyurethane*.

Keuntungan dari penggunaan resin jenis *thermoset* (Mazumdar, 2002)

- Serat lebih mudah basah, sehingga rongga dan porositas yang terjadi dapat berkurang.
- Pembuatan komposit lebih sederhana, biaya perkakas rendah.
- Pengolahan komposit termoset jauh lebih mudah karena sistem resin awal dalam keadaan cair.

Kekurangan dan pemrosesan *thermoset*

- Pengolahan komposit thermoset membutuhkan waktu *curing* yang *relative* lama yang membuat kecepatan produksi lebih rendah dari *thermoplastic*.
- Setelah kering dan padatkan, komposit *thermoset* tidak dapat didaur ulang untuk mendapatkan bentuk lain.

2. Thermoplastic

Thermoplastic masuk kedalam resin jenis *reversible*, karena jenis resin ini dapat dilunakkan dicairkan berulang kali (*recycle*) dengan menggunakan panas. *Thermoplastic* akan meleleh pada suhu tertentu, melekat mengikuti perubahan suhu dan mempunyai sifat dapat balik (*reversible*) pada sifat aslinya, yaitu kembali mengeras bila ditinggalkan. Contoh dari *thermoplastic* yaitu *Nylons, Polypropylene* (PP), *Polyetheretherketone* (PEEK), *Polyphenylene Sulfide* (PPS). Berikut keuntungan dan keuntungan dari *thermoplastic* (Mazumdar, 2002).

Keuntungan dari penggunaan *thermoplastic*

- Komposit *thermoplastic* dapat dan mudah didaur ulang dengan menggunakan panas dan tekanan dan pengolahan komposit *thermoplastic* relative lebih singkat.

Kerugian dari pemrosesan *thermoplastic*

- Pengolahan komposit *thermoplastic* lebih rumit, dengan menyediakan perkakas yang canggih dan kuat untuk perlakuan panas dan tekanan. Hal ini yang membuat biaya produksi dengan resin *thermoplastic* mahal.

Tabel 2.2
Perbandingan Sifat Mekanik *Thermoset* dan *Thermoplastic*

	Thermoset	Thermoplastic
<i>Young's Modulus (GPa)</i>	1.3-6.0	1.0-4.8
<i>Tensile Strength (MPa)</i>	20-180	40-190
<i>Fracture Toughness</i>		
<i>Klc (MPa\sqrt{m})</i>	0.5-1.0	1.5-6.0
<i>Glc (kJ/m²)</i>	0.002-0.2	0.7-6.5
<i>Maximum temperature (°C)</i>	50-450	25-230

Sumber: Matthew (1994)

2.5.2 Katalis

Katalis adalah bahan kimia yang dapat meningkatkan laju suatu reaksi tanpa mengubah komposisi kimia bahan setelah reaksi berakhir. Penggunaan katalis dibatasi berdasarkan kebutuhan dan *properties* dari resin yang dipakai, pada saat penambahan katalis ke dalam resin maka akan timbul panas (60°-90° C). Penambahan katalis tidak boleh terlalu banyak karena akan berakibat komposit menjadi getas akibat panas berlebih yang timbul saat proses pengeringan.

2.6 Metode Pembuatan

Berikut merupakan beberapa metode pembuatan komposit pada jenis *thermoset* dengan bahan fiber dan resin yaitu *filament winding*, *pultrusion*, *spray up*, *hand lay-up*, dan *RTM* (Mazumdar, 2002). Namun, pada penelitian ini menggunakan metode *hand lay-up* dengan penambahan penekanan (Compression).

2.6.1 Hand Lay-Up

Pembuatan Komposit dengan metode *Hand Lay-Up* merupakan cara yang paling sederhana karena dilakukan dengan cara manual. Untuk menggunakan metode ini, cetakan yang digunakan harus bersih dan mempunyai permukaan yang halus agar hasil dapat diperoleh secara maksimal.

Proses metode *Hand Lay-Up* dengan membuat lapisan (*Laminate*) dari serat dan resin diatas cetakan sampai ketebalan tertentu sesuai desain. Setelah ketebalan sesuai desain,

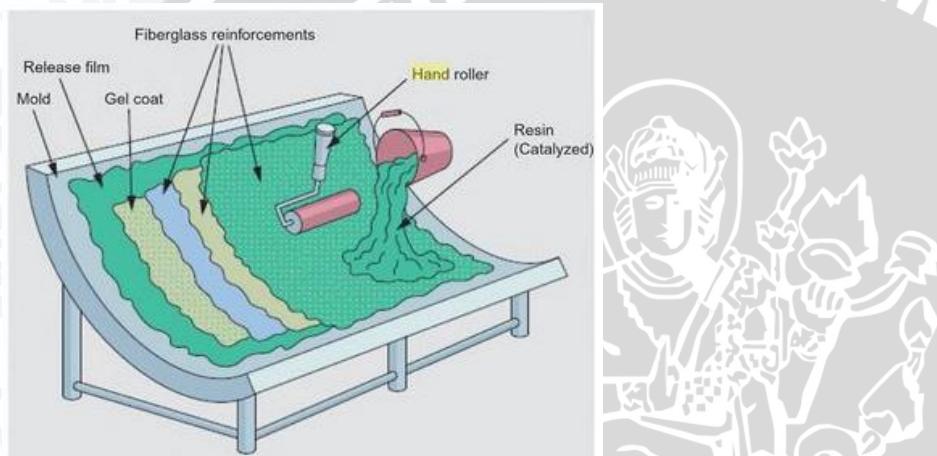
proses selanjutnya adalah merapatan lapisan komposit dengan menggunakan *roller*, agar udara di dalam komposit keluar dan permukaan menjadi rata.

Kelebihan Proses *Hand Lay-Up* :

- Proses penggerjaan relatif mudah dan murah
- Alat pendukung metode sederhana
- Dapat digunakan untuk benda besar maupun kecil
- Dapat digunakan untuk serat pendek maupun panjang

Kekurangan

- Keseragaman produk kurang seragam, bergantung penggerjaan tangan
- Penggerjaan relatif lama, dan volume produksi rendah



Gambar 2.3 Proses *Hand Lay-Up*

Sumber : Dodiuk, 2013

2.7 Aluminium

Aluminium merupakan suatu logam dengan campuran yang sedikit, pengembangan material ini untuk meningkatkan kekuatan dari aluminium biasa yang bersifat sangat ulet dan tahan terhadap karat. Komponen utama yang digunakan sebagai campuran adalah magnesium, silikon, zinc, copper dan mangan sedangkan nikel, kobal, kromium, besi, titanium dan zirconium digunakan sebagai komponen tambahan saja. Pemilihan bahan berikut sebagai komponen campuran dalam aluminium dikarenakan (Mazzolani, 1994) :

1. *Magnesium*, mampu menurunkan titik leleh menjadi 450°C (hal ini merupakan alasan mengapa digunakan sebagai logam untuk pengelasan), magnesium ini juga memiliki kemampuan untuk meningkatkan *work-hardening* dan tahan terhadap korosi yang disebabkan oleh air garam.

2. *Silicon*, mampu meningkatkan kekuatan dan keuletan serta menurunkan titik lelehnya. Apabila silikon dikombinasikan dengan magnesium maka memungkinkan timbulnya *hardening*.
3. *Zinc*, secara dratis dapat meningkatkan kekuatan dan menimbulkan panas dan dingin ketika terjadi *hardening*.
4. *Copper*, kadang-kadang dapat meningkatkan kekuatan dan menimbulkan efek dingin ketika *hardening*, tetapi dapat menurunkan kemampuannya untuk tahan terhadap karat, kemampuan pengelasan dan keuletan.
5. Nikel, dapat meningkatkan kekuatan pada kondisi dibawah suhu tinggi (dibawah suhu maksimum material dasarnya).
6. Titanium, mampu menurunkan ukuran partikel.
7. Zirconium, sebagai komponen penstabil, yang dapat berpengaruh terhadap *temperability*.
8. Chromium, meningkatkan resistansi terhadap tegangan akibat karat.
9. Besi, dapat meningkatkan kekuatan dari aluminium murni (Al 99.0, 99.5, 99.7, 99.8%) jika menggunakan persentase yang rendah.

2.8 Heat Treatment

Heat treatment adalah proses pemanasan pada logam untuk merubah sifat mekanisnya. Terdapat 5 jenis perlakuan panas yang sering dilakukan (Dosset & Howard, 2006) :

1. *Normalizing*, pemanasan logam hingga mencapai titik tertentu yang kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan dan pengeringan pada suhu ruang. Proses ini biasanya digunakan untuk mengembalikan efek tegangan yang disebabkan oleh pengcoran, penggeraan panas dan dingin, dan pengelasan.
2. *Annealing*, bertujuan untuk melunakkan logam dengan pemanasan untuk mengembalikan tegangan logam yang terjadi selama pembentukan atau proses penggeraan. Proses ini dilakukan dengan memanaskan logam hingga suhu, kemudian dilakukan penahanan selama rentang waktu tertentu yang kemudian dilaanjutkan dengan proses pendinginan lambat dengan menggunakan dapur listrik.
3. *Surface Hardening*, bertujuan meningkatkan kekerasan khususnya pada permukaan logam. Proses ini dilakukan dengan frekuensi yang tinggi untuk mengurangi penetrasi pemanasan, sehingga hanya permukaan panasnya saja yang dikeraskan.
4. *Quenching*, bertujuan untuk mengeraskan logam dengan memanaskan logam hingga beberapa derajat diatas suhu plastis, dan kemudian didinginkan dengan percepatan

pendingan tiba-tiba. Pendinginan dilakukan setelah logam mencapai beberapa derajat diatas suhu plastis lalu dicelupkan kedalam air atau oli. Setelah mencapai suhu tertentu, maka logam didinginkan kembali pada udara hingga suhu ruang.

5. *Tempering*, logam dipanaskan hingga beberapa derajat dibawah suhu plastis kemudian didinginkan secara bertahap untuk mengurangi kekerasan logam. Tujuannya untuk mengorbankan sekian persen kekerasan logam untuk ditukarkan dengan kelebihan dalam hal kepadatan dan kelenturan. Biasanya proses ini dilakukan untuk memperbaiki benda kerja setelah proses *quenching*.

2.9 Tegangan dan Regangan

2.9.1 Tegangan

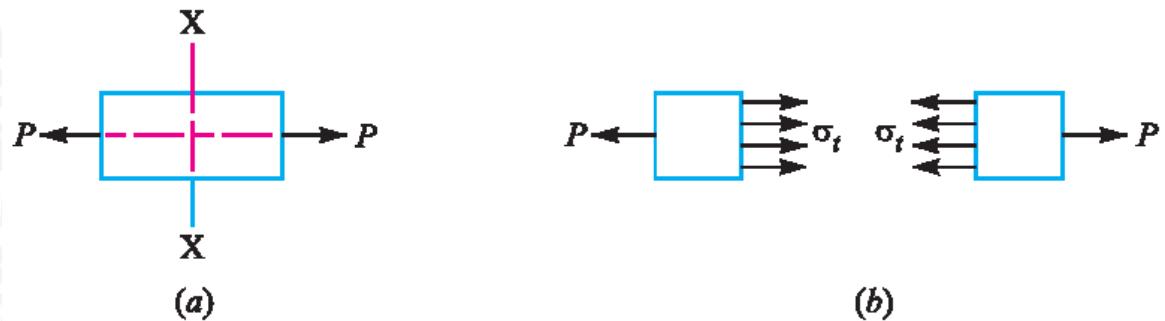
Tegangan didefinisikan sebagai intensitas gaya yang bekerja setiap satuan luas benda. Tegangan tidak dapat diukur tetapi dapat dihitung dan dirumuskan sebagai berikut :

Dimana :

S = tegangan (MPa)

$$P = \text{gaya}(N)$$

A = luas penampang (m^2)



Gambar 2.4 Terjadinya tegangan regangan

Sumber : khurmi (2005)

Tegangan dapat dibagi menjadi 2 berdasarkan jenis gaya yang bekerja terhadap bidang kontak (*cross section*), yaitu tegangan normal yaitu gaya yang bekerja tegak lurus terhadap bidang potong suatu batang dan tegangan geser yaitu gaya yang bekerja sejajar dengan bidang potong suatu batang. Sedangkan tegangan normal dibagi menjadi 2 berdasarkan arah gaya yaitu menjadi tegangan tarik (*tensile stress*) dan tegangan tekan (*compressive stress*).

2.9.2 Regangan

Regangan didefinisikan sebagai pertambahan panjang persatuan panjang. Regangan tidak memiliki dimensi dan satuan karena merupakan rasio antara dua panjang dan dihitung dengan persamaan :

Dimana :

ε = regangan

ΔL = pertambahan panjang

L = panjang mula-mula

Regangan ini bisa disebut regangan normal karena berkaitan juga dengan tegangan normal. Sehingga regangan juga dapat dibagi menjadi tegangan tarik yang diakibatkan karena adanya tegangan tarik dan regangan tekan yang diakibatkan oleh adanya tegangan tekan.

2.9.3 Hubungan Tegangan dan Regangan (*Hooke Law*)

Hubungan linier antara tegangan dan regangan untuk suatu batang yang mengalami tarik atau tekan sederhana dinyatakan dengan persamaan :

Dimana :

E = modulus elastisitas

S = tegangan aksial

ε = regangan aksial

Persamaan diatas bisa dikenal sebagai hukum hooke. Modulus elastisitas adalah perbandingan tegangan regangan didalam daerah elastis linier. Modulus elastisitas bisa dikenal sebagai *modulus young*, karena regangan tidak mempunyai dimensi maka satuan untuk E sama dengan satuan tegangan.

2.10 Fatigue

Fatigue merupakan suatu proses dari perubahan struktur awal dalam periode waktu yang diakibatkan oleh adanya beban dinamis pada material pada kondisi tertentu yang dapat mengakibatkan tegangan dan regangan yang berfluktuasi pada beberapa titik hingga

mencapai titik tertentu kemudian menimbulkan retakan merambat yang akhir dari proses ini adalah *fracture* (kegagalan) material. Sedangkan untuk fracture mechanic merupakan suatu proses untuk mengevaluasi kekuatan dari suatu struktur atau komponen dengan adanya suatu retakan yang diaplikasikan pada proses fatigue crack growth yang mencakup antara retak sampai patah. (Stephens, 2001)

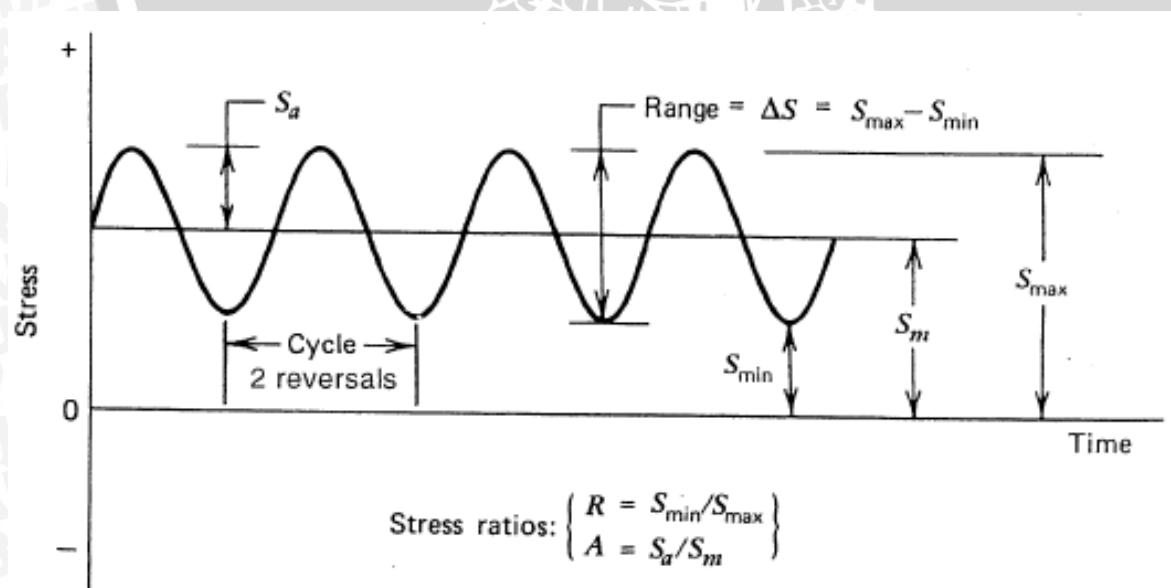
2.11 Beban Siklus

Beban siklus merupakan beban dinamis yang berubah terhadap waktu, beban ini sering terjadi pada permesinan dikarenakan getaran mesin dan sering disebut tegangan berulang (*repeated stresses*), tegangan bolak-balik (*alternating stresses*), atau tegangan berfluktuasi (*fluctuating stresses*) (Mouritz, 2012).

2.11.1 Komponen Beban Siklus

Beban siklus memiliki tegangan minimum dan maksimum, tegangan maksimum yang diberikan pada material sebenarnya masih dibawah kekuatan *yield*. Namun pembebahan dilakukan berulang dalam jumlah yang banyak sehingga menghasilkan kegagalan pada material. Kegagalan akibat beban siklus ini disebut sebagai *fatigue failure*.

Perbandingan tegangan maksimum dan minimum yang diberikan mempunyai pengaruh pada laju pertumbuhan retak. Gambaran beban yang berfluktuasi ditunjukkan pada gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2.5 Beban berfluktuasi dengan konstan amplitudo
Sumber : Stephen (2001)

Komponen beban siklus berulang pada gambar 2.5 Sebagai berikut:

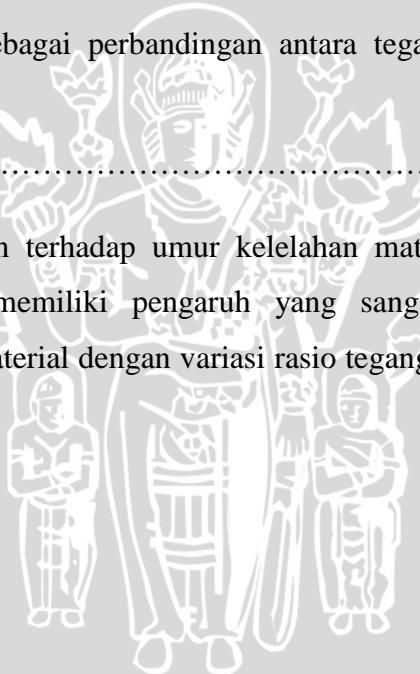
1. Tegangan rata-rata/ *mean stress* (S_m), yaitu nilai rata-rata dari tegangan maksimum dan tegangan minimum pada suatu pembebanan siklus.

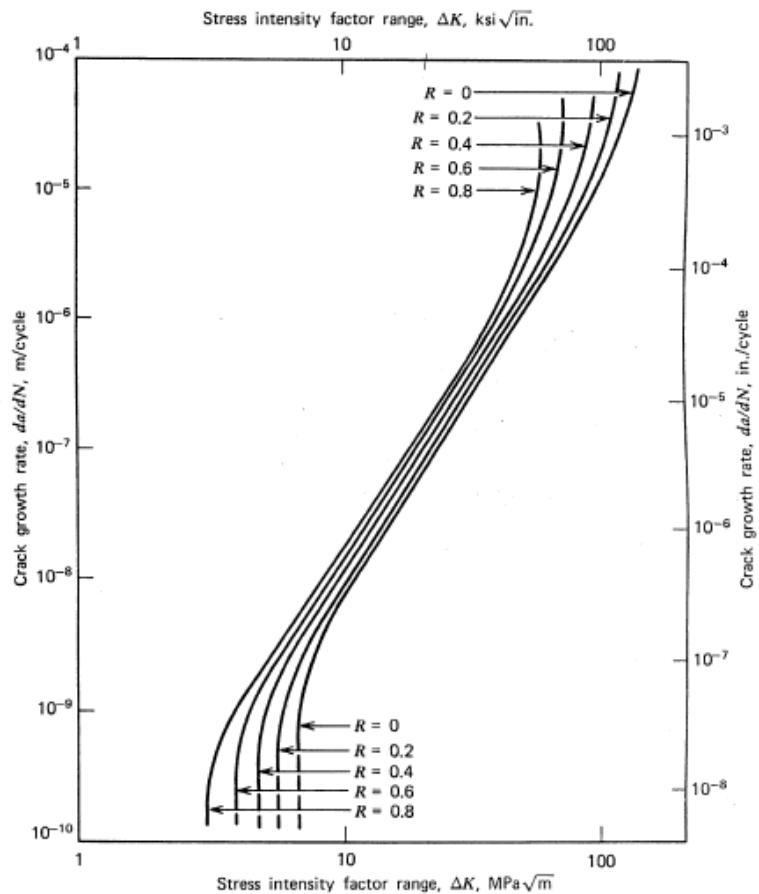
2. Jangkauan tegangan / stress range (ΔS), yaitu perbedaan antara tegangan maksimum dengan tegangan minimum pada suatu pembebahan siklus.

3. Tengangan amplitudo (S_a), yaitu setengah dari jangkauan tegangan.

4. Rasio tegangan (R), yaitu sebagai perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum.

Perbandingan rasio tegangan terhadap umur kelelahan material dapat dilihat pada gambar 2.6. Ratio tegangan memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap laju pertumbuhan retak pada suatu material dengan variasi rasio tegangan. Seperti yang terlihat pada kurva gambar 2.6 berikut:

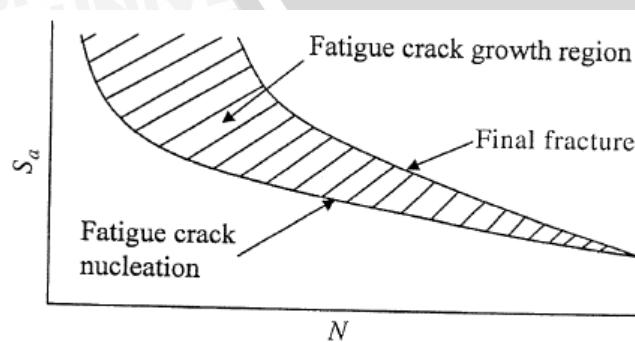




Gambar 2.6 Pengaruh rasio tegangan terhadap *fatigue growth life*

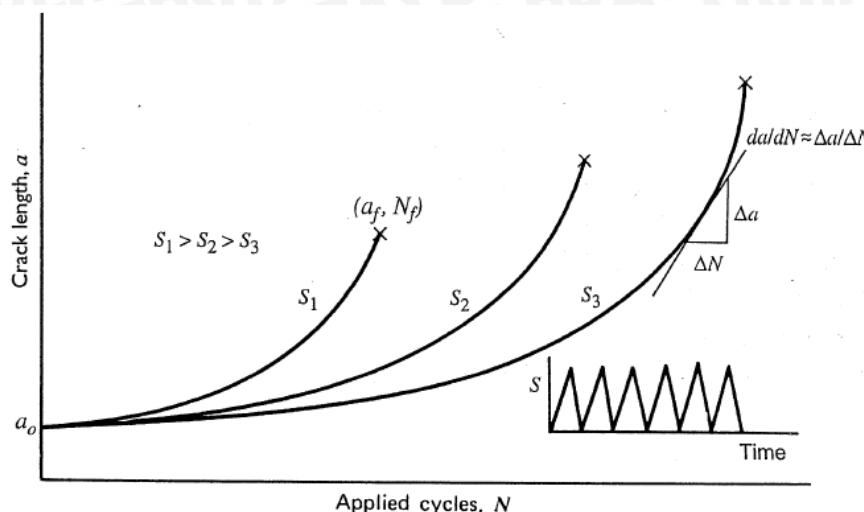
Sumber : Stephen (2001)

Tegangan amplitudo juga berpengaruh terhadap karakteristik pertumbuhan retak. Pada gambar 2.7 terlihat bahwa tegangan amplitudo mempengaruhi *fatigue life*, retak inti (*crack nucleation*) dan perambatan retak. Dimana semakin besar tegangan amplitudonya akan meningkatkan perambatan retak (gambar 2.8). Pada gambar 2.8 terlihat skematis tiga variasi pembebahan ($S_1 > S_2 > S_3$). Semua spesimen memiliki panjang inisial retak (a_0) yang sama dan tegangan minimum nol. Pada tegangan yang lebih besar dari kurva menjelaskan bahwa panjang retak dan umur kelelahan menjadi lebih pendek.



Gambar 2.7 Skematis tegangan aplitudo dengan umur material

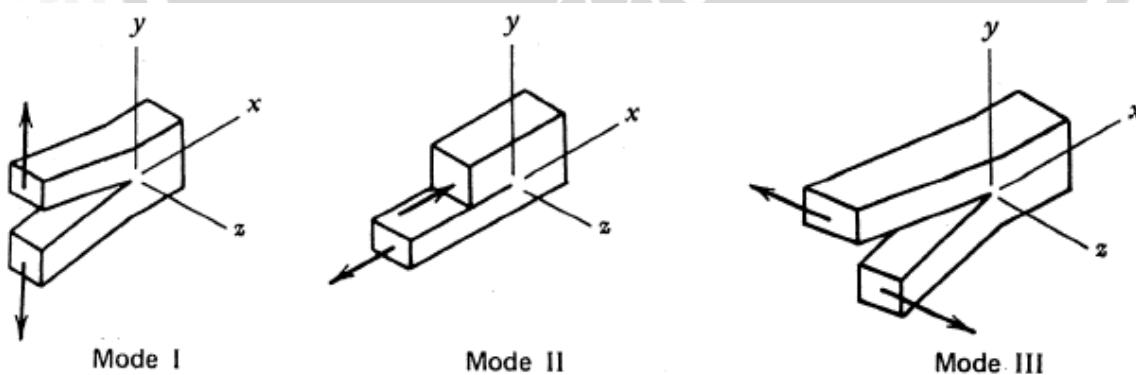
Sumber : Stephen (2001)



Gambar 2.8 Pengaruh tegangan amplitudo terhadap kurva panjang retak dan jumlah siklus pada rasio tegangan nol
Sumber : Stephen (2001)

2.12 Mekanisme Pertumbuhan Retak

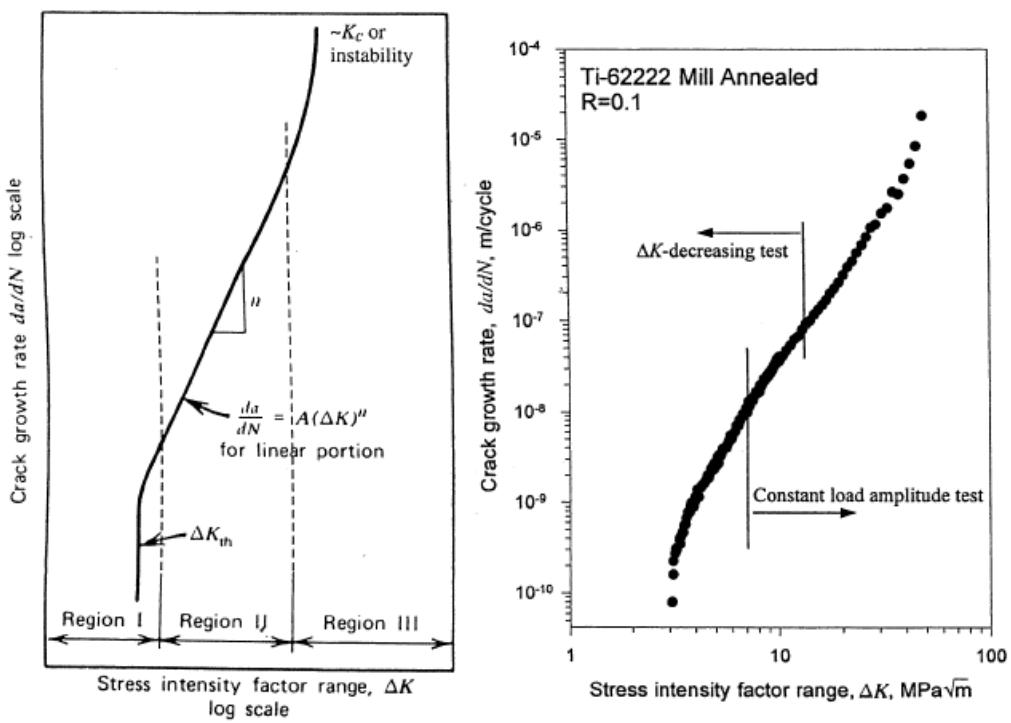
Patahan merupakan pemisahan atau pecahnya suatu benda padat menjadi dua bagian atau lebih yang diakibatkan adanya tegangan. Tahap awal pembentukan retak ini memerlukan jumlah siklus pembebahan yang cukup banyak. Perambatan retak yang terjadi pada tahap ini sangat lambat. Secara umum, ada tiga tipe/mode pembebahan yang menghasilkan terjadinya pembukaan retak yaitu mode I yang disebut *opening mode* yang disebabkan oleh gaya tarik (*tension loading*) yang bekerja tegak lurus terhadap bidang retak struktur material, mode II *sliding/shearing* mode yang disebabkan gaya gesek (*shearing loading*) yang menghasilkan arah rambat retak yang sejajar dengan arah beban, dan mode III *tearing mode* juga disebabkan oleh gaya geser sehingga arah permukaan retaknya bergeser berlawanan (Dowling, 1999:296).



Gambar 2.9 Mode pembukaan retak
Sumber : Stephen (2001)

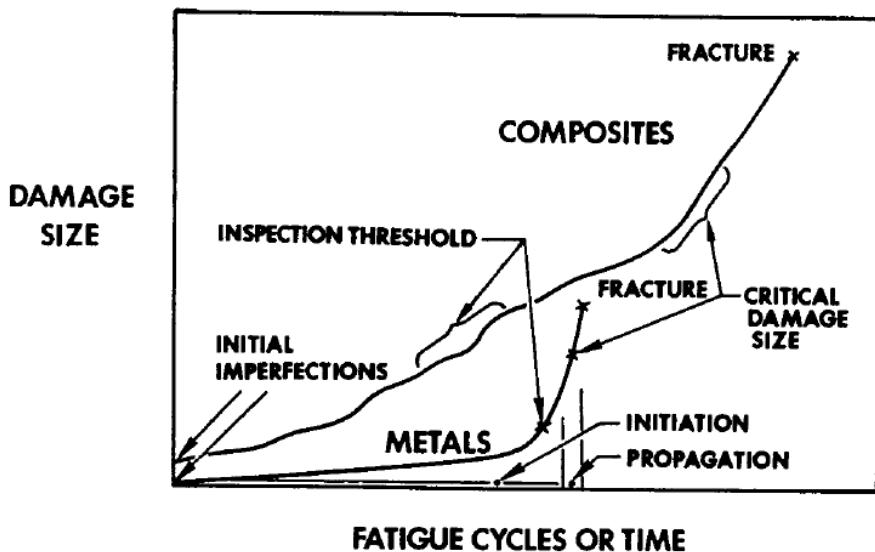
Mode I sering terjadi kelelahan perambatan retak terbesar karena merupakan mode utama macroskopik kelelahan perambatan retak (Stephen, 2001:144). Skematik perilaku pertumbuhan retak dibagi menjadi tiga region/daerah seperti gambar 2.10. Pada daerah I ini perambatan retak masih belum kelihatan dimana laju perambatan retak kira-kira 1×10^{-10} m/cycle. Daerah II terlihat kurva log da/dN dan log ΔK dianggap linear. Perambatan retak di daerah ini berlaku persamaan hukum paris.

Sedangkan untuk daerah III laju perambatan retak sangat tinggi dan pertumbuhan tidak stabil (Stephen, 2001:144-145).



Gambar 2.10 Skematik prilaku pertumbuhan
Sumber : Stephen (2001)

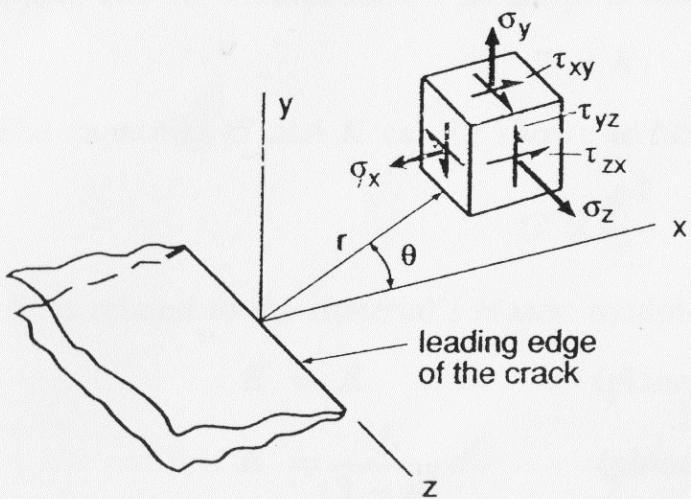
Namun untuk karakteristik perambatan retak material komposit berbeda dengan logam, dimana material komposit memiliki karakteristik *fatigue* yang baik seperti pada gambar 2.11. Awal dari kerusakan material komposit karena fiber rusak, delaminasi, retak pada matrik, *voids*, dan lain-lain. Tetapi awal kerusakan untuk logan dikarenakan adanya celah sempit atau retak dan pertumbuhan kerusakan sebelum mencapai *fracture* biasanya mendadak (Jones, 1999 : 333).



Gambar 2.11 Karakteristik kerusakan/kelelahan pada material komposit dan logam
Sumber : Jones (1999)

2.13 Faktor Intensitas Tegangan

Stress intensity factor digunakan untuk mengetahui besarnya tegangan yang berada disekitar ujung retak pada material linier-elastik dan isotropik. Dimana besar tegangan diarea ujung retak sebanding dengan *stress intensitas factor* pada kondisi tertentu. Distribusi tegangan yang berada disekitar ujung retak dapat dianalisa dengan mengamati gambar 2.12.



Gambar 2.12 Sistem koordinat 3 dimensi untuk daerah ujung retak
Sumber : Dowling (1999)

Distribusi tegangan untuk kasus pembebanan gaya tarik (tension loading) yang bekerja tegak lurus dengan bidang retak, tegangan diujung retak bisa dinyatakan dalam persamaan berikut berdasarkan teori linier elastisity (LEFM) (Dowling, 1999:298).

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}r} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \quad (2-9)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}r} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \quad (2-10)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}r} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \dots \quad (2-11)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (2-12)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (2-13)$$

Keterangan :

K_I = faktor intensitas tegangan

σ_x , σ_y , σ_z = tegangan menurut arah sumbu

τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} = tegangan geser pada bidang x-y, y-z, z-x

σ = tegangan nominal

a = panjang retak

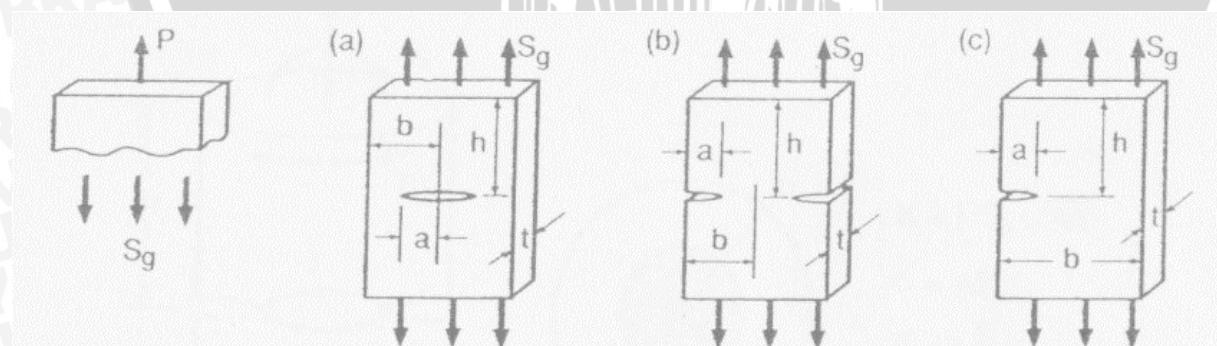
r = jarak suatu titik dari ujung retak

θ = posisi suatu titik dari sumbu retak

Bentuk sederhana untuk menunjukkan nilai K_I adalah

$$K_I = F \times S \times \sqrt{\pi \times a} \quad (2-14)$$

Dimana faktor F adalah fungsi dimensi yang tergantung pada konfigurasi geometri dan pembebahan.



Gambar 2.13 Faktor geometri untuk 3 kasus pada plat pembebatan tarik.

Sumber : dowling (1999)

Nilai untuk a/b yang kecil dan batas akurasi 10% :

a. $K = S_g \times \sqrt{\pi \times a}$ ($a/b \leq 0.4$)

b. $K = 1.12 \times S_g \times \sqrt{\pi \times a}$ ($a/b \leq 0.6$)

$$c. \quad K = 1.12 \times S_g \times \sqrt{\pi \times a} \quad (a/b \leq 0.13)$$

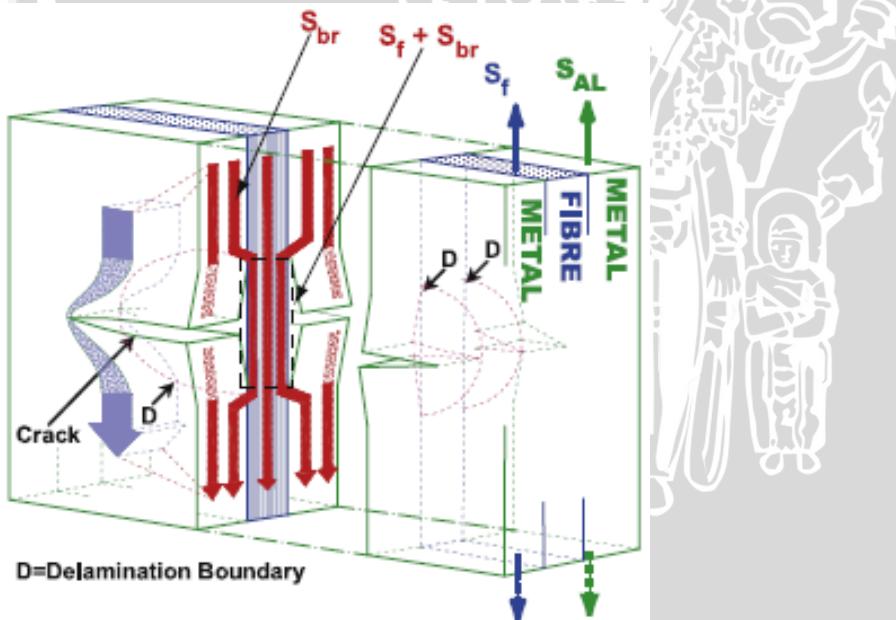
Untuk setiap $\alpha = a/b$:

$$a. F = \frac{1 - 0.5\alpha + 0.326\alpha^2}{\sqrt{1-\alpha}} \quad (h/b \geq 1.5)$$

$$b. F = \left(1 + 0.122 \cos^4 \frac{\pi a}{2}\right) \sqrt{\frac{2}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2}} \quad (h/b \geq 2)$$

$$c. F = 0.265(1 - \alpha)^4 + \frac{0.857 + 0.265\alpha}{(1-\alpha)^3/2} \quad (h/b \geq 1)$$

Pada material *fiber metal laminates*, faktor intensitas tegangan pada logamnya dipengaruhi juga oleh faktor intensitas tegangan yang ditransfer oleh logam ke komposit yang berada didalam lapisan. Hal ini dikarenakan pada material *fiber metal laminates*, tegangan di area ujung retak pada aluminium tertransfer ke komposit sehingga laju perambatan retak pada alumunium menurun seperti yang terlihat pada gambar 2.14 (S.U. Khan, 2011). Sehingga faktor intensitas tegangan diujung logam (aluminium) akan berkurang.



Gambar 2.14 Skema tegangan pada fiber metal laminates
Sumber : S.U. Khan et al. (2011)

Keterangan

K_{tip} = faktor intensitas tegangan diujung retak pada layer aluminium pada FMLS

K_{far} = faktor intensitas tegangan pada aluminium tanpa adanya komposit

K_{br} = faktor intensitas tegangan yang ditransfer dari aluminium ke komposit pada FMLS

2.14 Hipotesa

Dengan berdasarkan pada tinjauan pustaka yang dibahas menunjukkan bahwa semakin besar rasio tegangan yang diberikan pada *fiber metal laminates* menyebabkan laju perambatan retak meningkat sehingga mengakibatkan umur dari material semakin pendek. Sedangkan semakin besar tegangan amplitudo akan menyebabkan memperpendek umur kegagalan material (*fatigue life*) sehingga laju perambatan retaknya pun meningkat. Hal ini dikarenakan pengaruh besar kecilnya faktor intensitas tegangan dan adanya sebagian tegangan dari aluminium yang tertransfer ke bagian *fiber reinforced composites* diujung retak.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode eksperimen (*experimental research*). Dalam penelitian ini objek penelitian dibuat dalam bentuk spesimen kemudian diuji untuk mengetahui karakteristik perambatan retaknya. Dengan penelitian ini akan diteliti pengaruh rasio tegangan dan *amplitude stress* terhadap karakteristik perambatan retak pada *fiber metal laminates*.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian mengenai pengaruh rasio tegangan dan *amplitude stress* terhadap karakteristik perambatan retak pada *fiber metal laminates*, dilaksanakan pada rentang waktu Juli – Desember 2016 mulai tahap konsultasi judul, penelitian dilaboratorium, sampai dengan analisis data. Dan penelitian ini dilakukan pada :

1. Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Laboratorium Proses Produksi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Laboratorium Sentral Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

3.3 Variabel Penelitian

3.3.1 Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang bebas ditentukan nilainya sebelum dilakukan penelitian. Dalam penelitian ini variable bebas yang digunakan adalah:

1. Rasio tegangan $R = 0, R = 0.2, R = 0.3, R = 0.4$, dan $R = 0.5$ pada tegangan amplitudo yang sama yaitu 7 MPa.
2. Tegangan amplitudo $S_a = 7 \text{ MPa}, 8.75 \text{ MPa}, 10.5 \text{ MPa}, 12 \text{ MPa}$, dan 14 MPa pada rasio tegangan yang sama ($R = 0$).

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel hasil yang nilainya tidak dapat ditentukan oleh peneliti dan tergantung pada nilai variabel bebasnya. Dalam penelitian ini variabel terikat yang diamati adalah :

1. Panjang retak.



2. Laju perambatan retak.

3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang ditentukan oleh peneliti dan nilainya ditentukan konstan. Variabel yang dikontrol dalam penelitian ini adalah :

1. Annealing Aluminium dengan waktu *Holding* pada temperatur 300°C selama 1 jam.
2. Aluminium yang digunakan aluminium komersial dengan ketebalan 0.4 mm kekuatan *ultimate* 82 MPa dan *yield* 58 MPa.
3. Menggunakan serat sintetis jenis *woven e-glass*.
4. Menggunakan *adhesive* merk adhesive epoxy araldite standart.
5. Perbandingan volume *epoxy* dengan *hardener* dalam pemakaian 1 : 1.
6. Orientasi serat 0°/90° dimana 0° sejajar arah *roll* aluminium.
7. Dalam pembuatan spesimen diberi beban penekanan sebesar 0,89 kg/cm² Selama 20 detik.
8. Ukuran spesimen 200 mm x 40 mm.
9. Terdapat *nocth* dikanan kiri dengan panjang masing-masing 2.5 mm.
10. Pola pembebahan sinusoidal dengan konstan amplitudo.
11. Frekuensi pembebahan 4 Hz.

3.4 Peralatan dan Bahan Penelitian

3.4.1 Peralatan

1. Gelas baker

Untuk mencampurkan *epoxy* dan *hardener*.

2. *Stopwatch*

Untuk mengukur waktu penekanan saat membuat spesimen.

3. *Glove*

Keamanan waktu pembuatan spesimen.

4. *Cutter*

Sebagai alat pemotong spesimen dan pembuatan *notch*.

5. Kertas gosok

Untuk mengurangi kekasaran permukaan aluminium agar terlihat jelas retak akibat pembebahan. Yang digunakan dalam penelitian ini dengan nomor kekasaran 1000, 1200, 1500, 2000, dan 5000.



6. Kain flanel

Untuk mengurangi kekasaran permukaan aluminium setelah digosok dengan kertas gosok agar terlihat jelas retak akibat pembebahan.

7. Autosol

Untuk mengurangi kekasaran permukaan aluminium agar terlihat jelas retak akibat pembebahan. Yang digunakan bersamaan dengan kain flanel.

8. Dapur listrik

Digunakan untuk memberikan perlakuan panas *annealing* pada allumunium guna menghilangkan tegangan sisa akibat *rolling*.

Tabel 3.1
Spesifikasi Dapur Listrik

No.	Item	Description
1.	Merk	OPENBAU HOFMAN
2.	Tipe	E/90
3.	Votage	220 volt
4.	Daya	3.3 kW
5.	Suhu max	1100 °C
6.	Made	Austria



Gambar 3.1 Dapur Listrik

9. Machine press

Digunakan menekan spesimen dalam membuat spesimen. Dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3.2
Spesifikasi *Machine Press*

No.	<i>Item</i>	<i>Description</i>
1.	<i>Capacity</i>	15 ton
2.	<i>Cylinder Bore</i>	80 mm
3.	<i>Overall Height</i>	1650 mm
4.	<i>Red Stroke</i>	100 mm
5.	<i>Transverse Width</i>	800 mm
6.	<i>Screw Stroke</i>	110 ton
7.	<i>Floor Area</i>	860 x 750 mm ²
8.	<i>Oil Capacity</i>	1000 cc
9.	<i>Pressure</i>	300 kg/cm ²
10.	<i>Weight</i>	200 kg
11.	<i>Displacement of Ram</i>	240 mm



Gambar 3.2 *Machine Press*

10. Hydraulic Servo Pulser

Digunakan untuk uji Tarik dan uji *fatigue*. Alat ini terhubung dengan komputer yang terinstall *software* untuk menjalankan alat tersebut.

Tabel 3.3
Spesifikasi *Hydraulic Servo Pulser*

No.	Item	Description
1	<i>Type</i>	<i>Hydraulic Servo</i>
1.	<i>Max test load</i>	50 ton
2.	<i>Max frekuensi</i>	11 Hz
3.	<i>PC Controlled Function</i>	<i>Load and displacement</i>
4.	<i>Max test space</i>	100 mm
5.	<i>Min test space</i>	-100 mm
6.	<i>Main waveform</i>	<i>Sine, square, triangle</i>
7.	<i>Extensometer</i>	50 mm gage length
8.	<i>Voltage</i>	380 V
9.	<i>Daya</i>	6000 Watt



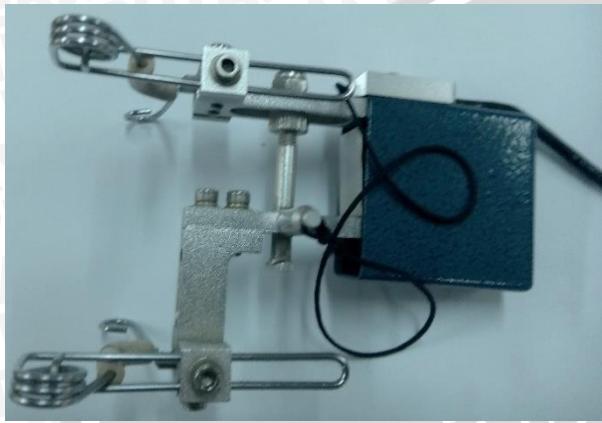
Gambar 3.3 *Hydraulic servo pulser*

11. Extensometer

Digunakan untuk mengetahui *displacement* disekitar inisial retak.

Tabel 3.4
Spesifikasi Extensometer

No.	Item	Description
1.	Gage length	50 mm



Gambar 3.4 Extensometer

12. Kamera Dino-lite microscope

Digunakan sebagai pengambilan data dengan cara mengukur panjang retak.

Kamera ini tersambung pada komputer yang sudah terinstall *software* untuk melihat hasil gambarnya.

Tabel 3.5
Spesifikasi Kamera Dino-Lite Microscope

No.	Item	Description
1.	Interface	USB 2.0
2.	Resolution	1.3 MP
3.	Sensor	Color CMOS
4.	Lighting	8 white LED lights switched on/off by software
5.	Magnification Rate	20x – 200x
6.	Microtouch	Touch sensitive trigger for taking pictures
7.	Operating Sistem	Windows 10, 8, 7, Vista, XP MAC OS 10.4 or later



Gambar 3.5 Kamera Dino-lite microscope

3.4.2 Bahan

1. Aluminium alloy

Sebagai metal alloy pada fibre metal laminates. Yang digunakan adalah aluminium komersial dengan kekuatan *ultimate* 82 MPa dan *yield* 40 MPa.

2. Adhesive epoxy Araldite Standard

Sebagai matrik dalam pembuatan komposit atau juga *adhesive* antara *fiber glass* dan aluminium. Dengan data propertis yang terlihat pada tabel 3.6 sebagai berikut:

Tabel 3.6
Data Propertis Produk Epoxy

Property	Araldite standard	Araldite standard	Araldite standard
	Resin	Hardener	Mixed
Colour	Neutral	Yellow	Pale yellow
Specific gravity	ca. 1.17	ca. 0.97	ca . 1.07
Viscosity at 25°C (Pas)	30-50	20-40	30-45
Pot life (100 g at 25°C	-	-	100-150 minutes

Sumber : Huntsman Advanced Materials (2011)

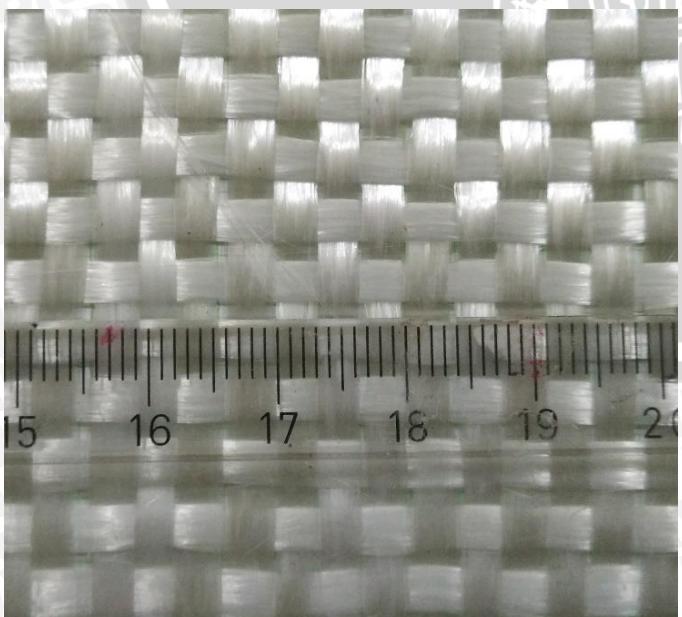


Gambar 3.6 Araldite standard

Prosedur penggunaan dari araldite sendiri adalah sebagai berikut:

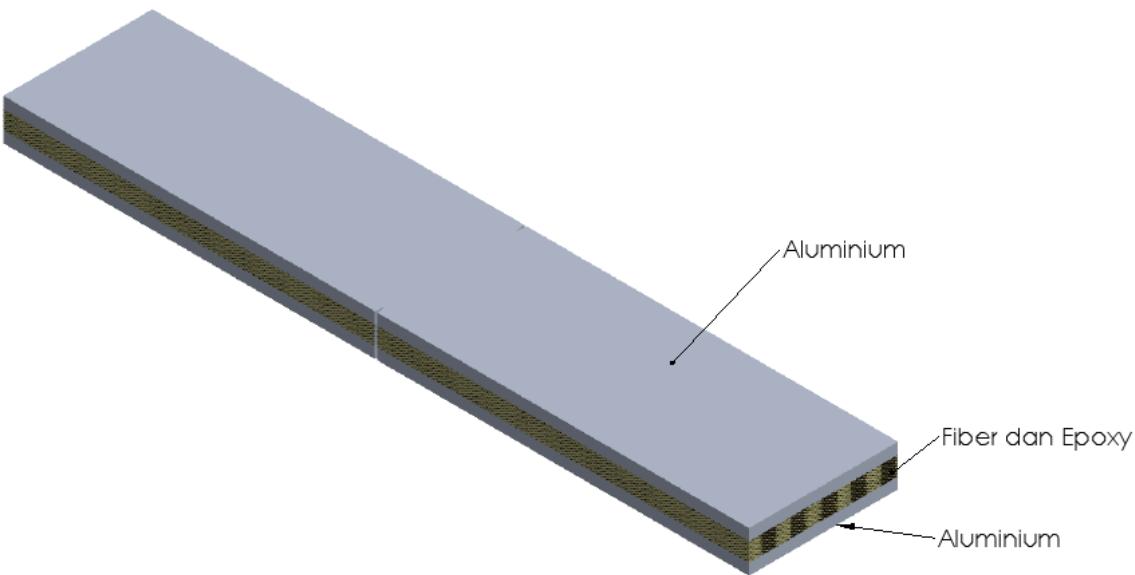
1. Pastikan permukaan yang digabung kering dan bersih.
 2. Campurkan resin dan *hardener* dengan perbandingan volume yang sama.
 3. Aduk rata dan digunakan sebelum 90 menit dari pengambilan dalam bungkusnya.
 4. Setelah direkatkan tunggu selama 12 jam untuk pengeringan
 5. Siap digunakan
3. *Glass fiber woven roving*

Sebagai serat dalam komposit, yang digunakan adalah *woven roving* ukuran 200.

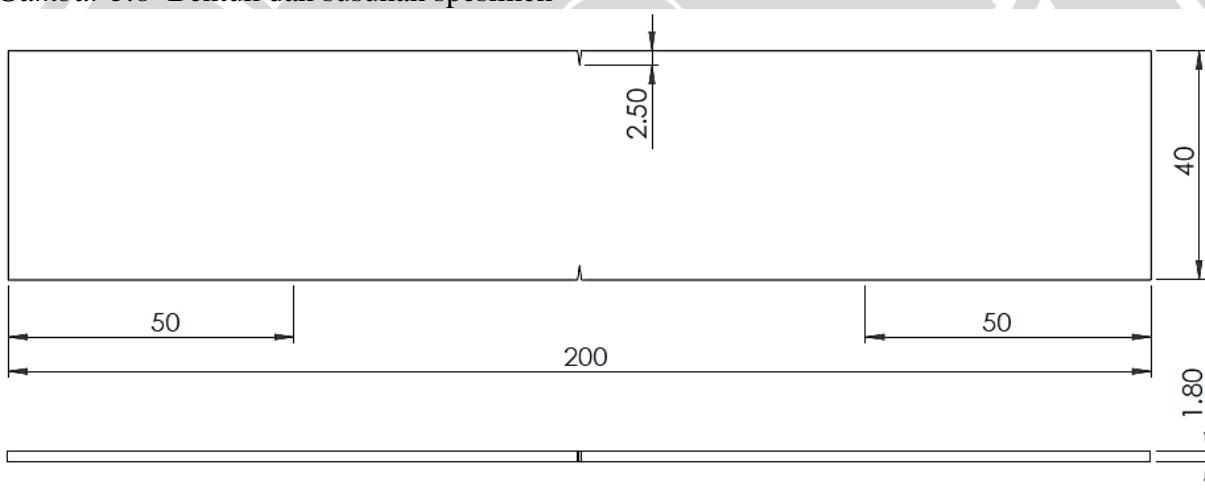


Gambar 3.7 Glass fiber woven roving

3.5 Bentuk dan Dimensi Spesimen



Gambar 3.8 Bentuk dan susunan spesimen



Gambar 3.9 Dimensi spesimen (mm)

3.6 Instalasi Penelitian



Gambar 3.10 Instalasi penelitian uji *fatigue*

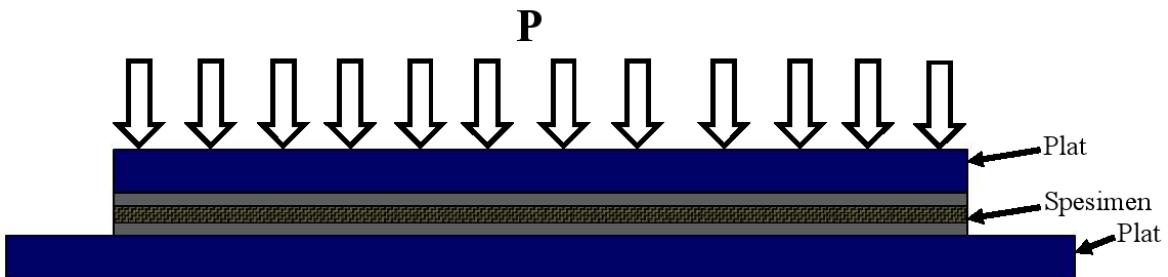
3.7 Rancangan Penelitian

1. *Heat treatment* aluminium
2. Pembuatan spesimen
3. Pengujian kekuatan mekanik
4. Pengujian *fatigue*
5. Pengambilan data
6. Pengolahan data
7. Pembuatan grafik



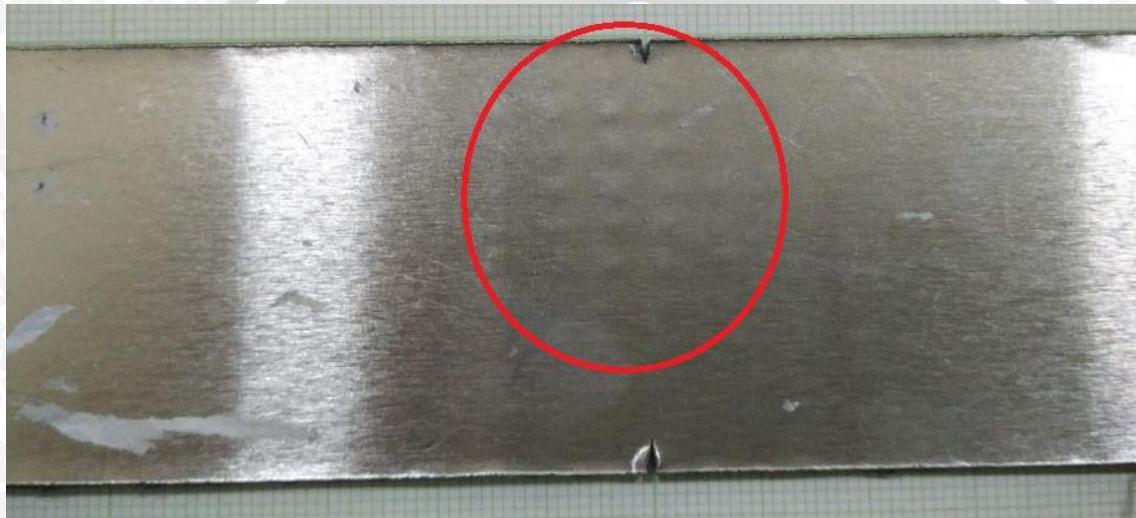
3.7.1 Pembuatan Spesimen

1. *Heat treatment annealing* aluminium dengan suhu *holding* 300°C selama 1 jam dan pendinginan dalam dapur listrik.
2. Siapkan alumunium dan fiber sesuai ukuran.
3. Campur *epoxy* dan *hardener* pada gelas baker dan diaduk dengan kecepatan konstan.
4. Tuangkan dan ratakan campuran *epoxy* ke sisi aluminium yang akan disatukan.
5. Satukan kedua aluminium pada sisi yang diberi campuan *epoxy* dengan ditengahnya diberi serat fiber orientasi 0°-90°. Dimana 0° sejajar dengan arah *roll* aluminium.
6. Beri beban penekanan pada spesimen dengan beban 0,89 kg/cm² selama 20 detik.

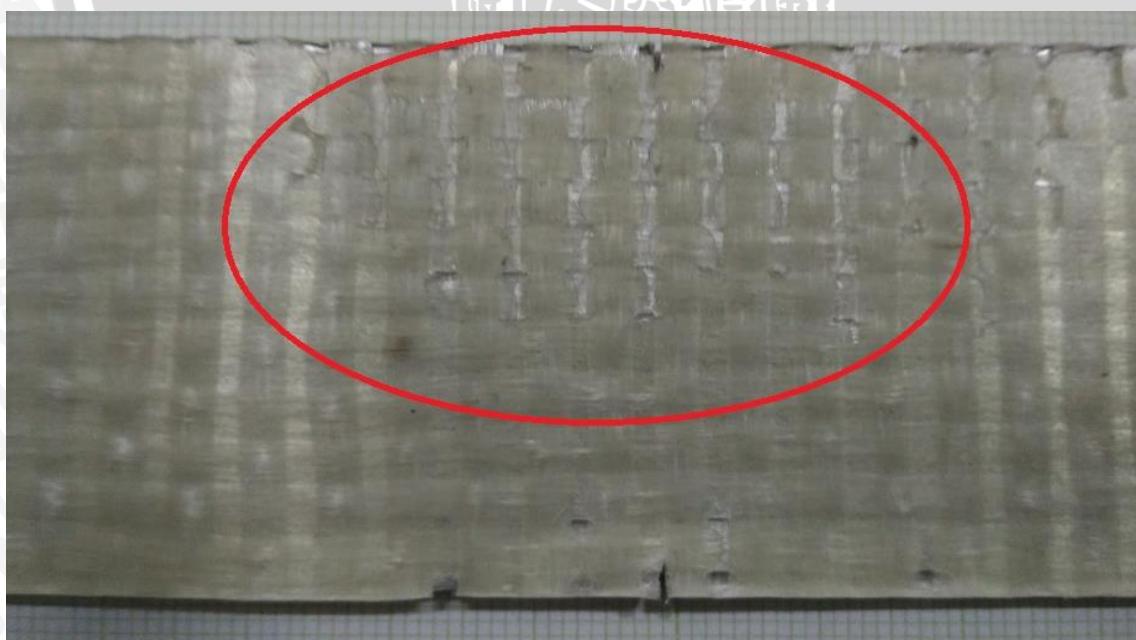


Gambar 3.11 Beban penekanan pada spesimen

7. Tunggu hingga 12 jam untuk pengeringan spesimen.
8. Amatilah hasilnya apakah ada kerusakan atau kegagalan.



a.



b.

Gambar 3.12 Ciri-ciri penampang yang gagal, a. penampang luar gagal, b. bagian dalam dari penampang luar yang gagal



Gambar 3.13 Ciri-ciri penampang yang berhasil, a. penampang luar yang bagus, b. bagian dalam dari penampang luar yang bagus

9. Potong sesuai dimensi spesimen untuk uji tarik dan *fatigue* .
10. Buat inisial retak pada spesimen uji *fatigue*.
11. Gosok salah satu bagian spesimen uji *fatigue* yang akan diteliti dengan kertas gosok kemudian kain flannel yang dicampur autosol sampai kekasaran berkurang.

3.7.2 Pengujian Spesimen Uji Tarik

1. Saipkan spesimen yang akan diuji yaitu aluminium dan *fiber metal laminates*.
2. Pastikan spesimen sesuai dimensi standart masing-masing. Untuk aluminium menggunakan standart ASTM E8/E8 M dan untuk *fiber metal laminates*, *fiber reinforced composites* dan *epoxy* menggunakan standart ASTM D 638.

3. Nyalakan komputer yang terhubung dengan alat *hydraulic servo pulser*.
4. Nyalakan pompa dan *colling* untuk pendinginan mesin.
5. Nyalakan tombol *power* alat *hydraulic servo pulser*.
6. Buka *software* pada komputer yang terhubung dengan alat *hydraulic servo pulser*.
7. Pilih tombol *turn on* pada *software* untuk menghidupkan mesin *hydraulic servo pulser* dan tunggu beberapa saat.
8. Atur dan pasang spesimen pada penjepit.
9. *Setting speed of testing* sesuai standar pengujian. ASTM E8/E8M dengan *speed* 0.04 kN/s (8 MPa/s) dan untuk ASTM D 638 dengan *speed* 0.0833 mm/s (5 mm/menit).
10. Tekan tombol *start* pada *software* yang dihubungkan pada alat *hydraulic servo pulser*.
11. Amati pertambahan beban dan panjang sampai spesimen patah.
12. Pengolahan data.
13. Hasil yang didapat adalah sebagai berikut:

Tabel 3.7
Data Hasil Uji Tarik

Spesimen	Kekuatan <i>Ultimate</i> (MPa)	Kekuatan <i>Yield</i> (MPa)	<i>Elongation</i>
Aluminium	83	58	8%
<i>Fiber Epoxy</i>	103		4%
<i>Fiber Metal Laminates</i>	99	60	3.8%

3.7.3 Pengujian Spesimen Uji *Fatigue*

1. Nyalakan komputer yang terhubung dengan alat *hydraulic servo pulser*.
2. Nyalakan pompa dan *colling* untuk pendinginan mesin.
3. Nyalakan tombol *power* alat *hydraulic servo pulser*.
4. Buka *software* pada komputer yang terhubung dengan alat *hydraulic servo pulser*.
5. Pilih tombol *turn on* pada *software* untuk menghidupkan mesin *hydraulic servo pulser* dan tunggu beberapa saat.
6. Atur dan pasang spesimen pada penjepit.
7. Pasang *ekstensometer* pada spesimen.
8. Pasang instalasi kamera *microscope* dan sambungkan ke laptop yang sudah terinstal softwarenya.
9. Fokuskan kamera *microscope* sampai gambar terlihat jelas.

1. Menghitung laju perambatan retak dengan menggunakan metode perhitungan *secant method* :

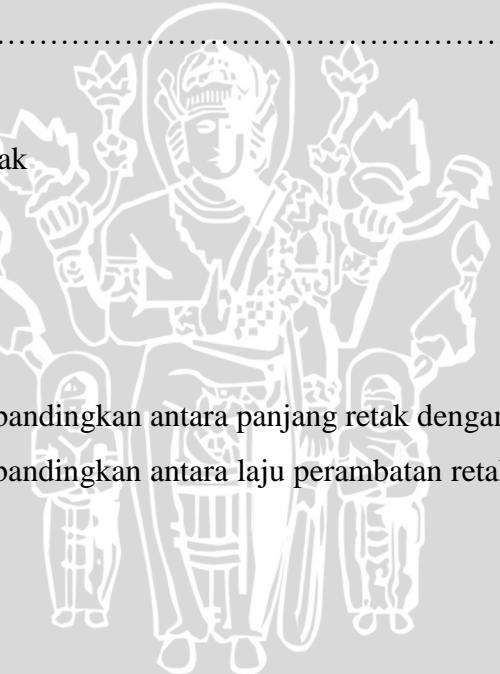
da/dN = laju perambatan retak

a = panjang retak

N = jumlah siklus

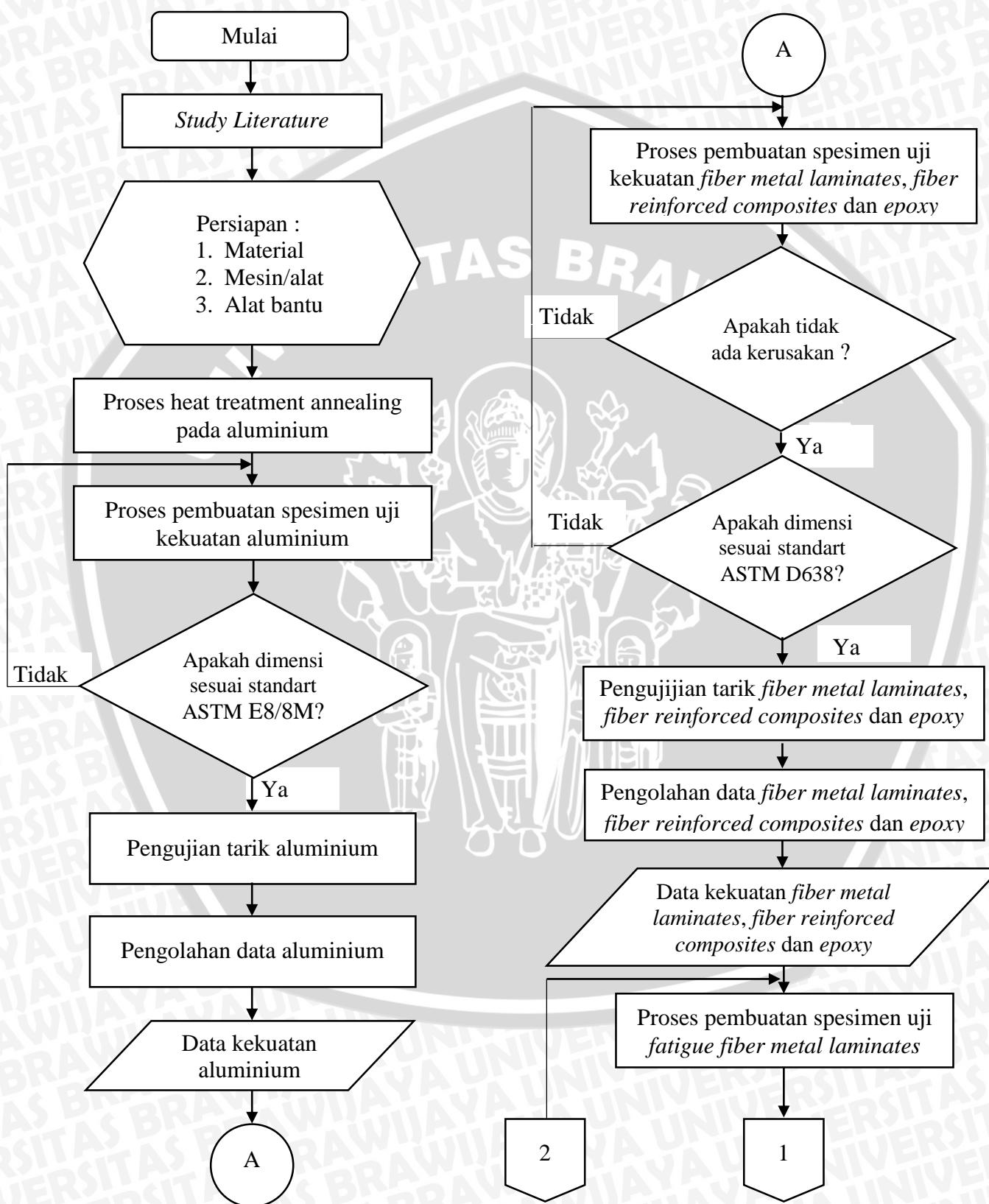
n = data ke-n

2. Pembentukan grafik yang membandingkan antara panjang retak dengan jumlah siklus.
 3. pembentukan grafik yang membandingkan antara laju perambatan retak dengan panjang retak.



3.8 Diagram Alir

Berikut digram alir dari penelitian ini:



Apakah tidak ada kerusakan ?

Apakah dimensi sesuai ?

Menentukan variasi pembebatan *fatigue fiber metal laminates*

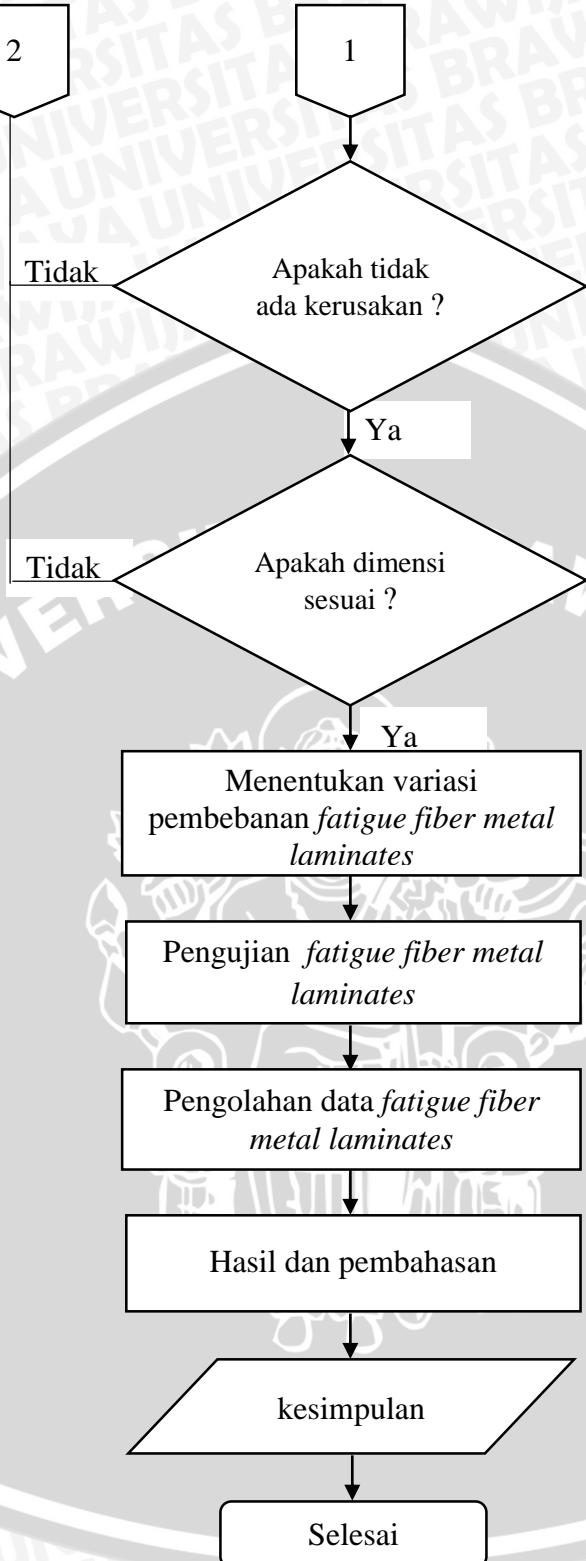
Pengujian *fatigue fiber metal laminates*

Pengolahan data *fatigue fiber metal laminates*

Hasil dan pembahasan

kesimpulan

Selesai



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Pada pengujian *fatigue* hasil yang didapatkan berupa jumlah siklus yang adalah sebagai berikut:

Tabel 4.1
Data Jumlah Siklus Hasil Pengujian *Fatigue*

<i>Stress Ratio</i>	Tegangan Maksimum (MPa)	Tegangan Mean (MPa)	Tegangan Amplitudo (MPa)	Jumlah Siklus
0	14	7	7	680000
0.2	17.5	10.5	7	1000000
0.3	21	14	7	601366
0.4	24	17	7	395000
0.5	28	21	7	236686
0	17.5	8.75	8.75	262117
0	21	10.5	10.5	143448
0	24	12	12	127000
0	28	14	14	36000

Sedangkan untuk data panjang retak, jumlah siklus dan laju perambatan retak dapat dilihat pada lampiran. Untuk perhitungan laju perambatan retak menggunakan metode *secant*, data yang digunakan sebagai contoh adalah sebagai berikut :

Tabel 4.2
Contoh Data Jumlah Siklus dan Panjang Retak dari Hasil Pengujian *Fatigue*

Jumlah siklus	Panjang retak (mm)		Jumlah panjang retak rata-rata (mm)
	Kiri	Kanan	
75000	1.418	1.651	4.343
85000	1.859	1.828	4.577

- Panjang retak rata –rata (a)

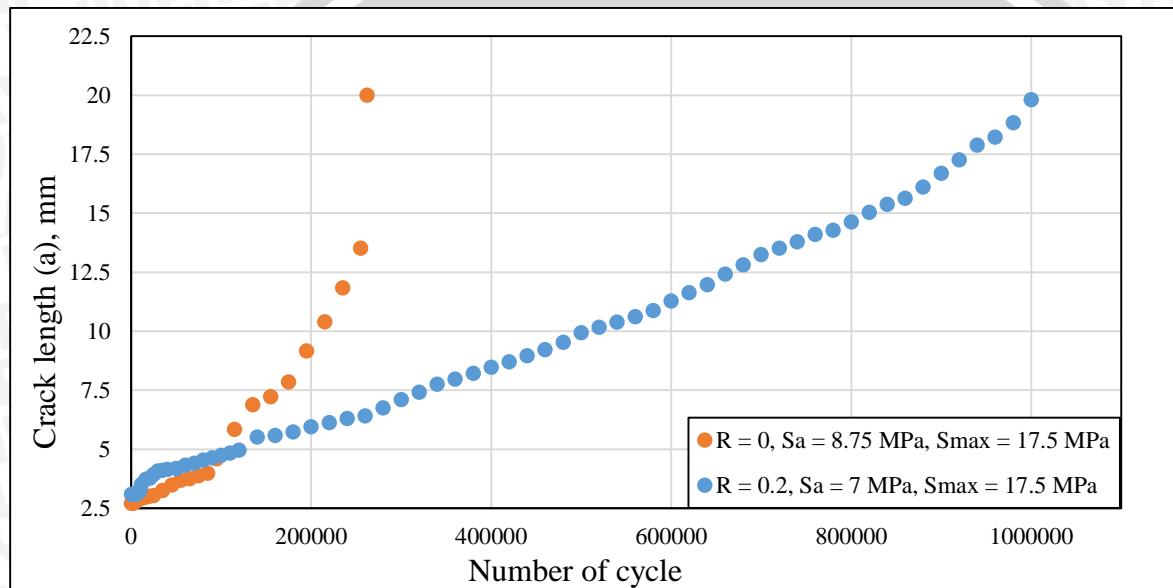
$$\begin{aligned}
 a &= \frac{\Sigma \text{panjang notch} + \Sigma \text{panjang retak}}{2} \\
 &= \frac{(2.891 + 2.576) + (1.859 - 1.828)}{2} \\
 &= 4.577 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Laju perambatan retak (da/dN)

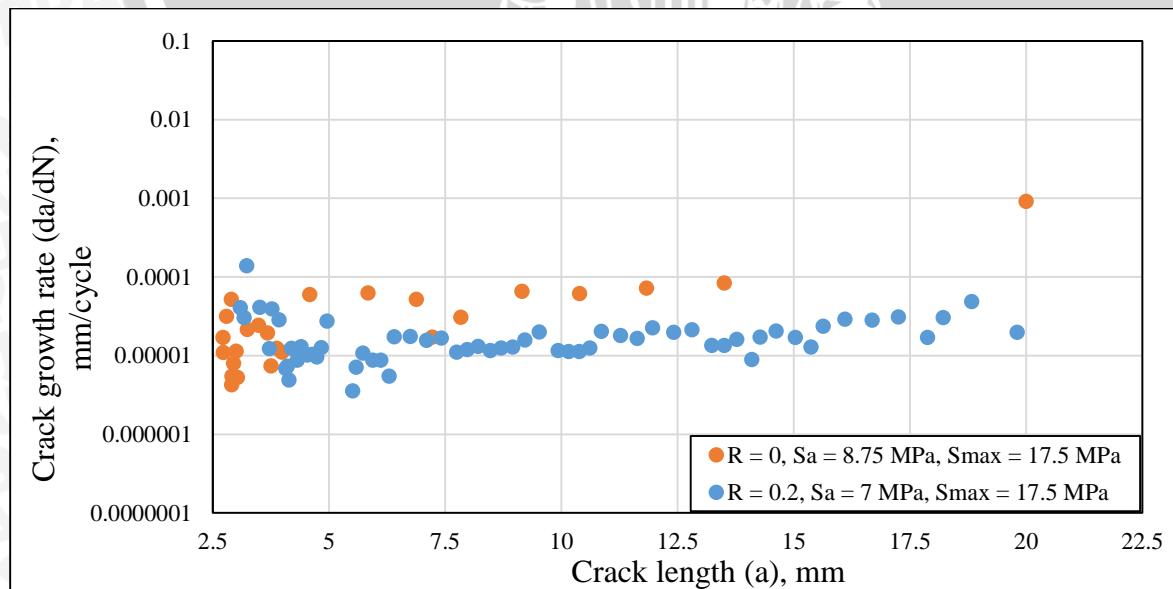
$$\begin{aligned}\frac{da}{dN} &= \frac{a_n - a_{n-1}}{N_n - N_{n-1}} \\ &= \frac{4.577 - 4.343}{85000 - 75000} \\ &= 2.34E - 05 \text{ mm/siklus}\end{aligned}$$

4.2 Grafik dan Pembahasan

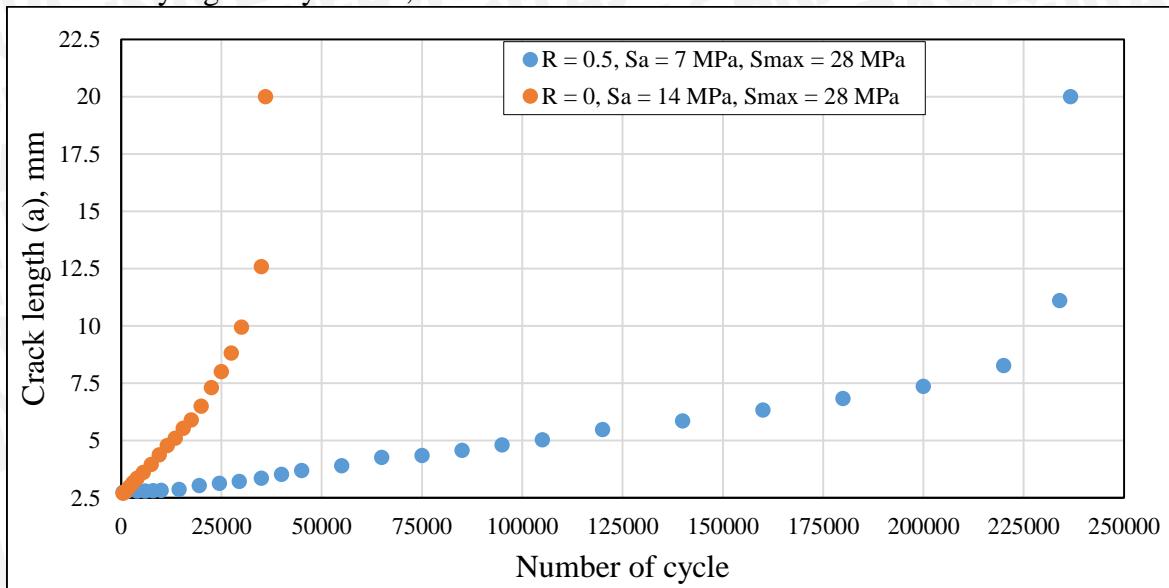
4.2.1 Hubungan Tegangan Maksimum Sama Terhadap Tegangan Amplitudo Beda



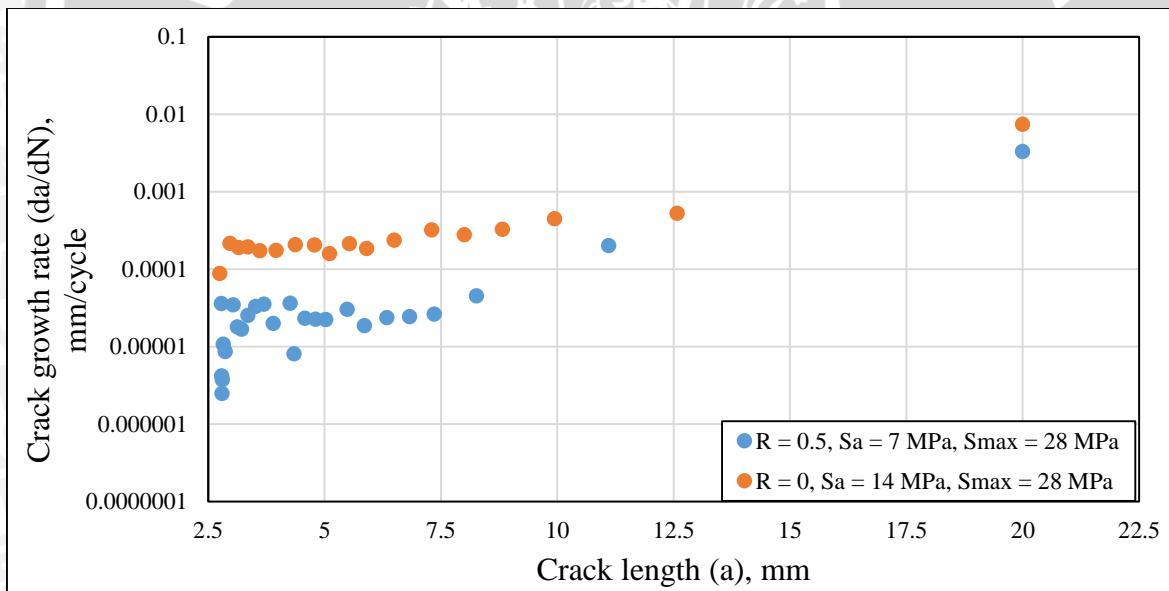
Gambar 4.1 Grafik hubungan jumlah siklus dengan panjang retak pada tegangan maksimum yang sama yaitu 17,5 MPa



Gambar 4.2 Grafik hubungan panjang retak dengan laju perambatan retak pada tegangan maksimum yang sama yaitu 17,5 MPa



Gambar 4.3 Grafik hubungan jumlah siklus dengan panjang retak pada tegangan maksimum yang sama yaitu 28 MPa



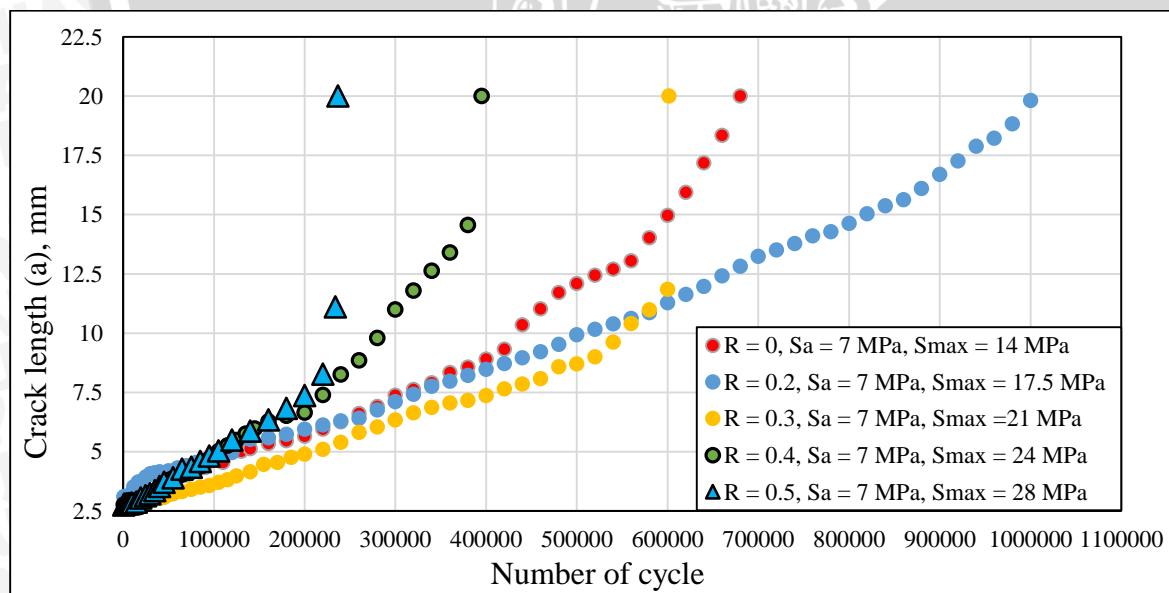
Gambar 4.4 Grafik hubungan panjang retak dengan laju perambatan retak pada tegangan maksimum yang sama yaitu 28 MPa

Gambar 4.1 sampai 4.4 merupakan grafik pengaruh tegangan amplitudo pada tegangan maksimum yang sama. Pada gambar 4.1 dan 4.3 terlihat bahwa semakin besar tegangan amplitudonya maka umur dari material semakin pendek walaupun pada tegangan maksimum yang sama. Spesimen dengan tegangan maksimum 17,5 MPa pada tegangan amplitudo 7 MPa mengalami patah pada siklus 1000000 kemudian dengan pemberian tegangan amplitudo 8,75 MPa mengalami patah pada siklus 262117. Sedangkan dengan

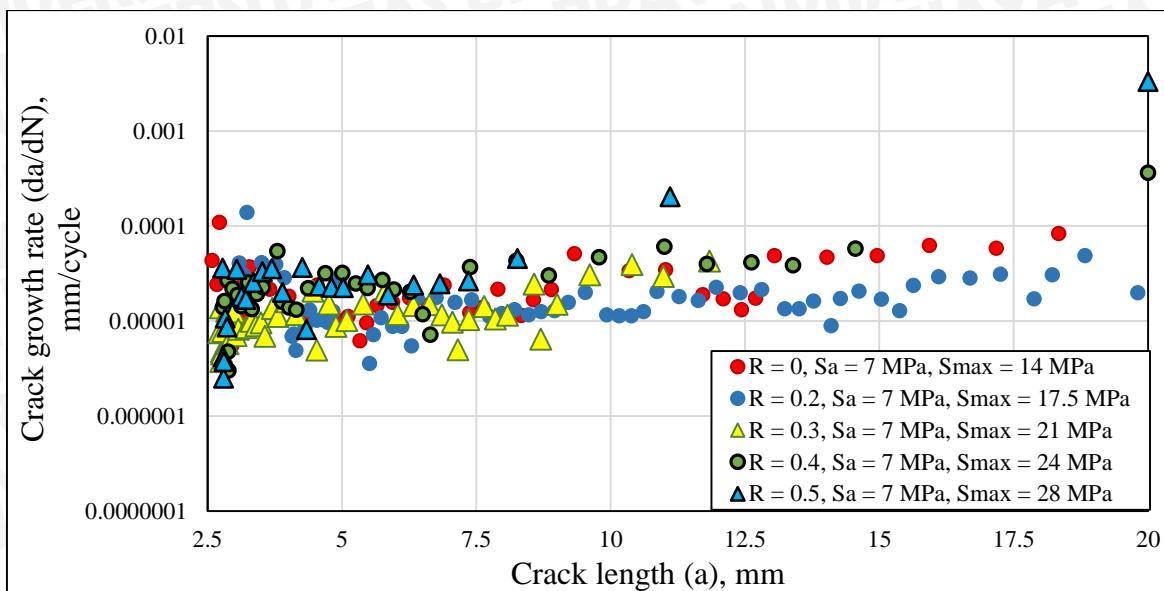
tegangan maksimum 28 MPa pada tegangan amplitudo 7 MPa mengalami patah pada siklus 236686. Kemudian dengan pemberian tegangan amplitudo 12 MPa mengalami patah pada siklus 36000.

Selain dengan menurunnya umur pada material, laju perambatan retak juga semakin meningkat dengan bertambahnya tegangan amplitudo yang terlihat pada gambar 4.2 dan 4.4. Pada gambar 4.2 spesimen dengan tegangan maksimum 17.5 MPa pada tegangan amplitudo 7 MPa dengan tegangan amplitudo 8.75 MPa terlihat laju perambatan retak spesimen tegangan amplitudo 7 MPa cenderung lebih kecil daripada spesimen dengan tegangan amplitudo 8.75 MPa. Dan ini terlihat jelas perbedaannya dengan tegangan maksimum diperbesar yaitu jadi 28 MPa maka tegangan amplitudo 7 MPa dan 14 MPa pada gambar 4.4. Dengan bertambah besar tegangan maka laju perambatan retak akan meningkat dengan tegangan maksimum sama. Hal ini dikarenakan dengan pertambahan tegangan amplitudo maka akan semakin besar perbedaan antara tegangan maksimum dan minimum yang akan mengakibatkan perbedaan faktor intensitas tegangan akan bertambah besar sehingga intensitas tegangan diujung retak bertambah besar. Dengan bertambahnya tegangan diujung retak ini akan memperbesar laju perambatan retak sehingga umur material akan berkurang.

4.2.2 Hubungan Tegangan Amplitudo Sama Terhadap Ratio Tegangan Beda

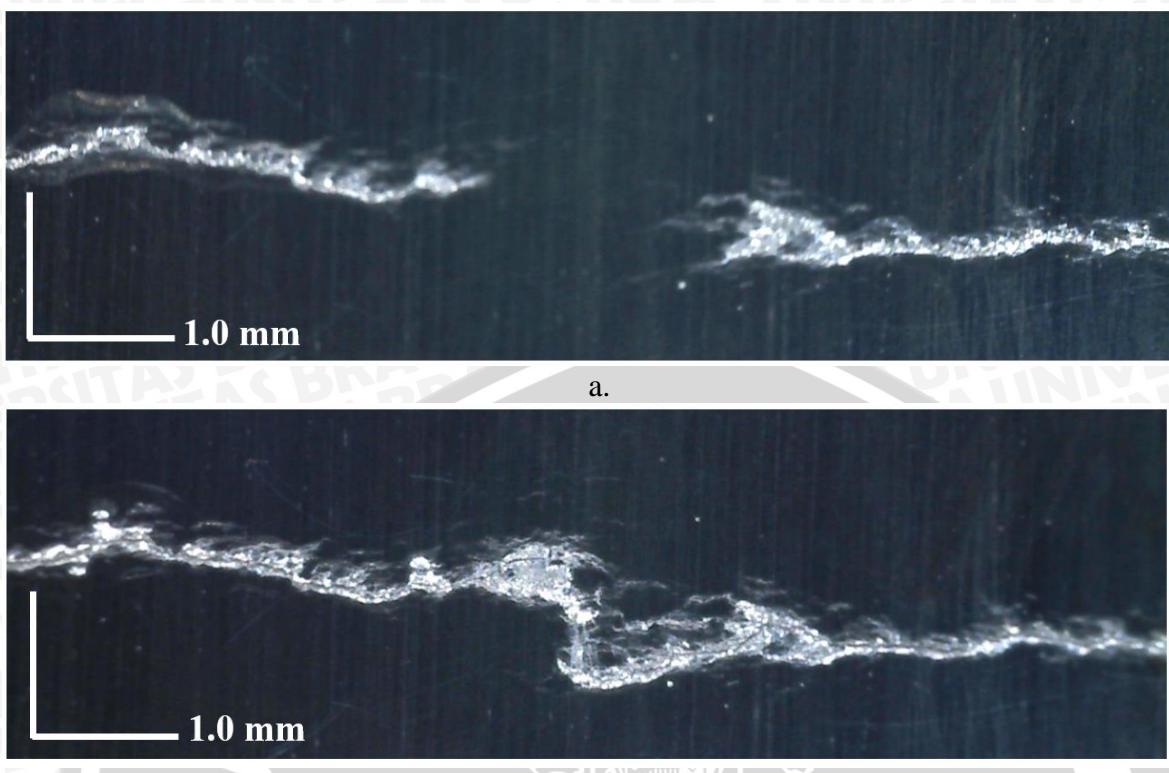


Gambar 4.5 Grafik hubungan jumlah siklus dengan panjang retak pada tegangan amplitudo yang sama yaitu 7 MPa



Gambar 4.6 Grafik hubungan panjang retak dengan laju perambatan retak pada tegangan amplitudo yang sama yaitu 7 MPa

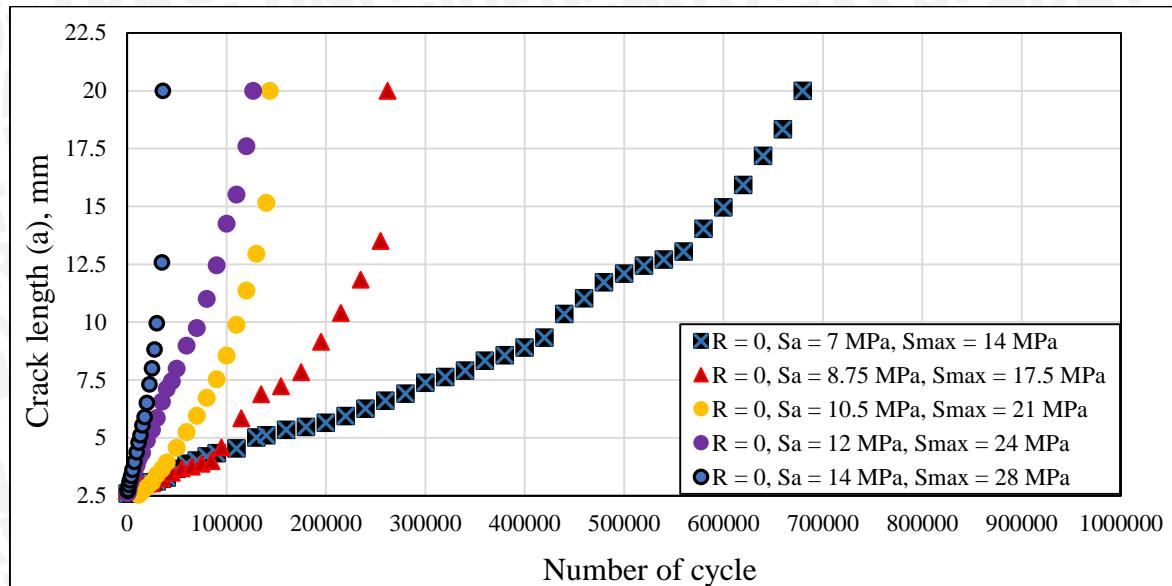
Pada gambar 4.5 merupakan grafik hubungan jumlah siklus dengan panjang retak pada tegangan amplitudo yang sama yaitu 7 MPa. Terlihat pada grafik dimana dengan bertambah besar tegangan maksimum maka umur material tersebut semakin pendek. Spesimen memiliki umur siklus terbesar pada rasio 0,2 yaitu patah pada siklus 1000000, sedangkan umur yang paling pendek pada rasio tegangan 0,5 yaitu patah pada siklus 236686. Di rasio tegangan 0,2 ini terjadi penyimpangan dimana seharusnya umur siklusnya berada diantara 680000 dan 601366, penyebab dari penyimpangan ini dikarenakan spesimen *fiber metal laminates* ini kemungkinan memiliki sifat dominan ke komposit fiber epoxy dimana pada tegangan yang kecil patahan dari aluminium sampai bertemu tetapi spesimen belum patah. Dan ini juga dapat dilihat dari karakteristik prilaku dari material penyusunnya yang bisa dilihat pada lampiran 11 sampai 13.



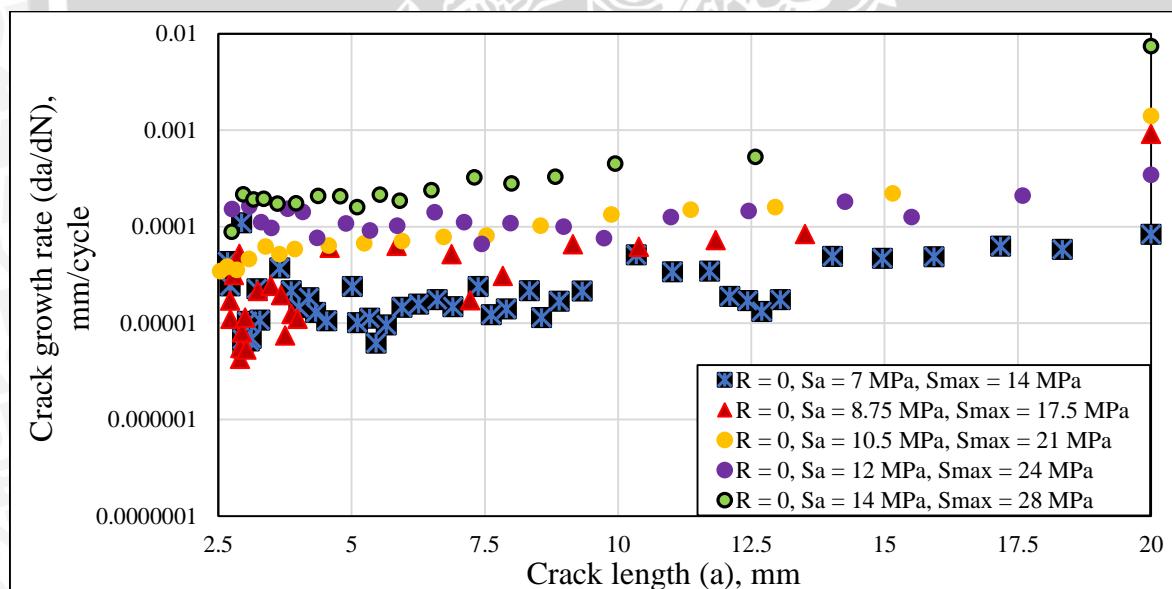
Gambar 4.7 Perambatan retak pada $R = 0.2$ (a) sebelum kedua ujung retak menyatu, (b) saat kedua ujung retak menyatu dan pembebahan terus berlanjut.

Gambar 4.6 menunjukkan grafik hubungan panjang retak dengan laju perambatan retak pada tegangan amplitudo yang sama yaitu 7 MPa. Dimana diketahui dengan pertambahan tegangan maksimum sampai pada maksimal 28 MPa laju perambatan retak mengalami kenaikan. Ini dikarenakan bagian *fiber epoxy* memiliki umur yang lebih panjang dari pada *fiber metal laminates* dan karakteristik dari *fiber epoxy* sendiri dimana dalam pengujian *fatigue* sendiri bukan hanya faktor retak yang biasa terjadi patah tetapi matriksnya sendiri mengalami mulur sampai batas tertentu sehingga langsung patah walaupun retak yang terjadi hanya kecil. Sehingga dalam pengujian tegangan amplitudo yang sama dengan variasi mean stress maka terjadi perubahan *displacement* antara titik maksimum dengan titik minimum sehingga akan terjadi mulur pada matriks yang sama dimasing-masing spesimen. Selain itu juga bisa adanya sebagian tegangan dari aluminium yang diteransfer ke *fiber epoxy* dalam jumlah yang sama antar spesimen. Dan mengakibatkan sedikit terjadi perubahan kenaikan terhadap laju perambatan retak pada *fiber metal laminates*.

4.2.3 Hubungan Ratio Tegangan Konstan dengan Tegangan Amplitudo Beda



Gambar 4.8 Grafik hubungan jumlah siklus dengan panjang retak pada rasio tegangan yang sama yaitu $R = 0$



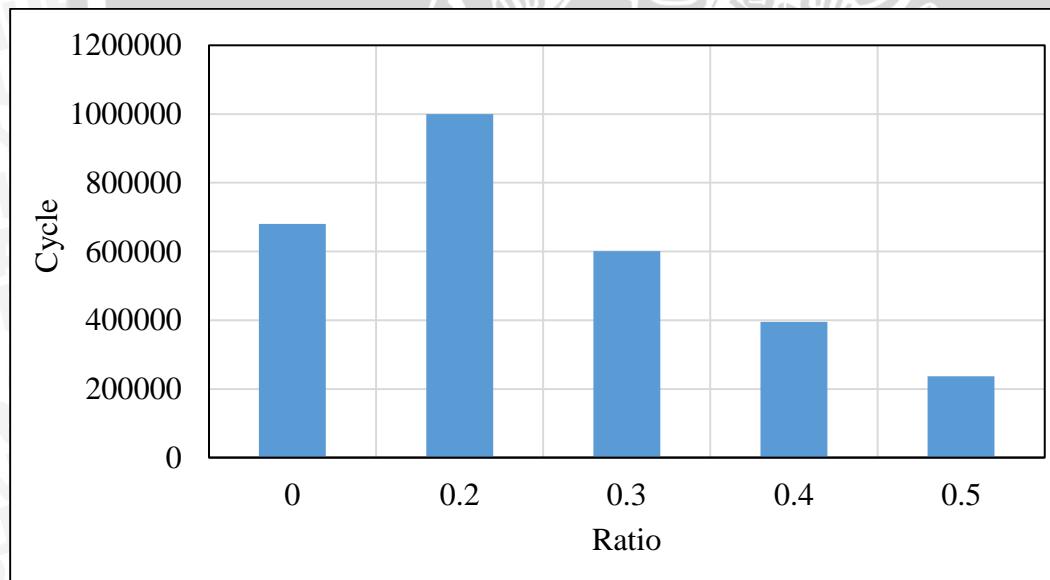
Gambar 4.9 Grafik hubungan panjang retak dengan laju perambatan retak pada rasio tegangan yang sama yaitu $R = 0$

Pada gambar 4.8 dan 4.9 menunjukkan grafik pengaruh perbedaan amplitudo pada rasio tegangan yang sama. Gambar 4.8 menjelaskan grafik hubungan jumlah siklus dengan panjang retak. Spesimen yang diberi tegangan amplitudo terkecil sebesar 7 MPa memiliki umur yang lebih lama yaitu dengan jumlah siklus 680000. Sedangkan untuk spesimen yang

diberi tegangan amplitudo terbesar yaitu 14 MPa memiliki umur yang lebih pendek dengan jumlah siklus 56000. Ini menjelaskan bahwa semakin besar tegangan amplitudo yang diterapkan maka umurnya akan semakin pendek.

Gambar 4.9 merupakan grafik hubungan panjang retak dengan laju perambatan retak terhadap perbedaan tegangan amplitudo yang diterapkan. Dimana dari grafik menjelaskan bahwa semakin besar tegangan amplitudo yang diterapkan maka laju perambatan retak pun ikut meningkat juga. Laju perambatan retak paling rendah terjadi pada spesimen dengan diberi tegangan amplitudo terendah yaitu 7 MPa. Segangkan untuk spesimen yang memiliki laju perambatan tertinggi terjadi pada spesimen yang diberi tegangan amplitudo terbesar yaitu 14 MPa. Ini menjelaskan bahwa pengaruh tegangan amplitudo berpengaruh besar terhadap laju perambatan retak yang disebabkan oleh besarnya perbedaan intensitas tegangan dan tegangan yang ditransfer dari aluminium ke *fiber epoxy* pada ujung retak yang semakin besar. Sehingga laju perambatan retak akan meningkat seiring dengan meningkatnya perbedaan intensitas tegangan diujung retak.

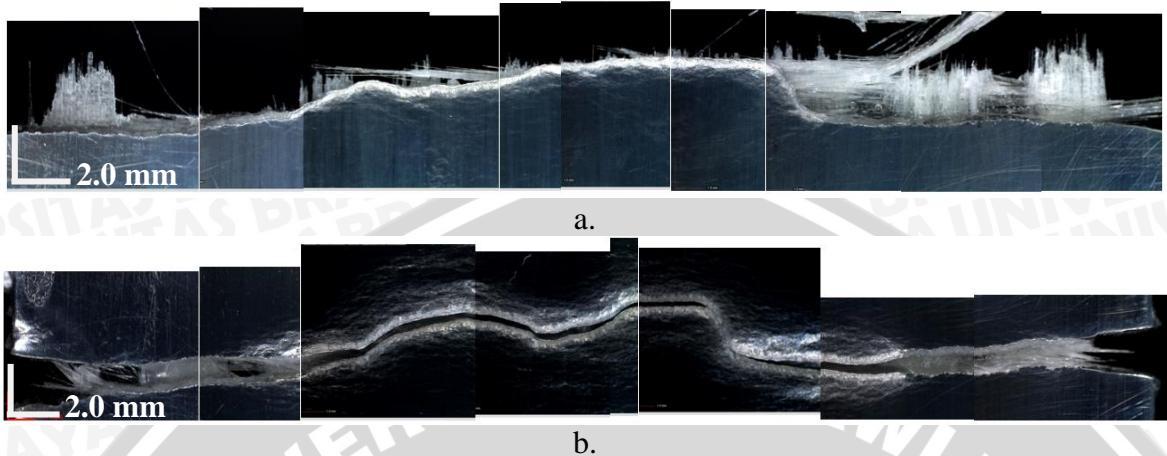
4.2.4 Hubungan Jumlah Siklus Terhadap Pembebanan



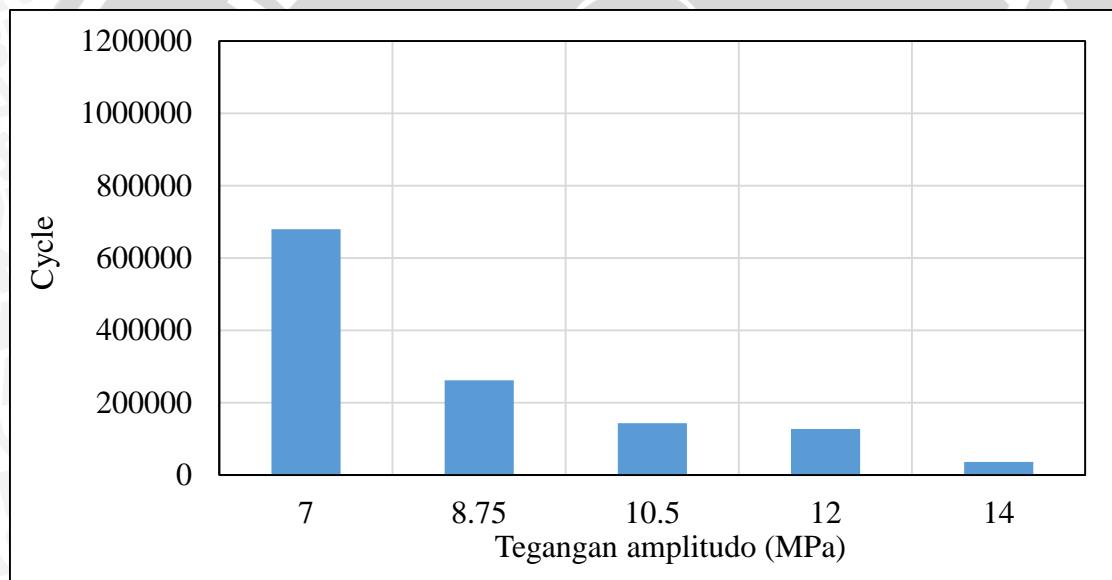
Gambar 4.10 Grafik hubungan perbandingan rasio tegangan terhadap jumlah siklus

Diketahui pada gambar 4.10 menjelaskan hubungan perbandingan rasio tegangan terhadap siklus. Dimana kecenderungan dari grafik ini mengalami jumlah siklus maksimum pada rasio tegangan 0.2 dan setelah itu turun. Kenaikan pada rasio tegangan 0.2 dikarenakan spesimen pada pembebaan rendah dominan sifatnya kearah komposit fiber epoxy karena patahanan dari aluminium sampai bertemu tetapi spesimen

belum patah seperti yang dijelaskan pada gambar 4.7. sedangkan untuk rasio tegangan setelah 0.2 sampai 0.5 alumunium sama fiber epoxy iku bersamaan patah.



Gambar 4.11 Patahan spesimen (a) spesimen kondisi $R = 0.3$ (b) spesimen kondisi $R = 0.5$



Gambar 4.12 Grafik hunbungan perbandingan tegangan amplitudo terhadap jumlah siklus

Pada gambar 4.12 ini menjelaskan hubungan tegangan amplitudo terhadap jumlah siklus. Dimana pada dari grafik di atas terlihat mengalami kecenderungan semakin menurun jumlah siklusnya terhadap pertambahan tegangan amplitudo. Setelah tegangan amplitudo 7 MPa semua spesimen mengalami patah. Sehingga dapat dijelaskan dengan tegangan amplitudo ini berpengaruh besar terhadap umur material ini dari pada rasio tegangan.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

1. Pada tegangan amplitudo yang sama:
 - a. Semakin besar rasio tegangan maka umur material semakin pendek kecuali pada rasio tegangan 0.2 yang disebabkan oleh karakteristik material pengusunnya.
 - b. Laju perambatan retak mengalami perubahan sedikit terhadap pengaruh mean stress atau rasio tegangan.
2. Pada rasio tegangan yang sama, semakin besar tegangan amplitudo maka:
 - a. Umur material semakin pendek.
 - b. Laju perambatan retak semakin besar.

5.2 SARAN

1. Material untuk matrik perlu divariasi lagi dengan bahan yang lain. Agar apakah dengan variasi rasio tegangan juga memiliki laju perambatan yang cenderung sama.
2. Perlu penelitian *fatigue* pada material komposit *fiber reinforced*.
3. Perlunya penelitian dengan pembeban siklus dengan beban *displacement*.
4. Perlu penelitian *fatigue* dengan proses pembuatan kompositnya menggunakan alat vakum agar *void* yang terbentuk semakin berkurang dan bisa dibandingkan dengan metode ini.
5. Perlunya penelitian pada *fiber metal laminates* dengan paduan dimana *modulus elastisitas* komposit lebih besar dari pada logam.

DAFTAR PUSTAKA

- A.Albedah, sohail M.A. Khan, F. Benyahia, B. Bachir Bouiadra. (2016). *Effect of load amplitude change on the fatigue life of cracked Al plate repaired with composite patch*. Netherlands: Elsevier.
- Architectural Fiberglass, Inc. (2012). http://www.fiberglass-afi.com/specs_balusters.htm. (diakses pada tanggal 25 September 2016).
- ASTM Volume 03.01 International. 2004. *Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM
- ASTM Volume 08.01 International. 2004. *Standard Test Method for Tensile Properties Composite*. ASTM
- Aviation Safety Network. <https://aviation-safety.net/>. (diakses pada tanggal 20 September 2016).
- Callister, William. D dan David G. Rethwisch. (2009). *Material science and Engineering introduction*. New York:
- Cambell, F.C. (2010). *Structural composite materials*. ASM International.
- Carlsson, L.A and Kardomateas G.A. (2011). *Structural and failure mechanics of sandwich Composite*. London: Springer
- Chung, Deborah D.L. (2010). *Composite materials: Science and applications*. London: Springer Science and business media.
- Dodiuk, Hanna dan Goodman, Sidney.H.(2013). *Handbook of thermoset plastics*. San Diego: William Andrew.
- Dosset, Jon. L dan Howard E. boyer (2006) *Practical Heat Treating*. ASM Internasional.
- Dowling,N.E. (1999). *Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methode for Deformation, Fracture and Fatigue*. Blacksburg: Prentice-Halt, Inc.
- Huang, Yi, Jianzhong Liu, Xiao Huang, Jiazen Zhang, dan Guangquan Yue. (2015). *Delamination and fatigue crack growth behavior in fiber metal laminates (GLARE) under single overloads*. Netherlands: Elsevier.
- Huntsman Advanced Materials. (2011). http://www.huntsman.com/advanced_materials/a/Home. (diakses pada tanggal 25 September 2016).
- Jones, Robert M. (1999). *Mechanics of Composite Materials Second Edition*. United States: Taylor & Francis.

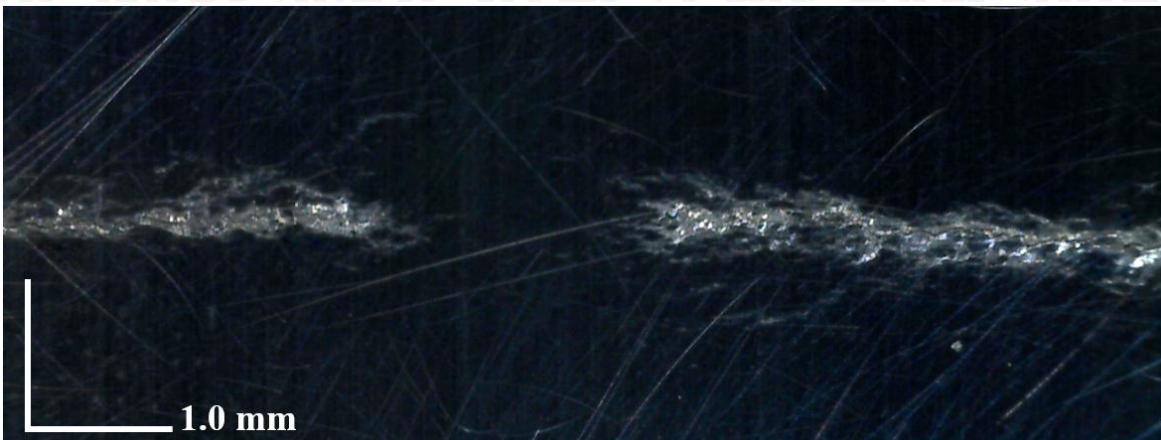
- Khan, S.U, R.C. Alderliesten dan R. Benedictus. (2011). *Delamination in fiber metal laminates (GLARE) during fatigue crack growth under variable amplitude loading.* Netherlands: Elsevier.
- Khurmi, R.S & Gupta, J.K. (2005). *A Text Book of Machine Design.* New Delhi: Eurasia Publishing House (PVT.) LTD.
- Mallick, P.K.(2007). *Fiber Reinforced composite materials, manufacturing, and design.*Boca raton: CRC Press.
- Mathews & Rawlings. (1994). *Composite Material: Engineering and Science.* London: UK, Chapman and Hall.
- Mazumdar. (2002). *Composite Manufacturing.* United States of America: Acid-free paper.
- Mouritz, Adrian.P.(2012). *Introduction to aerospace materials.* Cambridge: Woodhead Publishing limited.
- Mozzolani, Fedrico M. (1994). *Aluminium alloy structures.* London: Chapman ang Hall.
- Schwartz. (1984). *Composite Material Hand Book.* New York: McGraw-Hill Book Company.
- Stephens, Ralph I, Fatemi, Ali. Stephens, Robert R. & Fuchs, Henry O. (2001). *Metal Fatigue in Engineering.* New York: Jonh Wiley & Sons, INC.
- Timings, Roger. (2006). *Basic manufacturing.* Burlington: Newnes.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

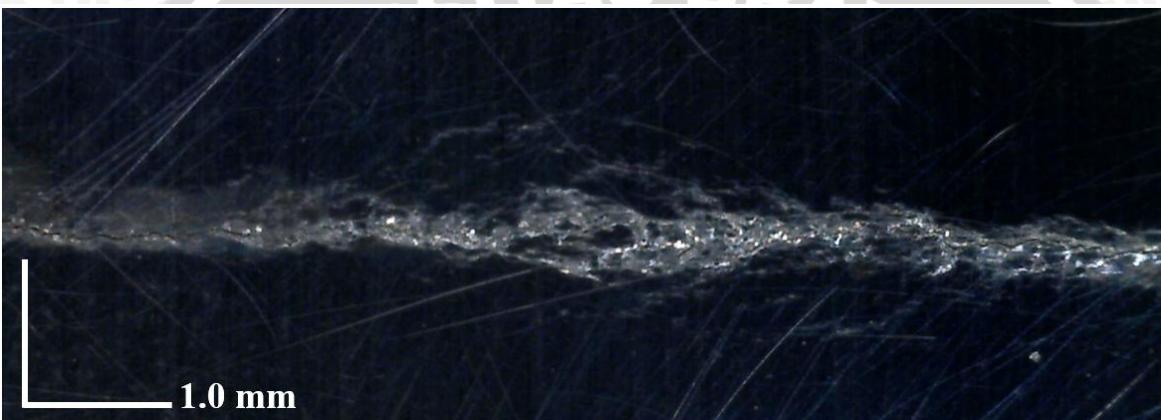
LAMPIRAN



Lampiran 1 Patahan pada spesimen $R = 0$, $S_{max} = 14$ MPa
Sebelum retak bertemu



Setelah retak bertemu



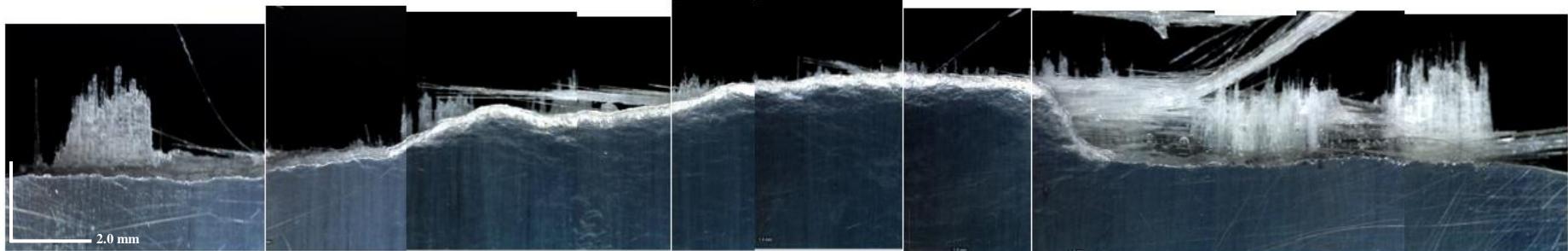
Lampiran 2 Patahan pada spesimen $R = 0.2$, $S_{max} = 17.5$ MPa
Sebelum retak bertemu



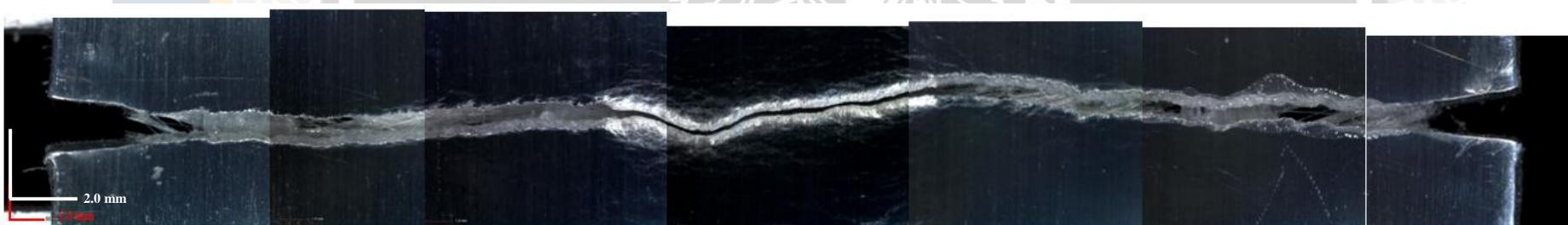
Setelah retak bertemu



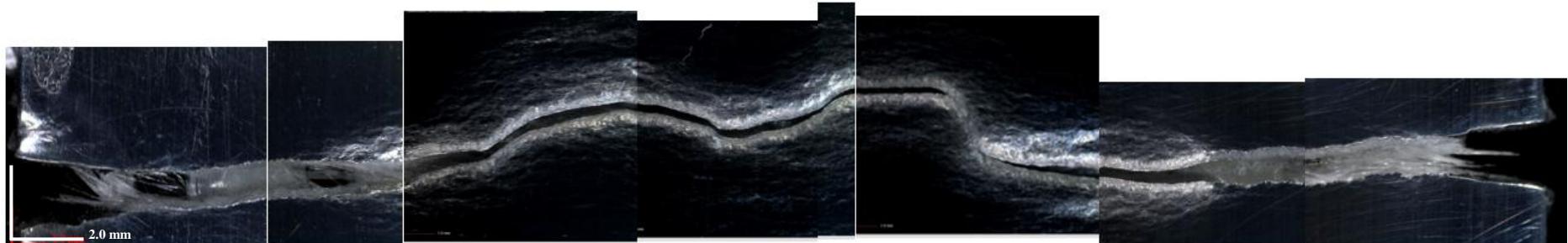
Lampiran 3 patahan pada spesimen $R = 0.3$, $S_{max} = 21$ MPa



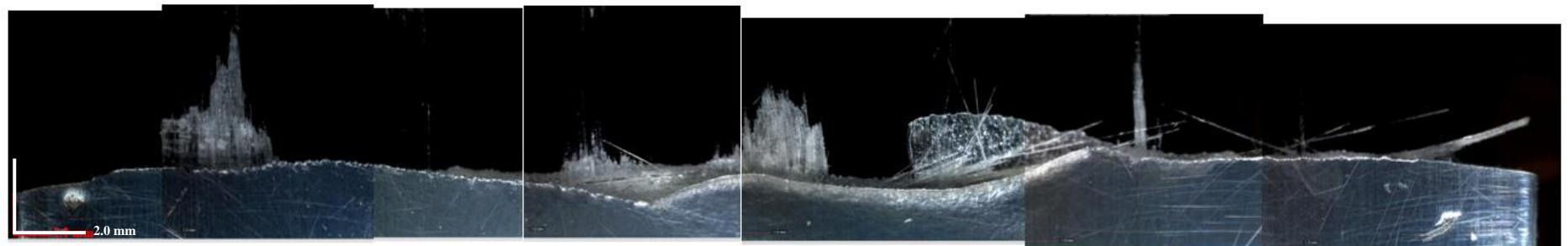
Lampiran 4 patahan pada spesimen $R = 0.4$, $S_{max} = 24$ MPa



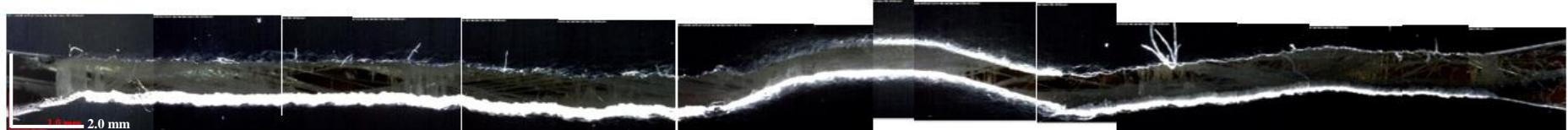
Lampiran 5 patahan pada spesimen $R = 0.5$, $S_{max} = 28$ MPa



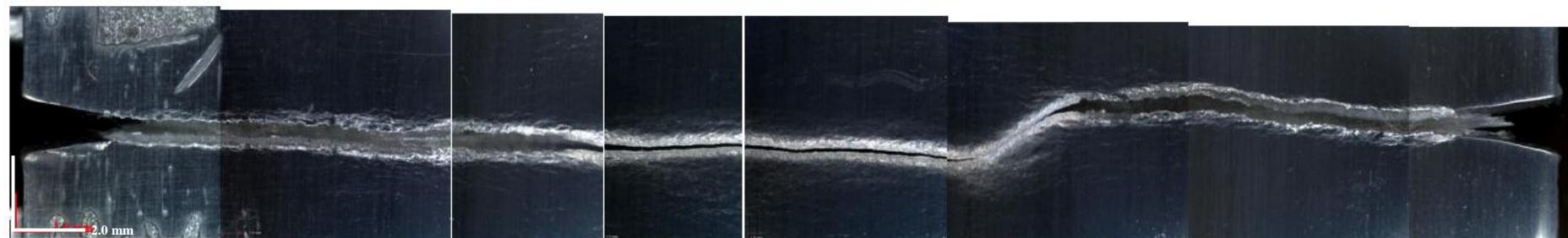
Lampiran 6 patahan pada spesimen $R = 0$, $S_{max} = 17.5$ MPa



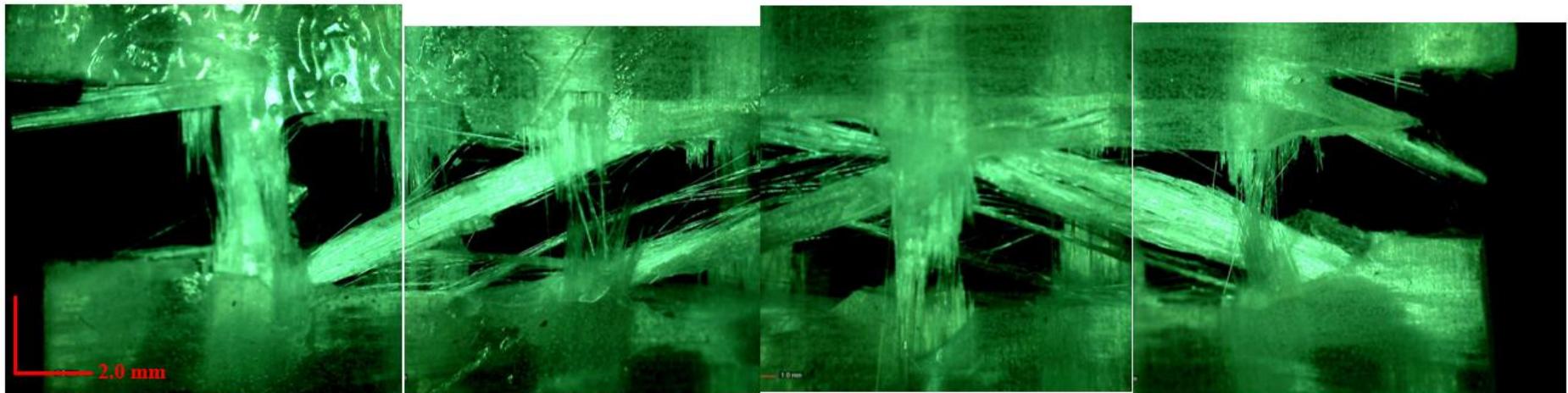
Lampiran 7 patahan pada spesimen R = 0, Smax = 21 MPa



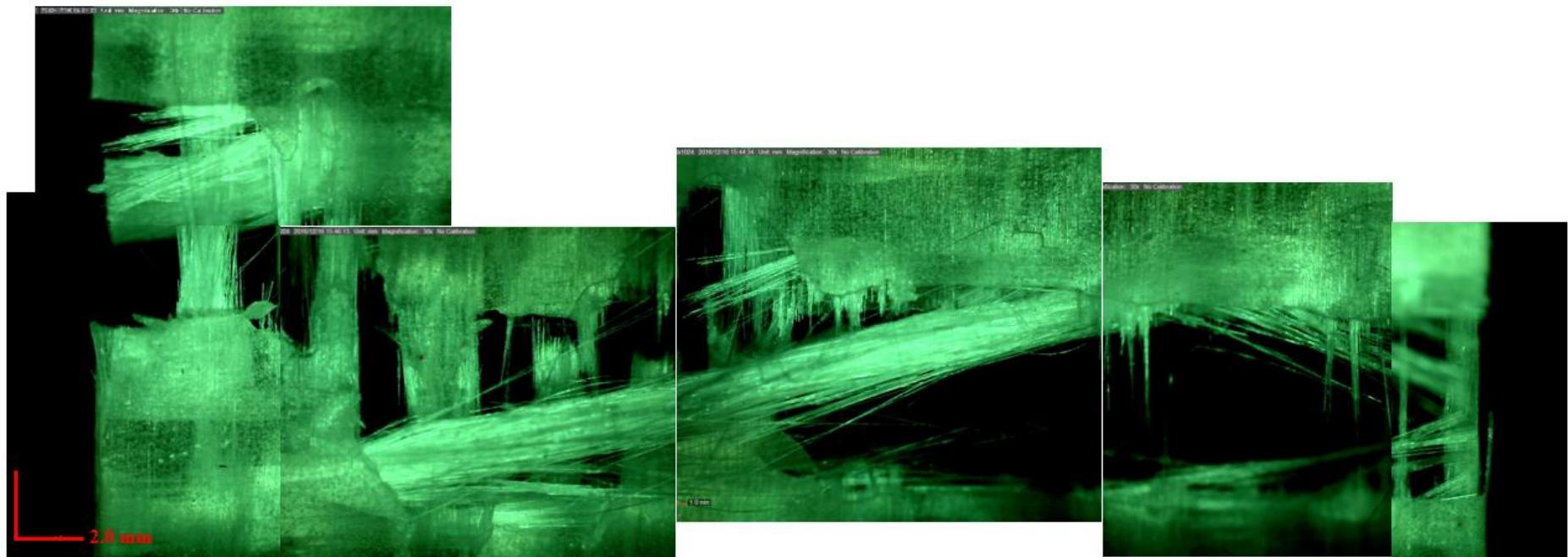
Lampiran 8 patahan pada spesimen R = 0, Smax = 28 MPa



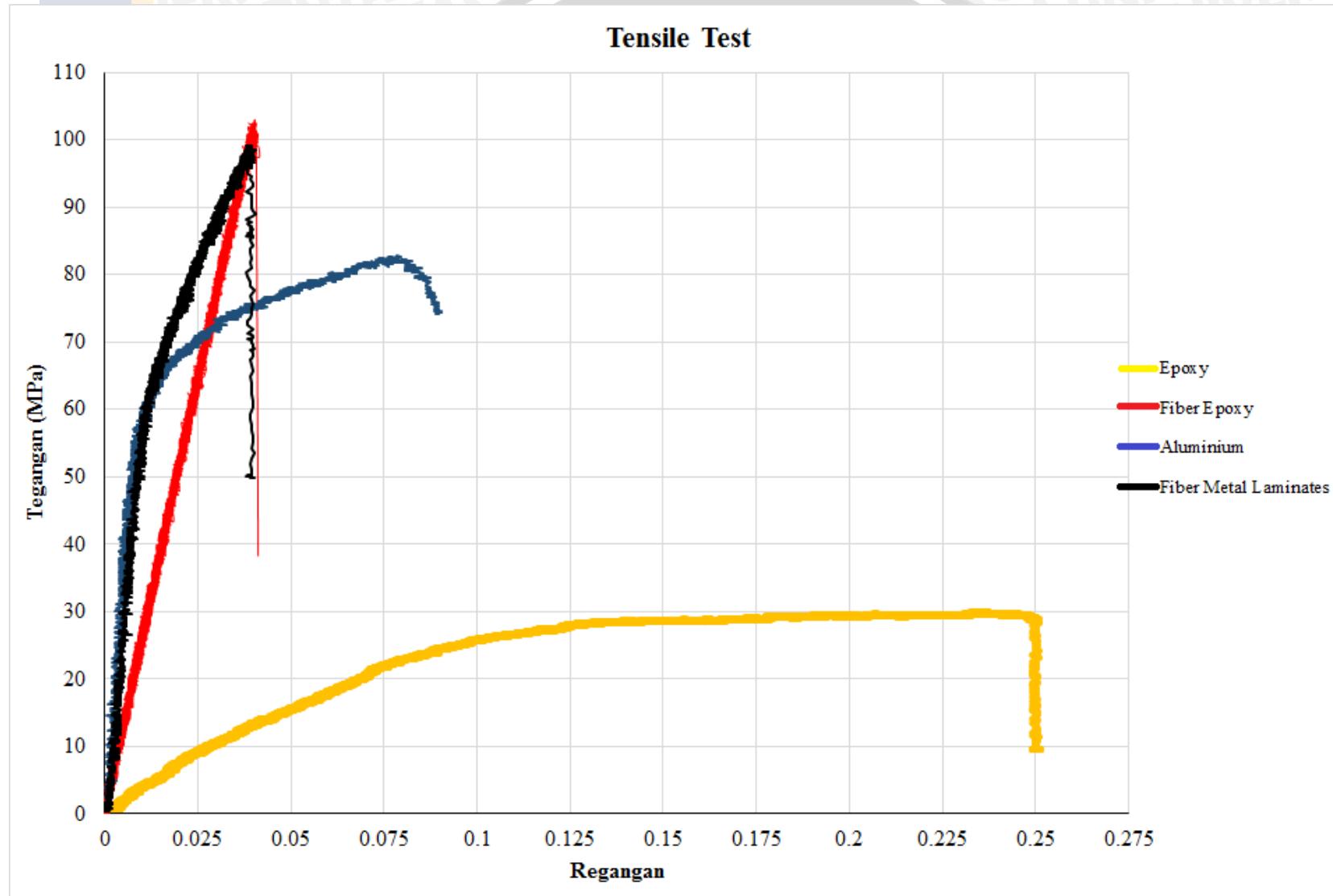
Lampiran 9 patahan pada spesimen fiber epoxy R = 0, Smax = 17.5 MPa



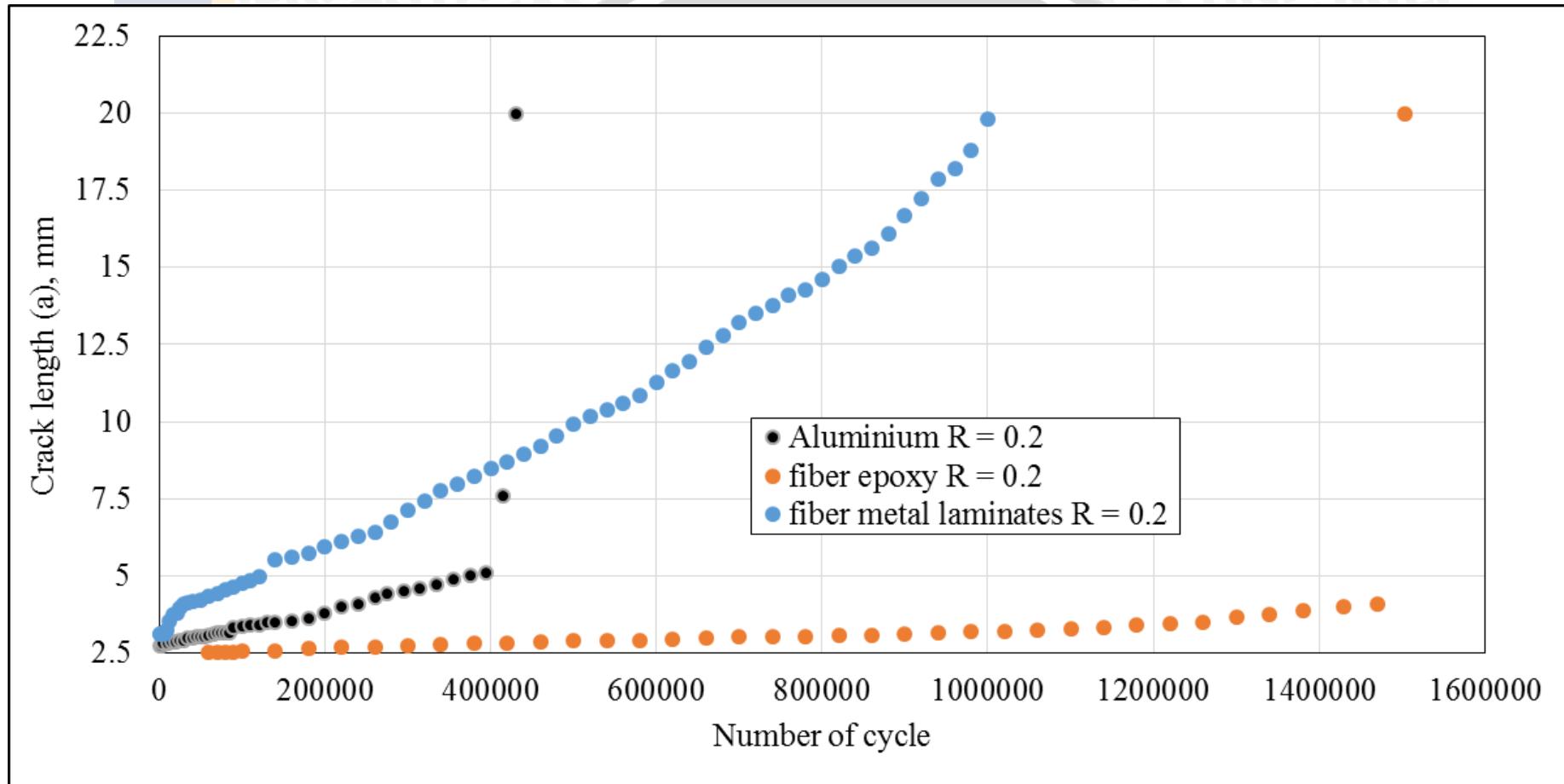
Lampiran 10 patahan pada spesimen fiber epoxy R = 0.2, Smax = 17.5 MPa



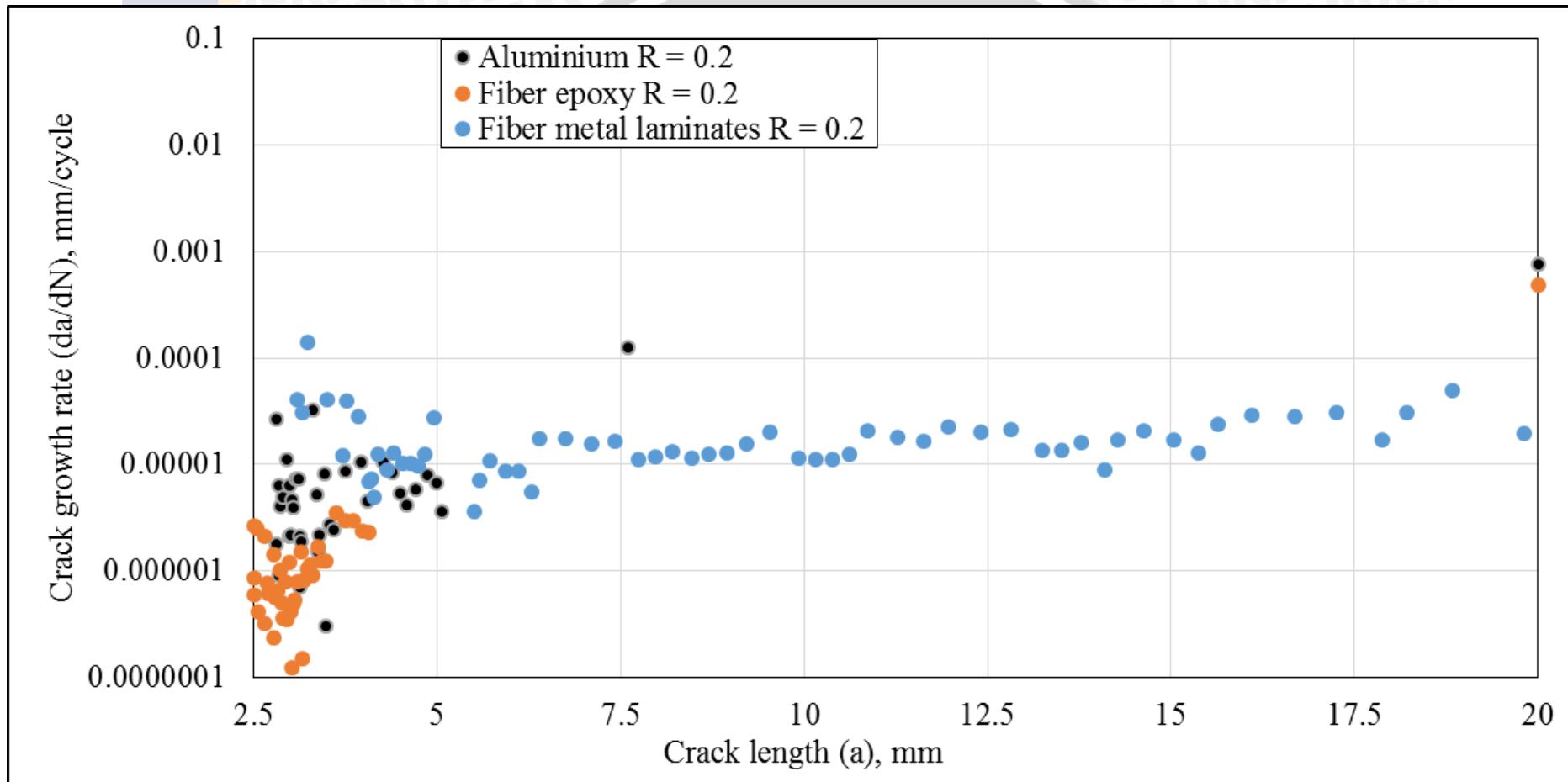
Lampiran 11 diagram tegangan regangan



Lampiran 12 diagram hubungan jumlah siklus terhadap panjang retak



Lampiran 13 diagram hubungan panjang retak terhadap laju perambatan retak



Lampiran 14 data hasil penelitian pada kondisi Smean = 7 MPa saat R = 0

Smax (MPa)	Smean (MPa)	Sa (MPa)	R	Panjang notch (mm)	
				Kiri	Kanan
14	7	7	0	2.561	2.612

No.	siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
1	500	0	0	2.5865	0
2	1500	0	0	2.5865	4.33E-05
3	3500	0.158	0.015	2.673	2.42E-05
4	5500	0.233	0.037	2.7215	0.000109
5	7500	0.649	0.058	2.94	6.75E-06
6	9500	0.67	0.064	2.9535	5.5E-06
7	11500	0.67	0.086	2.9645	8.25E-06
8	13500	0.673	0.116	2.981	1.04E-05
9	20000	0.716	0.208	3.0485	6.5E-06
10	25000	0.747	0.242	3.081	6.9E-06
11	30000	0.78	0.278	3.1155	2.27E-05
12	35000	0.878	0.407	3.229	1.07E-05
13	40000	0.918	0.474	3.2825	3.72E-05
14	50000	1.358	0.778	3.6545	2.16E-05
15	60000	1.564	1.005	3.871	1.45E-05
16	70000	1.652	1.206	4.0155	1.83E-05
17	80000	1.749	1.474	4.198	1.29E-05
18	90000	1.842	1.639	4.327	1.05E-05
19	110000	2.069	1.833	4.5375	2.38E-05
20	130000	2.366	2.489	5.014	1.01E-05
21	140000	2.419	2.637	5.1145	1.12E-05
22	160000	2.599	2.904	5.338	6.18E-06
23	180000	2.705	3.045	5.4615	9.58E-06
24	200000	2.919	3.214	5.653	1.46E-05
25	220000	3.141	3.575	5.9445	1.57E-05
26	240000	3.422	3.923	6.259	1.75E-05
27	260000	3.672	4.371	6.608	1.48E-05
28	280000	3.989	4.644	6.903	2.38E-05
29	300000	4.33	5.255	7.379	1.22E-05
30	320000	4.635	5.439	7.6235	1.4E-05
31	340000	4.993	5.642	7.904	2.16E-05
32	360000	5.286	6.212	8.3355	1.14E-05
33	380000	5.428	6.526	8.5635	1.68E-05
34	400000	5.768	6.856	8.8985	2.14E-05
35	420000	5.768	7.711	9.326	5.1E-05



No.	siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
36	440000	6.819	8.701	10.3465	3.39E-05
37	460000	7.333	9.544	11.025	3.46E-05
38	480000	7.982	10.278	11.7165	1.89E-05
39	500000	8.31	10.706	12.0945	1.71E-05
40	520000	8.664	11.035	12.436	1.32E-05
41	540000	8.995	11.231	12.6995	1.74E-05
42	560000	9.495	11.427	13.0475	4.89E-05
43	580000	10.437	12.441	14.0255	4.67E-05
44	600000	11.659	13.089	14.9605	4.86E-05
45	620000	12.709	13.981	15.9315	6.24E-05
46	640000	13.81	15.374	17.1785	5.81E-05
47	660000	15.008	16.498	18.3395	8.3E-05
48	680000	16.751	18.259	20	0
49	700000	16.751	18.259	20	2.86E-05



Lampiran 15 data hasil penelitian pada kondisi Smean = 10.5 MPa saat R = 0.2

Smax (MPa)	Smean (MPa)	Sa (MPa)	R	Panjang notch (mm)	
				kiri	Kanan
17.5	10.5	7	0.2	2.924	3.258

No.	Siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata-rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
1	500	0	0	3.091	0
2	1500	0	0	3.091	0
3	3500	0	0	3.091	0
4	5500	0	0	3.091	4.08E-05
5	7500	0.037	0.126	3.1725	3.05E-05
6	9500	0.057	0.228	3.2335	0.000139
7	11500	0.106	0.733	3.5105	4.12E-05
8	16500	0.489	0.762	3.7165	1.22E-05
9	21000	0.563	0.798	3.7715	3.91E-05
10	25000	0.774	0.9	3.928	2.86E-05
11	30000	0.917	1.043	4.071	6.9E-06
12	35000	1.043	0.986	4.1055	7.3E-06
13	40000	1.071	1.031	4.142	4.9E-06
14	50000	1.112	1.088	4.191	1.24E-05
15	60000	1.222	1.226	4.315	8.8E-06
16	70000	1.312	1.312	4.403	0.000013
17	80000	1.422	1.462	4.533	1.02E-05
18	90000	1.487	1.601	4.635	1.04E-05
19	100000	1.572	1.723	4.7385	9.6E-06
20	110000	1.65	1.837	4.8345	1.27E-05
21	120000	1.801	1.939	4.961	2.76E-05
22	140000	2.183	2.66	5.5125	3.58E-06
23	160000	2.232	2.754	5.584	7.15E-06
24	180000	2.249	3.023	5.727	1.08E-05
25	200000	2.453	3.251	5.943	8.78E-06
26	220000	2.615	3.44	6.1185	8.75E-06
27	240000	2.744	3.661	6.2935	5.47E-06
28	260000	2.86	3.764	6.403	1.74E-05
29	280000	3.281	4.039	6.751	1.76E-05
30	300000	3.661	4.363	7.103	1.57E-05
31	320000	3.972	4.68	7.417	1.67E-05
32	340000	4.253	5.066	7.7505	1.11E-05
33	360000	4.424	5.34	7.973	1.19E-05
34	380000	4.625	5.616	8.2115	1.31E-05
35	400000	4.87	5.897	8.4745	1.16E-05
36	420000	5.01	6.221	8.7065	1.25E-05

No.	Siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
37	440000	5.249	6.483	8.957	1.28E-05
38	460000	5.42	6.825	9.2135	1.58E-05
39	480000	5.731	7.144	9.5285	2E-05
40	500000	6.092	7.583	9.9285	1.16E-05
41	520000	6.318	7.822	10.161	1.13E-05
42	540000	6.587	8.005	10.387	1.13E-05
43	560000	6.868	8.176	10.613	1.26E-05
44	580000	7.162	8.384	10.864	2.04E-05
45	600000	7.577	9	11.273	1.8E-05
46	620000	7.882	9.203	11.6335	1.65E-05
47	640000	8.09	9.655	11.9635	2.26E-05
48	660000	8.567	10.082	12.4155	1.99E-05
49	680000	8.897	10.547	12.813	2.14E-05
50	700000	9.301	10.999	13.241	1.34E-05
51	720000	9.459	11.378	13.5095	1.35E-05
52	740000	9.728	11.647	13.7785	1.62E-05
53	760000	9.996	12.025	14.1015	8.9E-06
54	780000	10.181	12.196	14.2795	1.72E-05
55	800000	10.481	12.585	14.624	2.06E-05
56	820000	10.889	13.003	15.037	1.7E-05
57	840000	11.093	13.478	15.3765	1.28E-05
58	860000	11.354	13.73	15.633	2.37E-05
59	880000	11.732	14.299	16.1065	2.92E-05
60	900000	12.362	14.837	16.6905	2.82E-05
61	920000	12.954	15.374	17.255	3.11E-05
62	940000	13.626	15.948	17.878	1.71E-05
63	960000	13.907	16.351	18.22	3.06E-05
64	980000	14.518	16.962	18.831	4.89E-05
65	1000000	15.459	17.976	19.8085	1.98E-05

Lampiran 16 data hasil penelitian pada kondisi Smean = 14 MPa saat R = 0.3

Smax (MPa)	Smean (MPa)	Sa (MPa)	R	Panjang notch (mm)	
				kiri	Kanan
21	14	7	0.3	2.851	2.555

No.	Siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata-rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
1	500	0	0	2.703	7.5E-06
2	1500	0.015	0	2.7105	1.38E-05
3	3500	0.07	0	2.738	3.75E-06
4	5500	0.085	0	2.7455	4.75E-06
5	7500	0.104	0	2.755	4.5E-06
6	9500	0.122	0	2.764	7.75E-06
7	11500	0.153	0	2.7795	4.1E-06
8	16500	0.182	0.012	2.8	1.27E-05
9	21000	0.264	0.044	2.857	5.75E-06
10	25000	0.284	0.07	2.88	1.09E-05
11	30000	0.373	0.09	2.9345	1.24E-05
12	35000	0.431	0.156	2.9965	7E-06
13	40000	0.446	0.211	3.0315	8.2E-06
14	45000	0.238	0.501	3.0725	1.96E-05
15	50000	0.376	0.559	3.1705	8.5E-06
16	55000	0.395	0.625	3.213	9.95E-06
17	65000	0.504	0.715	3.3125	8.9E-06
18	75000	0.652	0.745	3.4015	9.55E-06
19	85000	0.771	0.817	3.497	6.9E-06
20	95000	0.909	0.817	3.566	1.36E-05
21	105000	1.014	0.984	3.702	1.12E-05
22	115000	1.121	1.1	3.8135	1.6E-05
23	125000	1.311	1.229	3.973	1.17E-05
24	140000	1.447	1.445	4.149	2.07E-05
25	155000	1.864	1.648	4.459	4.94E-06
26	170000	1.884	1.7763	4.53315	1.51E-05
27	185000	2.063	2.051	4.76	8.8E-06
28	200000	2.177	2.201	4.892	1.01E-05
29	220000	2.255	2.526	5.0935	1.51E-05
30	240000	2.551	2.832	5.3945	2.07E-05
31	260000	2.851	3.359	5.808	1.17E-05
32	280000	3.098	3.578	6.041	1.46E-05
33	300000	3.397	3.861	6.332	1.49E-05
34	320000	3.786	4.067	6.6295	1.16E-05
35	340000	4.028	4.29	6.862	9.72E-06
36	360000	4.276	4.431	7.0565	4.98E-06

No.	Siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
37	380000	4.383	4.523	7.156	1.03E-05
38	400000	4.611	4.707	7.362	1.42E-05
39	420000	4.948	4.936	7.645	1.05E-05
40	440000	5.163	5.139	7.854	1.15E-05
41	460000	5.41	5.352	8.084	2.45E-05
42	480000	6.016	5.726	8.574	6.43E-06
43	500000	6.06	5.939	8.7025	1.5E-05
44	520000	6.511	6.089	9.003	3.05E-05
45	540000	7.137	6.685	9.614	3.92E-05
46	560000	7.728	7.66	10.397	2.94E-05
47	580000	8.537	8.028	10.9855	4.28E-05
48	600000	9.44	8.838	11.842	0.005972
49	601366	20	20	20	3.33E-05



Lampiran 17 data hasil penelitian pada kondisi Smean = 17 MPa saat R = 0.4

Smax (MPa)	Smean (MPa)	Sa (MPa)	R	Panjang notch (mm)	
				kiri	Kanan
24	17	7	0.4	2.883	2.631

No.	Siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata-rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
1	500	0	0	2.757	0
2	1500	0	0	2.757	0.000014
3	3500	0.027	0.029	2.785	1.62E-05
4	5500	0.077	0.044	2.8175	2.68E-05
5	7500	0.141	0.087	2.871	4.75E-06
6	9500	0.16	0.087	2.8805	3E-06
7	11500	0.162	0.097	2.8865	2.19E-05
8	15000	0.252	0.16	2.963	1.87E-05
9	20000	0.4	0.199	3.0565	1.43E-05
10	25000	0.439	0.303	3.128	2.54E-05
11	30000	0.574	0.422	3.255	1.33E-05
12	35000	0.613	0.516	3.3215	1.92E-05
13	40000	0.703	0.618	3.4175	2.26E-05
14	45000	0.781	0.766	3.5305	5.43E-05
15	50000	1.016	1.074	3.802	1.59E-05
16	55000	1.105	1.144	3.8815	1.39E-05
17	65000	1.258	1.268	4.02	1.31E-05
18	75000	1.324	1.464	4.151	2.22E-05
19	85000	1.58	1.651	4.3725	3.19E-05
20	95000	1.907	1.962	4.6915	3.2E-05
21	105000	2.262	2.246	5.011	2.48E-05
22	115000	2.438	2.566	5.259	2.22E-05
23	125000	2.691	2.757	5.481	2.7E-05
24	135000	3.085	2.903	5.751	2.15E-05
25	145000	3.242	3.175	5.9655	2.02E-05
26	160000	3.588	3.436	6.269	1.18E-05
27	180000	3.83	3.666	6.505	7.15E-06
28	200000	3.988	3.794	6.648	3.7E-05
29	220000	4.539	4.721	7.387	4.32E-05
30	240000	5.207	5.779	8.25	3.01E-05
31	260000	5.682	6.506	8.851	4.68E-05
32	280000	6.399	7.66	9.7865	6.06E-05
33	300000	7.587	8.896	10.9985	3.97E-05
34	320000	8.836	9.236	11.793	4.15E-05
35	340000	9.769	9.963	12.623	3.88E-05
36	360000	10.413	10.869	13.398	5.8E-05

No.	Siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
37	380000	11.878	11.723	14.5575	0.000363
38	395000	20	20	20	5.06E-05

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Lampiran 18 data hasil penelitian pada kondisi Smean = 21 MPa saat R = 0.5

Smax (MPa)	Smean (MPa)	Sa (MPa)	R	Panjang notch (mm)	
				kiri	Kanan
28	21	7	0.5	2.891	2.576

No.	Siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata-rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
1	500	0.027	0	2.747	0.000036
2	1500	0.082	0.017	2.783	4.2E-06
3	4000	0.089	0.031	2.7935	2.5E-06
4	6000	0.089	0.041	2.7985	3.75E-06
5	8000	0.099	0.046	2.806	1.07E-05
6	10000	0.135	0.053	2.8275	8.67E-06
7	14500	0.213	0.053	2.8665	3.48E-05
8	19500	0.327	0.287	3.0405	0.000018
9	24500	0.396	0.398	3.1305	1.69E-05
10	29500	0.523	0.44	3.215	2.55E-05
11	35000	0.677	0.566	3.355	3.3E-05
12	40000	0.836	0.737	3.52	3.54E-05
13	45000	0.97	0.957	3.697	0.00002
14	55000	1.151	1.176	3.897	3.65E-05
15	65000	1.418	1.639	4.262	8.1E-06
16	75000	1.568	1.651	4.343	2.34E-05
17	85000	1.859	1.828	4.577	2.27E-05
18	95000	2.026	2.114	4.8035	2.24E-05
19	105000	2.266	2.321	5.027	3.05E-05
20	120000	2.745	2.757	5.4845	1.88E-05
21	140000	3.127	3.127	5.8605	2.38E-05
22	160000	3.612	3.594	6.3365	2.46E-05
23	180000	4.091	4.097	6.8275	2.65E-05
24	200000	4.733	4.515	7.3575	4.54E-05
25	220000	5.498	5.566	8.2655	0.000203
26	234000	7.156	9.589	11.106	0.003311
27	236686	20	20	20	8.45E-05

Lampiran 19 data hasil penelitian pada kondisi $S_a = 8.75 \text{ MPa}$ saat $R = 0$

Smax (MPa)	Smin (MPa)	Sa (MPa)	R	Panjang notch (mm)	
				kiri	Kanan
17.5	0	8.75	0	3.045	2.376

No.	siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata-rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
1	500	0	0	2.7105	0
2	1000	0	0	2.7105	0
3	1500	0	0	2.7105	0
4	2000	0	0	2.7105	1.7E-05
5	2500	0	0.017	2.719	1.1E-05
6	3500	0.015	0.024	2.73	3.15E-05
7	5500	0.08	0.085	2.793	0.000052
8	7500	0.167	0.206	2.897	4.25E-06
9	9500	0.184	0.206	2.9055	5.5E-06
10	11500	0.189	0.223	2.9165	8E-06
11	15000	0.221	0.247	2.9445	1.14E-05
12	20000	0.245	0.337	3.0015	5.3E-06
13	25000	0.245	0.39	3.028	2.15E-05
14	35000	0.39	0.674	3.2425	2.43E-05
15	45000	0.562	0.987	3.485	1.94E-05
16	55000	0.65	1.287	3.679	7.4E-06
17	65000	0.662	1.423	3.753	1.24E-05
18	75000	0.676	1.656	3.8765	1.11E-05
19	85000	0.72	1.833	3.987	6.01E-05
20	95000	1.333	2.421	4.5875	6.28E-05
21	115000	2.361	3.905	5.8435	5.18E-05
22	135000	3.18	5.158	6.8795	1.72E-05
23	155000	3.326	5.701	7.224	3.08E-05
24	175000	3.607	6.652	7.84	6.57E-05
25	195000	4.606	8.281	9.154	6.18E-05
26	215000	5.633	9.726	10.39	7.22E-05
27	235000	6.826	11.422	11.8345	8.36E-05
28	255000	8.106	13.487	13.507	0.000912
29	262117			20	7.63E-05



Lampiran 20 data hasil penelitian pada kondisi $S_a = 10.5 \text{ MPa}$ saat $R = 0$

Smax (MPa)	Smin (MPa)	Sa (MPa)	R	Panjang notch (mm)	
				kiri	Kanan
21	0	10.5	0	2.38	2.036

No.	siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
1	500	0	0	2.208	5.5E-05
2	1500	0.055	0.055	2.263	2.15E-05
3	2500	0.08	0.073	2.2845	7E-06
4	3500	0.082	0.085	2.2915	0.000022
5	5500	0.131	0.124	2.3355	1.7E-05
6	7500	0.17	0.153	2.3695	4.78E-05
7	9500	0.269	0.245	2.465	3.45E-05
8	11500	0.342	0.31	2.534	3.84E-05
9	15000	0.473	0.448	2.6685	3.56E-05
10	20000	0.647	0.63	2.8465	4.59E-05
11	25000	0.829	0.907	3.076	0.000062
12	30000	1.173	1.183	3.386	5.18E-05
13	35000	1.5	1.374	3.645	5.85E-05
14	40000	1.777	1.682	3.9375	6.35E-05
15	50000	2.162	2.566	4.572	6.69E-05
16	60000	2.725	3.34	5.2405	7.06E-05
17	70000	3.287	4.189	5.946	7.81E-05
18	80000	3.801	5.236	6.7265	8.05E-05
19	90000	4.198	6.448	7.531	0.000102
20	100000	4.906	7.777	8.5495	0.000133
21	110000	5.953	9.386	9.8775	0.000149
22	120000	7.078	11.238	11.366	0.000159
23	130000	8.038	13.448	12.951	0.00022
24	140000	9.706	16.183	15.1525	0.001406
25	143448			20	0.000139



Lampiran 21 data hasil penelitian pada kondisi $S_a = 12 \text{ MPa}$ saat $R = 0$

Smax (MPa)	Smin (MPa)	Sa (MPa)	R	Panjang notch (mm)	
				kiri	Kanan
24	0	12	0	2.471	2.424

No.	siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
1	500	0.288	0.027	2.605	0.000152
2	1500	0.507	0.112	2.757	0.000162
3	3500	0.875	0.393	3.0815	0.000111
4	5500	1.093	0.618	3.303	0.000097
5	7500	1.437	0.662	3.497	0.000153
6	9500	1.791	0.921	3.8035	0.000142
7	11500	2.201	1.079	4.0875	7.6E-05
8	15000	2.497	1.315	4.3535	0.000108
9	20000	3.285	1.606	4.893	9.09E-05
10	25000	3.83	1.97	5.3475	0.000102
11	30000	4.722	2.097	5.857	0.00014
12	35000	5.682	2.54	6.5585	0.000111
13	40000	6.584	2.744	7.1115	6.59E-05
14	45000	7.185	2.802	7.441	0.000109
15	50000	7.873	3.2	7.984	9.99E-05
16	60000	9.483	3.588	8.983	7.56E-05
17	70000	10.452	4.131	9.739	0.000126
18	80000	11.984	5.11	10.9945	0.000145
19	90000	14.088	5.915	12.449	0.000181
20	100000	16.454	7.165	14.257	0.000125
21	110000	17.704	8.417	15.508	0.000209
22	120000	19.645	10.647	17.5935	0.000344
23	127000			20	0.000157



Lampiran 22 data hasil penelitian pada kondisi $S_a = 14 \text{ MPa}$ saat $R = 0$

Smax (MPa)	Smin (MPa)	Sa (MPa)	R	Panjang notch (mm)	
				kiri	Kanan
28	0	14	0	2.646	2.385

No.	siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
1	500	0.191	0.191	2.7065	8.8E-05
2	1000	0.264	0.206	2.7505	0.000216
3	2000	0.451	0.451	2.9665	0.000192
4	3000	0.684	0.601	3.158	0.000194
5	4000	0.899	0.773	3.3515	0.000173
6	5500	1.12	1.071	3.611	0.000175
7	7500	1.452	1.437	3.96	0.000208
8	9500	1.888	1.833	4.376	0.000206
9	11500	2.411	2.133	4.7875	0.000159
10	13500	2.741	2.44	5.106	0.000214
11	15500	3.135	2.903	5.5345	0.000185
12	17500	3.501	3.275	5.9035	0.000238
13	20000	4.013	3.954	6.499	0.000322
14	22500	4.615	4.964	7.305	0.000279
15	25000	5.158	5.818	8.0035	0.000328
16	27500	5.856	6.758	8.8225	0.000449
17	30000	6.972	7.889	9.946	0.000527
18	35000	9.734	10.394	12.5795	0.007421
19	36000			20	0.000556



Lampiran 23 data hasil penelitian pada kondisi $S_{mean} = 10.5$ MPa saat $R = 0.2$ di Aluminium

Smax (MPa)	Smean (MPa)	Sa (MPa)	R	Panjang notch (mm)	
				kiri	Kanan
17.5	10.5	7	0.2	2.8	2.654

No.	Siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
1	500	0	0	2.727	0
2	2000	0	0	2.727	2.65E-05
3	5000	0.089	0.07	2.8065	1.8E-06
4	10000	0.098	0.079	2.8155	6.4E-06
5	15000	0.137	0.104	2.8475	9E-07
6	20000	0.137	0.113	2.852	0.000004
7	25000	0.153	0.137	2.872	4.9E-06
8	30000	0.171	0.168	2.8965	1.13E-05
9	35000	0.229	0.223	2.953	6.4E-06
10	40000	0.232	0.284	2.985	2.1E-06
11	45000	0.238	0.299	2.9955	2.2E-06
12	50000	0.247	0.312	3.0065	4.6E-06
13	55000	0.269	0.336	3.0295	3.9E-06
14	60000	0.287	0.357	3.049	7.4E-06
15	65000	0.333	0.385	3.086	7.3E-06
16	70000	0.348	0.443	3.1225	2.1E-06
17	75000	0.357	0.455	3.133	7E-07
18	80000	0.364	0.455	3.1365	1.9E-06
19	85000	0.364	0.474	3.146	3.26E-05
20	90000	0.44	0.724	3.309	5.2E-06
21	100000	0.495	0.773	3.361	1.5E-06
22	110000	0.504	0.794	3.376	2.15E-06
23	120000	0.513	0.828	3.3975	8.1E-06
24	130000	0.544	0.959	3.4785	3E-07
25	140000	0.55	0.959	3.4815	2.75E-06
26	160000	0.632	0.987	3.5365	2.45E-06
27	180000	0.73	0.987	3.5855	8.73E-06
28	200000	0.929	1.137	3.76	1.05E-05
29	220000	1.247	1.237	3.969	4.47E-06
30	240000	1.291	1.372	4.0585	1.05E-05
31	260000	1.41	1.674	4.269	8.47E-06
32	275000	1.463	1.875	4.396	5.35E-06
33	295000	1.568	1.984	4.503	4.18E-06
34	315000	1.601	2.118	4.5865	5.83E-06
35	335000	1.703	2.249	4.703	7.97E-06

No.	Siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
36	355000	1.821	2.45	4.8625	6.73E-06
37	375000	1.937	2.603	4.997	3.58E-06
38	395000	1.968	2.715	5.0685	0.000127
39	415000	4.082	5.671	7.6035	0.000757
40	431374			20	4.64E-05



Lampiran 24 data hasil penelitian pada kondisi $S_{mean} = 10.5$ MPa saat $R = 0.2$ di *Fiber Reinforced Composites (Fiber Epoxy)*

Smax (MPa)	Smean (MPa)	Sa (MPa)	R	Panjang notch (mm)	
				kiri	Kanan
17.5	10.5	7	0.2	2.303	2.43

No.	Siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
1	500	0	0	2.3665	0
2	1500	0	0	2.3665	0
3	3500	0	0	2.3665	0
4	5500	0	0	2.3665	0
5	10000	0	0	2.3665	9.5E-06
6	15000	0	0.095	2.414	3.1E-06
7	20000	0	0.126	2.4295	3.4E-06
8	25000	0	0.16	2.4465	0
9	30000	0	0.16	2.4465	0
10	35000	0	0.16	2.4465	6.6E-06
11	40000	0	0.226	2.4795	0
12	45000	0	0.226	2.4795	0
13	50000	0	0.226	2.4795	2.65E-06
14	60000	0	0.279	2.506	6E-07
15	70000	0	0.291	2.512	8.5E-07
16	80000	0	0.308	2.5205	0
17	90000	0	0.308	2.5205	2.5E-06
18	100000	0.04	0.318	2.5455	4.13E-07
19	140000	0.04	0.351	2.562	2.13E-06
20	180000	0.052	0.509	2.647	3.25E-07
21	220000	0.061	0.526	2.66	7.62E-07
22	260000	0.076	0.572	2.6905	6.12E-07
23	300000	0.092	0.605	2.715	1.41E-06
24	340000	0.159	0.651	2.7715	2.38E-07
25	380000	0.177	0.652	2.781	5.63E-07
26	420000	0.208	0.666	2.8035	6.5E-07
27	460000	0.23	0.696	2.8295	1.03E-06
28	500000	0.24	0.768	2.8705	5E-07
29	540000	0.267	0.781	2.8905	3.62E-07
30	580000	0.267	0.81	2.905	8E-07
31	620000	0.322	0.819	2.937	3.5E-07
32	660000	0.335	0.834	2.951	1.21E-06
33	700000	0.407	0.859	2.9995	4.12E-07
34	740000	0.412	0.887	3.016	1.25E-07
35	780000	0.422	0.887	3.021	4.88E-07

No.	Siklus	Crack		Jumlah panjang retak rata- rata (mm)	Laju perambatan retak da/dN (mm/siklus)
		Kiri	Kanan		
36	820000	0.422	0.926	3.0405	5.38E-07
37	860000	0.458	0.933	3.062	7.88E-07
38	900000	0.509	0.945	3.0935	1.53E-06
39	940000	0.57	1.006	3.1545	1.5E-07
40	980000	0.576	1.012	3.1605	8.25E-07
41	1020000	0.6	1.054	3.1935	1.06E-06
42	1060000	0.63	1.109	3.236	1.14E-06
43	1100000	0.721	1.109	3.2815	9.13E-07
44	1140000	0.764	1.139	3.318	1.7E-06
45	1180000	0.84	1	3.386	1.23E-06
46	1220000	0.84	1.297	3.435	1.24E-06
47	1260000	0.897	1.339	3.4845	3.54E-06
48	1300000	0.915	1.604	3.626	2.98E-06
49	1340000	0.921	1.836	3.745	2.96E-06
50	1380000	0.932	2.062	3.8635	2.37E-06
51	1430000	0.97	2.261	3.982	2.3E-06
52	1470000	1.001	2.414	4.074	0.000486
53	1502788			20	1.33E-05