

**PENGARUH RASIO TEGANGAN DAN DELAMINASI TERHADAP  
DISTRIBUSI TEGANGAN PADA *FIBER METAL LAMINATES***

**SKRIPSI**  
**TEKNIK MESIN KONSENTRASI KONSTRUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**NATASHA RATNA DILLA**  
**NIM. 155060200111052**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**JURUSAN MESIN**  
**MALANG**  
**2019**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGARUH RASIO TEGANGAN DAN DELAMINASI TERHADAP  
DISTRIBUSI TEGANGAN PADA *FIBER METAL LAMINATES***

**SKRIPSI  
TEKNIK MESIN KONSENTRASI KONSTRUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**NATASHA RATNA DILLA  
NIM. 155060200111052**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 19 Juni 2019

Dosen Pembimbing I

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

Dosen Pembimbing II

Khairul Anam, ST., MSc  
NIP. 2013108611271001

Mengetahui,

Ketua Program Studi S1



Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., M.Eng  
NIP. 19740930 200012 1 001



## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan orang lain untuk memperoleh gelar akademik disuatu 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 disebarakan sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam 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, 25 Juni 2019

Mahasiswa,



Natasha Ratna Dilla

NIM. 155060200111052

UNIVERSITAS BRAWIJAYA







**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM SARJANA**



**SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI**

Nomor : 014/UN10.F07.12.21/PP/2019

Sertifikat ini diberikan kepada :

**NATASHA RATNA DILLA**

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH RASIO TEGANGAN DAN DELAMINASI TERHADAP DISTRIBUSI  
TEGANGAN PADA FIBER METAL LAMINATES**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi  $\leq 20\%$ , dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **24 JUN 2019**

Ketua Jurusan Teknik Mesin



**Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D**

NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin



**Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT**

NIP. 19740930 200012 1 001



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan atas kehadiran Allah SWT karena atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Skripsi dengan judul Pengaruh Rasio Tegangan dan Delaminasi Terhadap Distribusi Tegangan pada *Fiber Metal Laminates* ini dapat terselesaikan dengan baik.

Pembuatan laporan ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik. Penulis berharap laporan ini dapat memberikan manfaat bagi kelancaran bidang akademik mahasiswa khususnya dan pembaca umumnya.

Dalam pembuatan laporan ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu menyelesaikan laporan ini. Secara khusus penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang senantiasa mencurahkan rahmat dan ridho Nya, petunjuk dan bimbingan serta nikmat yang tak terhingga banyaknya.
2. Nabi Muhammad Sholallahu Alaihi Wassalam, atas ajaran Beliau yang senantiasa memberi manfaat bagi penulis.
3. Kedua Orang Tua, Bapak Junet Iswahyudi dan Ibu Tjendrawasih Maja Christanti, adik tersayang Kintani Dewayanti dan seluruh keluarga yang selalu memberikan doa dan dukungan baik moral ataupun materiil.
4. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT, Ph.D. selaku Ketua Jurusan dan Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng, Ph.D selaku Sekertaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
5. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., M.Eng selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya
6. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng selaku Dosen Pembimbing 1, dan Bapak Khairul Anam, ST., M.Sc selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah membantu, memberikan saran dan motivasi penulis dalam menyelesaikan skripsi.
7. Bapak dan Ibu Dosen beserta seluruh staff Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
8. Teman-teman seperjuangan skripsi, Sarah Ardiana Pangesti dan Rikky Handoyo yang telah menemani jalannya proses skripsi simulasi, terimakasih atas waktu dan pengalaman berjuang bersama, semoga selalu diberikan kelancaran dan kemudahan dalam menjalani

- kehidupan kedepannya, dan Adhitya Fauzan Salim semoga segera dilancarkan eksperimentalnya.
9. Muhammad Syifa'uddin yang selalu bersedia meluangkan waktu dan tenaga, selalu ada dan menemani serta senantiasa mendukung penulis ketika membutuhkan bantuan.
  10. Bapak Djoko Sumantri, selaku pranata Laboratorium Fenomena Dasar Mesin, dan seluruh mas mbak dan teman teman Asisten yaitu Moniq, Dono, Arul, Ilham, Ifada, Ipay, Erlangga, Rizalul, WT, Nando, Putu, Mas Sat, Mas TA, Mas Bara, Mas Jek, Mbak Putri, Mas Arab, Mas Naufal, Mbak Ayuk, Mas Unggar, dan Mas Bayu terimakasih atas tiga tahunnya, semoga sukses pada jalannya masing-masing.
  11. Teman - teman Apatte-62 Brawijaya angkatan 2015 dan 2016, Syifa', Isti, Bene, Riandika, Apep, Tomo, Fitra, Sugeng, Fuad, Afrie, Ariaz, Rahmat, Wildan, Fanani, Andre, Mido, Mayra, Gita, Titan, Rayhan, Nova, Shanda, Teguh, Farid, Kigung, Shofwan, Yacub, Yusril, semoga semakin berprestasi kedepannya.
  12. Putri Mesin 2015 yang selalu ada dari hari pertama perkuliahan yaitu Moniq, Isti, Dewi, Amal, Tamara, Nisa, Sela, Zafirah, Eka, Fety, Sarah, semoga kita selalu bersama hingga tua nanti, semoga kalian sukses selalu.
  13. Khalida Ikhlasia dan Irza Sari Kautsar sebagai sahabat terbaik.
  14. Teknik Mesin Angkatan 2015 dan KBMM yang telah memberikan banyak pengalaman berharga.
  15. Serta teman - teman yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Pembuatan laporan masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi perbaikan dan kesempurnaan laporan ini. Terimakasih.

Malang, Mei 2019

Penulis



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	x
<b>RINGKASAN</b> .....	xi
<b>SUMMARY</b> .....	xii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	5
2.2 Material Komposit .....	7
2.3 <i>Laminates</i> .....	10
2.4 Matriks .....	13
2.5 <i>Fiberglass</i> .....	15
2.6 Aluminium Alloy / Aluminium Paduan .....	16
2.6.1 Macam-macam <i>Fiber Metal Laminates</i> (FMLs) .....	16
2.7 Perekat / <i>Epoxy Adhesive</i> .....	17
2.8 <i>Fatigue</i> .....	17
2.9 Beban Siklus .....	18
2.10 <i>Crack</i> .....	21
2.11 Delaminasi .....	25
2.12 Serat <i>Bridging</i> .....	25
2.13 Hubungan antara Tegangan dan Regangan.....	26
2.14 Metode Elemen Hingga .....	30
2.15 Formula Metode Elemen Hingga Pada Pelat Komposit .....	33
2.16 Hipotesis.....	35

<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>37</b>
3.1 Metode Penelitian .....	37
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian .....	37
3.3 Variabel Penelitian .....	37
3.4 Pemodelan Geometri .....	39
3.5 Pemodelan Material .....	40
3.6 Pemodelan Pembebanan .....	41
3.7 Pemodelan Retak .....	43
3.8 Diskritisasi / <i>Meshing</i> .....	44
3.9 Rancangan Penelitian .....	44
3.9.1 Simulasi dengan Perangkat Lunak Komputer Berbasis Metode Elemen Hingga .....	46
3.10 Diagram Alir Penelitian .....	47
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>49</b>
4.1 Hasil Simulasi .....	49
4.1.1 Kontur Distribusi Tegangan Terhadap Variasi Rasio Tegangan .....	49
4.1.2 Kontur Tegangan Maksimum Terhadap Variasi Panjang Retak dan Delaminasi .....	56
4.1.3 Grafik Distribusi Tegangan Terhadap Variasi Rasio Tegangan .....	59
4.1.4 Grafik Hubungan Antara Tegangan Maksimum Terhadap Variasi Panjang Retak dan Delaminasi .....	66
4.2 Pembahasan .....	68
4.2.1 Pembahasan Mengenai Pengaruh Variasi Rasio Tegangan Terhadap Distribusi Tegangan Pada Jarak Dari Ujung Retak Tertentu .....	68
4.2.2 Pembahasan Mengenai Pengaruh Variasi Panjang Retak Terhadap Tegangan Maksimum .....	71
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>73</b>
5.1 Kesimpulan .....	73
5.2 Saran .....	73

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Material properties E-Glass</i> .....	18
Tabel 3.1 Variabel Bebas .....	38
Tabel 3.2 Dimensi benda uji .....	39
Tabel 3.3 <i>Material properties Commercial Aluminium</i> .....	40
Tabel 3.4 <i>Contact Interaction Properties</i> .....	40
Tabel 3.5 <i>Material Properties of Glass Fiber Composite</i> .....	41
Tabel 4.1 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Dengan Panjang Retak 3mm Untuk Setiap Variasi Rasio Tegangan Pada <i>Inner Aluminium Surface</i> .....	54
Tabel 4.2 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Dengan Panjang Retak 3mm Untuk Setiap Variasi Rasio Tegangan Pada <i>Outer Aluminium Surface</i> .....	55
Tabel 4.3 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Dengan Panjang Retak 3mm Untuk Setiap Variasi Rasio Tegangan Pada <i>Glass Fiber Composite Surface</i> .....	56
Tabel 4.4 Kontur Dua Dimensi Tegangan Maksimum Dengan Variasi Panjang Retak 3, 7, dan 12 mm Untuk Rasio Tegangan 0,5 Pada <i>Inner Aluminium Surface</i> .....	58
Tabel 4.5 Kontur Dua Dimensi Tegangan Maksimum Dengan Variasi Panjang Retak 3, 7, dan 12 mm Untuk Rasio Tegangan 0,5 Pada <i>Outer Aluminium Surface</i> .....	59
Tabel 4.6 Kontur Dua Dimensi Tegangan Maksimum Dengan Variasi Panjang Retak 3, 7, dan 12 mm Untuk Rasio Tegangan 0,5 Pada <i>Glass Fiber Composite Surface</i> .....	59
Tabel 4.7 Data nilai tertinggi untuk masing-masing <i>surface</i> pada panjang retak 3, 7, dan 12 mm.....	68

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Tentang Klasifikasi Material Komposit.....	8
Gambar 2.2 <i>Laminate Composite</i> .....	9
Gambar 2.3 <i>Sandwich Panel</i> .....	10
Gambar 2.4 Perbedaan <i>ply</i> dan <i>laminates</i> .....	10
Gambar 2.5 <i>Lamina</i> dan <i>Laminate</i> .....	11
Gambar 2.6 <i>Continuous fiber composite</i> .....	11
Gambar 2.7 <i>Woven Fiber Composite</i> .....	12
Gambar 2.8 <i>Chopped fiber composite</i> .....	12
Gambar 2.9 <i>Hybrid Composite</i> .....	13
Gambar 2.10 <i>Composite Classification Based On Matrices</i> .....	17
Gambar 2.11 <i>Variation of stress with time that accounts for fatigue failures</i> .....	19
Gambar 2.12 <i>Sinusoidal loading for fatigue testing</i> .....	21
Gambar 2.13 Mode Bukan <i>Crack</i> .....	22
Gambar 2.14 <i>Elliptical-shaped crack</i> .....	22
Gambar 2.15 <i>Circular embedded crack</i> .....	22
Gambar 2.16 <i>Semi-elliptical surface crack</i> .....	23
Gambar 2.17 <i>Quarter-circular corner crack</i> .....	23
Gambar 2.18 <i>Center-Cracked Plate in Tension</i> .....	23
Gambar 2.19 <i>Single-edge Crack in Tension</i> .....	24
Gambar 2.20 <i>Double-edge Crack in Tension</i> .....	24
Gambar 2.21 <i>Single-edge Crack in Bending</i> .....	24
Gambar 2.22 Delaminasi .....	25
Gambar 2.23 Serat <i>Bridging</i> dan delaminasi pada lapisan komposit .....	26
Gambar 2.24 Diagram Tegangan Regangan Paduan Aluminium.....	28
Gambar 2.25 Diagram Tegangan Regangan (a) Skema Tegangan Regangan Serat dan Matriks (b) Skema Tegangan Regangan Serat Diperkuat Komposit .....	29
Gambar 2.26 Detail sumbu pelat dan lapisan komposit .....	33
Gambar 3.1 Pemodelan ukuran retak dan delaminasi.....	38
Gambar 3.2 Pemodelan Geometri Benda Uji (dalam satuan mm).....	39



Gambar 3.3 Susunan dan Ketebalan Spesimen (dalam satuan mm).....	40
Gambar 3.4 Contoh pemodelan pembebanan pada Rasio tegangan = 0 dan nilai Amplitudo = 14 MPa ; (a) <i>Step 1</i> ketika A = 14 MPa dan (b) <i>Step 2</i> ketika A = 0 Mpa.....	42
Gambar 3.5 <i>Boundary conditions</i> (a) tumpuan jepit ( <i>encastre mode</i> ) dan (b) tumpuan rol ( <i>XSMM mode</i> ) .....	43
Gambar 3.6 Metode <i>Seam</i> tampak depan dan samping .....	43
Gambar 3.7 <i>Meshing</i> benda uji FMLs .....	44
Gambar 3.8 Pengambilan data di setiap titik pada ujung retak.....	45
Gambar 4.1 Contoh kontur tiga dimensi distribusi tegangan pada FMLs dengan retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0.....	50
Gambar 4.2 Contoh kontur tiga dimensi distribusi tegangan tampak samping FMLs dengan retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0 .....	50
Gambar 4.3 Contoh penampang tiga dimensi daerah ujung retak pada FMLs dengan panjang retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0 .....	50
Gambar 4.4 Contoh penampang tiga dimensi <i>outer aluminium surface</i> pada FMLs dengan panjang retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0 .....	51
Gambar 4.5 Contoh penampang tiga dimensi <i>inner aluminium surface</i> pada FMLs dengan panjang retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0 .....	51
Gambar 4.6 Contoh penampang tiga dimensi <i>glass fiber composite surface</i> pada FMLs dengan panjang retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0 .....	51
Gambar 4.7 Kontur dari tegangan geser maksimum disekitar daerah ujung retak yang membentuk <i>semicircular shape</i> atau <i>butterfly shaped</i> .....	55
Gambar 4.8 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 3 mm pada <i>inner aluminium surface step 1</i> dan 2.....	60
Gambar 4.9 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 3 mm pada <i>outer aluminium surface step 1</i> dan 2.....	60
Gambar 4.10 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 3 mm pada <i>glass fiber composite surface step</i> 1 dan 2.....	61

Gambar 4.11 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 7 mm pada <i>inner aluminium surface step 1 dan 2</i> .....	61
Gambar 4.12 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 7 mm pada <i>outer aluminium surface step 1 dan 2</i> .....	62
Gambar 4.13 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 7 mm pada <i>glass fiber composite surface step 1 dan 2</i> .....	62
Gambar 4.14 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 12 mm pada <i>inner aluminium surface step 1 dan 2</i> .....	63
Gambar 4.15 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 12 mm pada <i>outer aluminium surface step 1 dan 2</i> .....	63
Gambar 4.16 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 12 mm pada <i>glass fiber composite surface step 1 dan 2</i> .....	64
Gambar 4.17 Grafik Hubungan Antara Tegangan Maksimum Terhadap Variasi Panjang Retak dan Delaminasi Pada <i>Inner Aluminium Surface</i> .....	66
Gambar 4.18 Grafik Hubungan Antara Tegangan Maksimum Terhadap Variasi Panjang Retak dan Delaminasi Pada <i>Outer Aluminium Surface</i> .....	66
Gambar 4.19 Grafik Hubungan Antara Tegangan Maksimum Terhadap Variasi Panjang Retak dan Delaminasi Pada <i>Glass Fiber Composite Surface</i> .....	67
Gambar 4.20 Contoh kontur tiga dimensi regangan pada FMLs dengan retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0.....	70
Gambar 4.21 Grafik regangan pada <i>fiber metal laminates</i> dengan retak 3mm rasio tegangan 0,5 pada setiap <i>surface</i> dalam <i>step 1</i> dan <i>step 2</i> .....	71

**DAFTAR LAMPIRAN**

No.	Judul
Lampiran 1	Kontur <i>Inner Aluminium Surface</i>
Lampiran 2	Kontur <i>Outer Aluminium Surface</i> .
Lampiran 3	Kontur <i>Glass Fiber Composite Surface</i> .
Lampiran 4	Grafik Distribusi Tegangan Pada <i>Inner Aluminium Surface</i>
Lampiran 5	Grafik Distribusi Tegangan Pada <i>Outer Aluminium Surface</i>
Lampiran 6	Grafik Distribusi Tegangan Pada <i>Glass Fiber Composite Surface</i>
Lampiran 7	Tabel Tegangan Pada <i>Inner Aluminium Surface</i>
Lampiran 8	Tabel Tegangan Pada <i>Outer Aluminium Surface</i>
Lampiran 9	Tabel Tegangan Pada <i>Glass Fiber Composite Surface</i>



## RINGKASAN

**Natasha Ratna Dilla**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Februari 2019, Pengaruh Rasio Tegangan Dan Delaminasi Terhadap Distribusi Tegangan Pada *Fiber Metal Laminates*, Dosen Pembimbing : Anindito Purnowidodo dan Khairul Anam.

Kemajuan teknologi dewasa ini berbanding lurus dengan perkembangan material komposit. Salah satu jenis komposit berdasarkan material penguatnya adalah *Fiber Metal Laminates* (FMLs). *Fiber Metal Laminates* merupakan gabungan antara lapisan tipis logam dan komposit yang disatukan dengan menggunakan perekat. Bentuk kerusakan yang dapat terjadi pada *Fiber Metal Laminates* salah satunya adalah delaminasi. Delaminasi merupakan proses terpisahnya antar lapisan pada komposit yang dapat timbul karena adanya retak awal dan rasio tegangan yang kemudian mempengaruhi distribusi tegangan pada komposit tersebut. Delaminasi akan mempengaruhi kekuatan dan kemampuan material dalam menahan beban *fatigue*. Oleh karena itu dilakukanlah penelitian menggunakan simulasi dengan *software* berbasis metode elemen hingga untuk mengetahui pengaruh rasio tegangan dan delaminasi terhadap distribusi tegangan pada *fiber metal laminates*.

Pada penelitian ini material komposit yang digunakan adalah *Glass Reinforced Aluminium Laminate* dan aluminium paduan, Perekat yang digunakan pada antarmuka aluminium dan *fiberglass* menggunakan *epoxy*. Dimensi spesimen yang digunakan memiliki tebal keseluruhan sebesar 1.8 mm, panjang 200 mm, dan lebar 40 mm. Pemodelan daerah ujung retak pada masing-masing retakan pada ujung spesimen dianggap sama (*double edge crack*). Tegangan maksimum yang diberikan adalah 28 MPa dengan variasi rasio tegangan yang diberikan adalah 0; 0,2; 0,3; 0,4 dan 0,5, dan ukuran delaminasi yang diberikan adalah 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, dan 12 mm. Pengujian dilakukan dengan dua *step*, yaitu *step 1* dengan tegangan maksimum, dan *step 2* dengan tegangan yang diberikan variasi rasio tegangan.

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa semakin besar rasio tegangan yang diberikan dan semakin besar ukuran panjang retak dan delaminasi akan menimbulkan distribusi tegangan pada daerah disekitar ujung retak yang akan semakin besar. Penyebabnya adalah adanya pengaruh konsentrasi tegangan yang terjadi di daerah ujung retak akan semakin besar ketika panjang retak meningkat. Selain itu semakin jauh jarak sebuah daerah dari ujung retak, maka konsentrasi tegangan yang terjadi akan semakin menurun karena timbulnya distribusi tegangan yang tidak merata. Begitu pula, tegangan yang terjadi pada setiap permukaan yang saling terhubung akan berbeda nilainya disebabkan karena adanya perbedaan modulus elastisitas yang dimiliki oleh masing-masing material penyusun komposit tersebut.

**Kata kunci** : *Fiber Metal Laminates*, Rasio Tegangan, Delaminasi, Distribusi Tegangan



## SUMMARY

*Natasha Ratna Dilla, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, May 2019, The Effect of Stress Ratio and Delamination on Stress Distribution in Fiber Metal Laminates, Academic Supervisor: Anindito Purnowidodo and Khairul Anam.*

Today's technological advances are directly proportional to the development of composite materials. One type of composite that is grouped based on its reinforcing material is Fiber Metal Laminates (FMLs). Fiber Metal Laminates are a combination of thin layers of metal and composites which are joined together using an adhesive. The form of damage that can occur in Fiber Metal Laminates is delamination. Delamination occurs when some layers in a composite separated that can arise due to the initial crack and stress ratio which then affects the stress distribution of the composite. Delamination will affect the material's strength and ability to withstand fatigue loads. Therefore, research is carried out using simulation with finite element method software to determine the effect of stress and delamination ratios on stress distribution on fiber metal laminates.

In this study, the composite material used is Glass Reinforced Aluminum Laminate and aluminum alloy. The type of adhesive used in aluminum and fiberglass interfaces is epoxy. The dimensions of the specimens have an overall thickness of 1.8 mm, a length of 200 mm, and a width of 40 mm. The specimen's crack tip area modeling on each crack at the end of the specimen is considered the same (double edge crack). The maximum stress given is 28 MPa with variations in the stress ratio given is 0; 0.2; 0.3; 0.4 and 0.5, and the size of the delamination given is 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, and 12 mm. The simulation is done in two steps, step 1 with maximum stress, and step 2 with the stress given variation in stress ratio.

From the simulation results, it is found that the greater the stress ratio is given and the greater the size of the length of the crack and delamination, it will cause a greater stress distribution in the area around the crack tip. The reason is that the effect of stress concentration that occurs at the end of the crack will increase when the crack length increases. In addition, the farther the distance of an area from the crack tip, the lower the stress concentration that occurs due to the emergence of uneven stress distribution. Likewise, the stress that occurs on each surface that is interconnected will have different values due to the difference in the modulus of elasticity conceived by each of the composite constituent materials.

**Keywords:** *Fiber Metal Laminates, Stress Ratio, Delamination, Stress Distribution*

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Kemajuan teknologi dewasa ini berbanding lurus dengan kebutuhan manusia akan berbagai macam material baru dengan kualitas terbaik. Material yang sudah umum diketahui seperti logam, keramik, dan polimer masih dirasa memiliki sifat yang kurang baik. Maka dari itu manusia mulai mengembangkan material baru yang dapat meningkatkan kualitas material konvensional. Material yang memiliki sifat spesifik dan tidak umum dibutuhkan dalam aplikasi teknologi tinggi, seperti yang dapat kita temui pada bidang penerbangan, teknologi bawah air, bio mekanik, dan industri transportasi.

Kombinasi antara berbagai sifat material telah dikembangkan secara luas dengan perkembangan material komposit. Sebuah komposit dapat dikatakan sebagai gabungan antara dua material dengan sifat fisik dan kimiawi yang berbeda dan membentuk material baru namun tidak mengubah karakteristik material pembentuknya, dimana antar material tersebut memiliki batas antar muka yang jelas (Sinmazçelik, dkk. 2011). Komposit sendiri telah menjadi perhatian utama pada berbagai bidang selama beberapa dekade terakhir, seperti pada bidang militer, penerbangan, dan transportasi (Callister, 2012).

Material komposit sendiri terdapat berbagai macam jenisnya, salah satunya adalah *Fiber Metal Laminates* (FMLs), dimana merupakan material komposit hibrida yang terbuat dari gabungan lapisan tipis logam dan serat yang telah diperkuat dengan perekat. Mengambil manfaat dari kedua bahan tersebut, yaitu logam (umumnya aluminium) dan serat yang diperkuat, akan memberikan beberapa keuntungan, diantaranya adalah dihasilkannya *Fiber Metal Laminates* (FMLs) yang memiliki daya tahan terhadap kerusakan yang lebih baik terutama terhadap pertumbuhan retak, dan daya tahan akibat *impact* yang lebih baik. FMLs juga dinilai lebih unggul dari segi kekuatan dan kekakuan, serta lebih ringan (Sinmazçelik, dkk. 2011).

Namun, respon mekanik dan respon termal dari material komposit dapat dipengaruhi oleh beberapa mekanisme perusakan dimana serat matriks nya terlepas serta matriksnya mengalami retak yang mana merupakan mode kerusakan primer. Retak pada matriks juga

dapat menyebabkan timbulnya delaminasi, yang memiliki efek signifikan pada kekuatan struktur (Madadi, dkk, 2018).

Delaminasi merupakan peristiwa terlepasnya antar lapisan pada komposit dimana delaminasi atau yang dapat disebut dengan *interlaminar fracture* pada struktur komposit berbasis polimer umumnya terjadi karena tegangan *interlaminar* yang muncul karena sifat elastis yang tidak sebanding antar lapisan. Timbulnya delaminasi pada FMLs dapat mengakibatkan banyak masalah keamanan dan mengurangi daya tahan struktur, seperti berkurangnya kekakuan, berkurangnya kekuatan dan umur struktur, serta hancurnya material (Das, dkk. 2013). Ketahanan material terhadap beban kerusakan juga dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti rasio tegangan dan adanya keretakan awal yang dialami oleh material tersebut, sehingga menyebabkan distribusi tegangan pada benda tersebut tidak merata yang menyebabkan berkurangnya umur material.

Rasio tegangan atau *Stress ratio* merupakan suatu perbandingan beban minimum dan beban maksimum yang dialami oleh benda uji. Dengan memberikan variasi nilai rasio tegangan maka akan diperoleh karakter laju perambatan retak yang bervariasi pula, dengan kata lain rasio tegangan akan mempengaruhi perilaku laju perambatan retak yang terjadi, sehingga dapat membantu dalam mengetahui ketahanan material terhadap beban *fatigue*.

Ditinjau dari latar belakang di atas, maka diperlukan adanya penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh rasio tegangan dan delaminasi terhadap distribusi tegangan pada *Fiber Metal Laminates*. Penelitian ini menggunakan simulasi pada *software* yang berbasis Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Methods* yang mana dari penelitian ini diharapkan akan dapat mengetahui pengaruh ukuran delaminasi dan panjang retak tertentu serta pengaruh rasio tegangan FMLs. Pada penelitian sebelumnya yang menggunakan metode eksperimental, hanya didapatkan data berupa jumlah siklus yang dihasilkan pada setiap variasi *stress ratio*, tegangan maksimum, tegangan *mean* dan tegangan amplitudo, sehingga dapat digunakan untuk menghitung laju perambatan retak pada benda uji *Fiber Metal Laminates*. Perbedaannya dengan menggunakan metode simulasi dengan *software* berbasis Metode Elemen Hingga yaitu dengan simulasi maka akan dapat terlihat dan diketahui distribusi tegangan serta letak tegangan maksimum pada daerah ujung retak, tegangan minimum, daerah delaminasi yang terbentuk, serta dapat diketahui pula nilai distribusi tegangan yang berbeda-beda yang terbentuk pada setiap permukaan pada *Fiber Metal Laminates* ketika nantinya benda uji dikenai pembebanan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah pengaruh variasi rasio tegangan terhadap distribusi tegangan pada *Fiber Metal Laminates*?
2. Bagaimanakah pengaruh ukuran panjang retak dan delaminasi terhadap distribusi tegangan pada *Fiber Metal Laminates*?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini bertujuan agar pembahasan nantinya akan terfokus. Beberapa batasan masalah pada penelitian ini antara lain:

1. Analisis tegangan dan delaminasi menggunakan *software* berbasis Metode Elemen Hingga.
2. Penelitian dipusatkan pada rasio tegangan dan delaminasi pada *Fiber Metal Laminates*.
3. Material *fiberglass* yang digunakan memiliki sifat *orthotropic*.
4. Material aluminium yang digunakan yaitu *bilenar isotropic*.
5. Antarmuka aluminium dan *fiberglass* menggunakan *epoxy*.
6. Temperatur dan kelembaban dianggap konstan.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui dan menganalisa pengaruh Rasio Tegangan terhadap distribusi tegangan pada *Fiber Metal Laminates*
2. Mengetahui dan menganalisa pengaruh delaminasi pada panjang retak tertentu terhadap distribusi tegangan pada *Fiber Metal Laminates*

## 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan untuk memberikan manfaat berupa:

1. Memberikan prediksi kegagalan sebuah struktur yang diakibatkan adanya beban *fatigue*.
2. Memberikan informasi pengaruh rasio tegangan dan delaminasi terhadap distribusi tegangan pada *Fiber Metal Laminates*.
3. Dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan distribusi tegangan, rasio tegangan, dan delaminasi pada *Fiber Metal Laminates*.





## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Mathur dkk, (2007) dalam penelitian yang berjudul *Effect Of Stress Ratio And Frequency On Fatigue Crack Growth Rate of 2618 Aluminum Alloy Silicon Carbide Metal Matrix Composite* melakukan penelitian tentang pengaruh *stress ratio* dan frekuensi pembebanan pada Aluminium alloy-SiC composite dengan nilai *stress ratio* 0,1 ; 0,25 dan 0,5 dan frekuensi pembebanan 1 Hz, 5 Hz dan 10 Hz. Dari hasil penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa semakin kecil nilai *stress ratio* maka laju perambatan retak akan semakin cepat sedangkan variasi besar frekuensi pembebanan tidak mempengaruhi laju perambatan retak. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa laju perambatan retak fatik panel komposit serat gelas (*Glass Fiber Reinforced Plastic*) akan semakin cepat seiring dengan penurunan nilai rasio tegangan.

Wu (2007) juga memperkuat hasil penelitian sebelumnya dalam penelitiannya yang berjudul *Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth of Ti40 As*, dengan hasil penelitian yang dilakukan pada komposit metal Ti40-SiCn yang mempunyai hasil serupa dimana akan terjadi peningkatan laju perambatan retak seiring dengan penurunan nilai *stress ratio*.

Astika (2012) dalam penelitian yang berjudul *Analisa Delaminasi Pada Glass Fiber Reinforced Polymer Komposit Laminat Dengan Pembebanan Fatigue* meneliti dan mengamati bahwa pertumbuhan delaminasi pada komposit laminat yang didasarkan pada perhitungan kemungkinan pertumbuhan delaminasi pada semua tingkat pembebanan selama siklus pembebanan *fatigue*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju perambatan retak mengalami penurunan pada jumlah siklus yang meningkat. Bertambahnya siklus mengakibatkan faktor intensitas tegangan dan energi yang dibebaskan mengalami penurunan. Berkurangnya energi yang dibebaskan dan faktor intensitas tegangan berpengaruh pada distribusi tegangan pada ujung retakan mengakibatkan laju pertumbuhan retak menurun.

Mohammdi (2015) dalam penelitian yang berjudul *On Computational Modelling of Postbuckling Behavior of Composite Laminates Containing Single and Multiple Delamination using Interface Element with Cohesive Law* juga telah melakukan penelitian pengaruh ukuran, letak, dan distribusi delaminasi serta konfigurasi *lay-up* untuk mengetahui

respon pada komposit baik secara teoritikal dan numerikal untuk memecahkan masalah delaminasi.

Kumar (2016) dalam penelitian yang berjudul *Analysis of Stress Concentration in Orthotropic Laminates* meneliti tentang analisa elemen hingga yang cakupannya luas pada konsentrasi tegangan di *laminates orthotropic*. Penelitian ini menginvestigasi faktor konsentrasi tegangan (SCF) dalam plat isotropic dan ortotropic sesuai dengan adanya pemotongan di bagian tengah plat namun tetap memperhatikan orientasi sudut lamina. Simulasi numerikal dilakukan dengan menggunakan elemen *shell 8 node* pada *software ANSYS APDL*.

Yao dkk, (2016) dalam penelitian yang berjudul *Mode I Fatigue Delamination Growth with Fiber Bridging in Multidirectional Composite Laminates* melakukan penelitian untuk menginvestigasi pengaruh rasio tegangan pada serat *bridging* dalam penambahan delaminasi dengan beban *fatigue* terhadap material komposit. Dalam penelitian ini didapatkan bahwa signifikansi serat *bridging* dipengaruhi oleh rasio tegangan. Serat *bridging* yang lebih banyak akan dihasilkan pada delaminasi dengan rasio tegangan yang tinggi, jika dibandingkan dengan yang dipengaruhi oleh rasio tegangan yang rendah.

Sakti (2017) dalam penelitian yang berjudul Pengaruh Rasio Tegangan dan Panjang Retak Terhadap Distribusi Tegangan pada *Fiber Metal Laminates* menunjukkan bahwa semakin besar rasio tegangan yang diberikan, maka distribusi tegangan yang terjadi juga semakin besar. Kemudian, semakin besar panjang retak maka tegangan maksimum yang terjadi di depan ujung retak juga akan semakin besar, dan tegangan yang terjadi pada setiap permukaan *Fiber Metal Laminates* juga berbeda besarnya sesuai dengan regangan yang terjadi pada setiap permukaan dan modulus elastisitas yang dimiliki oleh material tersebut.

Sari (2017) dalam penelitian yang berjudul Pengaruh Amplitudo Tegangan dan Panjang Retak Terhadap Distribusi Tegangan Pada *Fiber Metal Laminates* Dengan Menggunakan *Finite Element Method*, dilakukan penelitian dimana *Fiber Metal Laminates* diberi tegangan amplitudo sebesar 7 MPa, 8.75 MPa, 10.5 MPa, 12 MPa, dan 14 MPa dengan variasi panjang retak 3 mm sampai dengan 12 mm. Mendapatkan hasil yakni semakin tinggi amplitudo tegangan maka distribusi tegangan akan semakin tinggi, namun semakin jauh jarak dari ujung retak maka nilai tegangan yang dihasilkan semakin kecil. Semakin panjang retak maka intensitas tegangan pada ujung retak akan semakin tinggi sehingga tegangan maksimum yang dihasilkan semakin tinggi.

Subekti (2017) dalam penelitiannya yang berjudul Pengaruh Rasio Tegangan Dan Amplitudo *Stress* Terhadap Karakteristik Perambatan Retak Pada *Fiber Metal Laminates*,

dengan menggunakan metode eksperimental yang menggunakan variabel bebas berupa rasio tegangan yakni  $R = 0 ; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5$  dan tegangan amplitudo sebesar 7 MPa, 8.75 MPa, 10.5 MPa, 12 MPa, dan 14 MPa. Variabel terkontrol yaitu pembuatan spesimen dengan menggunakan metode *hand lay-up* dengan diberi beban penekanan sebesar  $0.89 \text{ kg/cm}^2$  selama 20 detik menggunakan serat sintetis jenis *woven e-glass* dengan orientasi  $0^\circ/90^\circ$ , dimana  $0^\circ$  sejajar dengan arah rol aluminium, pola pembebanan sinusoidal dengan konstan amplitudo menggunakan frekuensi pembebanan 4 Hz. Mendapatkan hasil bahwa pada tegangan amplitudo yang sama, semakin meningkat rasio tegangan 0.2 yang disebabkan oleh karakteristik material penyusunnya. Untuk laju perambatan retaknya mengalami perubahan sedikit terhadap pengaruh rasio tegangan. Pada rasio tegangan yang sama, semakin besar tegangan amplitudo maka umur material akan semakin pendek dan laju perambatan retak semakin meningkat.

Adhim (2018) dalam penelitian yang berjudul Simulasi Pengaruh Rasio Tegangan Dan Panjang Retak Terhadap Distribusi Tegangan Pada *Fiber Metal Laminates* Dengan Arah Orientasi  $45^\circ/-45^\circ$  mendapatkan hasil bahwa semakin besar rasio tegangan yang diberikan maka distribusi tegangan yang terjadi juga akan semakin besar, dan semakin panjang retak, maka tegangan maksimum yang terjadi di depan ujung retak akan semakin besar.

## 2.2 Material Komposit

Material struktural dapat dibedakan menjadi empat kategori dasar, yakni logam, polimer, keramik, dan komposit. Komposit sendiri terdiri atas dua atau lebih material terpisah yang dikombinasikan dalam sebuah unit struktural makroskopis, dan terbuat dari berbagai kombinasi dari ketiga material lain (Gibson, 1994). Secara umum, komposit dianggap sebagai gabungan antara dua material atau lebih yang digabungkan pada skala makroskopis untuk membentuk material ketiga yang baru. Ciri dari skala makroskopis adalah seluruh materialnya dapat dilihat dan diperiksa dengan hanya menggunakan mata manusia (Jones, 1998, p.2). Pengertian serupa mengenai komposit ialah material multi fase apapun yang memperlihatkan proporsi signifikan antara kedua sifat unsur pokok yang mana akan membentuk kombinasi sifat material yang lebih baik yang harus memiliki dua sifat kimia yang berbeda dan dipisahkan dengan antar muka yang jelas (Callister, 2012). Komposit tersusun oleh dua komponen utama, yaitu matriks dan material penguat (*reinforcement*).

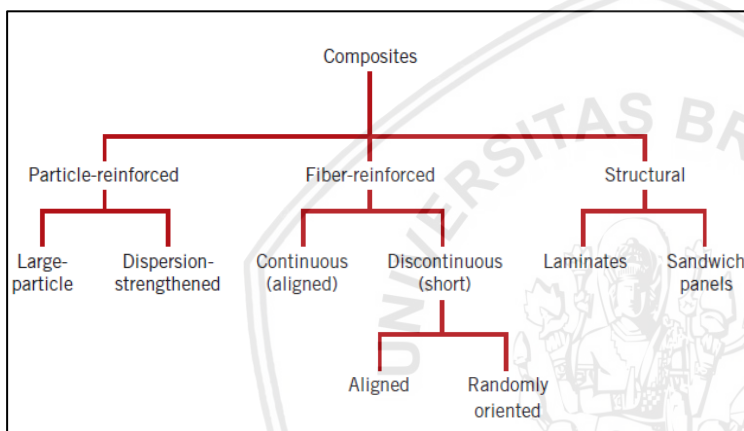
Tujuan pembuatan material komposit antara lain untuk memperbaiki sifat mekanik dan/atau sifat spesifik tertentu; untuk mempermudah desain yang sulit pada manufaktur;



untuk keleluasaan dalam bentuk atau desain sehingga dapat menghemat biaya; dan untuk menjadikan bahan lebih ringan. (Nayiroh, 2010).

Komposit secara umum telah digunakan karena memiliki sifat-sifat yang diinginkan, yang sebelumnya tidak dapat dipenuhi oleh material-material tunggal lainnya, seperti kekuatan dan kekakuan yang tinggi, ringan, tahan korosi, sifat tahan terhadap *fatigue* yang baik, dan ketahanan terhadap temperatur tinggi. (Botelho dkk, 2006).

Sebuah skema sederhana tentang klasifikasi material komposit berdasarkan material penguatnya dijelaskan pada Gambar 2.1, yang mana terdiri atas tiga divisi utama, yaitu: *particle-reinforced*, *fiber-reinforced*, dan *structural composite*



Gambar 2.1 Skema Tentang Klasifikasi Material Komposit  
Sumber: Callister, 2012.p 629

### 1. *Particle-reinforced Composite*

*Particle-reinforced Composite* merupakan komposit yang menggunakan partikel besar atau *large-particle composite* dan *dispersed-strengthened composite* yang menggunakan partikel yang memiliki ukuran sangat kecil sebagai penguatnya. Partikel penguat ini cenderung menahan pergerakan fase matriks disekitar partikel. Matriks akan menyalurkan tegangan yang diterapkan ke partikel komposit. *Large-particle composite* mengindikasikan bahwa interaksi antara partikel dan matriks tidak dapat diperlakukan pada skala atomik. Untuk *dispersed-strengthened composite* ukuran partikel penguatnya adalah berdiameter 10 sampai dengan 100 nm dimana interaksi antara partikel dan matriks diperlakukan pada skala atomik.

### 2. *Fiber-reinforced Composite*

*Fiber-reinforced Composite* adalah komposit yang menggunakan serat sebagai penguatnya. Komposit berpenguat serat terbagi menjadi dua jenis yaitu *continuous (aligned)* dimana seratnya lurus dan memiliki panjang sepanjang ukuran komposit, dan

*discontinuous (short)* dimana seratnya berukuran kecil dan terpotong-potong. Jenis serat *discontinuous* terbagi menjadi dua jenis yakni *aligned* atau sejajar dan *randomly oriented* atau tidak sejajar.

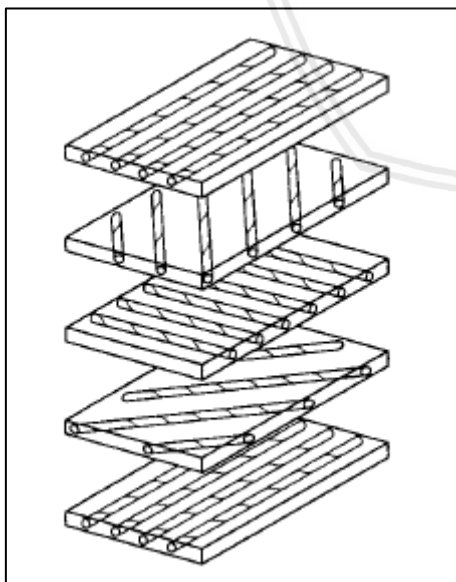
### 3. *Structural Composite*

*Structural composite* tersusun dari material homogen dan material komposit, dimana sifat komposit ini bergantung tidak hanya pada sifat material pokoknya saja, namun juga dari desain geometris pada variasi elemen struktur. *Laminate composites* dan *sandwich panels* merupakan dua *structural composite* yang paling umum.

#### a. *Laminate Composites*

*Laminate composite* tersusun atas dua lembaran atau panel yang memiliki arah serat berkekuatan tinggi yang ditumpuk dan direkatkan sehingga setiap lapisan memiliki arah kekuatan yang tinggi dan bervariasi pada setiap lapisannya. Dengan demikian, komposit laminar memiliki kekuatan yang relatif tinggi dalam sejumlah arah dalam bidang dua dimensi; Namun, kekuatan dalam arah tertentu, tentu saja, lebih rendah daripada jika semua serat berorientasi ke arah itu. *Laminate Composite* diilustrasikan pada Gambar 2.2 berikut.

Pada penelitian pengaruh rasio tegangan dan delaminasi terhadap distribusi tegangan pada *Fiber Metal Laminates* ini, digunakanlah *laminate composite* dengan orientasi serat  $0/90^\circ$ .

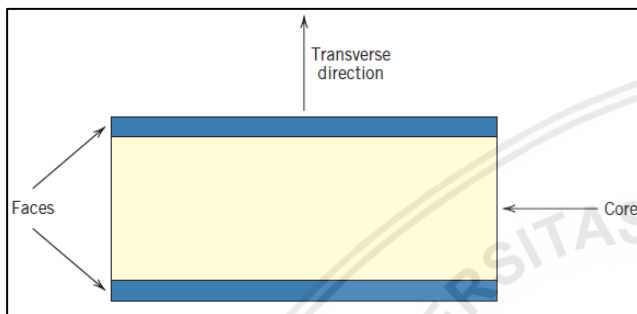


Gambar 2.2 *Laminate Composite*

Sumber: Jones, 1998, p.17

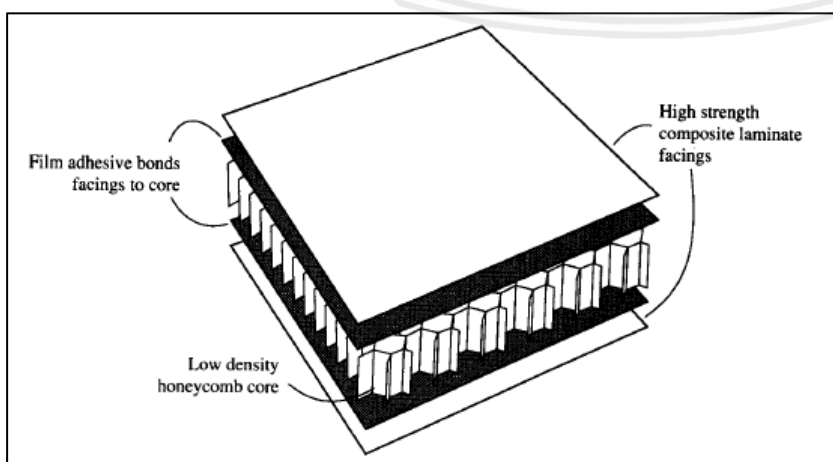
b. *Sandwich Panel*

Sebuah *sandwich panel* pada gambar 2.3 terdiri atas dua lembaran terluar yang direkatkan pada *core* yang lebih tebal. Lembaran terluarnya terdiri atas material yang relatif kaku dan kuat, misalnya aluminium paduan, karena lembaran terluar ini harus mampu menahan tegangan tarik dan tekan yang dihasilkan dari pembebanan. Material *core* juga harus ringan dan biasanya memiliki nilai modulus elastisitas yang rendah.



Gambar 2.3 *Sandwich Panel*  
Sumber: Callister, 2012, p.661

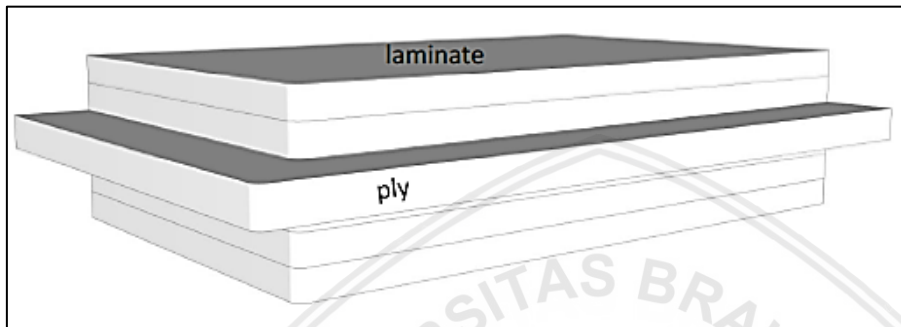
Konfigurasi komposit umum yang lain adalah struktur *sandwich*, yang terdiri atas komposit berkekuatan tinggi yang ditempelkan dengan *foam* yang ringan atau *honeycomb core*. Struktur *sandwich* ini memiliki kekuatan lentur yang sangat tinggi dengan rasio beratnya dan digunakan dengan luas pada struktur pesawat terbang. Fleksibilitas desain yang diberikan oleh *sandwich structure* memiliki aplikasi yang luas dan sangat diminati. *Composite honeycomb sandwich panel* diilustrasikan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Composite honeycomb sandwich panel*  
Sumber: Gibson, 1994, p.6

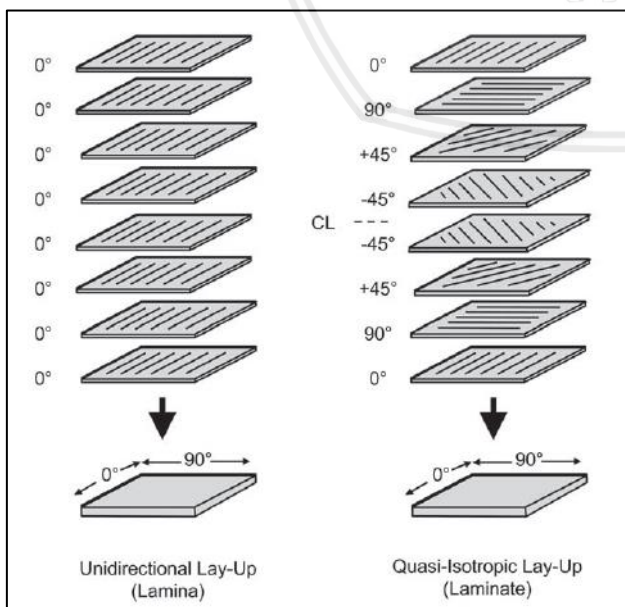
### 2.3 Laminates

Ketika terdapat sebuah lapisan atau sebuah *lay-up* dimana seluruh lapisannya tersusun dalam orientasi yang sama, *lay-up* tersebut dinamakan lamina. Namun ketika terdapat gabungan dari dua atau lebih lamina yang tersusun dalam orientasi sudut yang bervariasi, *lay-up* tersebut dinamakan *laminates*. Perbedaan lamina atau *ply* dan *laminates* digambarkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Perbedaan lamina atau *ply* dan *laminates*  
Sumber: Nijssen, 2013

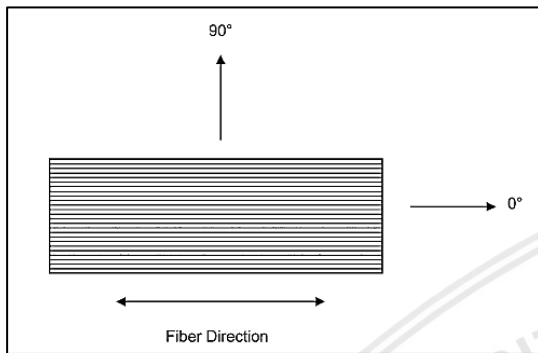
Komposit dengan serat kontinu umumnya merupakan material *laminate*, dimana setiap lapisan individualnya berorientasi ke arah yang akan saling menguatkan arah pembebanan primernya. Serat dengan orientasi sudut  $0^\circ$  memiliki sifat yang sangat kuat dan kaku. Namun, serat ini sangat rapuh pada orientasi sudut  $90^\circ$  karena beban akan ditempatkan pada matriks polimer yang paling rapuh, seperti diilustrasikan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Lamina dan Laminate  
Sumber: Campbell (2010, p.7)



Tegangan longitudinal dan beban kompresi diaplikasikan pada serat, sedangkan matriks mendistribusikan beban diantara serat yang memiliki tegangan dan menstabilkan serat serta mencegahnya dari *buckling* atau munculnya tekukan saat dikenai kompresi. Matriks juga merupakan pembawa beban primer untuk pergeseran interlaminar (contohnya pergeseran antar lapisan) dan tegangan transversal ( $90^\circ$ ) pada gambar 2.7.

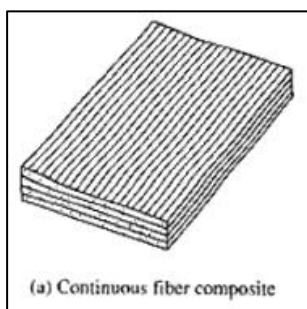


Gambar 2.7 Unidirectional continuous-fiber lamina or laminate  
Sumber: Campbell (2010, p. 9)

Komposit *laminate* terdiri atas empat jenis, yaitu:

a. *Continuous Fiber Composite*

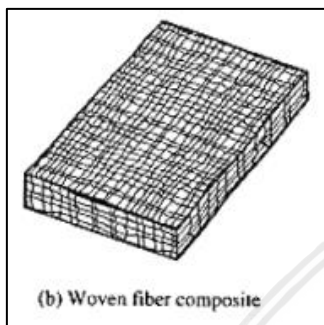
*Continuous fiber composite* merupakan komposit yang diperkuat dengan serat kontinyu. Pada gambar 2.8 ditunjukkan bahwa pada *continuous fiber / matrix lamina* memiliki orientasi pada arah yang diinginkan dan diikat bersama sehingga membentuk *laminate*. Meskipun *continuous fiber laminate* telah digunakan secara luas, namun potensi adanya delaminasi atau terpisahnya *laminates* masih merupakan masalah utama karena kekuatan *interlaminar* didominasi oleh matriks.



Gambar 2.8 Continuous Fiber Composite  
Sumber: Gibson, 1994, p.6

b. *Woven Fiber Composite*

*Woven Fiber Composite* pada gambar 2.9 memiliki susunan serat yang berbentuk seperti anyaman. Pada komposit jenis ini, *interlocking* antar seratnya lebih tinggi jika dibandingkan dengan *continuous fiber*. Bentuk *interlocking* atau anyaman ini membuat serat ketika dikenai uji tarik maka akan menghasilkan *pull-out* atau proses terlepasnya serat dari matriks menjadi lebih merata. Komposit jenis inilah yang digunakan pada penelitian ini.

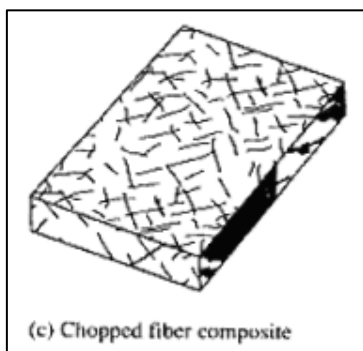


Gambar 2.9 *Woven Fiber Composite*

Sumber: Gibson, 1994, p.6

c. *Chopped fiber composite*

*Chopped fiber composite* pada gambar 2.10 memiliki serat yang pendek-pendek dan tersebar secara acak pada matriks. *Chopped fiber composite* umumnya digunakan pada aplikasi dengan volume besar, karena biaya manufakturnya yang lebih rendah, namun sifat mekanik dari *chopped fiber composite* termasuk rendah bila dibandingkan dengan *continuous fiber composite*.

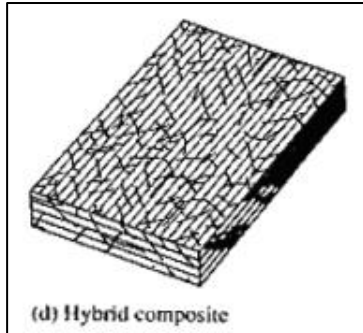


Gambar 2.10 *Chopped Fiber Composite*

Sumber: Gibson, 1994, p.6

d. *Hybrid Composite*

*Hybrid composite* pada gambar 2.11 terdiri atas campuran antara *chopped* dan *continuous fibers*, atau campuran beberapa tipe serat seperti *glass fiber* atau grafit.



Gambar 2.11 *Hybrid Composite*

Sumber: Gibson, 1994, p.6

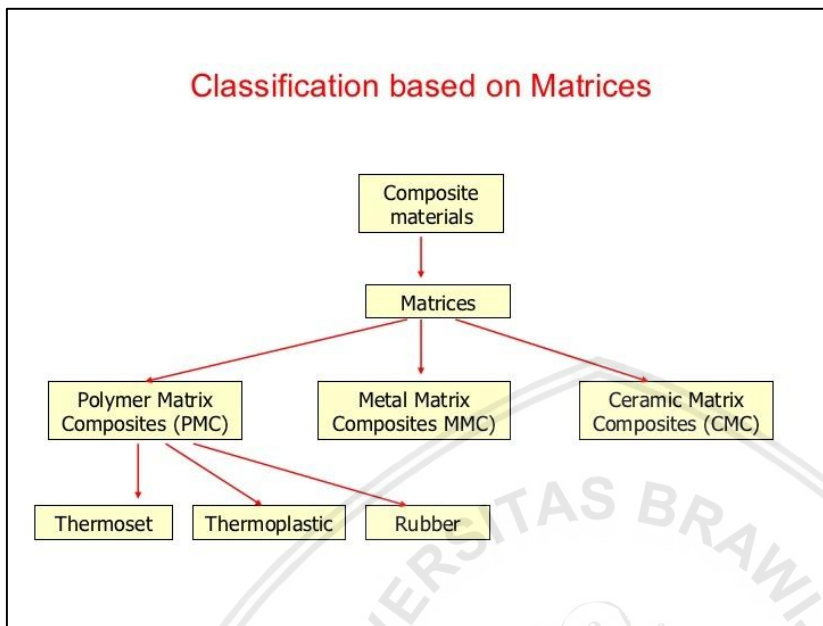
## 2.4 Matriks

Matriks pada komposit dapat berupa logam, polimer, atau keramik. Secara umum, logam dan polimer merupakan yang banyak digunakan sebagai matriks karena keuletan yang diinginkan, sedangkan komposit keramik matriks masih harus ditambahkan komponen penguat untuk meningkatkan sifat *fracture toughness*.

Matriks akan menyatukan serat dalam sebuah unit struktural dan melindungi serat dari kerusakan luar, menyalurkan dan mendistribusikan beban yang diaplikasikan pada serat, dan pada banyak kasus, matriks akan memberikan sifat mekanik yang dibutuhkan seperti keuletan, kekuatan, atau isolasi elektrik. Ikatan antar muka yang kuat antara matriks dan serat akan sangat dibutuhkan, maka dari itu matriks harus mampu membentuk ikatan mekanik dan kimiawi dengan serat. Serat dan matriks juga harus cocok secara kimiawi, sehingga reaksi yang tidak diinginkan tidak akan terjadi pada lapisan antar muka antara serat dan matriks, karena reaksi kimia umumnya akan menjadi masalah pada komposit yang berada pada temperatur tinggi (Gibson, 1994).

Matriks sendiri akan memberikan beberapa fungsi. Pertama, sebagai perekat serat-serat dan bertindak sebagai perantara ketika ada beban dari luar yang diaplikasikan dan terdistribusi pada serat, sehingga hanya sedikit beban yang diteruskan oleh matriks. Selain itu, material matriks harus ulet. Fungsi yang kedua adalah matriks berguna untuk melindungi setiap permukaan dari kerusakan akibat adanya abrasi mekanik atau reaksi kimia dengan lingkungan. Yang terakhir, matriks akan memisahkan serat dan mencegah adanya retakan

dari serat ke serat yang bisa menyebabkan kehancuran, matrikslah yang nantinya akan membuat batasan agar serat tidak hancur.



Gambar 2.12 Composite Classification Based On Matrices

Sumber: Siddonde (2015)

Fase – fase matriks dibedakan menjadi:

a. *Polimer – Matrix Composites (PMCs)*

*Polimer Matrix Composite (PMCs)* tersusun atas polimer resin sebagai matriks dengan serat sebagai media penguatnya. Material ini digunakan dalam aplikasi komposit secara luas, dan juga memiliki kuantitas terbesar, sangat baik digunakan di suhu ruang, mudah difabrikasi, dan memiliki harga yang terjangkau. Polimer dibedakan menjadi termoset (contohnya *epoxy*, poliester, *phenolic*) dan termoplastik (contohnya *polimide (PI)*, *polysulfone (PS)*, *polyetheretherketone (PEEK)*, dan *polyphenylene sulfide (PPS)*). Berbagai variasi klasifikasi PMCs dibedakan berdasarkan tipe penguatnya, yaitu: *glass*, *carbon* atau *aramid*.

b. *Metal – Matrix Composites (MMCs)*

*Metal – Matrix Composites (MMCs)* merupakan matriks yang terbuat dari logam yang ulet. Material ini dapat digunakan untuk suhu yang tinggi, serta bahan penguatnya dapat meningkatkan kekakuan dan kekuatan secara spesifik, meningkatkan ketahanan terhadap abrasi, ketahanan untuk mulur, konduktivitas termal yang baik, dan stabilitas dimensi. Beberapa keuntungan dari material ini dibandingkan komposit material polimer meliputi suhu operasi yang lebih tinggi, tidak mudah terbakar, dan ketahanan

terhadap fluida organik yang baik. MMCs memiliki harga yang lebih tinggi dibandingkan PMCs, namun sebagian MMCs dilarang penggunaannya. Contoh MMCs adalah aluminium, titanium, dan magnesium serta paduannya seperti *titanium aluminide*, dan *nickel aluminide* yang temperatur operasinya dapat mencapai 1250 derajat Celcius.

c. *Ceramic – Matrix Composites*

*Ceramic – Matrix Composites* merupakan matriks yang terbuat dari keramik dimana pada dasarnya tahan terhadap oksidasi dan deteriorasi pada suhu tinggi, jika bukan disebabkan oleh sifatnya yang getas dan memiliki kekuatan *tensile* yang rendah, maka material keramik akan menjadi material yang ideal untuk digunakan pada suhu dan tekanan tinggi, terutama untuk komponen pada kendaraan dan mesin turbin gas pesawat terbang. Ketangguhan retak keramik telah ditingkatkan secara signifikan oleh pengembangan generasi baru komposit keramik-matriks (CMCs) - partikulat, serat, atau *whiskers* dari satu bahan keramik yang telah tertanam ke dalam matriks keramik lain. Contoh CMCs adalah *silicon carbide* dan *silicon nitride* yang dapat digunakan hingga suhu 1650 derajat Celcius.

## 2.5 Fiberglass

Serat karbon, grafit karbon atau *carbon fiber* adalah bahan yang terdiri dari serat yang sangat tipis sekitar 0,005-0,010 mm dan sebagian besar terdiri dari atom karbon. Atom karbon yang terikat bersama kristal mikroskopis yang sejajar dengan sumbu panjang serat (Bregar and Bill, 2017).

*Fiberglass* umumnya digunakan untuk bahan penguat polimer matriks. *Fiberglass* memiliki kekuatan yang relatif tinggi namun modulus elastisitasnya rendah, serta memiliki sifat yang mudah pecah. *Fiberglass* memiliki beberapa karakteristik, yaitu:

- Memiliki massa jenis sekitar 2.5 g/cm<sup>3</sup>.
- Memiliki kekerasan kurang lebih seperti aluminium yaitu 1/3 kekerasan baja, dimana memiliki nilai E sekitar 80 sampai dengan 100 GPa.
- Memiliki ketahanan *fatigue* yang rendah.
- Konduktivitas termalnya kurang dari setengah konduktivitas termal baja.
- Ekspansi termalnya kurang dari setengah ekspansi termal baja.

Jenis-jenis glass yang sering digunakan untuk produksi serat, diantaranya adalah:

- *E glass (borosilicate)* – umumnya digunakan pada insulasi elektrik



- *S glass* (silica-magnesium *glass*) – digunakan pada komposit berkekuatan tinggi
- *A glass* (mengandung SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, MgO a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – untuk insulasi termal
- *C glass* (*pyrex*) – umumnya digunakan pada aplikasi di bidang kimiawi

Tipe serat gelas yang paling banyak digunakan di industri adalah *E-glass* baik berbentuk *random chopped strand mat* (CSM) maupun *woven roving* (Ismoyo, 1999). *E-glass* (*electrical glass*) umumnya digunakan sebagai insulator perkabelan, karena memiliki mampu bentuk yang baik dan hingga kini telah banyak digunakan sebagai serat penguat material dan biasa disebut *fiberglass*.

Tabel 2.1  
*Material properties E-Glass*

Properties	Nilai
<i>Specific gravity</i>	2.1
<i>Tensile Modulus</i>	
<i>Longitudinal</i> [GPa (10 <sup>6</sup> psi)]	45 (6.5)
<i>Transverse</i> [GPa (10 <sup>6</sup> psi)]	12 (1.8)
<i>Tensile Strength</i>	
<i>Longitudinal</i> [GPa (10 <sup>6</sup> psi)]	1020 (150)
<i>Transverse</i> [GPa (10 <sup>6</sup> psi)]	40 (5.8)
<i>Ultimate Tensile Strain</i>	
<i>Longitudinal</i>	2.3
<i>Transverse</i>	0.4

Sumber: Callister (1980, p.650)

## 2.6 Aluminium Alloy / Aluminium Paduan

Aluminium paduan memiliki karakteristik umum yakni densitasnya yang relatif rendah yaitu 2.7 g/cm<sup>3</sup> jika dibandingkan baja dengan nilai massa jenis 7.9 g/cm<sup>3</sup>. Aluminium paduan juga memiliki konduktivitas termal dan konduktivitas listrik yang tinggi, serta tahan terhadap korosi pada lingkungan tertentu. Aluminium paduan memiliki keuletan yang tinggi, hal ini dapat dibuktikan dengan lembaran aluminium *foil* yang dapat dengan mudah dilakukan proses pengerolan. Karena aluminium memiliki struktur kristal FCC maka sifat uletnya dapat tetap bertahan meskipun pada temperatur yang rendah. Batasan utama aluminium adalah temperatur lelehnya yakni 660 derajat Celcius.

Beberapa aplikasi umum aluminium paduan meliputi bagian struktur pesawat terbang, kaleng minuman, badan bus, dan perangkat otomotif seperti *engine blocks*, piston, dan *manifolds*.

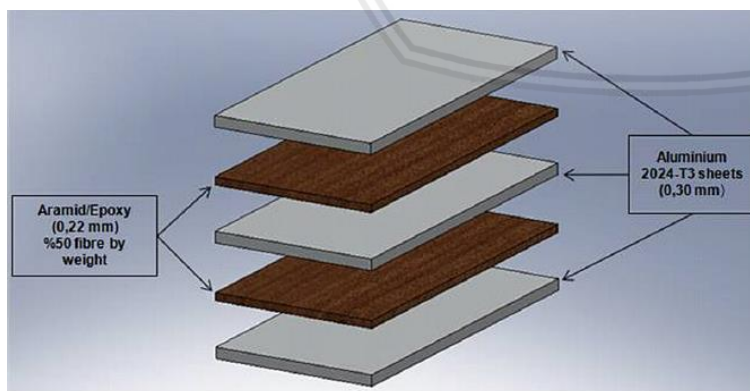
### 2.6.1 Macam-macam *Fiber Metal Laminates* (FMLs) Berdasarkan *Aluminium Alloys*

*Fiber Metal Laminates* (FMLs) merupakan material komposit hibrida yang terbuat dari gabungan lapisan tipis logam dan serat yang telah diperkuat dengan perekat. Logam digunakan sebagai material isotropik, karena memiliki kekuatan dan ketahanan *impact* yang tinggi serta mudah diperbaiki jika ada kerusakan, sedangkan serat memiliki keunggulan yakni kekakuannya yang tinggi dan ketahanan terhadap beban *fatigue* nya yang sangat baik (Sinmazçelik, dkk. 2011).

*Fiber Metal Laminates* yang tersedia secara komersial adalah ARALL (*Aramid Reinforced Aluminium Laminate*), dibuat dari *aramid fibres*, GLARE (*Glass Reinforced Aluminium Laminate*), dibuat dari serat gelas berkekuatan tinggi, dan CARALL (*Carbon Reinforced Aluminium Laminate*), yang dibuat dari *carbon fiber*.

#### a. ARALL (*Aramid Reinforced Aluminium Laminate*)

ARALL terbuat dari serat aramid yang tertanam dalam perekat epoxy yang terletak diantara lembaran paduan aluminium. ARALL terdiri atas lapisan aluminium paduan dengan tebal  $0.2 \pm 0.4$  mm dan uniaksial atau biaksial *aramid fibre prepreg*. ARALL terbagi menjadi dua, yaitu ARALL 1 merupakan variasi aluminium 7075 dan ARALL 2 yang menggunakan aluminium 2024.



Gambar 2.13 *Fiber Metal Laminates* berjenis ARALL 2  
Sumber: Sinmazçelik, 2011

b. GLARE (*Glass Reinforced Aluminium Laminate*)

GLARE (*Glass Reinforced Aluminium Laminate*) dibuat dari serat gelas berkekuatan tinggi yang disisipkan ke dalam material komposit. Serat kaca memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pembebanan tekan, selain itu juga memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dan kekuatan residual yang lebih baik, namun GLARE memiliki kekakuan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan ARALL.

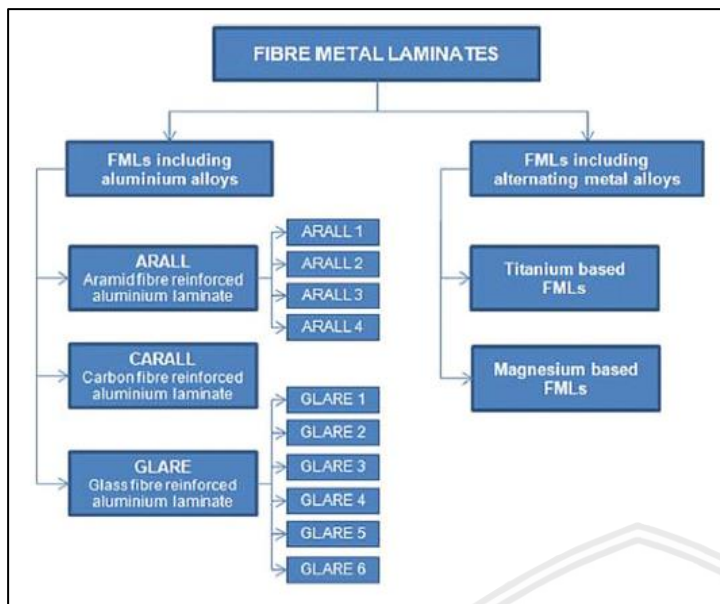
Tabel 2.2  
Jenis-Jenis GLARE

Grade	Sub	Jenis Logam	Ketebalan Logam (mm)	Lapisan Serat (mm)	Arah prepeg setiap lapisan (°)	Karakteristik
GLARE 1	-	7475-T761	0.3-0.4	0.266	0/0	<i>Fatigue, strength, yield stress</i>
GLARE 2	GLARE 2A	2024-T3	0.2-0.5	0.266	0/0	<i>Fatigue, strength</i>
	GLARE 2B	2024-T3	0.2-0.5	0.266	90/90	<i>Fatigue, strength</i>
GLARE 3	-	2024-T3	0.2-0.5	0.266	0/90	<i>Fatigue, impact</i>
GLARE 4	GLARE 4A	2024-T3	0.2-0.5	0.266	0/90/0	<i>Fatigue, strength, in 0° direction</i>
	GLARE 4B	2024-T3	0.2-0.5	0.266	90/0/90	<i>Fatigue, strength, in 90° direction</i>
GLARE 5	-	2024-T3	0.2-0.5	0.266	0/90/90/0	<i>Impact, shear, off-axis properties</i>
GLARE 6	GLARE 6A	2024-T3	0.2-0.5	0.266	+45/-45	<i>Shear, off-axis properties</i>
	GLARE 6B	2024-T3	0.2-0.5	0.266	-45/+45	<i>Shear, off-axis properties</i>

Sumber : Sinmazcelik (2011,p.9)

c. CARALL (*Carbon Reinforced Aluminium Laminate*)

CARALL (*Carbon Reinforced Aluminium Laminate*) menggunakan karbon sebagai serat pada material komposit. CARALL memiliki kekakuan yang tinggi sehingga perambatan retak pada CARALL akan lebih lambat.



Gambar 2.14 Klasifikasi FMLs berdasarkan lapisan logamnya  
Sumber: Sinmazçelik, 2011

## 2.7 Perekat / Epoxy Adhesive

Resin merupakan kata yang digunakan untuk menandakan polimer, material awal polimer, dan/atau campuran dengan berbagai macam zat tambahan atau komponen reaktif kimia. Resin secara komposisi kimia dan properti fisik, akan mempengaruhi proses, fabrikasi, dan sifat utama dari material komposit. Variasi komposisi, keadaan fisika, atau morfologi dari resin dan kehadiran zat kontaminasi pada resin, akan berakibat pada kemampuan penanganan dan kemampuan proses, sifat lamina atau laminates, dan performa jangka panjang dari material komposit tersebut (Callister, 2007).

Epoxy berfungsi sebagai perekat untuk menyambungkan dan merekatkan dua permukaan yang terpisah sehingga menjadi satu bagian tertentu. Epoxy digunakan secara luas sebagai struktur *adhesive*.

Epoxy memiliki beberapa keuntungan, diantaranya adalah kekuatan dan modulusnya yang tinggi, tidak mudah menguap, mudah melekat, tidak menyusut, tahan terhadap bahan kimia, dan mudah dalam pemrosesan. Kerugian epoxy adalah sifatnya yang getas, dan berkurangnya sifat mekaniknya karena adanya kelembapan.

## 2.8 Fatigue

*Fatigue* atau kelelahan adalah perubahan struktur yang progresif, terlokalisasi, dan permanen dalam material, yang mengalami regangan berulang atau berfluktuasi pada tegangan nominal yang kurang dari kekuatan luluh bahan (ASM International Handbook

Committee. ASM handbook. vol. 19, Fatigue and fracture. Materials Park, Ohio: ASM International; 1996).

*Fatigue* merupakan bentuk kegagalan yang terjadi ketika sebuah struktur diberikan gaya dinamis dan fluktuatif (contohnya jembatan, pesawat terbang, dan komponen mesin). Dalam keadaan ini, kegagalan akan sangat mungkin terjadi ketika *stress level* lebih rendah dari kekuatan *tensile* atau kekuatan *yield* pada pembebanan statis. Kata “*fatigue*” digunakan karena tipe kegagalan ini umumnya terjadi setelah periode siklus pengulangan tegangan atau regangan. *Fatigue* terjadi pada proses inisiasi dan perambatan retak, dan umumnya retaknya permukaan akan tegak lurus dengan arah pemberian tegangan (Callister, 2007).

Sifat *fatigue* dari sebuah material merupakan respon material tersebut terhadap pembebanan siklus. Kekuatan *fatigue* memiliki nilai yang lebih rendah jika dibandingkan dengan kekuatan statiknya. Pada kegagalan *fatigue*, dapat terlihat bahwa kegagalan tersebut terjadi karena adanya deformasi plastis. *Fatigue life* tergantung pada besarnya tegangan, keadaan tegangan, mode siklus, sejarah proses, dan keadaan lingkungan.

Pengujian *fatigue* umumnya dilakukan dengan pembebanan sinusoidal, dimana tahapan pembebanan *fatigue* dapat dideskripsikan dengan beberapa parameter yang ditunjukkan pada gambar. Dengan membuat spesifikasi tegangan maksimum dan minimum dengan parameter tegangan lainnya, akan mudah sekali dalam mendapatkan nilai parameter yang lain seperti jangkauan nilai tegangan ( $\sigma_r$ ), amplitudo tegangan ( $\sigma_a$ ), tegangan rata-rata ( $\sigma_m$ ), dan rasio tegangan *fatigue* ( $R$ ).

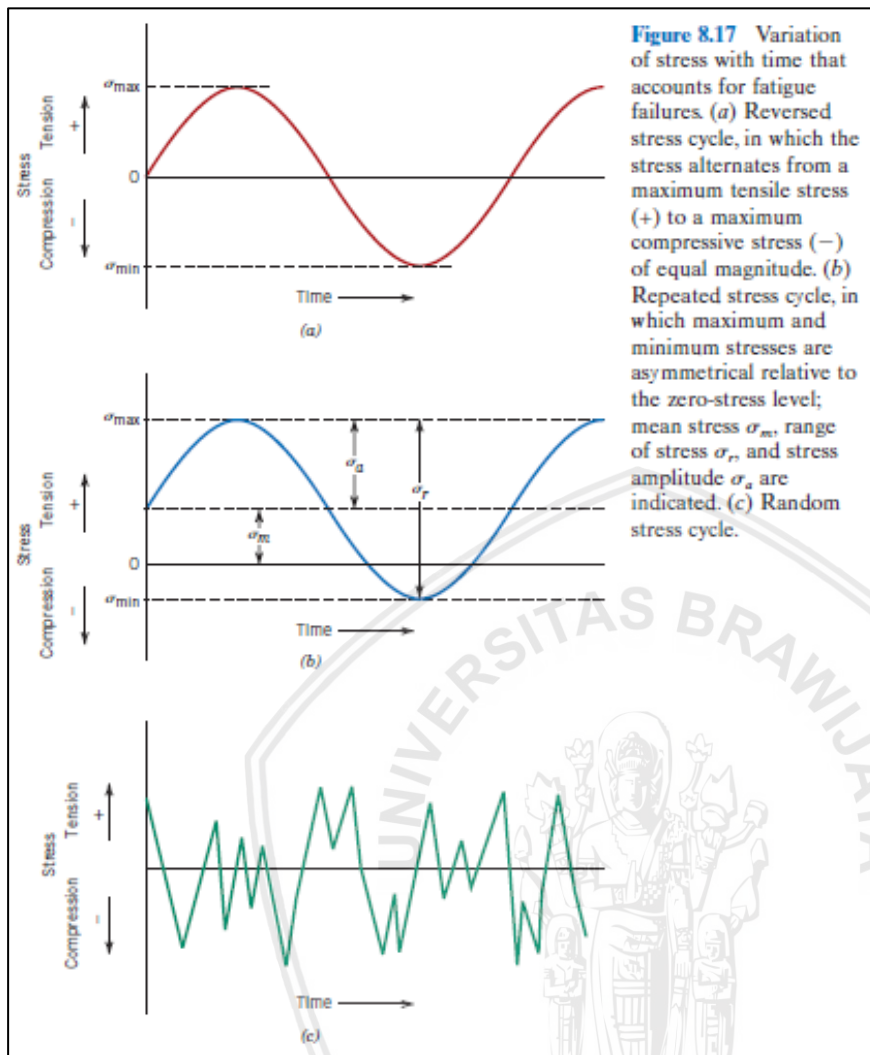
## 2.9 Beban Siklus

Di alam, tekanan yang diberikan dapat berupa aksial (tegangan tarik dan tekan), *flexural (bending)* atau torsional (*twisting*). Secara umum, tiga mode fluktuatif *stress – time* pada *fatigue stress cycle* yang mungkin terjadi dan dijabarkan secara skematik pada gambar 2.15.

Terdapat tiga jenis beban siklus, dan dijelaskan pada gambar 2.15, yaitu:

- a. *Reversed stress cycle*, yaitu tegangan berubah dari tegangan tarik maksimum (+) menjadi tegangan tekan minimum (-) pada nilai yang sama. Dijelaskan pada gambar 2.15 bagian a
- b. *Repeated stress cycle*, yaitu tegangan maksimum dan minimumnya asimetris dan relatif terhadap *zero-stress level*, tegangan rata-rata, jangkauan nilai tegangan, dan tegangan amplitudo yang diindikasikan. Dijelaskan pada gambar 2.15 bagian b.
- c. *Random stress cycle*, dimana tegangan yang dihasilkan acak. Dijelaskan pada gambar 2.15 bagian c.





Gambar 2.15 Variation of stress with time that accounts for fatigue failures  
 Sumber: Callister, 2012,p.228

1. Jangkauan tegangan ( $\sigma_{range}$ ) adalah selisih antara tegangan maksimum dengan tegangan minimum pada suatu pembebanan siklus.

$$\sigma_{range} = \sigma_{max} - \sigma_{min} \dots\dots\dots (2-2)$$

2. Tegangan amplitudo ( $\sigma_{amplitude}$ ) adalah jangkauan tegangan dibagi dua.

$$\sigma_{amplitude} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \dots\dots\dots (2-3)$$

3. Rasio Tegangan atau *Stress Ratio* ( $R$ ) merupakan perbandingan antara tegangan minimum dan maksimum

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \dots\dots\dots (2-4)$$

Rasio tegangan merupakan salah satu komponen dari pembebanan *fatigue* yang sering digunakan untuk melakukan perbandingan dalam suatu pengujian kelelahan atau kerusakan material, terutama pada keadaan nilai  $R = -1$  dan  $R = 0$ . Pada kondisi  $R = -1$ , pembebanan berada pada kondisi *fully reserved*, dimana besar tegangan tekan ( $\sigma_{min}$ ) sama dengan besar tegangan tarik  $-(\sigma_{max})$ . Sebaliknya pada kondisi  $R = 0$ , pembebanan berada pada kondisi *pulsating tension*, dimana tegangan minimum bernilai 0 atau dikatakan jika kondisi pembebanan sama dengan 0.

Rasio tegangan nantinya akan memberi pengaruh terhadap *fatigue life* suatu material. Semakin besar rasio tegangan dengan nilai tegangan maksimum yang dijaga tetap, maka umur ketahanan *fatigue* sebuah material akan semakin baik, hal ini disebabkan karena tegangan yang terjadi pada saat kondisi rasio tinggi akan semakin rendah pada setiap siklusnya. Semakin besar rasio tegangan yang diterima oleh beban dengan tegangan maksimum yang sama, maka umur material akan semakin panjang.

4. Perbandingan amplitudo ( $A$ ) merupakan perbandingan antara  $\sigma_{amplitude}$  dan  $\sigma_{mean}$ .

$$A = \frac{S_a}{S_m} = \frac{1-R}{1+R} \dots\dots\dots (2-5)$$

Dengan:

$\sigma_r$  = Jangkauan nilai tegangan (Pascal atau  $N/m^2$ )

$\sigma_a$  = Amplitudo tegangan (Pascal atau  $N/m^2$ )

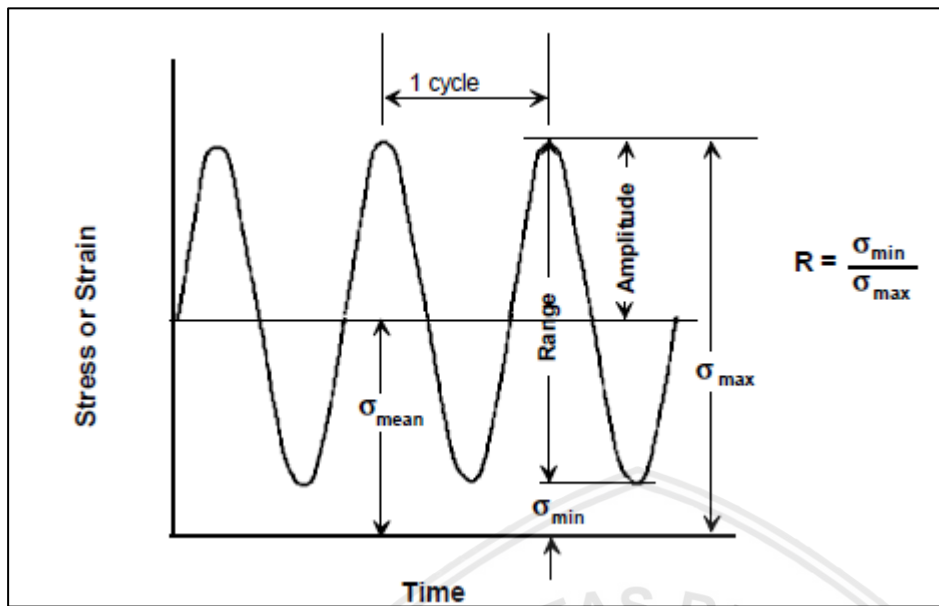
$\sigma_m$  = Tegangan rata-rata (Pascal atau  $N/m^2$ )

$R$  = Rasio tegangan *fatigue* (Pascal atau  $N/m^2$ )

$A$  = Perbandingan amplitudo (Pascal atau  $N/m^2$ )

Sumber: Stephen, p.61

Gambar tegangan sinusoidal yang digunakan untuk pengujian *fatigue* terlihat pada gambar 2.16 berikut.



Gambar 2.16 Sinusoidal loading for fatigue testing  
Sumber: Qiao, 2006

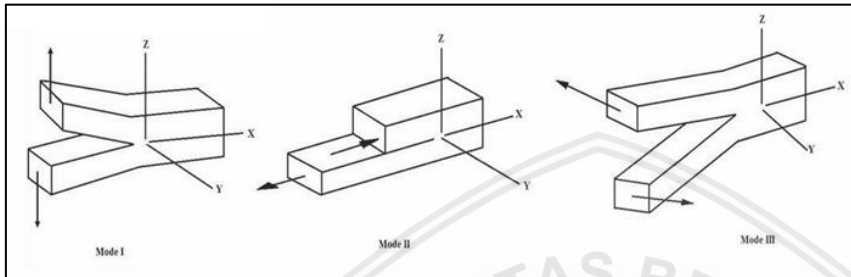
## 2.10 Crack

*Life cycle Fiber Metal Laminates* yang dikenai beban *fatigue* umumnya terbagi menjadi tiga tahap, (Schijve, 2009 dan Homan, 2006) yaitu: *crack initiation*, *crack propagation*, dan *final failure*. Namun begitu, untuk beberapa konfigurasi *fibre metal laminates*, komponen kompositnya masih mampu menyimpan beban, bahkan setelah melalui kegagalan sebesar tebal logam, dimana normalnya struktur tersebut harusnya sudah hancur sepenuhnya.

Tahap pertama dari FMLs *fatigue life* adalah *crack initiation*. Diasumsikan bahwa tahap ini akan berakhir ketika *fatigue crack* sudah cukup panjang untuk dapat dilihat secara makroskopik (Schijve, 2009 dan Homan, 2006). Pada saat inisiasi retakan fatik, laminasi FML diperlakukan sebagai logam monolitik. Ini karena proses produksi dan adanya tekanan termal di lapisan aluminium laminasi (Chang, 2002 dan Yoo Seong-Hwan, 2015). Dalam kasus di mana laminat dikenakan beban eksternal, tekanan pada lapisan khususnya merupakan jumlah tegangan termal dan tekanan yang dihasilkan dari beban mekanis. Untuk tingkat tegangan analog pada lapisan logam FML dan logam monolitik, umur inisiasi retakan fatik adalah sama untuk kedua jenis bahan. Hal ini diduga bahwa serat penguat tidak memiliki pengaruh pada perilaku laminasi FML yang mengalami kelelahan selama fase ini.

Tahap kedua dari *fatigue crack* adalah *crack propagation*. Pada FMLs, pertumbuhan retak dihalangi dengan *fibre-bridging effect*. Tahap ini meliputi transfer tekanan dari retakan pada lapisan logam menuju ke serat komposit (Alderliesten, 2007). Efek *bridging*

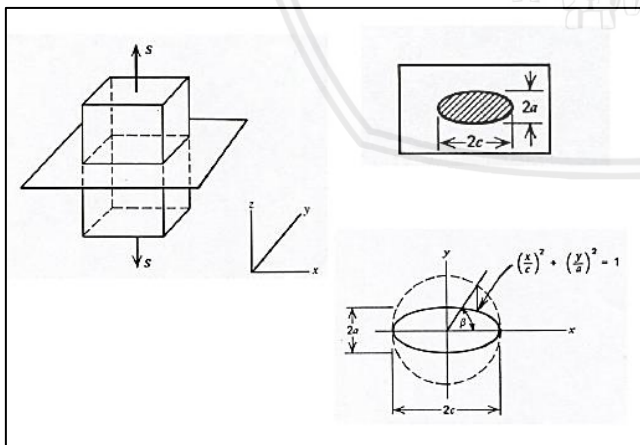
menentukan sifat kelelahan yang menguntungkan dan secara signifikan memperpanjang fase perambatan retak di FML dibandingkan dengan logam monolitik. Pada retakan melintang pada lapisan logam (melalui ketebalan) dari FML umumnya dianggap sebagai tahap ketiga dan terakhir dalam struktur laminasi. Biasanya menyebabkan kegagalan total struktur. Studi yang berfokus pada tahap ini sebagian besar berkaitan dengan pembentukan karakteristik S-N kelelahan dari FMLs dengan berbagai orientasi serat penguatan (Kawai, 2001).



Gambar 2.17 Mode Buka-an Crack  
Sumber: Schijve, 2009

Macam macam bentuk *crack* adalah sebagai berikut:

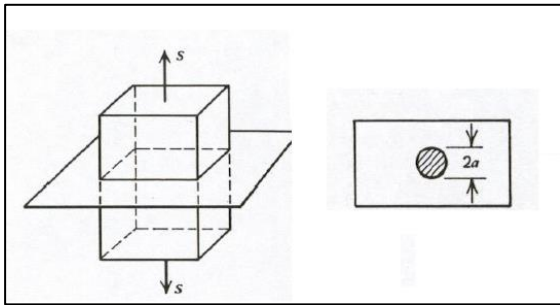
- Elliptical-shaped cracks** merupakan bentuk *crack* yang rata-rata ditemui pada struktur dan komponen mesin. Bentuk retak ini berada di dalam sebuah bidang yang dikenai tegangan merata  $S$  yang tegak lurus terhadap bidang retak. Jenis retak ini dideskripsikan melalui gambar 2.18 berikut.



Gambar 2.18 Elliptical-shaped crack  
Sumber: Stephens, 2000, p.131

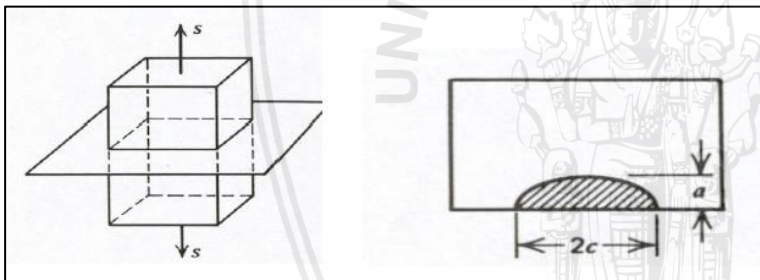
- Circular embedded crack** merupakan bentuk *crack* yang terdapat pada bagian dalam struktur, *crack* ini berbentuk lingkaran yang berada di tengah struktur dan umumnya

memiliki diameter sebesar  $2a$ , dimana  $a$  adalah panjang *crack*. *Circular embedded crack* dijelaskan pada gambar 2.19



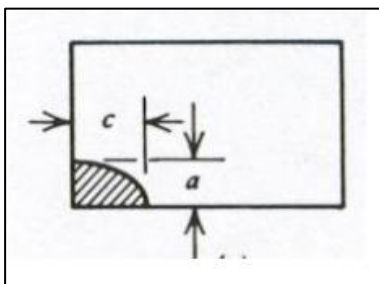
Gambar 2.19 *Circular embedded crack*  
Sumber: Stephens, 2000, p.131

- c. ***Semi-elliptical surface crack*** merupakan bentuk *crack elliptical* lanjutan yang dihasilkan akibat adanya efek *free surface*. *Semi-elliptical surface crack* terbentuk pada *finite thickness solid*. Dijelaskan pada gambar 2.20 berikut.



Gambar 2.20 *Semi-elliptical surface crack*  
Sumber: Stephens, 2000, p.131

- d. ***Quarter-circular corner crack*** merupakan bentuk *crack elliptical* lanjutan yang dihasilkan akibat adanya efek *free surface*. *Quarter-circular corner crack* terbentuk pada sudut bidang, dan memiliki sifat yang lebih rumit jika dibandingkan dengan retak yang terbentuk di dalam suatu struktur.

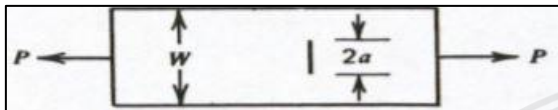


Gambar 2.21 *Quarter-circular corner crack*  
Sumber: Stephens, 2000, p.131



Terbentuknya retak akibat adanya beban *fatigue* juga umum terjadi tegak lurus terhadap tegangan utama yang diberikan. Bila ditinjau dari bidang yang tegak lurus terhadap arah tegangan, maka terdapat beberapa jenis retakan, yaitu sebagai berikut:

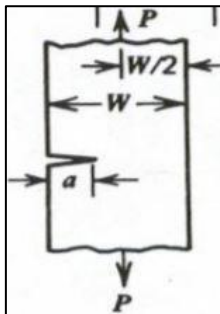
- a. **Center-Cracked Plate in Tension** yaitu terjadi retakan yang terletak di tengah plat yang diberi pembebanan tarik pada plat tersebut.  $W$  pada gambar 2.22 menunjukkan lebar plat,  $2a$  menunjukkan panjang retakannya dan  $P$  pada gambar menunjukkan pembebanan



Gambar 2.22 *Center-Cracked Plate in Tension*

Sumber : Stephen (2000,p.128)

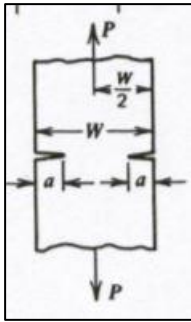
- b. **Single-edge Crack in Tension** merupakan jenis retakan yang terletak di ujung material pada salah satu sisinya yang pada bidang tersebut mengalami pembebanan tarik. Pada gambar 2.23 yang menjelaskan *Single-edge Crack in Tension*, ukuran panjang retak dilambangkan dengan  $a$ .



Gambar 2.23 *Single-edge Crack in Tension*

Sumber : Stephen (2000,p.128)

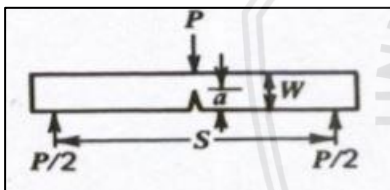
- c. **Double-edge Crack in Tension** merupakan jenis retakan yang terletak pada kedua sisi material yang dikenai pembebanan tarik. Pada gambar 2.24 yang menjelaskan *Double-edge Crack in Tension*, ukuran panjang retak dilambangkan dengan  $a$  untuk setiap sisi yang mengalami retakan.



Gambar 2.24 *Double-edge Crack in Tension*

Sumber : Stephen (2000,p.129)

- d. *Single-edge Crack in Bending* merupakan jenis retakan yang terletak pada bagian tengah material yang mengalami beban bending, karena adanya gaya dengan nilai yang sama yang menekan dan mengkompresi dari atas dan bawah material. Pada gambar 2.25 yang menjelaskan *Single-edge Crack in Bending*, ukuran panjang retak dilambangkan dengan  $a$ .



Gambar 2.25 *Single-edge Crack in Bending*

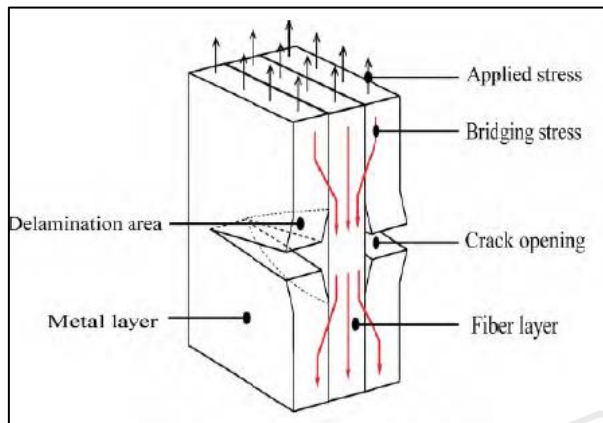
Sumber : Stephen (2000,p.129)

## 2.11 Delaminasi

Delaminasi atau kerusakan interlaminar pada struktur komposit berbasis polimer umumnya disebabkan karena tegangan yang tinggi antar lapisan pada komposit yang muncul akibat adanya ketidaksesuaian sifat elastis antar lapisan dan pada sisi-sisi bebasnya sehingga ikatan antara serat dan matriksnya terlepas. Penyebab terjadinya delaminasi adalah energi yang rendah, adanya konsentrasi tegangan, cacat manufaktur, dan dapat pula diakibatkan oleh penyusutan matriks.

Struktur komposit laminasi dibuat menggunakan teknik penggabungan konvensional yang sangat rawan mengalami delaminasi pada sudut-sudutnya. Timbulnya serta berkembangnya delaminasi pada komposit akan menyebabkan banyak masalah keamanan dan ketahanan, seperti berkurangnya kekakuan, kekuatan dan umur ketahanan terhadap kerusakan, disintegrasi pada material, dan lain sebagainya. Oleh karena itu, memahami perilaku tegangan serta delaminasi merupakan hal yang penting.

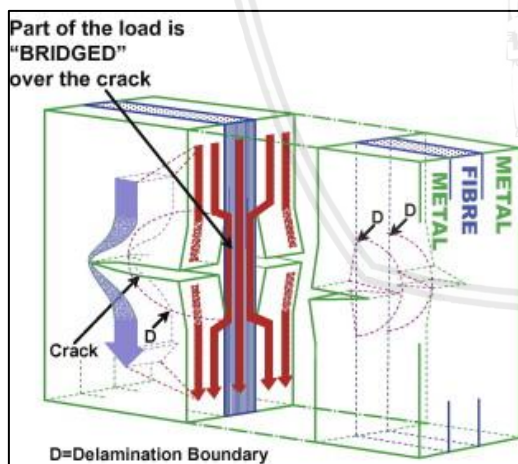
Delaminasi secara umum ditunjukkan pada gambar 2.26 berikut.



Gambar 2.26 Fenomena *Fiber Bridging* dan delaminasi  
Sumber: Yang (2001)

### 2.12 Serat *Bridging*

Serat *bridging* adalah fenomena penting yang sering diamati selama pertumbuhan delaminasi beberapa jenis laminasi komposit. Kehadiran serat *bridging* yang berada dibelakang retak akan secara signifikan mempengaruhi ketahanan *interlaminar* menurut studi delaminasi kuasi-statis. Umumnya delaminasi dan serat *bridging* terjadi bersamaan.



Gambar 2.27 Serat *Bridging* dan delaminasi pada lapisan komposit  
Sumber: Khan (2009)

### 2.13 Hubungan Antara Tegangan dan Regangan

Tegangan adalah perbandingan antara gaya tarik yang bekerja terhadap luas penampang benda tersebut. Tegangan menunjukkan kekuatan gaya yang menyebabkan benda berubah bentuk. Secara matematis tegangan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2-6)$$

Dengan :

$\sigma$  = Tegangan (MPa)

P = Gaya (N)

A = Luas penampang ( $m^2$ )

Sumber : Beer (2012,p.56)

Tegangan dapat bedakan sesuai dengan luasan dan arah gaya. Tegangan normal dibagi menjadi dua yaitu tegangan tarik (*tensile stress*) dan tegangan tekan (*compressive stress*). Menurut arah gaya yang diberikan, jika gaya tegak lurus dengan luas penampang maka menghasilkan tegangan normal (*normal stress*) namun, jika gaya yang diberikan sejajar luas penampang maka dihasilkan tegangan geser (*sheer stress*).

Regangan dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang benda terhadap panjang benda mula-mula. Selain itu regangan juga dapat dijadikan tolok ukur seberapa jauh benda tersebut berubah bentuk. Secara matematis regangan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \dots\dots\dots (2-7)$$

Dengan :

$\varepsilon$  = Regangan

$\delta$  = Pertambahan panjang (m)

L = Panjang mula-mula (m)

Sumber : Beer (2012,p.56)

Regangan terjadi tidak hanya pada benda yang mengalami pembebanan tarik, melainkan terjadi pula pada benda yang mengalami pembebanan tekan. Regangan yang terjadi searah dengan arah pembebanan disebut regangan aksial (*axial strain*) dan regangan yang terjadi tegak lurus pada arah pembebanan disebut dengan regangan lateral (*lateral strain*). Perbandingan antara regangan aksial dengan regangan lateral disebut dengan *Poisson's Ratio* ( $\nu$ ).

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_{\text{lateral strain}}}{\varepsilon_{\text{axial strain}}} \right| \dots\dots\dots(2-8)$$

Sumber : Beer (2012,p.93)

Hubungan antara Tegangan dan Regangan memiliki arti yang serupa dengan Modulus Young atau Modulus Elastisitas yang merupakan rasio tegangan terhadap regangan yang juga merupakan ukuran kekakuan suatu bahan elastis suatu material. Modulus Young dirumuskan sebagai berikut:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P/A}{\delta/L} = \frac{P.L}{A.\delta} \dots\dots\dots(2-9)$$

Dengan :

$E = \text{Modulus Young (N/m}^2\text{)}$

$P = \text{Gaya yang diberikan (N)}$

$A = \text{Luas penampang mula-mula (m}^2\text{)}$

$\delta = \text{Pertambahan panjang (m)}$

$L = \text{Panjang mula-mula (m)}$

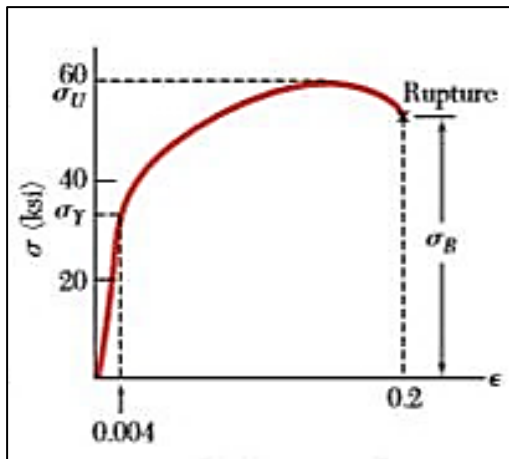
Sumber : Beer (2012,p.68)

Terdapat diagram hubungan antara tegangan dan regangan untuk beberapa material, yaitu:

#### 1. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Aluminium

Gambar 2.28 menunjukkan diagram tegangan dan regangan pada *Aluminium Alloy*. Dimana  $\sigma$  menunjukkan tegangan,  $\varepsilon$  menunjukkan regangan,  $\sigma_u$  menunjukkan tegangan ultimate,  $\sigma_y$  menunjukkan tegangan *yield*, dan  $\sigma_g$  menunjukkan tegangan saat patah.



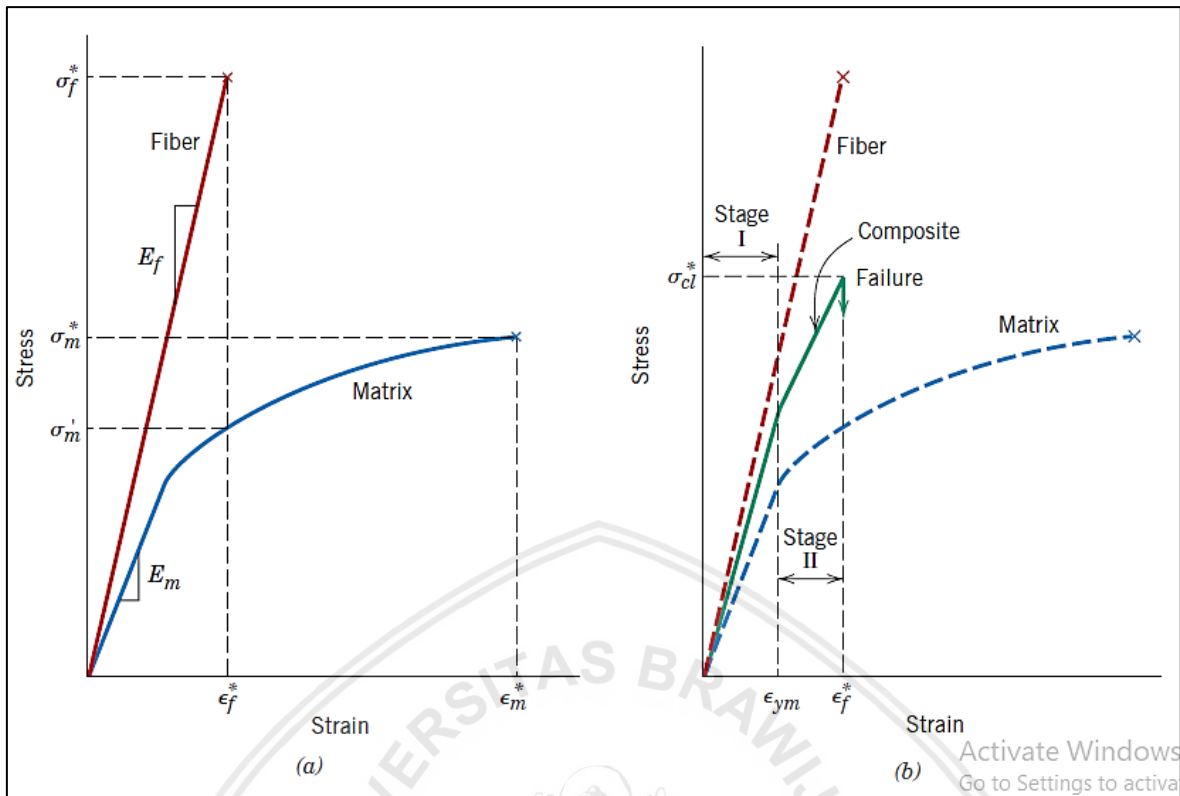


Gambar 2.28 Diagram Tegangan Regangan Paduan Aluminium  
Sumber : Beer (2012,p.58)

## 2. Diagram Tegangan dan Regangan Pada Komposit

Gambar 2.29 bagian *a* dan *b* menunjukkan diagram hubungan antara tegangan dan regangan pada serat, matriks dan komposit. Diasumsikan bahwa tegangan dan regangan untuk serat dan matriks ditunjukkan pada gambar 2.29. Pada diagram ini, properti serat dianggap getas dan properti matriks dianggap ulet. Tegangan *fracture* pada serat dilambangkan dengan  $\sigma^*f$  dan tegangan *fracture* pada matriks dilambangkan dengan  $\sigma^*m$ , dan regangan *fracture* pada serat dan matriks dilambangkan dengan  $\epsilon^*f$  dan  $\epsilon^*m$ .

Gambar 2.29 bagian *a* menunjukkan tegangan dan regangan dari serat dan matriks. Gambar 2.29 bagian *b* menunjukkan komposit diperkuat serat yang terdiri atas serat dan matriks yang kemudian menunjukkan respon tegangan dan regangan uniaksial. Pada tahap I awal, serat dan matriks mengalami deformasi secara elastis. Ketika komposit mencapai titik  $\epsilon_{ym}$  (regangan *yield* pada matriks) matriks akan mengalami deformasi plastis sementara serat akan meregang dikarenakan kekuatan tarik serat secara signifikan lebih besar daripada kekuatan luluh dari matriks. Kemudian pada tahap II setelah melewati titik  $\epsilon_{ym}$  akan memiliki kecenderungan garis yang linear namun kemiringannya akan berkurang relatif terhadap tahap I. Ketika melewati tahap I menuju tahap II, beban yang ditanggung serat semakin meningkat. Permulaan kegagalan pada komposit terjadi saat serat mulai patah.



Gambar 2.29 Diagram Tegangan Regangan (a) Skema Tegangan Regangan Serat dan Matriks. (b) Skema Tegangan Regangan Serat Diperkuat Komposit  
Sumber : Callister (2007,p.587)

## 2.14 Metode Elemen Hingga (MEH)

Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM) adalah prosedur numeris yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa (*engineering*). Metode ini digunakan pada permasalahan dimana *exact solution* atau *analytical solutions* tidak dapat menyelesaikan permasalahan utamanya. Inti dari Metode Elemen Hingga adalah membagi suatu benda yang akan dianalisa menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*), dimana bagian-bagian ini disebut elemen, yang nantinya setiap elemen akan dihubungkan dengan nodal (*node*), yang kemudian dibuatlah persamaan matematis yang menjadi representasi dari elemen-elemen benda tersebut.

Langkah-langkah dasar dalam Metode Elemen Hingga adalah sebagai berikut :

### *Processing phase*

1. Melakukan pembagian struktur atau diskritisasi (*meshing*)

Membuat dan menentukan daerah yang akan diselesaikan menggunakan MEH, kemudian menguraikan elemen dan *node* sehingga geometrinya menjadi lebih sederhana dan dapat lebih mudah untuk dianalisa.

2. Menentukan fungsi pendekatan

Fungsi pendekatan ini berhubungan dengan elemen-elemen struktur. Fungsi akan didefinisikan sebagai sebuah harga perpindahan pada setiap *node*, kemudian penentuan fungsi juga akan disesuaikan dengan jumlah *node* yang digunakan pada setiap elemen. Dilakukannya pendekatan fungsi kontinu akan digunakan sebagai asumsi untuk menggambarkan solusi dari sebuah elemen.

3. Memberikan hubungan dan tegangan regangan

Hubungan antara tegangan dan regangan diberikan menggunakan rumus yang ada dalam Hukum Hooke yang telah dijelaskan pada persamaan (2-9).

4. Menurunkan persamaan *matrix* kekakuan

$$[k] = \int [B]^T [C] [B] dV \dots\dots\dots(2-10)$$

Dengan:

$[k]$  = Matriks kekakuan elemen

$[B]$  = Matriks hubungan regangan dan perpindahan

$[C]$  = Matriks hubungan tegangan dan regangan

5. Menentukan matriks beban

Beban yang bekerja pada sebuah struktur dijabarkan menjadi tiga macam dan memiliki persamaan sebagai berikut:

$$F = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \dots\dots\dots(2-11)$$

Dengan:

$Q_{NF}$  = *Node force*

$Q_{BF}$  = *Body force*

$Q_T$  = *Surface traction*

6. Membentuk matriks global

Menerapkan kondisi batas, kondisi awal, serta pembebanan dan menyatukan seluruh elemen-elemen untuk menghadirkan keseluruhan masalah dan membentuk matriks global.

$$\{F\} = [K]\{d\} \dots \dots \dots (2-12)$$

Dengan:

$\{F\}$  = Matriks global

$[K]$  = Matriks kekakuan elemen

$\{d\}$  = Vektor perpindahan *node*

Berikut ini merupakan rumus kekakuan global dengan jumlah derajat kebebasan sebanyak  $n$ . Harga  $d$  disini ditentukan sebagai kondisi batas. Untuk menyelesaikan persamaan ini dapat menggunakan metode *Gauss* atau iterasi *Gauss-Seidel*. Contoh persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\{F\} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (2-13)$$

*Solution phase*

7. Memecahkan satu set aljabar linier atau non linier untuk mendapatkan hasil *node*.

*Post processing phase*

8. Mendapatkan hasil berupa informasi yang ingin didapatkan dari hasil perhitungan.

Macam-macam bentuk elemen dalam pemodelan menggunakan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

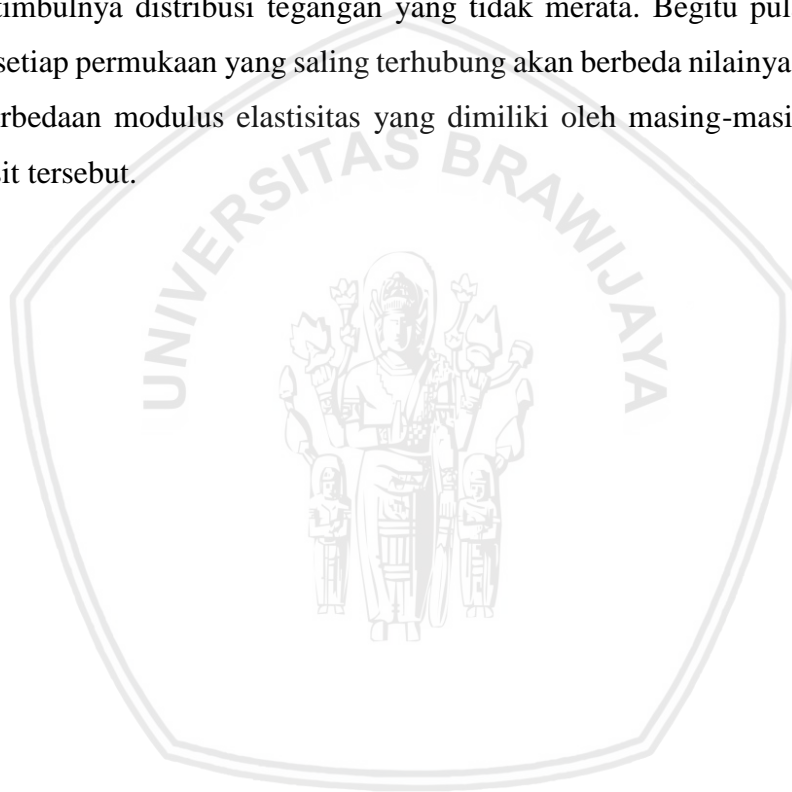
- Elemen satu dimensi, yang terdiri atas garis, yang dibentuk oleh dua titik node pada setiap ujungnya, disebut elemen garis linier. Dua elemen dengan orde lain yang lebih tinggi adalah elemen garis kuadratis, dan elemen garis kubik.
- Elemen dua dimensi, yang terdiri atas elemen segitiga dan elemen segi empat. Elemen orde liniernya memiliki sisi berupa garis lurus, sedangkan elemen dengan orde yang lebih tinggi dapat memiliki sisi berupa garis lurus, kurva, atau keduanya.
- Elemen tiga dimensi, terdiri atas elemen tetrahedron dan elemen berbentuk balok.

## 2.15 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dibahas, pada penelitian Pengaruh Rasio Tegangan dan Delaminasi Terhadap Distribusi Tegangan pada *Fiber Metal Laminates* dapat

ditentukan hipotesa bahwa semakin besar rasio tegangan yang diberikan dan semakin besar delaminasi yang terbentuk, maka akan memberikan pengaruh terhadap distribusi tegangan yang terjadi pada daerah ujung retak. Hal ini dikarenakan meningkatnya tegangan maksimum yang diberikan seiring dengan meningkatnya rasio tegangan menyebabkan semakin besarnya panjang retak yang terjadi, sehingga distribusi tegangan pada daerah ujung retak juga akan semakin besar, dan delaminasi yang terjadi juga akan semakin besar.

Penyebabnya adalah adanya pengaruh konsentrasi tegangan yang terjadi di daerah ujung retak akan semakin besar ketika panjang retak meningkat. Selain itu semakin jauh jarak sebuah daerah dari ujung retak, maka konsentrasi tegangan yang terjadi akan semakin menurun karena timbulnya distribusi tegangan yang tidak merata. Begitu pula, tegangan yang terjadi pada setiap permukaan yang saling terhubung akan berbeda nilainya disebabkan karena adanya perbedaan modulus elastisitas yang dimiliki oleh masing-masing material penyusun komposit tersebut.





## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi komputer menggunakan perangkat lunak berbasis Metode Elemen Hingga (MEH) atau *Finite Element Method* (FEM). Metode penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan informasi yang nantinya digunakan sebagai acuan maupun perkiraan pada saat melaksanakan eksperimental secara langsung. Informasi tambahan yang memperkaya penelitian ini didapatkan dari studi literatur melalui buku-buku pustaka, jurnal penelitian dan internet.

### 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

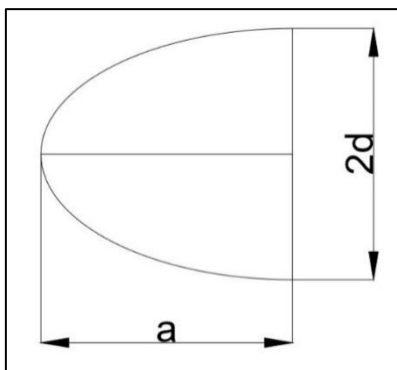
Penelitian ini dilakukan di Studio Gambar Mesin dan Laboratorium Sentral Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya pada bulan Januari – Juni 2019.

### 3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

#### 1. Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang nilainya bebas ditentukan sebelum melakukan penelitian. Dalam hal ini, variabel bebas yang digunakan adalah rasio tegangan ( $R$ ), panjang retak ( $a$ ), dan luas delaminasi yang berbentuk elips, dengan rincian sebagai berikut:



Gambar 3.1 Pemodelan ukuran retak dan delaminasi

Tabel 3.1  
Variabel Bebas

Variasi Rasio Tegangan (R)	Delaminasi, $d = \frac{1}{2} a$ (mm)	Panjang retak, a (mm)
0	1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
0.2	1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
0.3	1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
0.4	1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
0.5	1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

## 2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya tidak dapat ditentukan sendiri oleh peneliti karena tergantung pada nilai variabel bebasnya. Dalam penelitian ini variabel terikatnya adalah distribusi tegangan yang terjadi pada daerah ujung retak.

## 3. Variabel Terkontrol

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

- Menggunakan serat sintesis jenis *woven e-glass* berjumlah satu lapis.
- Orientasi serat adalah  $0^\circ / 90^\circ$  menurut arah pembebanan, atau sejajar dan tegak lurus terhadap arah pembebanan.
- Tegangan maksimum bernilai 28 MPa untuk setiap nilai rasio tegangan.
- Menggunakan *crack* dengan jenis *double edge crack*.
- Fiber glass* dan *epoxy* sudah menjadi satu material yaitu *glass fiber composite*

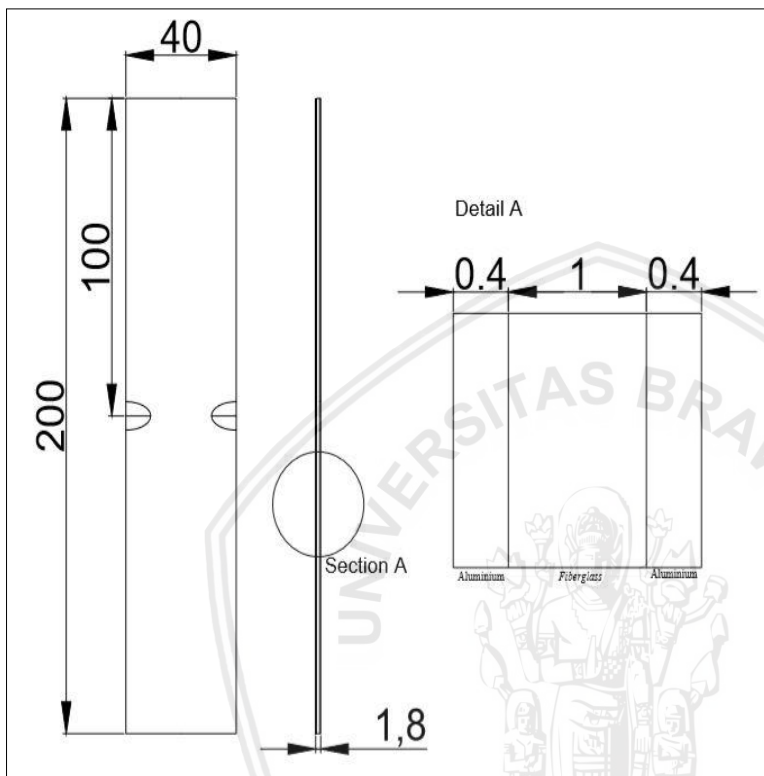
## 3.4 Pemodelan Geometri

Struktur digambarkan menggunakan perangkat lunak komputer berbasis Metode Elemen Hingga berdasarkan ukuran sebenarnya. Pemodelan dalam penelitian ini menggunakan setengah bagian benda uji karena besar tegangan dan regangan pada daerah ujung retak pada masing-masing retakan pada ujung spesimen dianggap sama (*double edge crack*). Perekat yang digunakan pada antarmuka aluminium dan *fiberglass* menggunakan *epoxy*.

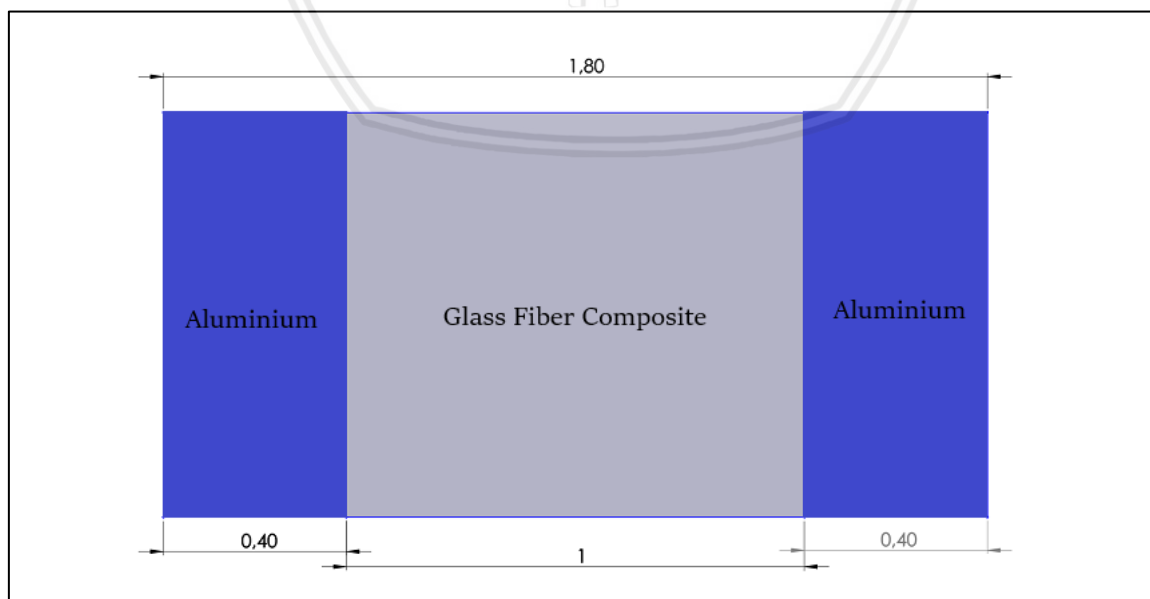
Aluminium memiliki tebal 0.4 mm, sedangkan *fiber glass* dan *epoxy* memiliki tebal 1 mm, sehingga tebal keseluruhan adalah sebesar 1.8 mm.

Tabel 3.2  
Dimensi benda uji

No.	Material	Tebal (mm)
1.	Aluminium	0.4
2.	<i>Glass fiber composite</i>	1



Gambar 3.2 Pemodelan Geometri Benda Uji (dalam satuan mm)



Gambar 3.3 Susunan dan Ketebalan Spesimen (dalam satuan mm)

### 3.5 Pemodelan Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini merupakan *Fiber Metal Laminates* yang diambil berdasarkan penelitian sebelumnya yaitu oleh Bonang Ananta Sakti (2017). Selain itu juga menggunakan GLARE (*Glass Fiber Reinforced Aluminium Laminate*). *Glass fiber* dan *epoxy* diasumsikan menjadi sebuah material yaitu *glass fiber composite*. Pemodelan material *glass fiber composite* diasumsikan bersifat *orthotropic elastic*. Pemodelan *orthotropic elastic* adalah material yang memiliki sifat mekanik yang berbeda pada tiga sumbu simetri. Pada pemodelan *orthotropic elastic*, nilai modulus elastisitas, modulus regangan, dan Poisson's *Ratio* memiliki nilai yang berbeda untuk ketiga material. Sedangkan untuk aluminium diasumsikan sebagai *isotropic material*.

#### 1. Commercial Aluminium

Tabel 3.3

*Material properties Commercial Aluminium*

Properties	Nilai
Modulus Elastisitas (GPa)	68
Kekuatan <i>Yield</i> (MPa)	85
Kekuatan <i>Ultimate</i> (MPa)	105
<i>Poisson's Ratio</i>	0.33
Massa Jenis (kg/m <sup>3</sup> )	2780

Sumber: Laboratorium Sentral Universitas Brawijaya (2018)

#### 2. Contact Interaction Properties

Tabel 3.4

*Contact Interaction Properties*

Properties	Nilai
<i>Contact Stiffness</i> (GPa)	10 <sup>3</sup>
<i>Damage Property</i>	
<i>Normal Only</i> (MPa)	1.2
<i>Shear-1 Only</i> (MPa)	3.65
<i>Shear-2 Only</i> (MPa)	3.65
<i>Thickness</i> (mm)	0.05

### 3. Glass Fiber Composite

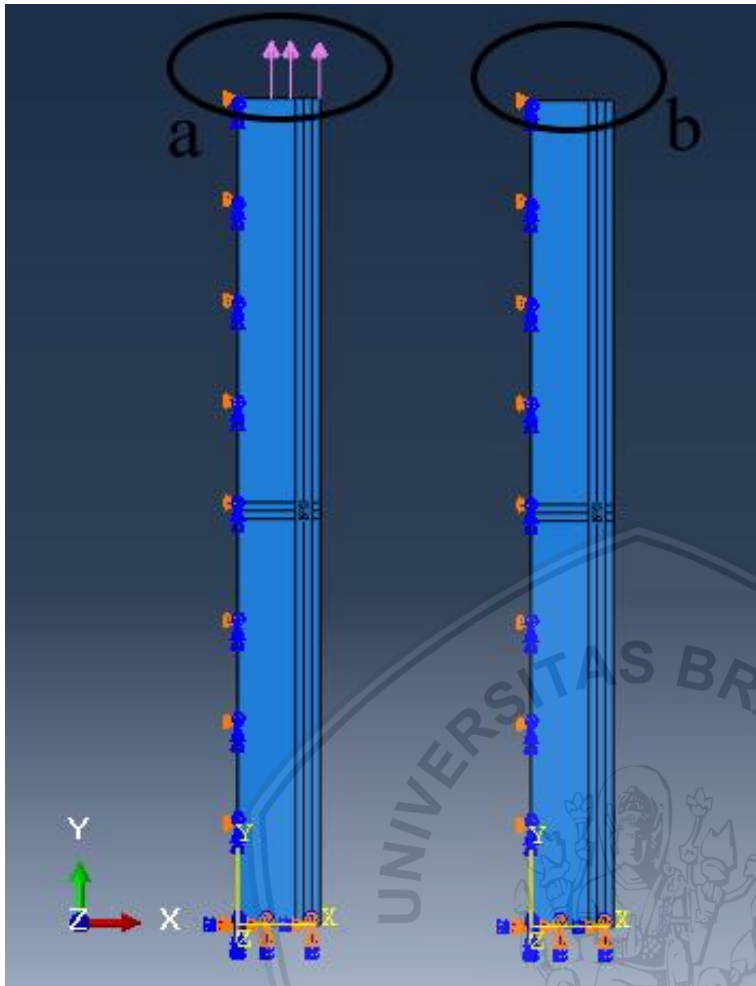
Tabel 3.5  
*Material Properties of Glass Fiber Composite*

Properties	Nilai
Massa Jenis (kg/m <sup>3</sup> )	2200
<i>Shear Strength</i>	
<i>Transversal</i> (MPa)	3.65
<i>Longitudinal</i> (MPa)	3.65
<i>Poisson's Ratio</i>	0.25
<i>Shear Modulus</i> (GPa)	32
<i>Tensile Strength</i>	
<i>Transversal</i> (MPa)	120
<i>Longitudinal</i> (MPa)	120
<i>Tensile Modulus</i> (GPa)	80

#### 3.6 Pemodelan Pembebanan

Pemodelan pembebanan adalah pengaturan gaya yang akan bekerja saat dilakukan simulasi. Pemodelan pembebanan yang diberikan berupa beban fatigue sebanyak satu siklus. Variasi beban *fatigue* yang diberikan yaitu rasio tegangan sebesar 0 ; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5 dengan amplitudo tegangan dijaga tetap yakni 28 MPa. Pemodelan pembebanan yang digunakan dibagi menjadi dua *step*. Pada *step* 1, spesimen uji diberikan beban maksimum yang sesuai dengan variasi *stress ratio* yang ada. Selanjutnya pada *step* 2, spesimen uji diberikan beban minimum yang sesuai dengan variasi *stress ratio* yang ada. Gambar 3.4 menunjukkan pemodelan pembebanan yang terjadi pada rasio tegangan dengan S max sebesar 28 MPa dan 0 MPa.



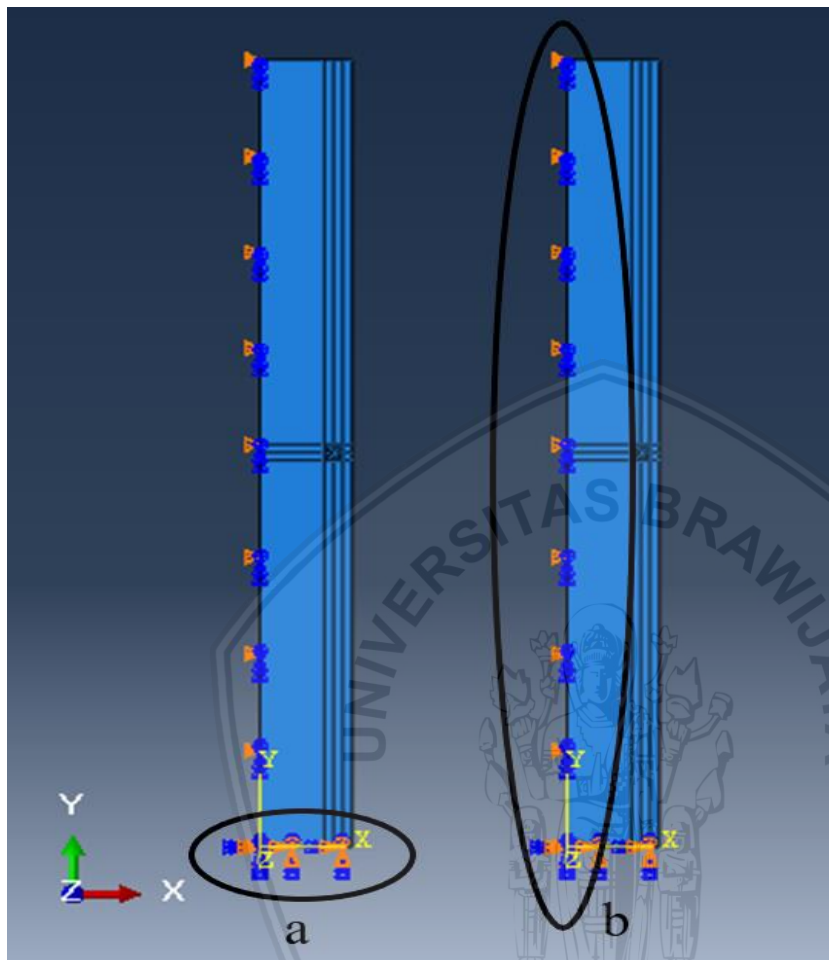


Gambar 3.4 Contoh pemodelan pembebanan pada Rasio tegangan = 0 dan  $S_{max} = 28$  MPa ; (a) *Step 1* ketika  $S_{max} = 28$  MPa dan (b) *Step 2* ketika  $S_{max} = 0$  MPa

Kondisi batas yang diberikan pada spesimen adalah tumpuan jepit (*encastre mode*) pada permukaan benda yang sejajar dengan permukaan benda yang diberi beban, seperti yang digambarkan pada gambar 3.5 (a). Tujuannya adalah agar spesimen mampu menahan gaya dan momen dari arah sumbu  $x$ ,  $y$ , serta  $z$ .

Kondisi batas selanjutnya adalah pemberian tumpuan rol (*XSYMM mode*) pada benda uji di sumbu  $y$  pada salah satu permukaan benda yang tidak mengalami retak, sehingga diharapkan benda mampu menahan gaya ke arah sumbu  $x$  dan momen dari arah sumbu  $y$  dan  $z$  seperti yang digambarkan pada gambar 3.5 (b). Pada proses simulasi, benda uji yang dilakukan pemodelan dan simulasi hanya setengah bagian dari benda uji keseluruhan, karena seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 3.3 Variabel Penelitian pada nomor 3 yaitu variabel terkontrol yakni bahwa jenis *crack* yang digunakan pada penelitian adalah jenis *double edge crack*, dimana benda bersifat *axis* simetris sehingga pemodelan dan simulasi

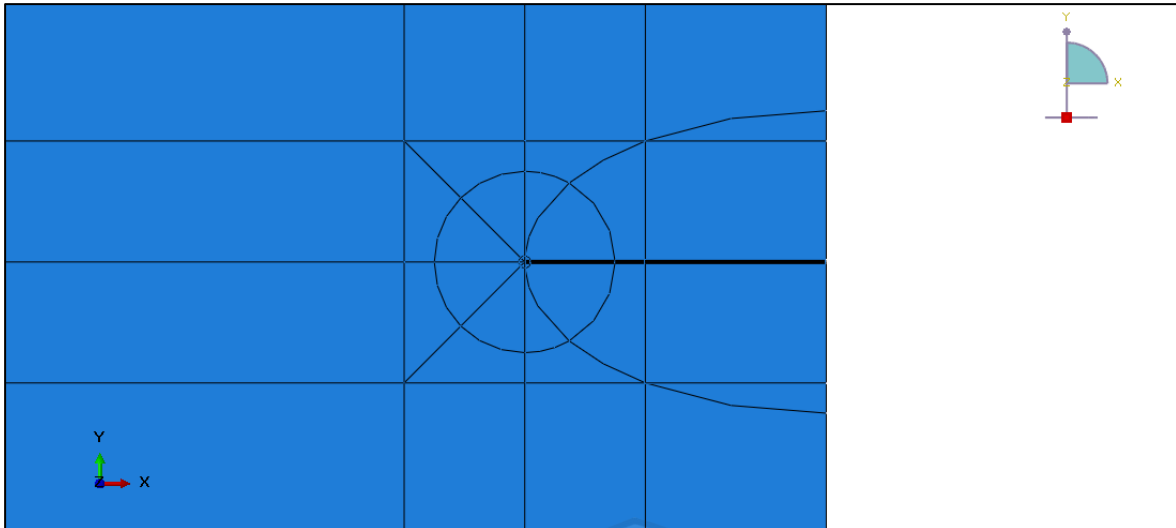
dapat dilakukan hanya dengan setengah bagian dari benda uji yang kemudian dibatasi oleh tumpuan rol.



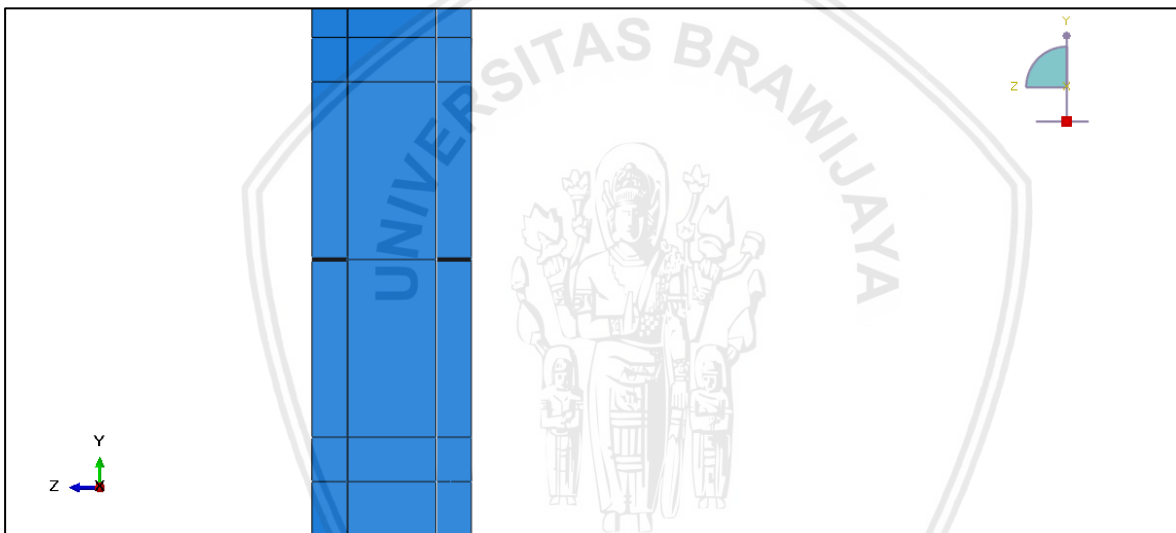
Gambar 3.5 Boundary conditions (a) tumpuan jepit (*encastre mode*) dan (b) tumpuan rol (*XSYMM mode*)

### 3.7 Pemodelan Retak

Pemodelan retak pada benda uji adalah dengan metode *seam* pada perangkat lunak berbasis Metode Elemen Hingga. Metode *seam* ini dapat digunakan jika terdapat dua buah sisi atau permukaan yang saling tumpang tindih (*overlapping*) yang kemudian dapat dipisahkan apabila nantinya telah diberikan gaya. Fungsi pemodelan retak ini adalah agar kita dapat mengidentifikasi daerah retak yang akan mengalami deformasi dan delaminasi setelah diberikan gaya. Gambar 3.6 menunjukkan daerah ujung retak yang telah diberikan mode *seam* dari tampak depan. Kemudian dapat dilihat pada Gambar 3.7 yaitu *mode seam* dari tampak samping bahwa yang mengalami retak hanyalah bagian aluminiumnya saja, kompositnya tidak mengalami retak, dimana fenomena ini dinamakan *fiber bridging*.



Gambar 3.6 Metode Seam tampak depan



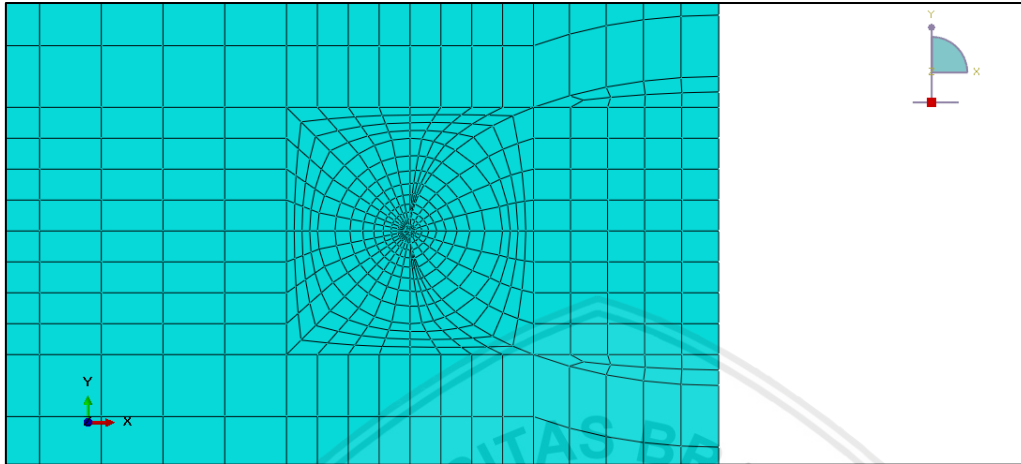
Gambar 3.7 Metode Seam tampak samping

### 3.8 Diskritisasi / Meshing

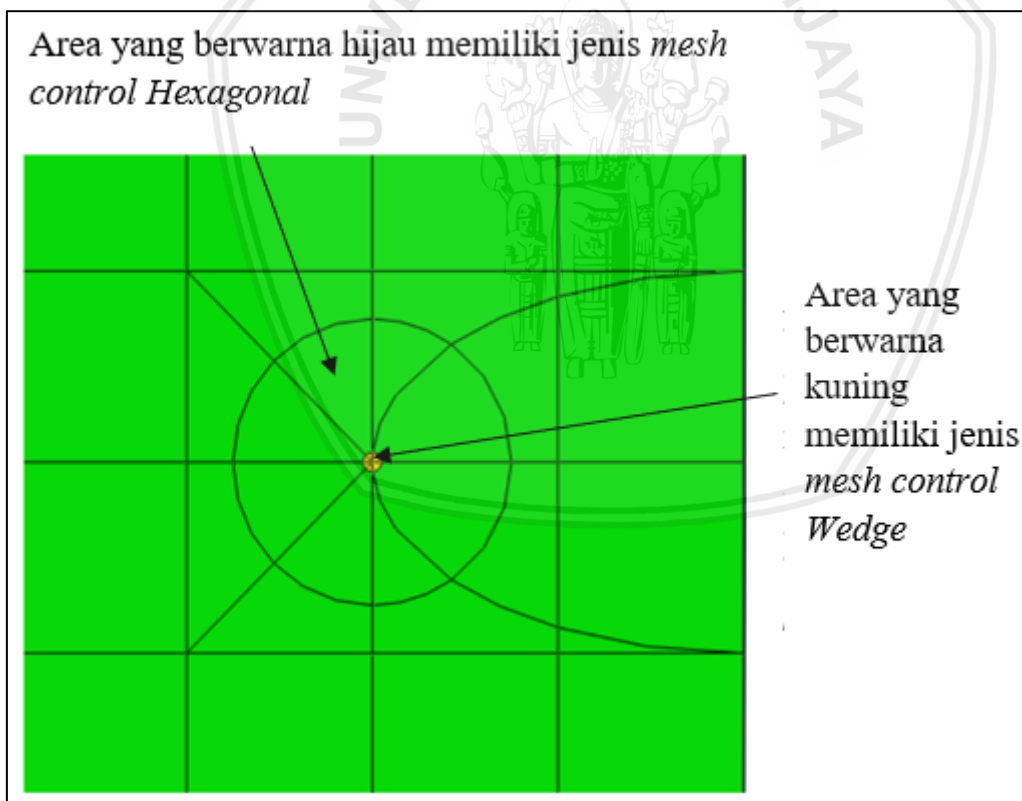
Diskritisasi atau *Meshing* merupakan proses pembagian elemen tak berhingga menjadi elemen dengan jumlah yang berhingga (terhitung). Setiap elemen tersusun atas simpul-simpul (*node*). Proses perhitungan numerik dilakukan pada setiap *node*. Semakin banyak pembagian elemen maka akan semakin banyak *node* yang terbentuk sehingga hasil analisis yang diperoleh akan semakin optimal dan teliti. Namun hal ini juga menyebabkan melambatnya kinerja komputer dan semakin lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan sebuah simulasi karena semakin banyak persamaan matematis yang harus diselesaikan.

Proses *meshing* pada setiap pemodelan benda uji dibedakan menjadi dua jenis *mesh* yang berbeda, yaitu *meshing* untuk daerah ujung retak, dan *meshing* untuk bagian benda uji

selain ujung retak. Dilakukan partisi untuk seluruh daerah benda uji, dan dilakukan partisi yang lebih teliti untuk daerah disekitar ujung retak. Hal ini bertujuan agar hasil *mesh* pada daerah sekitar ujung retak bisa lebih halus dan hasil pengujian dapat lebih teliti.



Gambar 3.8 Meshing benda uji FMLs



Gambar 3.9 Jenis meshing

### 3.9 Rancangan Penelitian

#### 1) Pengumpulan Data

Pengumpulan data bertujuan untuk mendapatkan sifat material yang akan digunakan sebagai data untuk melakukan simulasi. Data-data yang dikumpulkan yakni berupa sifat-sifat material dari *commercial aluminium*, *fibre e-glass*, dan *epoxy*. Data ini didapatkan dari hasil pengujian di Laboratorium Sentral Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Selanjutnya data-data yang telah didapatkan akan dipergunakan untuk melaksanakan proses selanjutnya yakni proses simulasi.

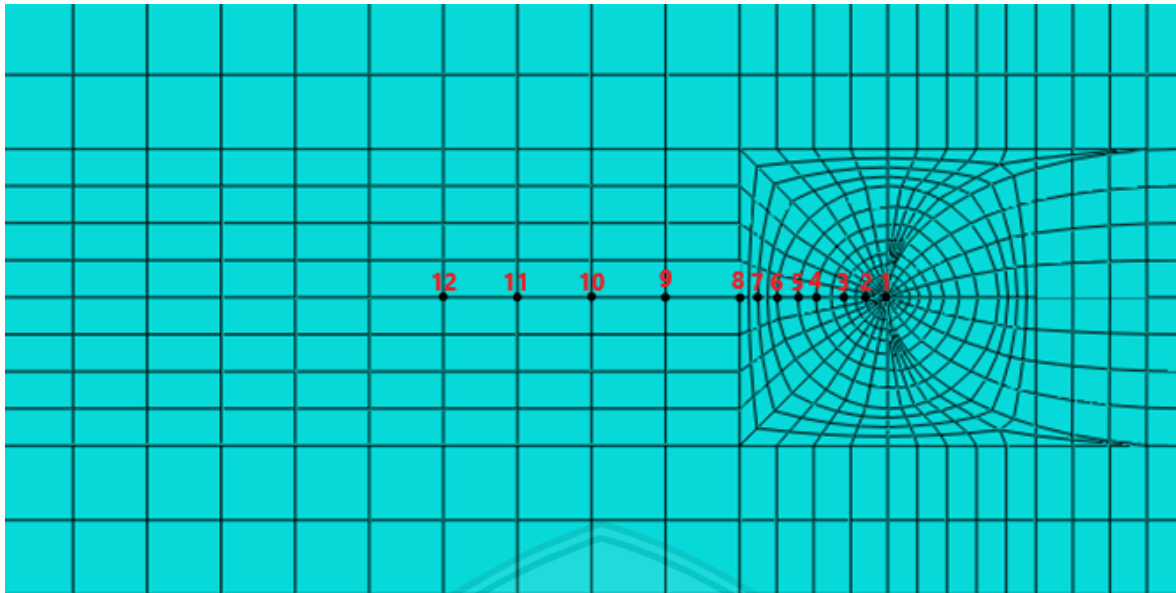
#### 2) Simulasi pada perangkat lunak berbasis Metode Elemen Hingga

Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak komputer berbasis Metode Elemen Hingga. Proses simulasi dilaksanakan untuk mendapatkan data distribusi tegangan dan data delaminasi pada variasi rasio tegangan dan panjang retak pada *Fiber Metal Laminates*. Mengenai rincian proses yang dijalankan selama simulasi komputer akan dijelaskan dalam sub bab berikutnya.

#### 3) Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan setelah proses simulasi komputer berbasis Metode Elemen Hingga telah selesai dilaksanakan. Data yang akan diperoleh adalah data tegangan ke arah sumbu  $y$  ( $S_y$  atau  $\sigma_y$ ) pada sejumlah titik di depan ujung retak pada masing-masing rasio tegangan di *outer aluminium surface*, *inner aluminium surface*, dan *glass fiber composite surface*. *Outer aluminium surface* merupakan bagian aluminium yang berada pada sisi terluar FMLs. *Outer aluminium surface* tidak mengalami kontak dengan permukaan manapun. Berikutnya, *inner aluminium surface* merupakan permukaan aluminium yang mengalami kontak dengan permukaan *glass fiber composite*. Selanjutnya adalah *glass fiber composite surface* yang merupakan permukaan *glass fiber composite* yang mengalami kontak langsung dengan aluminium. Data yang nantinya dihasilkan yakni berupa tegangan dengan satuan pascal, namun hal ini tergantung dari satuan properti material dan geometri yang digunakan.





Gambar 3.10 Pengambilan data di setiap titik pada ujung retak

#### 4) Pembuatan Tabel dan Grafik

Hasil simulasi kemudian akan diekspor ke Microsoft Excel untuk selanjutnya dibuat grafik. Grafik yang dihasilkan dari simulasi komputer ada dua macam. Pertama, grafik distribusi tegangan yang terjadi pada daerah sekitar depan ujung retak. Tegangan berada pada sumbu ordinat, sedangkan jarak horizontal dari ujung retak terletak pada sumbu absis. Yang kedua adalah grafik tegangan maksimum yang terjadi pada daerah ujung retak.

### 3.9.1 Simulasi dengan Perangkat Lunak Komputer Berbasis Metode Elemen Hingga

Proses simulasi dilakukan dalam tiga tahap, yaitu:

#### 1) *Pre-processing* (Proses Awal)

- a. Pemodelan benda uji sesuai dengan dimensi yang telah ditentukan, dengan membuat *part* yang terdiri atas tiga *part*, yaitu: aluminium, *crack*, dan *glass fiber*. *Part* aluminium akan disisipi dengan *part crack* untuk membentuk *part* Aluminium dengan *crack* awal atau disebut AluminiumC.
- b. Mengatur material *properties* sesuai dengan batasan-batasan yang telah ditentukan untuk setiap komponen, yakni material untuk aluminium dan *glass fiber*.
- c. Menggabungkan ketiga material tersebut atau menyusun *assembly* yang terdiri atas tiga lapisan yaitu yang pertama adalah AluminiumC, kedua adalah lapisan *glass fiber*, dan yang terakhir adalah lapisan AluminiumC lagi, sehingga didapatkanlah *Fiber Metal Laminates* (FMLs).

- d. Membuat partisi dan menembuskannya pada seluruh permukaan FMLs untuk memudahkan proses *meshing*.
- e. Membuat interaksi antara permukaan AluminiumC dengan permukaan *glass fiber*, sehingga kedua permukaan tersebut saling menyatu.
- f. Membuat *meshing* untuk setiap permukaan. Perlu diingat bahwa jumlah dan bentuk *mesh* pada setiap permukaan harus sama agar ketelitiannya sama sehingga pembagian distribusi tegangannya semakin baik.
- g. Memberikan beban, rasio tegangan, dan amplitudo pada FMLs

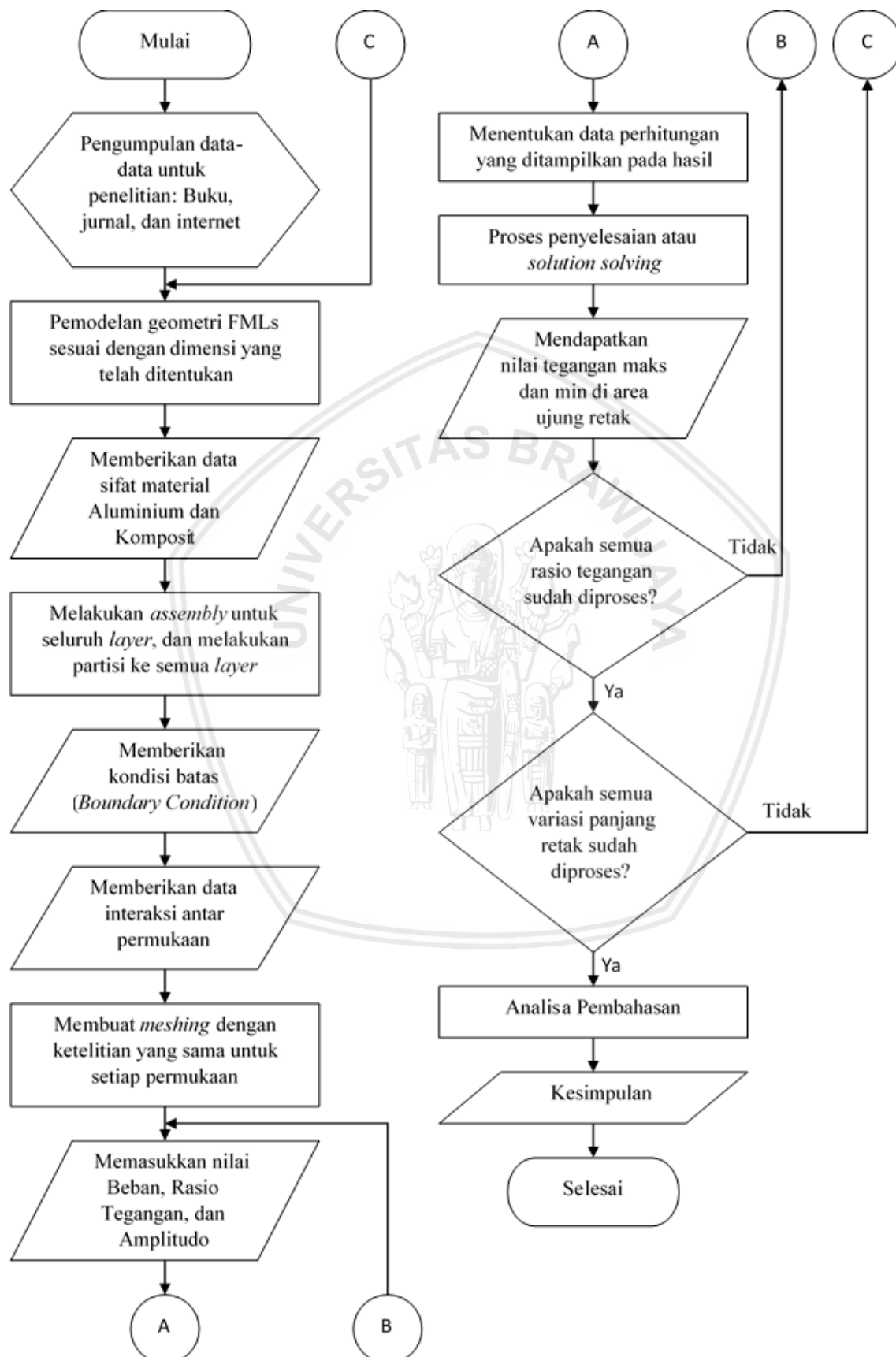
## 2) Proses Solusi / *Solution*

Dalam proses *solution* dilakukan penentuan data perhitungan yang ingin ditampilkan pada hasil simulasi. Pada penelitian ini hasil yang ingin didapatkan adalah nilai distribusi tegangan pada area ujung retakan.

## 3) Pasca Proses Solusi / *Post-processing*

Hasil simulasi dapat kita lihat dengan visualisasi setelah benda uji dikenai beban. Hasil simulasi ini berupa distribusi warna yang menunjukkan distribusi tegangan pada benda uji. Kemudian hasil simulasi akan dibuat dalam bentuk grafik dan tabel menggunakan Microsoft Excel.

### 3.10 Diagram Alir Penelitian



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Simulasi

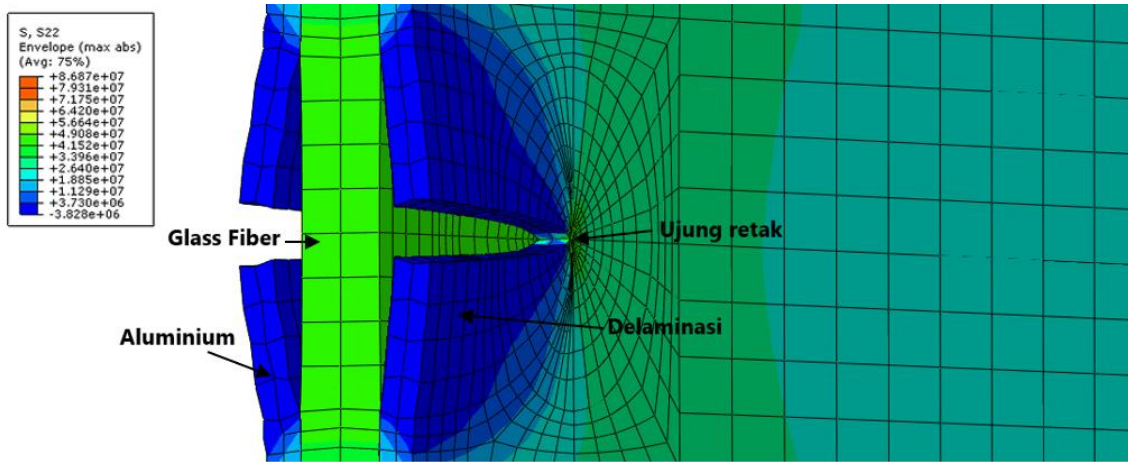
#### 4.1.1 Kontur Distribusi Tegangan Terhadap Variasi Rasio Tegangan

Hasil simulasi dengan menggunakan *software* berbasis Metode Elemen Hingga pada penelitian Pengaruh Rasio Tegangan dan Delaminasi Terhadap Distribusi Tegangan pada *Fiber Metal Laminates* didapatkan hasil berupa data distribusi tegangan yang terjadi pada daerah ujung retak ( $r$ ) pada masing-masing variasi rasio tegangan ( $R$ ) dan delaminasi ( $d$ ).

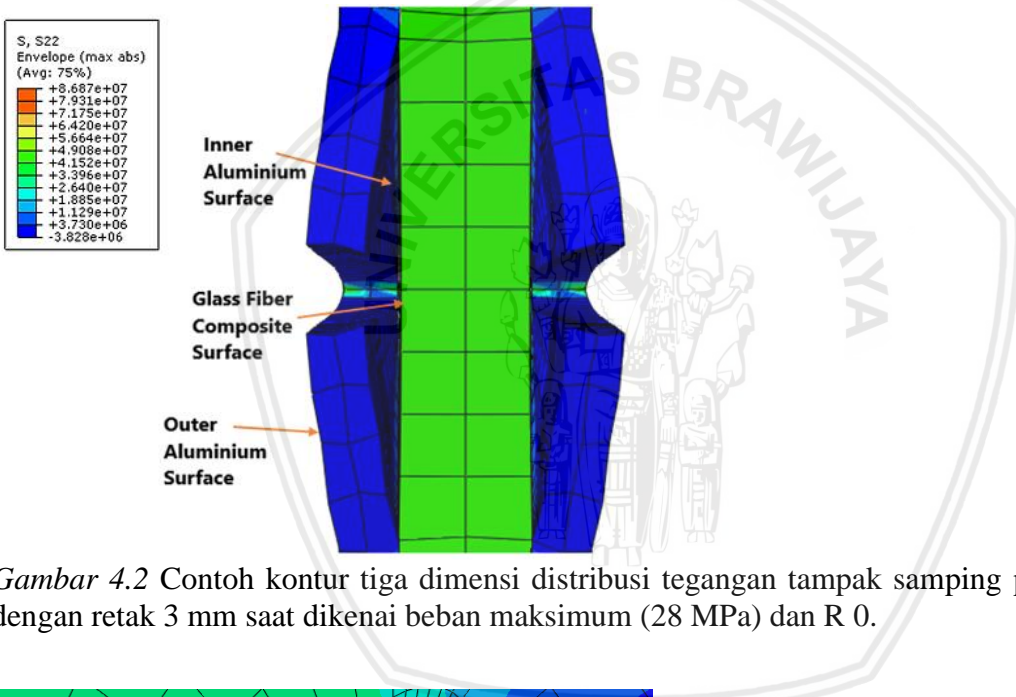
Variasi rasio tegangan yang digunakan adalah 0; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5 dengan tegangan maksimum yang tetap yaitu bernilai 28 MPa. Pada hasil dan pembahasan, diambil data-data dari beberapa ukuran panjang retak dan delaminasi yaitu ukuran panjang retak 3, 7, dan 12 mm. Hal ini bertujuan untuk mengetahui jangkauan hasil dari seluruh penelitian, maka diambil dari ukuran panjang retak dan delaminasi yang terendah, pertengahan, dan yang paling tinggi.

Setiap variasi rasio tegangan ( $R$ ) dan delaminasi ( $d$ ) pada masing-masing permukaan akan memiliki nilai yang berbeda-beda. Permukaan yang diamati dan diambil datanya adalah pada *inner aluminium surface*, *outer aluminium surface*, dan *glass fiber composite surface*. Data disajikan dalam bentuk gambar yang menyajikan informasi berupa persebaran warna yang menunjukkan distribusi tegangan pada masing-masing permukaan aluminium dan komposit yang diamati.

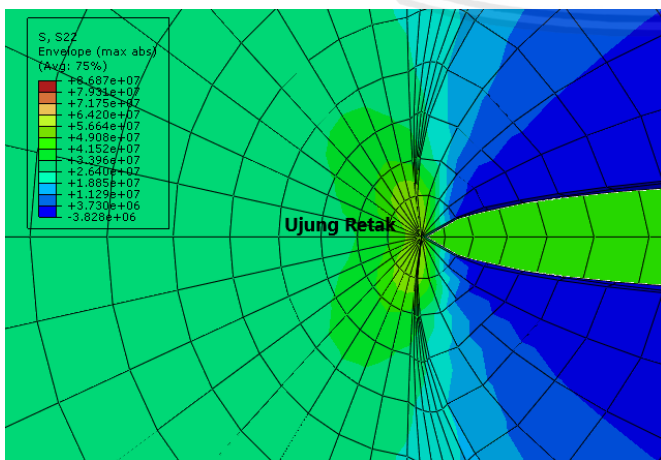
Gambar 4.1 sampai dengan gambar 4.6 menunjukkan kontur tiga dimensi distribusi tegangan dan contoh penampang *fiber metal laminates* untuk proses pengambilan data. Pada gambar dapat terlihat bahwa *fiber metal laminates* mengalami retak pada bagian aluminium yang pada mulanya memang sudah diberikan retak awalan (*initial crack*) yaitu sebesar 3 mm. Dapat terlihat pula daerah yang mengalami delaminasi pada lapisan aluminium yaitu daerah yang berwarna biru dan mengalami pelepasan dari struktur *fiber metal laminates*. Sedangkan lapisan *glass fiber composite* yang berada di tengah tidak mengalami keretakan.



Gambar 4.1 Contoh kontur tiga dimensi distribusi tegangan pada FMLs dengan retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0.

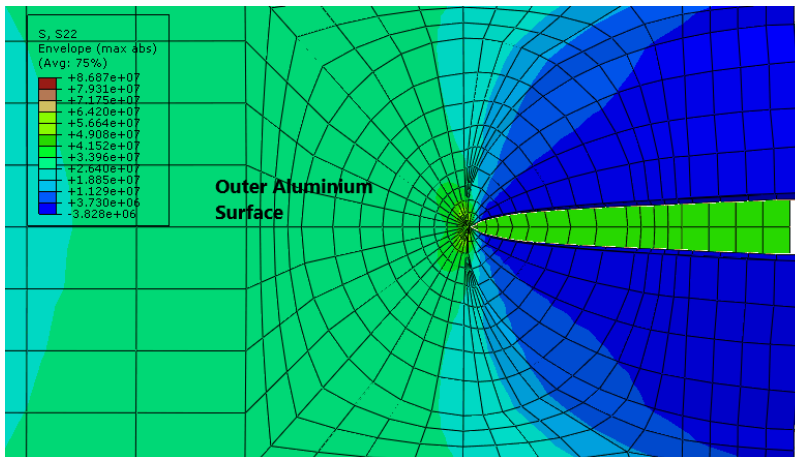


Gambar 4.2 Contoh kontur tiga dimensi distribusi tegangan tampak samping pada FMLs dengan retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0.

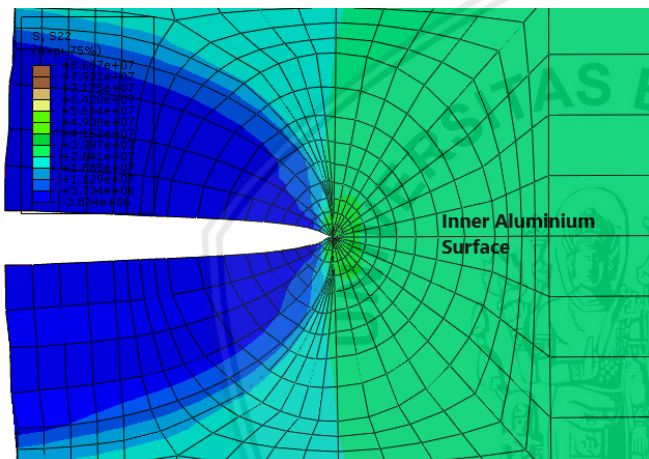


Gambar 4.3 Contoh penampang tiga dimensi daerah ujung retak pada FMLs dengan panjang retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0.

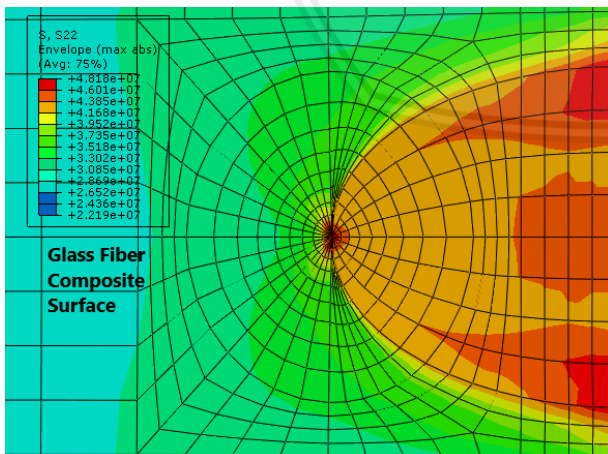




Gambar 4.4 Contoh penampang tiga dimensi *outer aluminium surface* pada FMLs dengan panjang retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0.

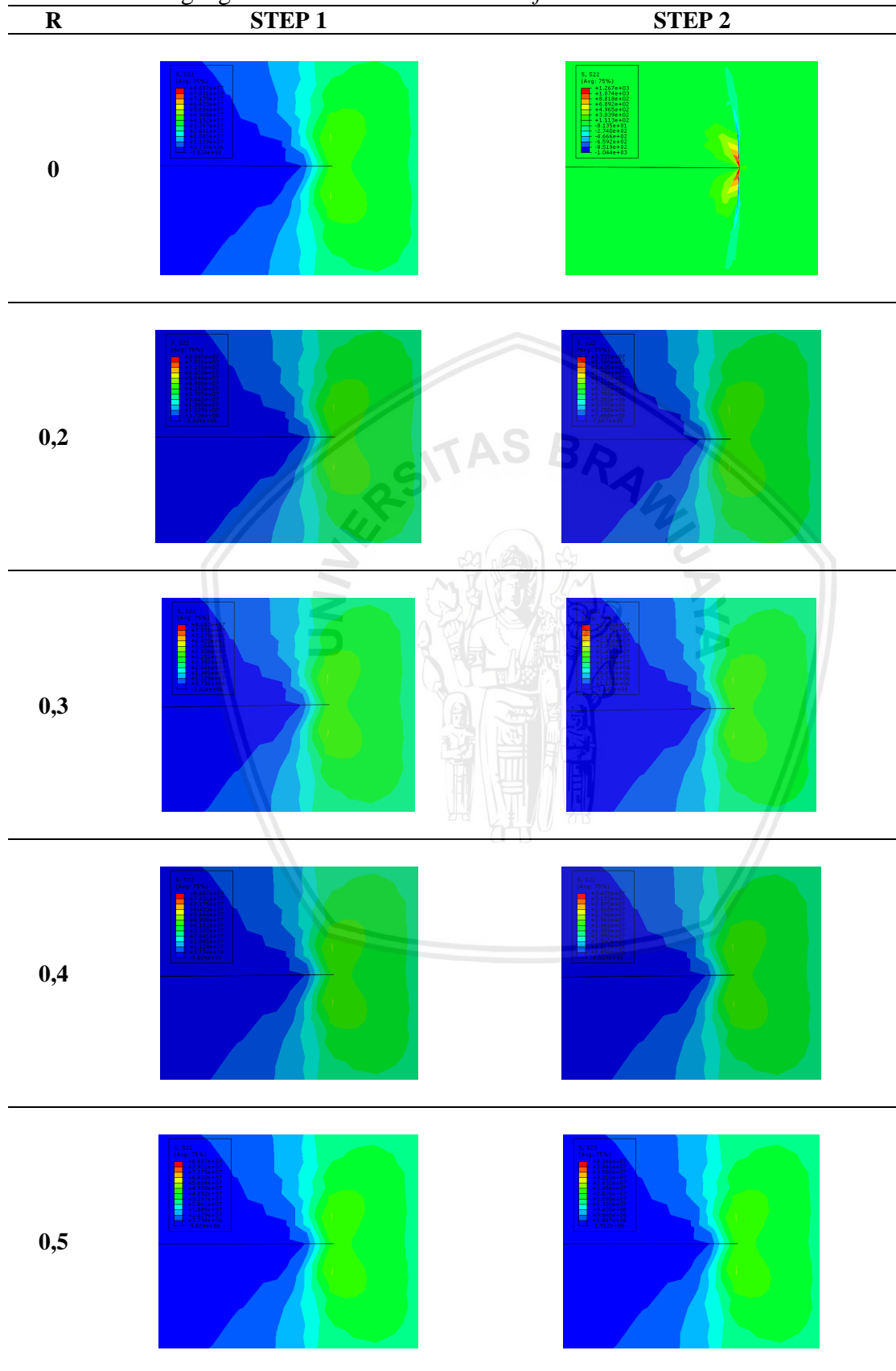


Gambar 4.5 Contoh penampang tiga dimensi *inner aluminium surface* pada FMLs dengan panjang retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0.



Gambar 4.6 Contoh penampang tiga dimensi *glass fiber composite surface* pada FMLs dengan panjang retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0.

Tabel 4.1  
 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Dengan Panjang Retak 3 mm Untuk Setiap Variasi Rasio Tegangan Pada *Inner Aluminium Surface*



Tabel 4.2  
 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Dengan Panjang Retak 3 mm Untuk Setiap Variasi Rasio Tegangan Pada *Outer Aluminium Surface*

R	STEP 1	STEP 2
0		
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		



Tabel 4.3  
 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Dengan Panjang Retak 3 mm Untuk Setiap Variasi Rasio Tegangan Pada *Glass Fiber Composite Surface*

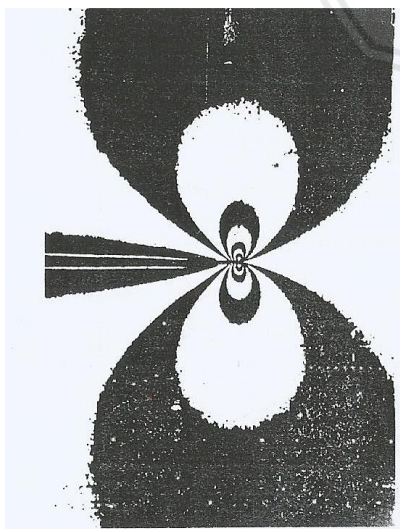
R	STEP 1	STEP 2
0		
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		



Kontur tiga dimensi pada gambar 4.1 sampai dengan gambar 4.6 yaitu merupakan distribusi tegangan yang terjadi pada sumbu Y atau dapat disebut dengan S22 pada *software*, yang mana terlihat bahwa tegangan maksimum berada pada ujung retak, yang diindikasikan dengan warna kuning untuk *inner* dan *outer aluminium surface* dan warna merah untuk *glass fiber composite surface* pada keterangan warna distribusi tegangan.

Tabel 4.1 sampai 4.3 di atas menunjukkan gambar kontur distribusi tegangan di daerah depan ujung retak 3 mm dengan rasio tegangan 0 ; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5 yang digunakan untuk melakukan analisis distribusi tegangan terhadap variasi rasio tegangan pada jarak tertentu dari ujung retak yang ditinjau dari masing-masing *inner aluminium surface*, *outer aluminium surface*, dan *glass fiber composite surface*. Terlihat bahwa setiap warna menggambarkan daerah dengan tegangan yang berbeda beda. Keterangan untuk masing-masing warna terlihat pada sisi kiri gambar, dimana setiap warna untuk setiap tegangan memiliki satuan Mega Pascal (MPa).

Persebaran warna pada *fiber metal laminates*, dapat diketahui dengan identifikasi warna yang ditunjukkan pada *software* yang ditunjukkan pada tabel di kiri atas masing-masing gambar kontur yang menunjukkan distribusi tegangan. Distribusi tegangan tersebut akan membentuk sebuah pola yang disebut dengan *butterfly shaped* atau disebut dengan *semicircular shape*. Fenomena ini terbentuk dari efek fotoelastik pada material plastis, dimana dua garis tipis berwarna putih yang masuk dari arah kiri merupakan retak, dan ujung retak berada pada bagian tengah kontur, dan disekitarnya merupakan daerah distribusi tegangan (Beer. 2012, p.299).



Gambar 4.7 Kontur dari tegangan geser maksimum disekitar daerah ujung retak yang membentuk *semicircular shape* atau *butterfly shaped*.

Sumber: Beer. 2012, p.299

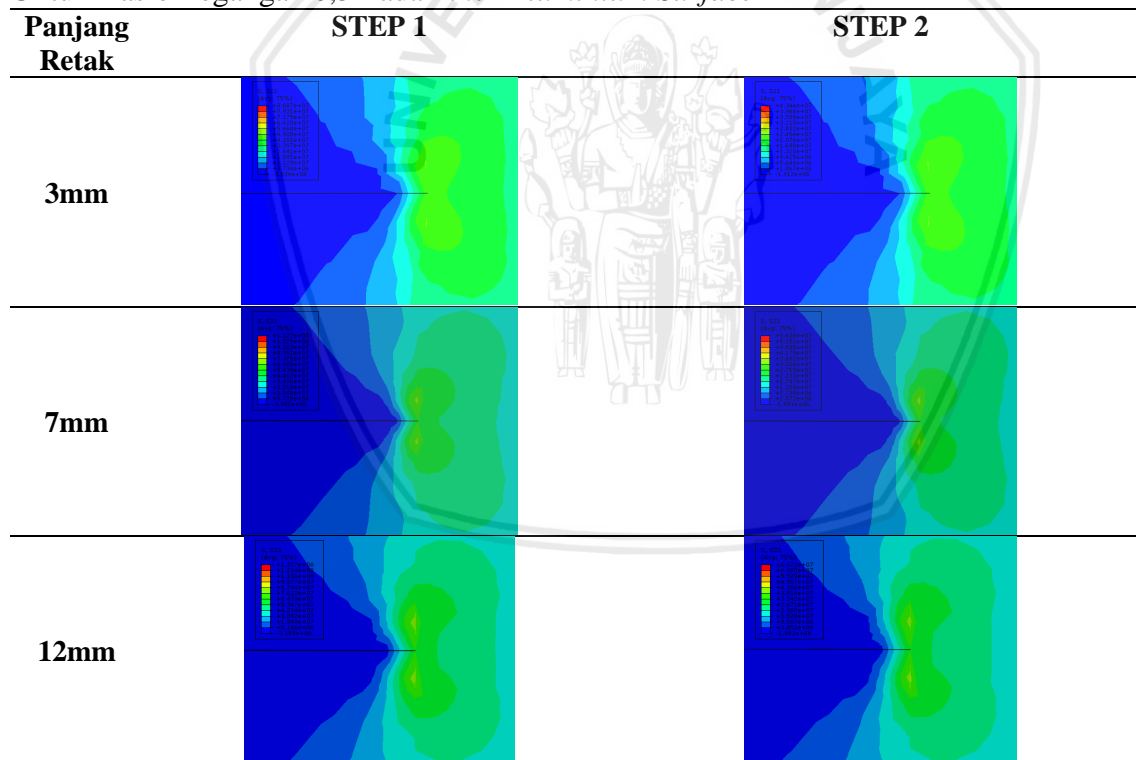


#### 4.1.2 Kontur Tegangan Maksimum Terhadap Variasi Panjang Retak dan Delaminasi

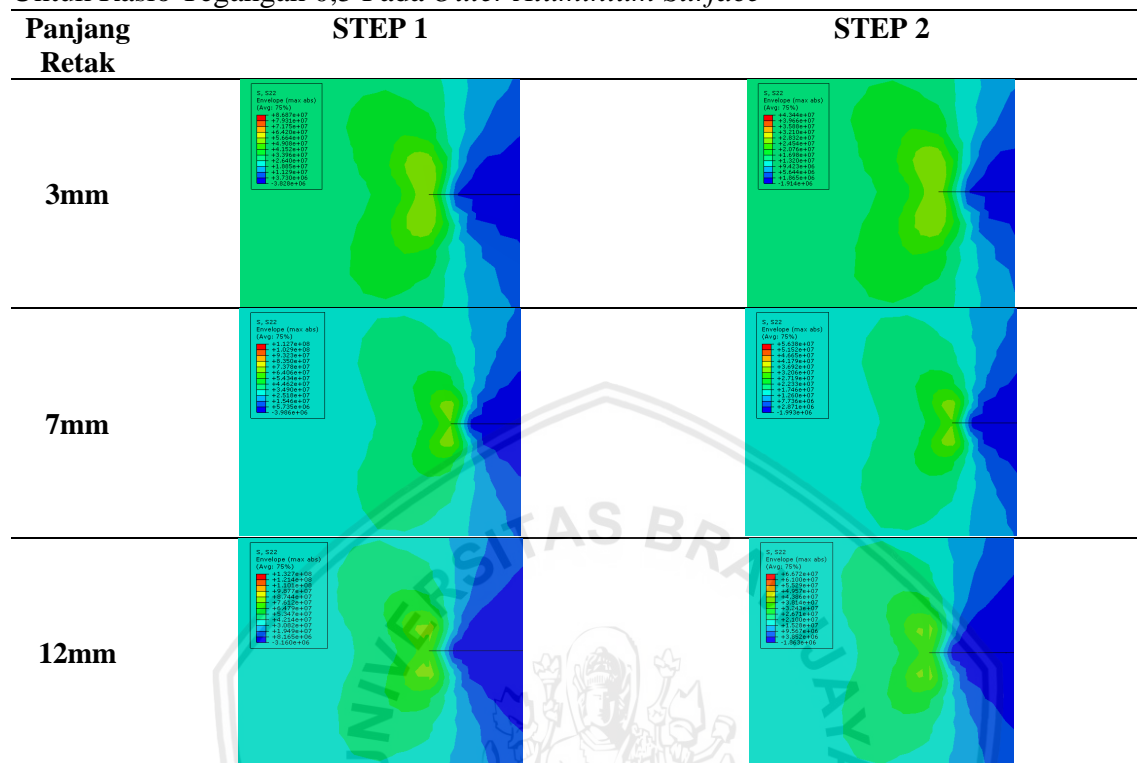
Retak awalan atau *initial crack* serta ukuran delaminasi yang divariasikan pada permukaan aluminium juga akan mempengaruhi nilai tegangan maksimum pada *fiber metal laminates* di seluruh permukaan yang diamati, yakni pada *inner aluminium*, *outer aluminium*, dan *glass fiber composite surface*. Kontur tegangan yang diamati adalah dari beberapa ukuran panjang retak dan delaminasi yaitu ukuran panjang retak 3, 7, dan 12 mm. Hal ini bertujuan untuk mengetahui jangkauan hasil dari seluruh penelitian, maka diambil dari ukuran panjang retak dan delaminasi yang terendah, pertengahan, dan yang paling tinggi.

Berikut ini merupakan tabel kontur tegangan maksimum terhadap variasi panjang retak 3, 7, dan 12 mm pada variasi rasio tegangan 0,5 pada masing-masing *surface*.

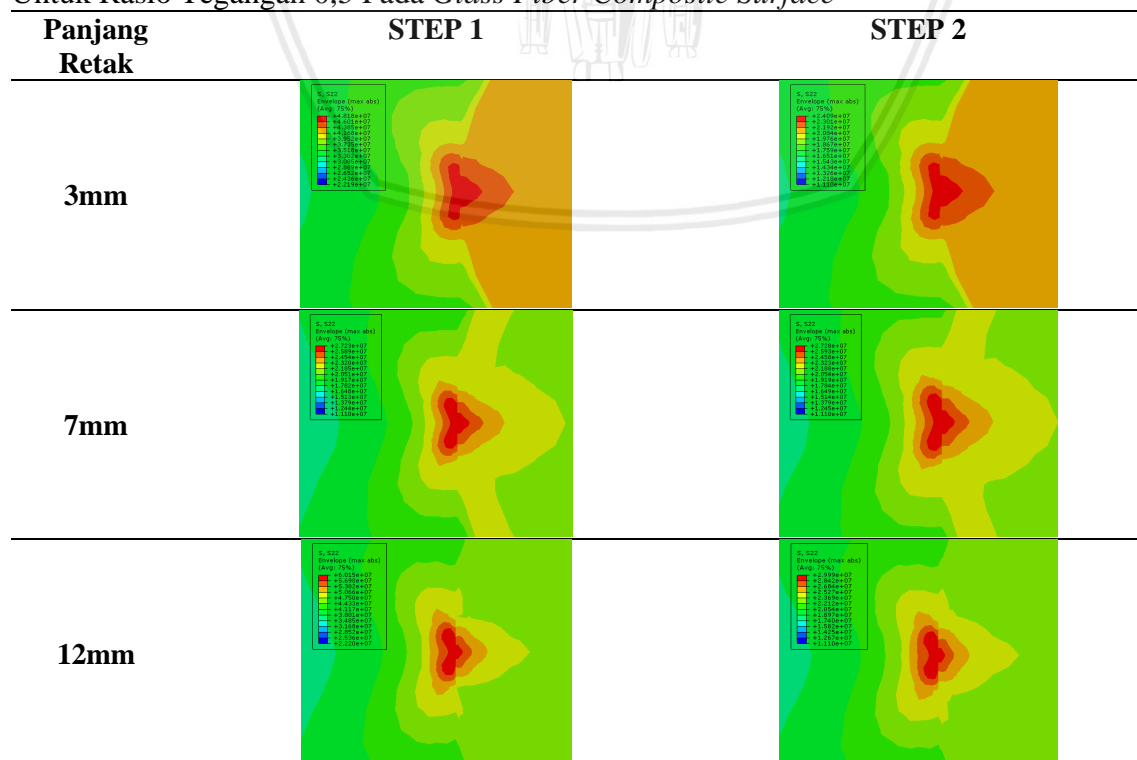
Tabel 4.4  
Kontur Dua Dimensi Tegangan Maksimum Dengan Variasi Panjang Retak 3, 7, dan 12 mm Untuk Rasio Tegangan 0,5 Pada *Inner Aluminium Surface*



Tabel 4.5  
Kontur Dua Dimensi Tegangan Maksimum Dengan Variasi Panjang Retak 3, 7, dan 12 mm  
Untuk Rasio Tegangan 0,5 Pada *Outer Aluminium Surface*



Tabel 4.6  
Kontur Dua Dimensi Tegangan Maksimum Dengan Variasi Panjang Retak 3, 7, dan 12 mm  
Untuk Rasio Tegangan 0,5 Pada *Glass Fiber Composite Surface*



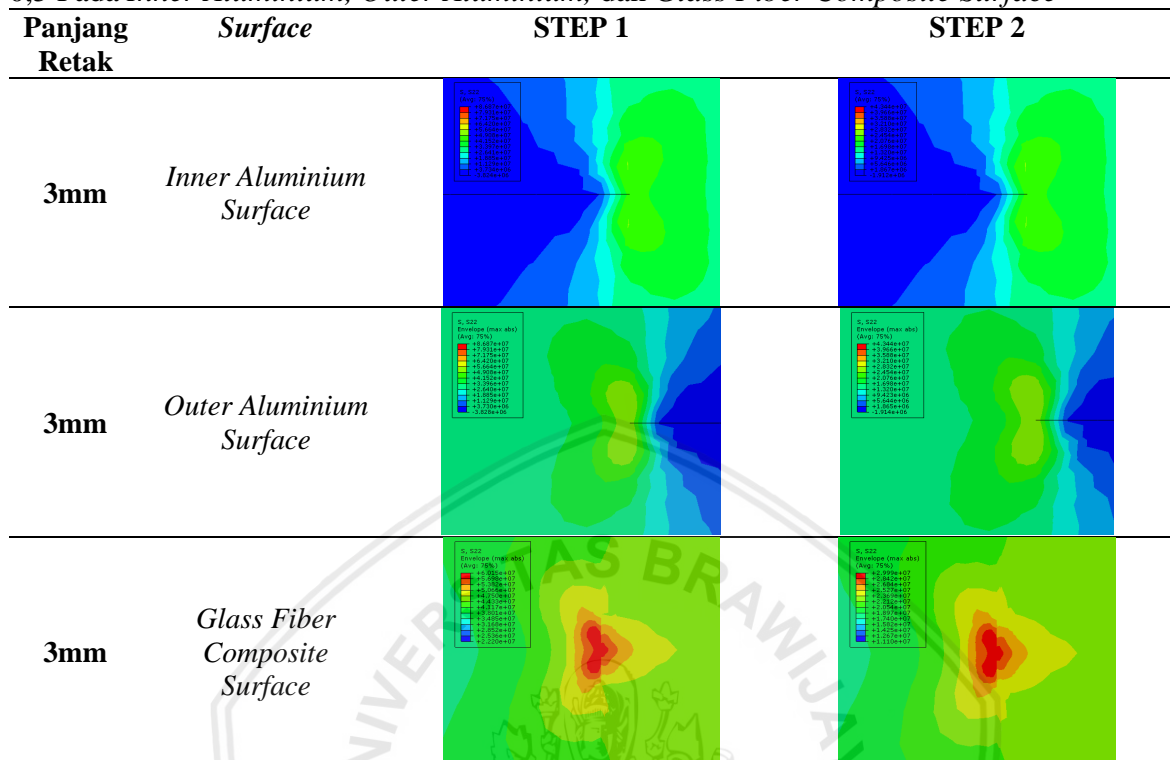
Dari tabel 4.4 sampai dengan 4.6 tersebut menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi pada masing-masing permukaan dipengaruhi oleh variasi ukuran panjang retak. Tegangan maksimum pada ujung retak terjadi karena *fiber metal laminates* yang telah diberi retak sebelumnya tidak melakukan distribusi tegangan secara merata akibat adanya retak tersebut, sehingga terbentuklah daerah dengan tegangan maksimum yang ditandai dengan warna kuning pada *inner* dan *outer aluminium surface*, serta warna merah pada *glass fiber composite surface*. Persebaran warna pada *fiber metal laminates*, dapat diketahui dengan identifikasi warna yang ditunjukkan pada *software*. Persebaran warna yang menunjukkan distribusi tegangan akan membentuk sebuah pola yang disebut dengan *butterfly shape* atau dapat pula disebut dengan *semicircular shape*. Sedangkan pada penelitian yang menggunakan metode eksperimental, besarnya tegangan dapat diketahui melalui data regangan yang timbul pada spesimen tersebut. Adanya tegangan maksimum dapat memicu timbulnya perambatan retak dan delaminasi pada *fiber metal laminates*, yang nantinya dapat mempengaruhi kekuatan bahan tersebut.

Dari tabel 4.4 sampai 4.6 tersebut, dapat diketahui bahwa semakin besar ukuran panjang retak, maka tegangan yang dihasilkan akan semakin besar pula. Jika diurutkan, maka tegangan maksimum tertinggi hingga terendah adalah dari panjang retak 12 mm, 7 mm dan yang terakhir adalah panjang retak 3 mm, sesuai dengan data yang berada pada keterangan warna pada masing-masing gambar kontur dua dimensi.

Ketika dibandingkan, distribusi tegangan pada *inner aluminium surface*, *outer aluminium surface*, dan *glass fiber composite surface* juga akan memiliki nilai yang berbeda. Sebagai contoh, tabel 4.7 berikut menunjukkan kontur *fiber metal laminates* dengan panjang retak 3 mm pada setiap *surface* ketika berada pada *step 1* dan *step 2*.

Tabel 4.7

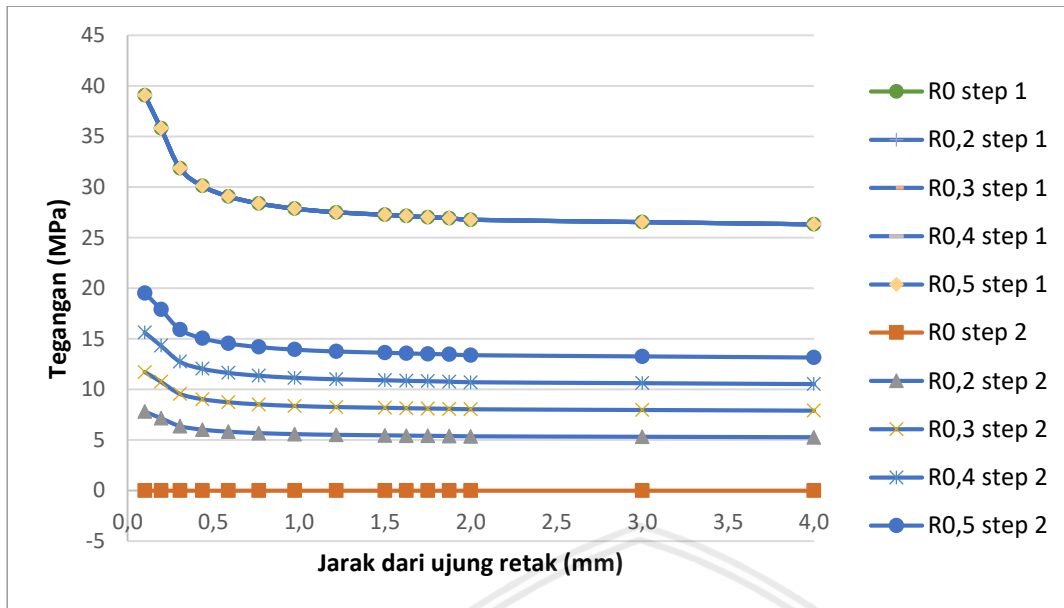
Kontur Distribusi Tegangan Dengan Variasi Panjang Retak 3 mm Untuk Rasio Tegangan 0,5 Pada *Inner Aluminium*, *Outer Aluminium*, dan *Glass Fiber Composite Surface*



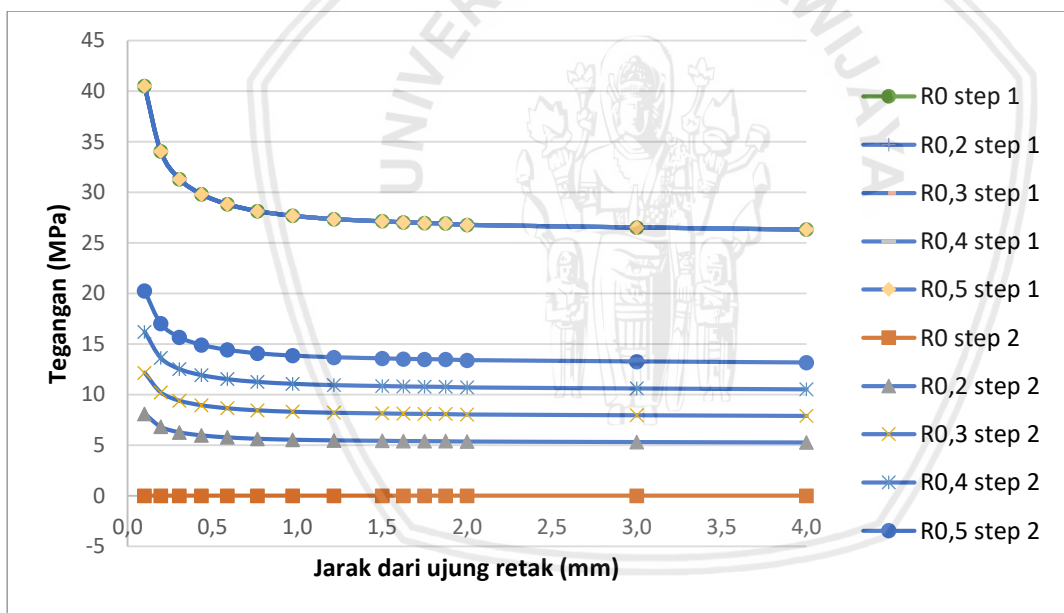
#### 4.1.3 Grafik Distribusi Tegangan Terhadap Variasi Rasio Tegangan

Grafik hubungan antara nilai distribusi tegangan terhadap variasi rasio tegangan menunjukkan nilai tegangan yang ditunjukkan pada sumbu  $y$  dan titik-titik yang menggambarkan jarak dari ujung retak yang ditunjukkan pada sumbu  $x$  pada setiap variasi rasio tegangan untuk *inner aluminium surface*, *outer aluminium surface*, dan *glass fiber composite surface*. Titik-titik dari ujung retak yang diamati yakni bernilai 0.1 mm, 0.197479 mm, 0.30569 mm, 0.43543 mm, 0.58722 mm, 0.76480 mm, 0.97257 mm, 1.21563 mm, 1.5 mm, 1.625 mm, 1.75 mm, 1.875 mm, 2 mm, 3 mm, dan 4 mm pada *node-node* dari ujung retak. Variasi rasio tegangan yang digunakan adalah rasio tegangan 0 ; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5, dengan tegangan maksimum yang bernilai 28 MPa.

Gambar 4.8 sampai 4.10 berikut merupakan gambar grafik perbandingan antara tegangan terhadap variasi rasio tegangan untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 3 mm, pada *inner aluminium surface*, *outer aluminium surface*, dan *glass fiber composite surface* dengan seluruh variasi rasio tegangan pada *step 1* dan *step 2*.

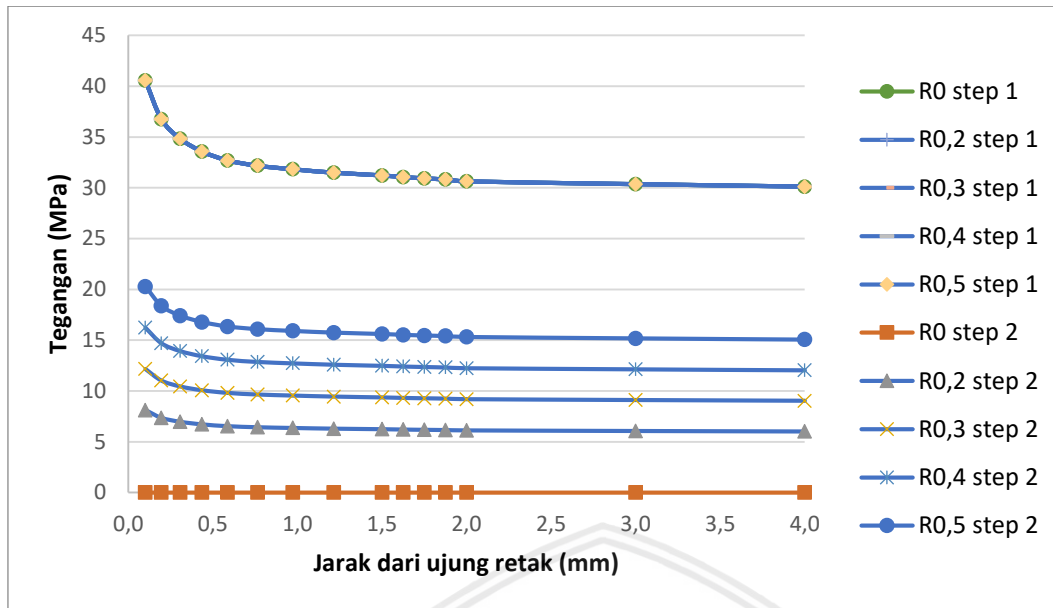


Gambar 4.8 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 3 mm pada *inner aluminium surface* step 1 dan 2.



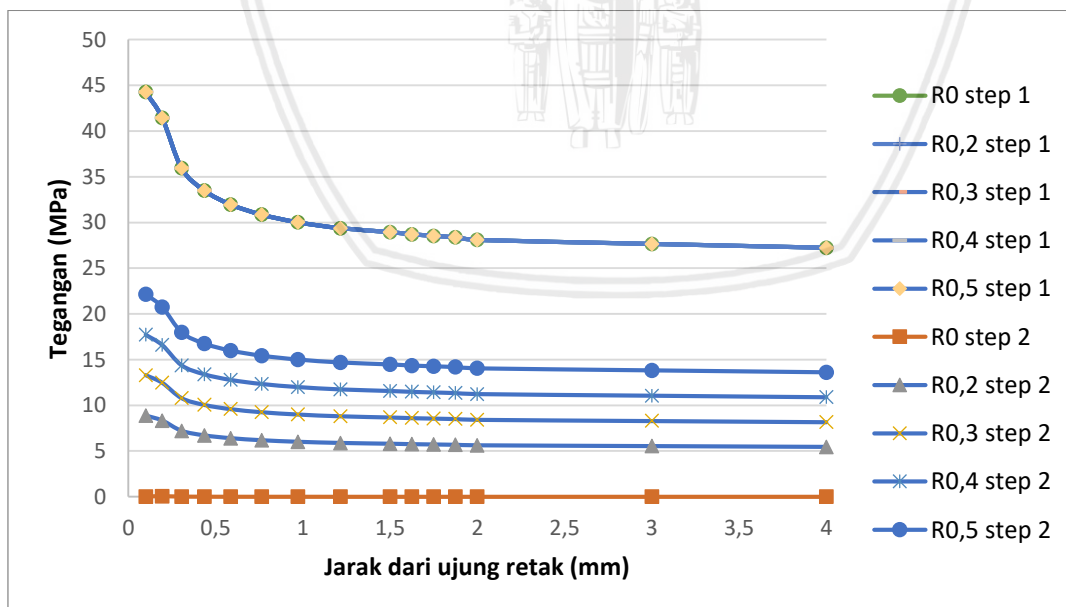
Gambar 4.9 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 3 mm pada *outer aluminium surface* step 1 dan 2.



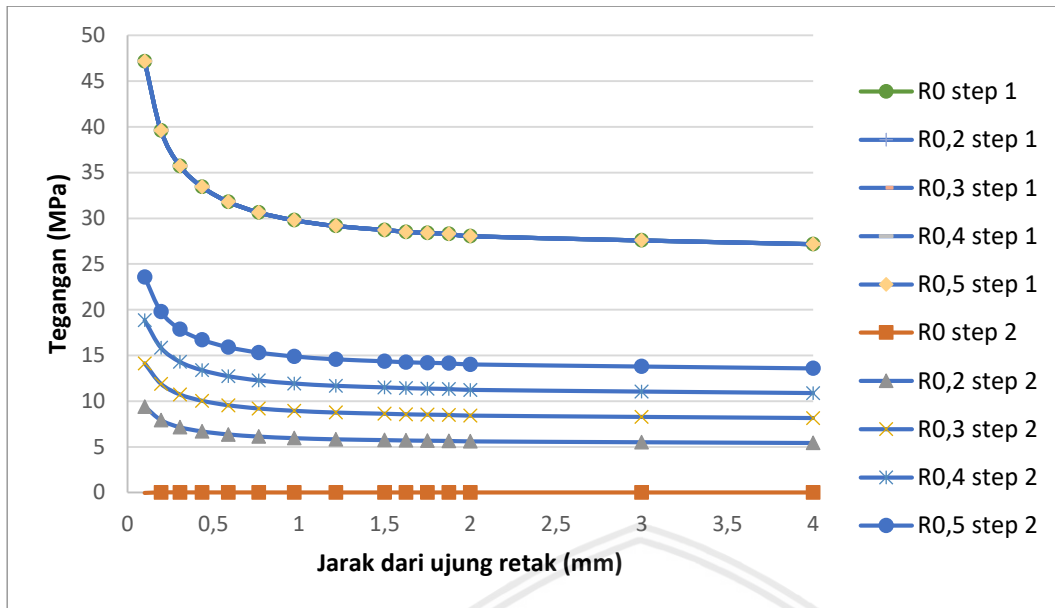


Gambar 4.10 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 3 mm pada *glass fiber composite surface* step 1 dan 2.

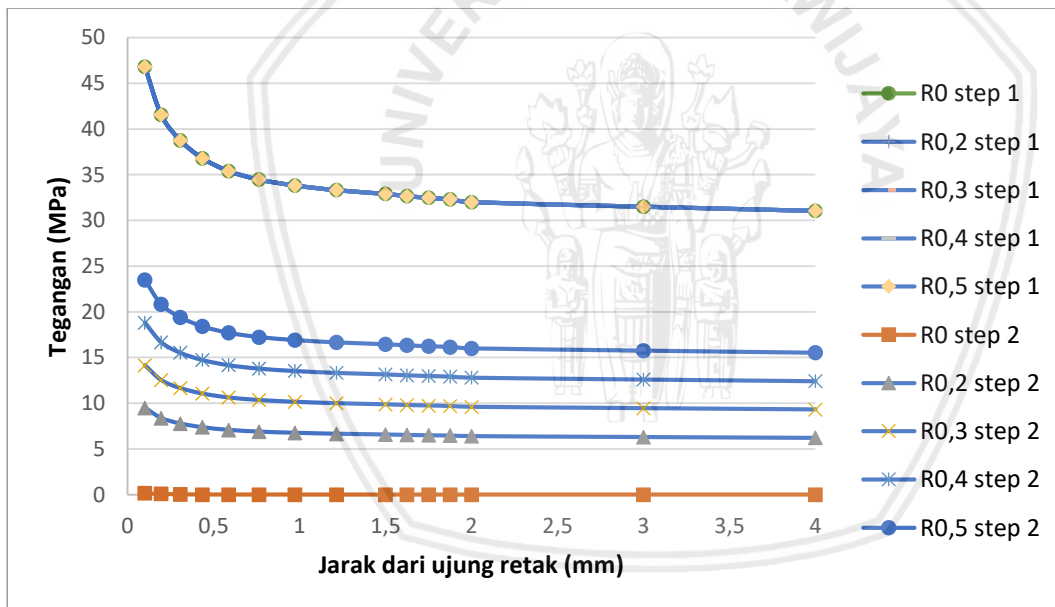
Gambar 4.11 sampai 4.13 berikut merupakan gambar grafik perbandingan antara tegangan terhadap variasi rasio tegangan untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 7 mm, pada *inner aluminium surface*, *outer aluminium surface*, dan *glass fiber composite surface* dengan seluruh variasi rasio tegangan pada *step 1* dan *step 2*.



Gambar 4.11 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 7 mm pada *inner aluminium surface* step 1 dan 2.

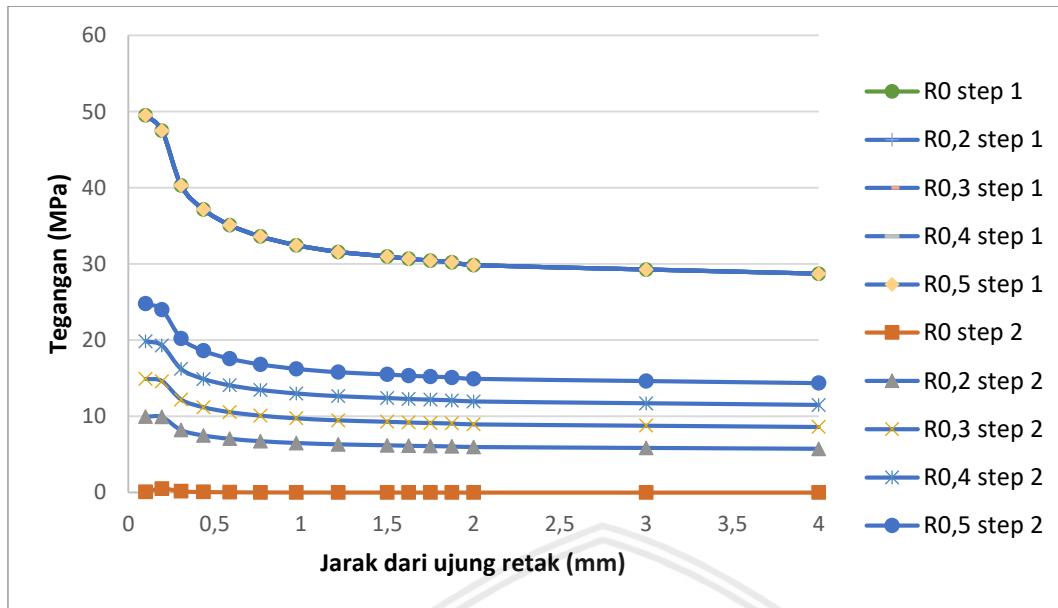


Gambar 4.12 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 7 mm pada *outer aluminium surface* step 1 dan 2.

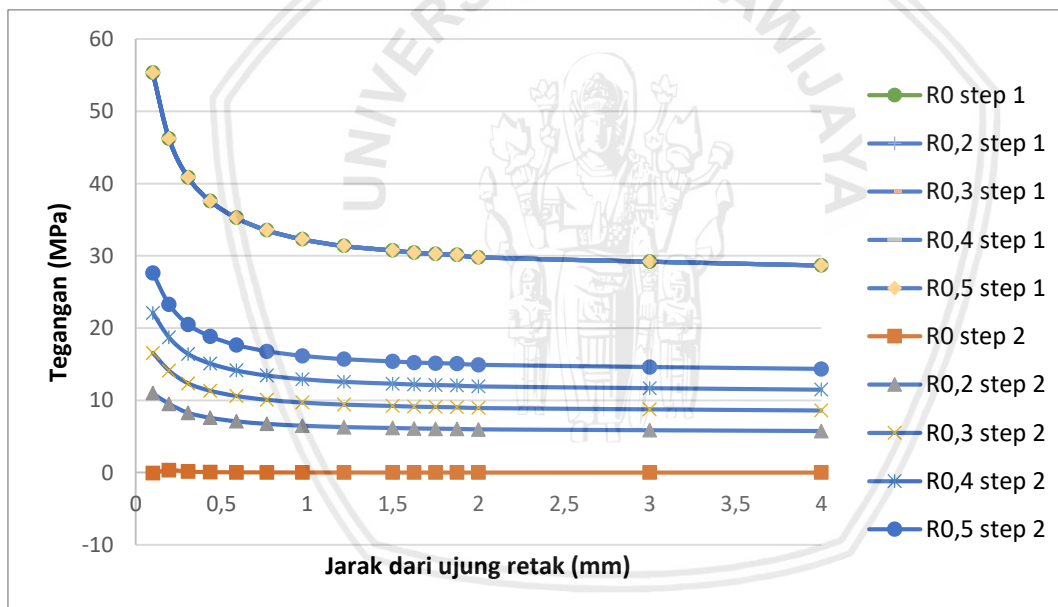


Gambar 4.13 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 7 mm pada *glass fiber composite surface* step 1 dan 2.

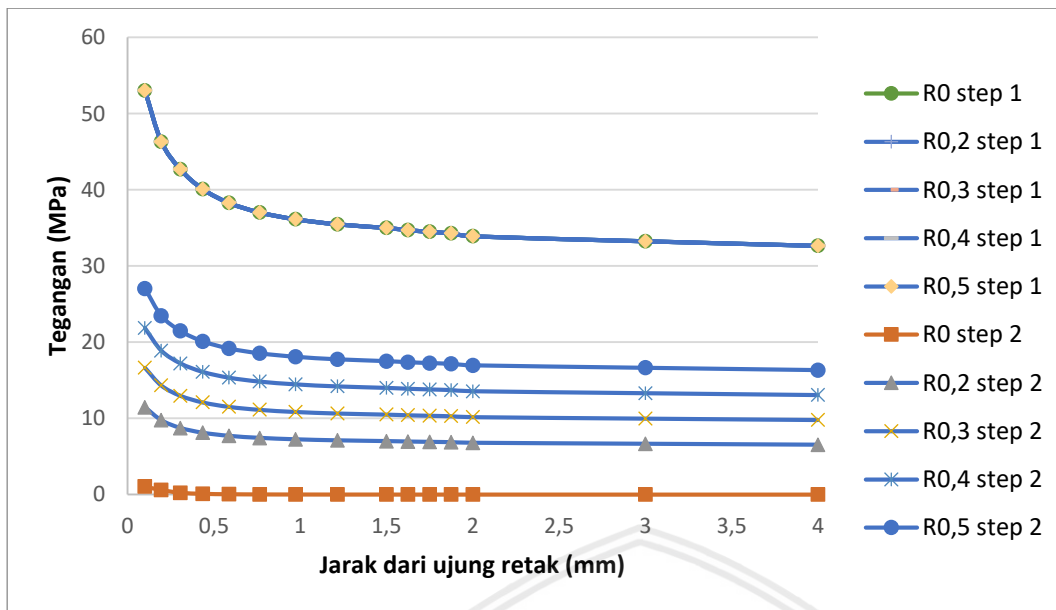
Gambar 4.14 sampai 4.16 berikut merupakan gambar grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 12 mm, pada *inner aluminium surface*, *outer aluminium surface*, dan *glass fiber composite surface* dengan seluruh variasi rasio tegangan pada *step 1* dan *step 2*.



Gambar 4.14 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 12 mm pada *inner aluminium surface* step 1 dan 2.



Gambar 4.15 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 12 mm pada *outer aluminium surface* step 1 dan 2.



Gambar 4.16 Grafik perbandingan antara tegangan terhadap jarak dari ujung retak untuk ukuran panjang retak dan delaminasi 12mm pada *glass fiber composite surface step 1* dan *2*.

Rasio tegangan merupakan perbandingan antara beban minimum dan beban maksimum yang diberikan kepada spesimen yang mana nilai rasio tegangan menjadi variabel bebas pada penelitian. Nilai variasi rasio tegangan yang diberikan pada setiap panjang retak yaitu 0; 0,2; 0,3; 0,4; dan 0,5, yang berarti, beban minimum yang akan diterima oleh spesimen secara berurutan yaitu sebesar 0 MPa; 5,6 MPa; 8,4 MPa; 11,2 MPa; dan 14 MPa.

Pada *fiber metal laminates* dengan panjang retak 3 mm, 7 mm dan 12 mm, untuk setiap variasi rasio tegangan, kecenderungannya adalah sama, yakni semakin dekat dari ujung retak maka tegangan yang terjadi akan semakin besar, dan semakin jauh dari ujung retak, maka tegangan yang terjadi juga akan semakin rendah yang dibuktikan dengan grafik hubungan antara nilai distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak pada masing-masing variasi rasio tegangan.

Perbedaan tegangan yang terjadi di depan daerah ujung retak diakibatkan karena tegangan minimum pada *step 2* ( $S_{min}$ ) akan semakin besar seiring dengan bertambahnya rasio tegangan. Pada grafik terlihat bahwa pada setiap variasi rasio tegangan pada *step 1* memiliki nilai yang tetap, hal ini dikarenakan pada *step 1*, *fiber metal laminates* mengalami tegangan maksimum yang seragam, yakni 28 MPa. Sedangkan pada *step 2*, *fiber metal laminates* diberi variasi rasio tegangan 0 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5, sehingga nilai tegangannya beragam. Namun dari grafik, dapat terlihat bahwa rasio tegangan 0,5 memiliki nilai tegangan yang tertinggi, kemudian diikuti oleh variasi rasio tegangan 0,4 ; 0,3 ; dan 0,2 secara berurutan, dan yang paling kecil adalah variasi rasio tegangan 0. Nilai distribusi tegangan yang tertinggi

yang dihasilkan pada semua titik di depan ujung retak di semua *surface* adalah nilai di *step* 1. Hal ini dikarenakan pada *step* 1, spesimen diberikan tegangan maksimum yaitu 28 MPa pada rasio tegangan 0,5. Sedangkan pada *step* 2, spesimen diberikan tegangan minimum yaitu 14 MPa pada rasio tegangan 0,5. Semakin besar rasio tegangan yang diberikan maka tegangan yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Untuk panjang retak 3 mm pada seluruh *surface* didapatkan nilai tegangan pada daerah paling dekat dengan ujung retak, pada *step* 1 adalah sebesar 39,083 MPa, dan nilai tegangan pada *step* 2 untuk rasio tegangan berurutan dari 0 hingga 0,5 adalah 6,11E-05 MPa; 7,81 MPa; 11,72 MPa; 15,63 MPa; dan 19,54 MPa. Pada gambar 4.9 didapatkan nilai tegangan pada *step* 1 adalah sebesar 40,48 MPa dan nilai tegangan pada *step* 2 untuk rasio tegangan berurutan dari 0 hingga 0,5 adalah 2,11E-05 MPa; 8,09 MPa; 12,14 MPa; 16,19 MPa; dan 20,24 MPa. Pada gambar 4.10 didapatkan nilai tegangan pada *step* 1 adalah sebesar 40,571 MPa, dan nilai tegangan pada *step* 2 untuk rasio tegangan berurutan dari 0 hingga 0,5 adalah 3,07E-05 MPa; 8,11 MPa; 11,02 MPa; 16,22 MPa, dan 20,28 MPa.

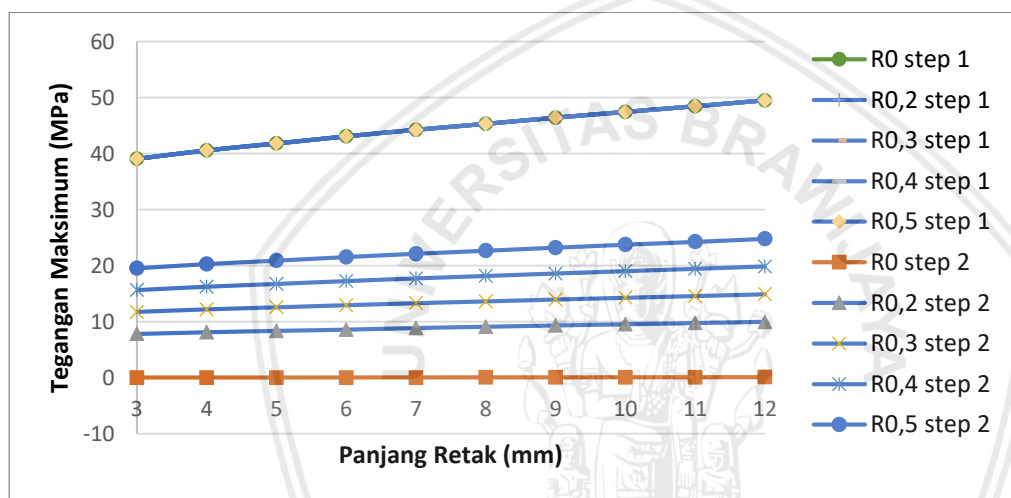
Untuk panjang retak 7 mm pada seluruh *surface* didapatkan nilai tegangan pada daerah paling dekat dengan ujung retak, pada *step* 1 adalah sebesar 44,26 MPa, dan nilai tegangan pada *step* 2 untuk rasio tegangan berurutan dari 0 hingga 0,5 adalah 0,025 MPa; 8,87 MPa; 13,29 MPa; 16,59 MPa; dan 22,14 MPa. Pada gambar 4.12 didapatkan nilai tegangan pada *step* 1 adalah sebesar 47,19 MPa, dan nilai tegangan pada *step* 2 untuk rasio tegangan berurutan dari 0 hingga 0,5 adalah 0,006 MPa; 9,40 MPa; 14,12 MPa; 18,85 MPa; dan 23,57 MPa. Pada gambar 4.13 didapatkan nilai tegangan pada *step* 1 adalah sebesar 49,52 MPa, dan nilai tegangan pada *step* 2 untuk rasio tegangan berurutan dari 0 hingga 0,5 adalah 0,158 MPa; 9,48 MPa; 14,15 MPa; 18,81 MPa; dan 23,48 MPa.

Untuk panjang retak 12 mm pada seluruh *surface* didapatkan nilai tegangan pada daerah paling dekat dengan ujung retak, pada *step* 1 adalah sebesar 49,52 MPa, dan nilai tegangan pada *step* 2 untuk rasio tegangan berurutan dari 0 hingga 0,5 adalah 0,095 MPa; 9,97 MPa; 14,91 MPa; 19,85 MPa; dan 24,80 MPa. Pada gambar 4.15 didapatkan nilai tegangan pada *step* 1 adalah sebesar 55,36 MPa, dan nilai tegangan pada *step* 2 untuk rasio tegangan berurutan dari 0 hingga 0,5 adalah -0,086 MPa; 11,003 MPa; 16,54 MPa; 22,09 MPa; dan 27,63 MPa. Pada gambar 4.16 didapatkan nilai tegangan pada *step* 1 adalah sebesar 53,03 MPa, dan nilai tegangan pada *step* 2 untuk rasio tegangan berurutan dari 0 hingga 0,5 adalah 1,054 MPa; 11,45 MPa; 16,65 MPa; 21,85 MPa; dan 27,04 MPa.

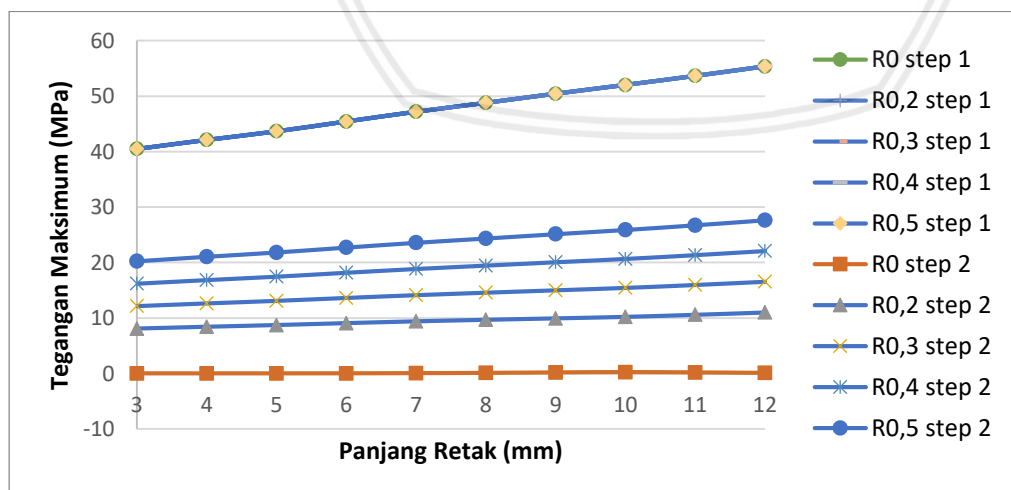


#### 4.1.4 Grafik Hubungan Antara Tegangan Maksimum Terhadap Variasi Panjang Retak dan Delaminasi

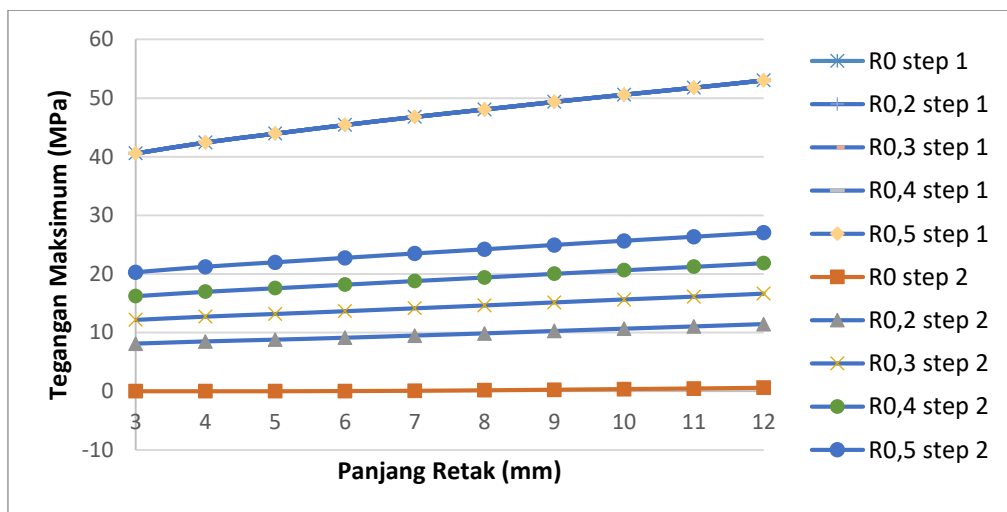
Grafik hubungan antara tegangan maksimum terhadap variasi panjang retak dan delaminasi menunjukkan nilai tegangan maksimum yang timbul dari setiap variasi rasio tegangan terhadap adanya variasi panjang retak untuk masing-masing *surface* yang diamati yakni *inner aluminium*, *outer aluminium*, dan *glass fiber aluminium surface*. Untuk mengetahui kecenderungan yang terjadi pada *fiber metal laminates* tersebut, maka digunakanlah data-data dari panjang retak 3 mm, 7 mm dan 12 mm. Berikut ini adalah grafik hubungan antara tegangan maksimum terhadap variasi panjang retak:



Gambar 4.17 Grafik Hubungan Antara Tegangan Maksimum Terhadap Variasi Panjang Retak dan Delaminasi Pada *Inner Aluminium Surface*



Gambar 4.18 Grafik Hubungan Antara Tegangan Maksimum Terhadap Variasi Panjang Retak dan Delaminasi Pada *Outer Aluminium Surface*



Gambar 4.19 Grafik Hubungan Antara Tegangan Maksimum Terhadap Variasi Panjang Retak dan Delaminasi Pada *Glass Fiber Composite Surface*

Tabel 4.7

Data nilai tertinggi untuk masing-masing *surface* pada panjang retak 3, 7, dan 12 mm

Panjang Retak	<i>Surface</i>	<i>Step</i>	Rasio Tegangan	Tegangan Maksimum
3 mm	<i>Inner Aluminium</i>	1	0 sampai 0,5	39,083 MPa
	<i>Inner Aluminium</i>	2	0,5	19,541 MPa
	<i>Outer Aluminium</i>	1	0 sampai 0,5	40,488 MPa
	<i>Outer Aluminium</i>	2	0,5	20,244 MPa
	<i>Glass Fiber</i>	1	0 sampai 0,5	40,571 MPa
	<i>Glass Fiber</i>	2	0,5	20,285 MPa
7 mm	<i>Inner Aluminium</i>	1	0 sampai 0,5	44,368 MPa
	<i>Inner Aluminium</i>	2	0,5	22,145 MPa
	<i>Outer Aluminium</i>	1	0 sampai 0,5	47,912 MPa
	<i>Outer Aluminium</i>	2	0,5	23,574 MPa
	<i>Glass Fiber</i>	1	0 sampai 0,5	46,803 MPa
	<i>Glass Fiber</i>	2	0,5	23,480 MPa
12 mm	<i>Inner Aluminium</i>	1	0 sampai 0,5	49,526 MPa
	<i>Inner Aluminium</i>	2	0,5	24,801 MPa
	<i>Outer Aluminium</i>	1	0 sampai 0,5	55,364 MPa
	<i>Outer Aluminium</i>	2	0,5	27,635 MPa
	<i>Glass Fiber</i>	1	0 sampai 0,5	53,035 MPa
	<i>Glass Fiber</i>	2	0,5	27,049 MPa

## 4.2 Pembahasan

Dari penelitian Pengaruh Rasio Tegangan dan Delaminasi Terhadap Distribusi Tegangan Pada *Fiber Metal Laminates* didapatkan hasil berupa gambar kontur tiga dimensi dan dua dimensi, grafik hubungan antara distribusi tegangan terhadap variasi rasio tegangan, dan grafik hubungan antara tegangan maksimum terhadap variasi panjang retak, dimana keseluruhan data tersebut diambil pada *inner aluminium surface*, *outer aluminium surface* dan *glass fiber aluminium surface*. Data penelitian yang didapatkan berupa nilai distribusi tegangan serta nilai tegangan maksimum yang mana didapatkan dari *node-node* yang diambil dari titik paling dekat dengan ujung retak. Berikut ini merupakan pembahasan untuk setiap hasil simulasi.

### 4.2.1 Pembahasan Mengenai Pengaruh Variasi Rasio Tegangan Terhadap Distribusi Tegangan Pada Jarak Dari Ujung Retak Tertentu

Kontur dua dimensi serta grafik hubungan antara distribusi tegangan terhadap variasi rasio tegangan menghasilkan data-data distribusi tegangan yang ditampilkan dengan persebaran warna pada kontur dan nilai tegangan pada grafik.

Kontur tiga dimensi pada gambar 4.1 sampai dengan gambar 4.6 merupakan distribusi tegangan yang terjadi pada sumbu Y atau dapat disebut dengan S22 pada *software*, yang mana terlihat bahwa tegangan maksimum berada pada ujung retak, yang diindikasikan dengan warna kuning untuk *inner* dan *outer aluminium surface* dan warna merah untuk *glass fiber composite surface* pada keterangan warna distribusi tegangan. Semakin jauh dari ujung retak, maka distribusi tegangan yang terjadi juga akan semakin berkurang, yang ditandai dengan berubahnya warna semakin menuju warna biru, yang artinya tegangan di daerah tersebut semakin kecil. Selain itu terjadi pula fenomena *fiber bridging*, dimana bagian *glass fiber composite* tidak mengalami kerusakan, karena delaminasi hanya terjadi pada lapisan aluminium saja.

Penelitian ini menggunakan dua *step*, yakni *step 1* dan *step 2* dimana pada *step 1* *fiber metal laminates* diberikan tegangan maksimum yaitu sebesar 28 MPa, dan *step 2* mendapatkan tegangan dengan diberikan variasi rasio tegangan yang bernilai 0 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 dan 0,5. Alasan dipilihnya tegangan maksimum yang bernilai 28 MPa adalah karena tegangan izin (*endurance stress*) yang diperbolehkan untuk diberikan pada suatu benda dengan beban dan frekuensi konstan dan memiliki permukaan yang halus adalah 0,3 sampai dengan 0,5 dari total nilai kekuatan *yield* material tersebut (Beer, 2012,p.70) yang mana, aluminium sendiri memiliki nilai kekuatan *yield* sebesar 85 MPa seperti yang telah

dijelaskan pada material properties aluminium pada Tabel 3.3, jadi nilai 28 MPa masih termasuk dalam tegangan izin untuk aluminium.

Pada gambar 4.8 sampai dengan 4.16 yang merupakan gambar grafik distribusi tegangan terhadap variasi rasio tegangan, diperoleh data bahwa tegangan yang terjadi pada *fiber metal laminates* berurutan dari yang paling tinggi ke yang terendah adalah dari variasi rasio tegangan 0,5 ; 0,4 ; 0,3 ; 0,2 ; dan 0 secara berurutan. Hal ini disebabkan karena nilai distribusi tegangan yang timbul dipengaruhi oleh besar tegangan yang diberikan kepada *fiber metal laminates* tersebut, sehingga semakin besar rasio tegangan yang diberikan, maka akan semakin besar pula tegangan pada *step 2* yang diterima oleh benda uji yang menyebabkan distribusi tegangan yang dihasilkanpun akan semakin besar, yaitu pada variasi rasio tegangan 0,5.

Selain itu, dari grafik tersebut juga dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan yang dihasilkan pada masing-masing *surface* yang diamati akan semakin besar ketika titik tersebut semakin dekat dengan ujung retak, dan sebaliknya, akan semakin kecil nilainya ketika semakin jauh dari ujung retak. Penyebab terjadinya hal ini karena selain tegangan, pada *fiber metal laminates* juga dianalisis terjadi regangan, dimana pada daerah ujung retak terjadi regangan, sehingga dapat pula dianalisis menggunakan rumus berikut:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots (4-1)$$

Dengan:

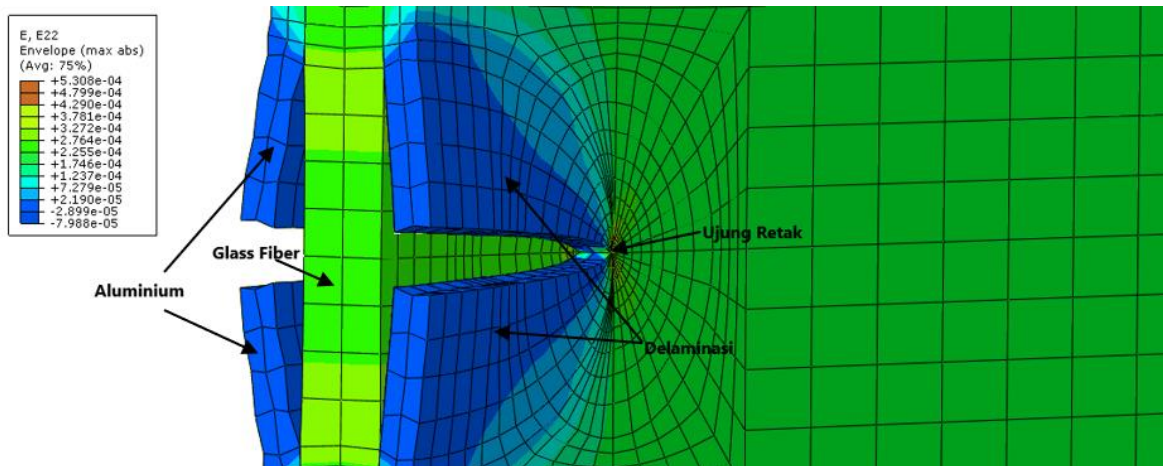
$E$  = Modulus Elastisitas (MPa)

$\sigma$  = Tegangan (MPa)

$\varepsilon$  = Regangan

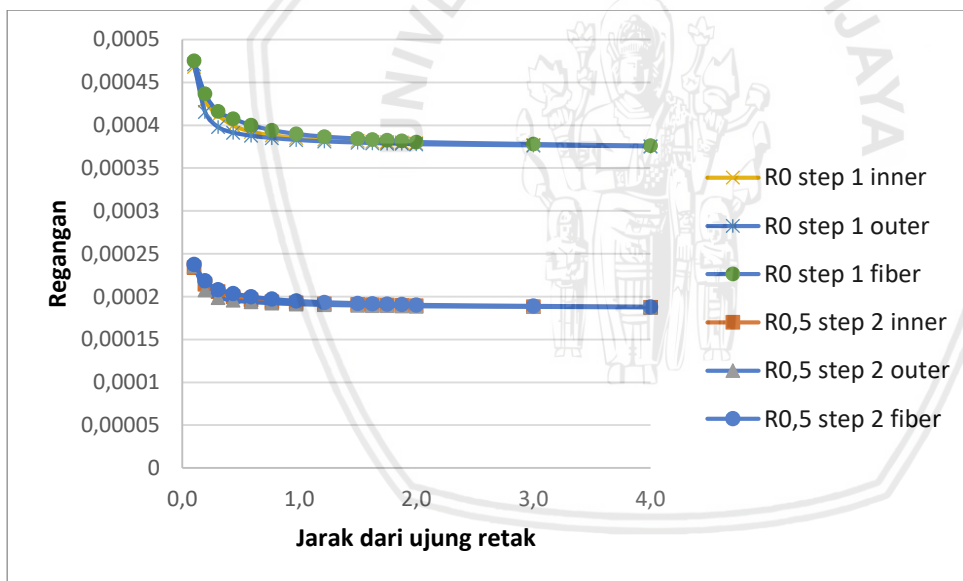
Sumber: Beer (2012,p.68)

Regangan yang terjadi dapat dijelaskan dengan hasil regangan pada simulasi *fiber metal laminates* yang ditunjukkan pada gambar 4.20 berikut.



Gambar 4.20 Contoh kontur tiga dimensi regangan pada FMLs dengan retak 3 mm saat dikenai beban maksimum (28 MPa) dan R 0.

Regangan yang terjadi juga dijelaskan dengan grafik hubungan antara regangan dan jarak dari ujung retak pada simulasi *fiber metal laminates* yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4.21 Grafik regangan pada *fiber metal laminates* dengan retak 3mm rasio tegangan 0,5 pada setiap *surface* dalam *step* 1 dan *step* 2.

Lapisan aluminium pada *fiber metal laminates* telah diberi retak dan delaminasi sebelumnya, sehingga pada daerah ujung retak dan delaminasi terjadi konsentrasi tegangan yang tinggi, yang menyebabkan timbulnya tegangan yang tinggi pada daerah ujung retak tersebut. Sedangkan jika kita bandingkan antara masing-masing *surface* yang diamati, maka tegangan yang terjadi pada *surface* tersebut dari yang paling tinggi hingga paling rendah adalah pada *glass fiber*, kemudian *inner aluminium*, dan yang terakhir adalah pada *outer aluminium*.



*Glass fiber composite surface* mengalami tegangan terbesar karena hampir seluruh tegangan yang diterima oleh fiber metal laminates akan ditahan dan ditujukan kepada glass fiber. Jika ditinjau dari regangan yang dihasilkan, maka glass fiber composite surface juga memiliki nilai regangan yang paling tinggi jika dibandingkan dengan regangan pada inner dan outer aluminium surface.

Ditinjau dari dasar teori sebelumnya, fungsi *glass fiber composite* pada *fiber metal laminates* adalah sebagai penerima dan penahan tegangan terbesar, sedangkan lapisan aluminium hanya berfungsi sebagai matriks, yang mana fungsi matriks itu sendiri hanyalah untuk menyalurkan tegangan yang diterima oleh *fiber metal laminates* menuju ke *glass fiber composite*. Sehingga hasil yang didapatkan sudah sesuai dengan dasar teori, dimana *outer aluminium surface* memiliki tegangan yang paling rendah dibandingkan *inner aluminium surface* yang memiliki tegangan yang lebih tinggi karena lebih dekat dengan *glass fiber composite surface*.

#### **4.2.2 Pembahasan Mengenai Pengaruh Variasi Panjang Retak Terhadap Tegangan Maksimum**

Pengaruh variasi panjang retak terhadap tegangan maksimum menunjukkan nilai tegangan maksimum yang timbul terhadap adanya variasi panjang retak untuk masing-masing *surface* yang diamati yakni *inner aluminium*, *outer aluminium*, dan *glass fiber aluminium surface*. Untuk mengetahui kecenderungan yang terjadi pada *fiber metal laminates* tersebut, maka digunakanlah data-data dari panjang retak 3 mm hingga 12 mm.

Analisis grafik hubungan antara tegangan maksimum terhadap variasi panjang retak menunjukkan bahwa semakin besar panjang retak yang diberikan, maka tegangan maksimum yang dihasilkan juga akan semakin besar. Nilai tegangan maksimum yang tinggi ke yang rendah secara berurutan yaitu panjang retak 12 mm, 11 mm, 10 mm, 9 mm, 8 mm, 7 mm, 6 mm, 5 mm, 4 mm dan yang terakhir adalah 3 mm. Analisis hubungan antara tegangan maksimum dan panjang retak tersebut dapat terjadi karena semakin besar ukuran panjang retak, maka konsentrasi tegangan yang terjadi juga akan semakin besar sehingga ketika panjang retak dan delaminasi ukurannya meningkat, maka konsentrasi tegangan juga akan meningkat pula.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian Pengaruh Rasio Tegangan dan Delaminasi Terhadap Distribusi Tegangan Pada *Fiber Metal Laminates*, didapatkan kesimpulan yaitu:

1. Semakin besar rasio tegangan (R) yang diberikan pada *fiber metal laminates* akan menghasilkan distribusi tegangan yang berada di daerah depan ujung retak semakin besar pula.
2. Distribusi tegangan yang diamati dari titik yang paling dekat dengan ujung retak akan memiliki nilai yang paling tinggi, dan nilainya akan semakin berkurang seiring dengan semakin jauhnya titik tersebut dari ujung retak.
3. Panjang retak yang diberikan pada lapisan aluminium pada *fiber metal laminates* akan mempengaruhi nilai tegangan yang terjadi, dimana semakin besar panjang retak yang diberikan, maka tegangan maksimum di ujung retak juga akan semakin besar, yang diakibatkan karena konsentrasi tegangan yang terjadi juga semakin besar pula.
4. Dari ketiga *surface* yang diamati, maka *glass fiber composite surface* lah yang memiliki nilai tegangan yang paling tinggi, diikuti oleh *inner aluminium surface*, dan yang terakhir adalah *outer aluminium surface*. Tegangan yang terjadi pada setiap *surface* juga dipengaruhi oleh adanya regangan yang terjadi, sesuai dengan rumusan modulus elastisitas.

#### 5.2 Saran

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai distribusi tegangan dan delaminasi pada *fiber metal laminates* baik secara eksperimental maupun menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga.
2. Pemodelan bahan perekat antar lapisan pada *fiber metal laminates* perlu ditinjau kembali, dan dilakukan pengujian.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Anonim. (2002) *E, R and D Glass Properties*, Saint-Gobain Vetrotex, Germany
- Adhim, M. H. (2018). *Simulasi Pengaruh Rasio Tegangan dan Panjang Retak Terhadap Distribusi Tegangan pada Fiber Metal Laminates dengan Arah Orientasi 45°/-45°*. Malang: Universitas Brawijaya. Tidak Diterbitkan.
- Astika, I.M. (2012). *Analisa Delaminasi Pada Glass Fiber Reinforced Polymer Komposit Laminat Dengan Pembebanan Fatigue*. Teknik Mesin Fakultas Teknik Unud.
- Beer, F.P., Johnston, E.R., DeWolf, J.T., Mazurek, D.F., (2012). *Mechanics of Materials. Sixth Edition*. New York: McGraw Hill.
- Callister W.D. (2007). *Materials Science and Engineering. An Introduction. Seventh Edition*. United States of America: University of Utah
- Campbell, F.C., (2010). *Structural Composite Material*. Ohio: ASM International.
- Das, S., Choudhury, P., Halder, S., and Sriram, P. (2013). *Stress And Free Edge Delamination Analyses Of Delaminated Composite Structure Using ANSYS*. India: Indian Institute of Technology.
- Department of Defense Handbook. (2002). *Composite Materials Handbook Vol. 3 Polymer Matrix Composite Material Usage, Design, and Analysis*. United States of America.
- Ding, W., (1999). *Delamination Analysis of Composite Laminates*. Toronto: University of Toronto.
- Gibson, R.F., (1994). *Principles of Composite Material Mechanics*. United States of America: McGraw-Hill.
- Hasan C. & Gokmen A. (2011). *Vibration Analysis of Delaminated Composite Beams Using Analytical and FEM Models*. India: Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 18, pp. 7-14
- Ismoyo I. (1999) *Dokumen Riset INKA-Rosella Baru*, Litbang PTPN XI PK Rosella Baru, Surabaya.
- Jones, R.M. (1999). *Mechanics of Composite Materials*. Virginia: Taylor & Francis, Inc.
- Kanitkar, Y.M., Kulkarni, A.P., and Wangikar K.S. (2017). *Characterization of Glass Hybrid composite: A Review*. India: Vishwakarma Institute of Information Technology
- Khan S.U., Alderliesten R.C., and Benedictus R. (2009). *Delamination Growth In Fibre Metal Laminates Under Variable Amplitude Loading*. Netherland: Delft University of Technology
- Klárová M. (2015). *Composite Materials Study Support Coursebook / Textbook*. Ostrava

- repository.ub.ac.id
- Kumar, A. Agrawal, A. Ghadai, R. and Kalita K. (2016). *Analysis of Stress Concentration in Orthotropic Laminates*. India: Sikkim Manipal Institute of Technology.
- Kutlu, Zafer. Chang. (1995). *Composite Panels Containing Multiple Through-the-Width Delaminations and Subjected to Compression*. Part II: Experiments & Verification. *Composite Structures* 31 p.297-314.
- Madadi, H., and Farrokhabadi, A. (2018). *Development A Refined Numerical Model For Evaluating The Matrix Cracking And Induced Delamination Formation In Cross-Ply Composite Laminates*. Iran: Tarbiat Modares University.
- Mathur & Nirbay M., (2007). *Effect of Stress Ratio and Frequency on Fatigue Crack Growth Rate Of 2618 Aluminium Alloy Silicon Carbide Metal Matrix Composite*. *Bulletin of Materials Science*, Vol. 24, No. 2, pp.169-171: Indian Academy of Science.
- Mazumdar, S.K. (2002). *Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering*. Florida: CRC Press LLC.
- Mishnaevsky, L. (2007). *Composite Mesomechanics of Composites*. Technical University of Denmark. Denmark: CRC Press.
- Mohammdi, B. and Farhad S., (2015). *On Computational Modelling of Postbuckling Behavior of Composite Laminates Containing Single and Multiple Delamination using Interface Element with Cohesive Law*. *Engineering Fracture Mechanics*.
- Nayiroh, N. (2010). *Teknologi Material Komposit*. Bandung: Universitas Nurtanio Bandung.
- Ning H., Hisaq F. and Masaki K. (2006) *Identification of Delaminations in Composite Laminates*. *Jurnal of Intelligent Systems and Structures*, Vol. 17.
- Nijssen R.P.L. (2013). *Composieten: Basiskennis*. Holland: Hogeschool InHolland
- O'Brien, T.K., (1982). *Characterization of Delamination Onset and Growth in a Composite Laminate*. Philadelphia: American Society for Testing Material.
- Qiao, P. And Yang M. (2006). *Fatigue Life Prediction of Pultruded E-Glass / Polyurethane Composites*. United States of America: The University of Akron
- Rahmani, M., and Farrokhabadi, A. (2018). *Prediction Of Induced Delamination Development In  $[\theta/90]_s$  Composite Laminates Using A Computational Analytical Approach*. Iran: Tarbiat Modares University.
- Sakti, B. A. (2017). *Pengaruh Rasio Tegangan dan Panjang Retak Terhadap Distribusi Tegangan pada Fiber Metal Laminates*. Malang: Universitas Brawijaya. Tidak Diterbitkan
- Sari, S.N. (2017). *Pengaruh Amplitudo Tegangan dan Panjang Retak Terhadap Distribusi Tegangan Pada Fiber Metal Laminates dengan Menggunakan Finite Element Method*. Malang: Universitas Brawijaya. Tidak Diterbitkan.

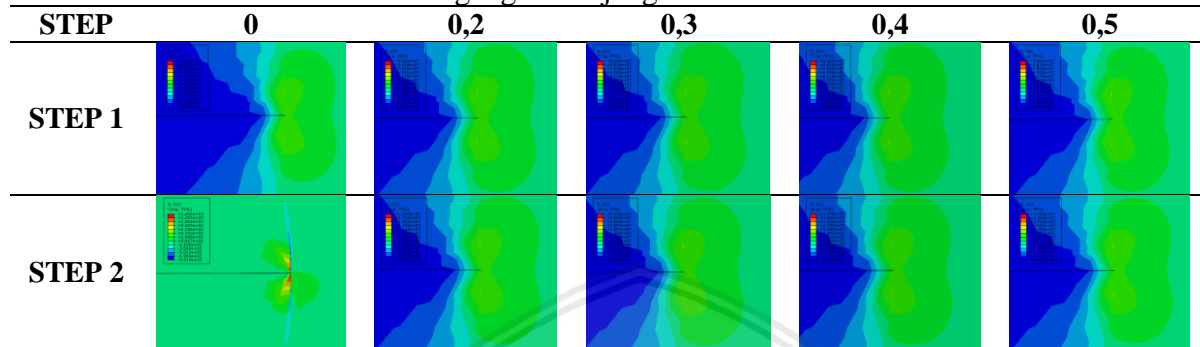


- Siddgonde, N. (2015). *Numerical Analysis of Low-Velocity Impact on Fibre Reinforced Laminated Composite Plates*. Khangpur: Indian Institute of Technology Khangpur.
- Sinmazçelik T., Avcu E., Bora M.O., and Çoban O. (2011). *A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods*. Turkey: Kocaeli University
- Stephens, R.I. Fatemi, A. Stephens R.R, Fuchs, H.O. (2000). *Metal Fatigue in Engineering*. Canada: John Wiley & Sons.
- Subekti, D. T. (2017). *Pengaruh Rasio Tegangan dan Amplitudo Stress Terhadap Karakteristik Perambatan Retak pada Fiber Metal Laminates*. Malang: Universitas Brawijaya. Tidak Diterbitkan.
- Sulistijono. (2012). *Mekanika Material Komposit*. Surabaya: ITS Press.
- Umar M.L., Hidayat M.I.P., dan Noerochim L., (2016). *Evaluasi Numerik untuk Delaminasi Tengah pada Pelat Komposit dengan Model Cohesive Zone*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).
- Wasseem, Mohammed, dan Kumar. (2014). *Finite Element Modelling for Delamination Analysis of Double Cantilever Beam Specimen*. India: SSRG-IJME.
- Wu H., (2007). *Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth Of Ti40 As*
- Yang, M. (2001). *Damage Tolerance and Durability of Fiber Metal Laminates for Aircraft Structures*. Los Angeles: Universitas California, Los Angeles.
- Yao, L., Sun Y., Guo L., Lyu X., Zhao M., Jia L. Alderliesten R.C., and Benedictus R. (2017). *Mode I fatigue delamination growth with fibre bridging in multidirectional composite laminates*. Netherland: Delft University of Technology.
- Zhai, Z., Groschel, C., and Drummer, D. (2016) *Tensile Behavior Of Quasi-Unidirectional Glass Fiber/Polypropylene Composites At Room And Elevated Temperatures*. Germany: Institute of Polymer Technology.

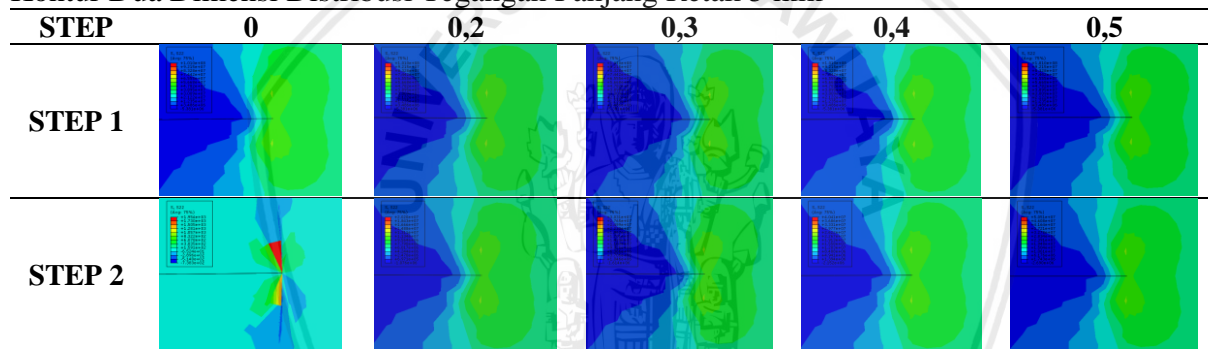
LAMPIRAN

Lampiran 1. Kontur *Inner Aluminium Surface*

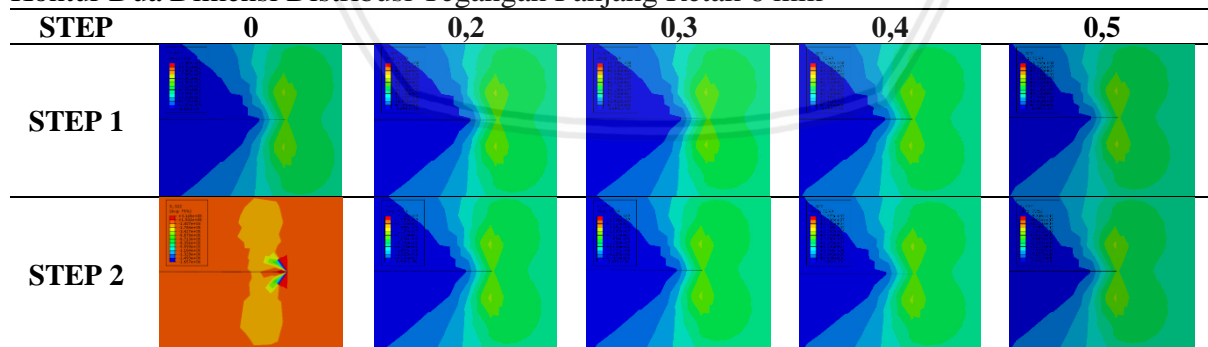
Tabel 1  
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 4 mm



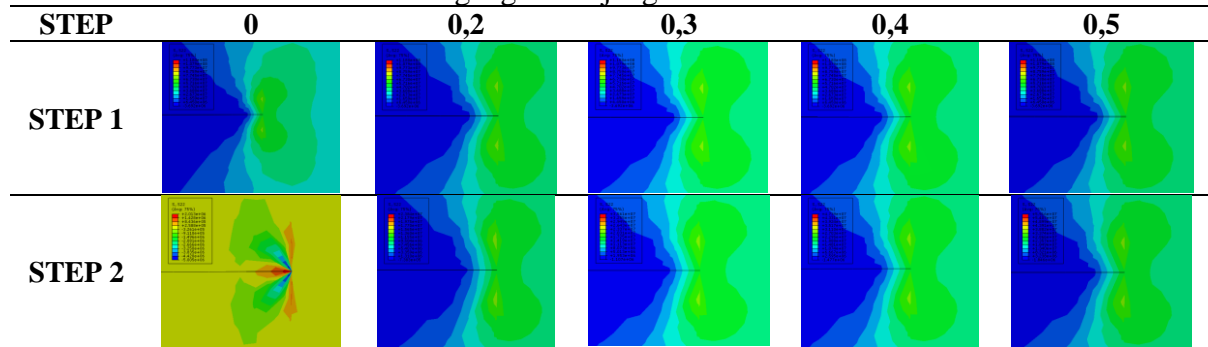
Tabel 2  
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 5 mm



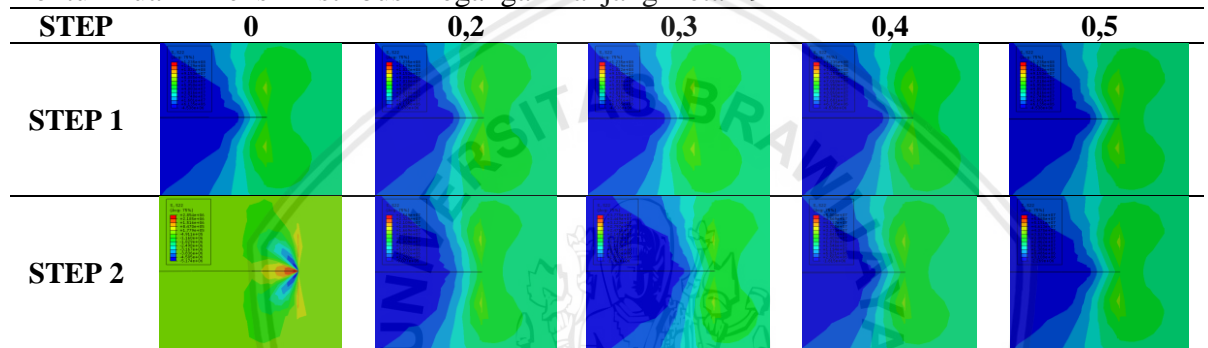
Tabel 3  
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 6 mm



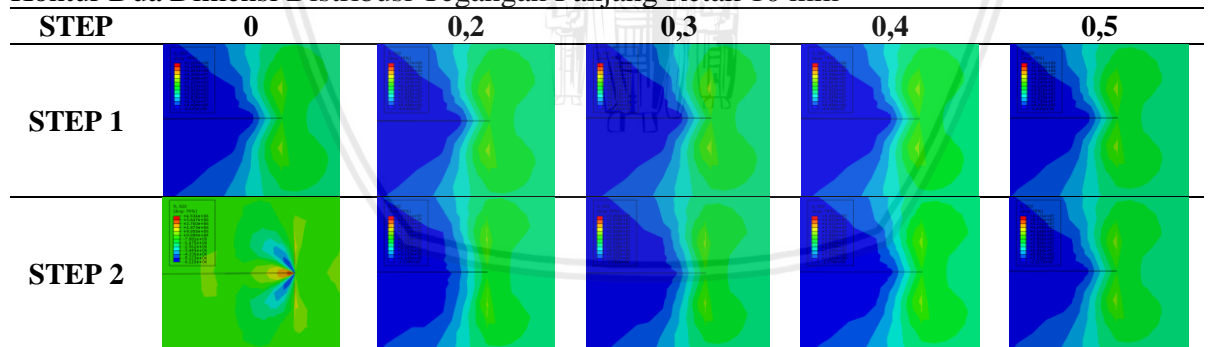
Tabel 4  
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 8 mm



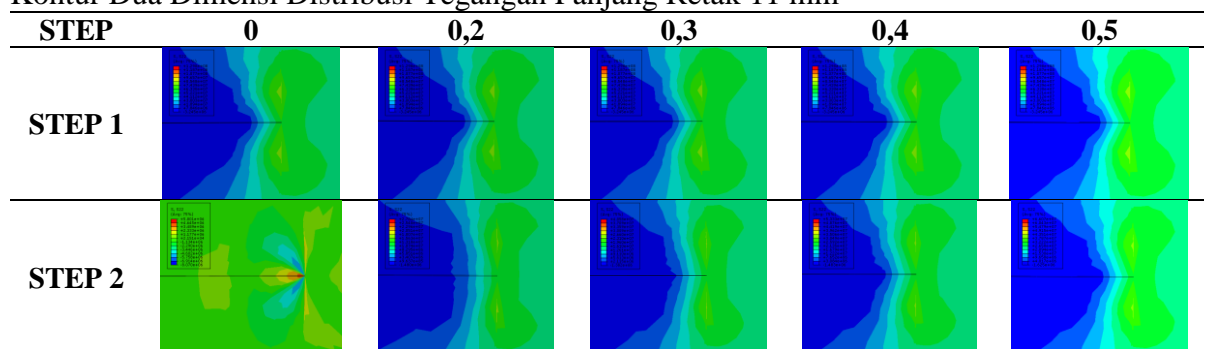
Tabel 5  
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 9 mm



Tabel 6  
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 10 mm

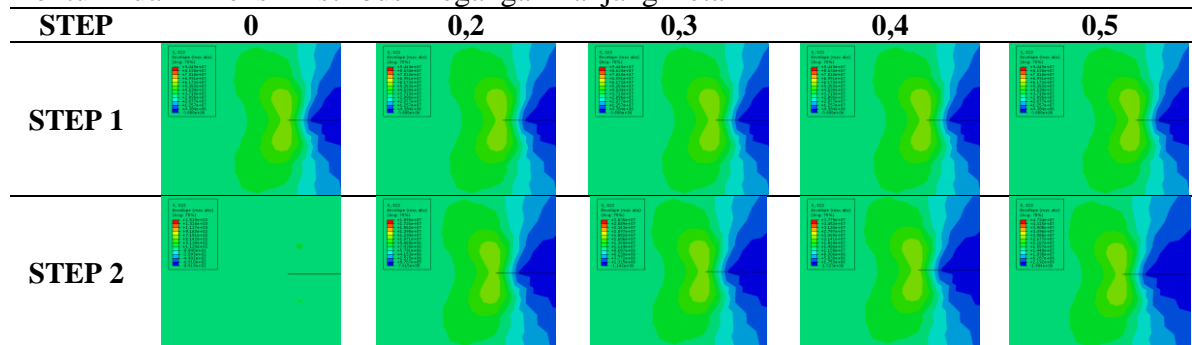


Tabel 7  
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 11 mm

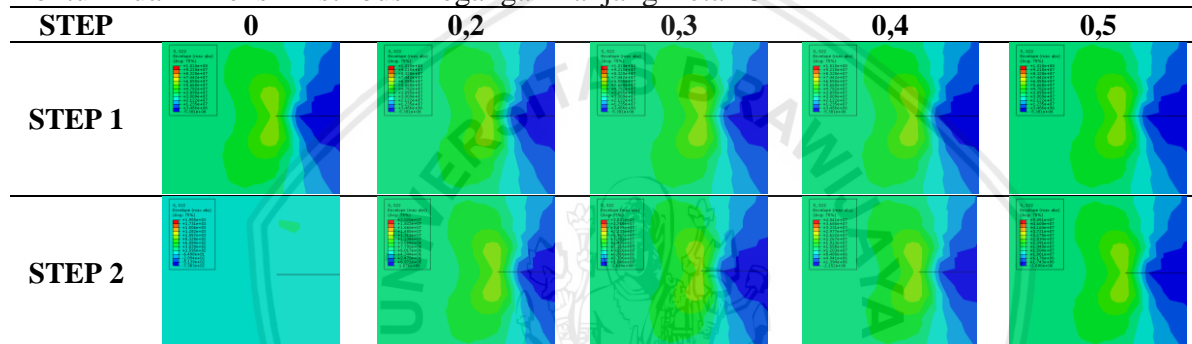


**Lampiran 2. Kontur Outer Aluminium Surface**

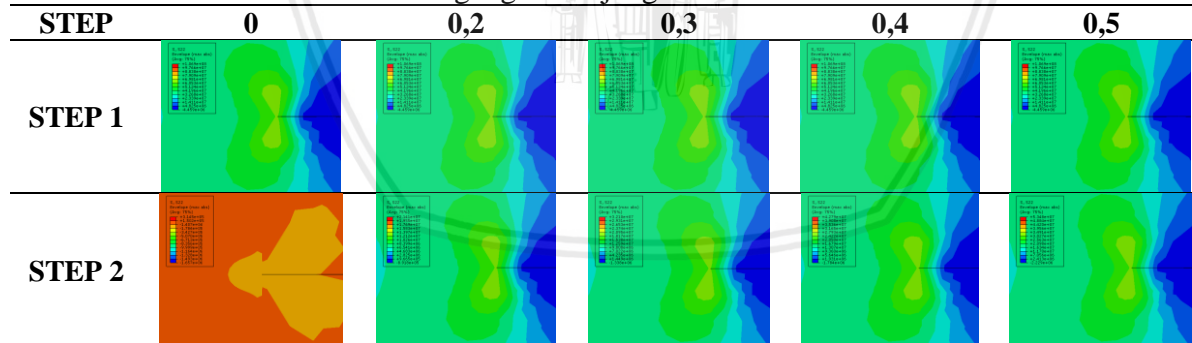
Tabel 8  
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 4 mm



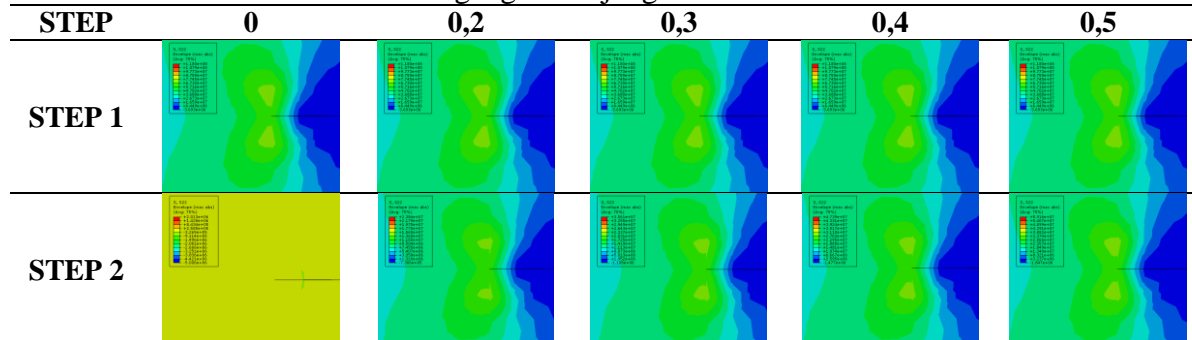
Tabel 9  
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 5 mm



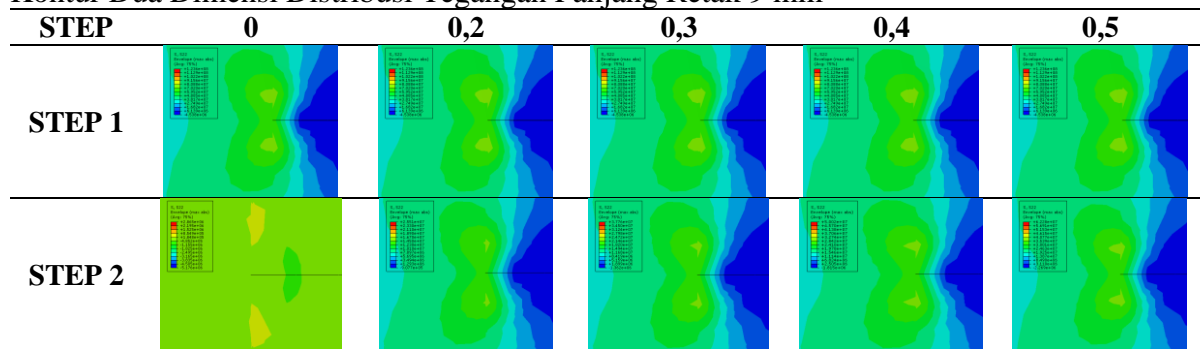
Tabel 10  
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 6 mm



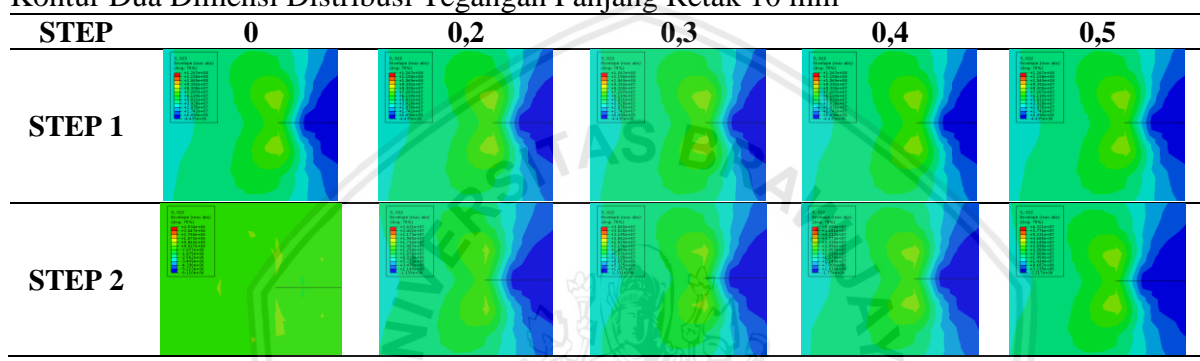
Tabel 11  
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 8 mm



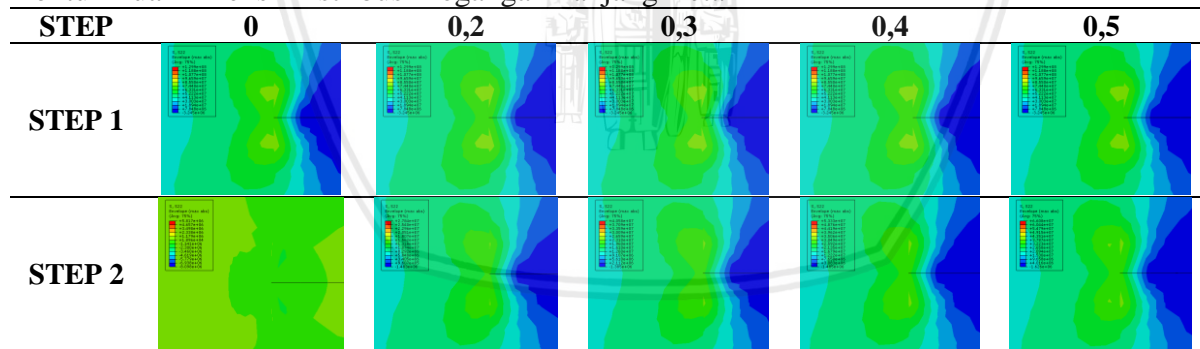
Tabel 12  
 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 9 mm



Tabel 13  
 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 10 mm



Tabel 14  
 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 11 mm

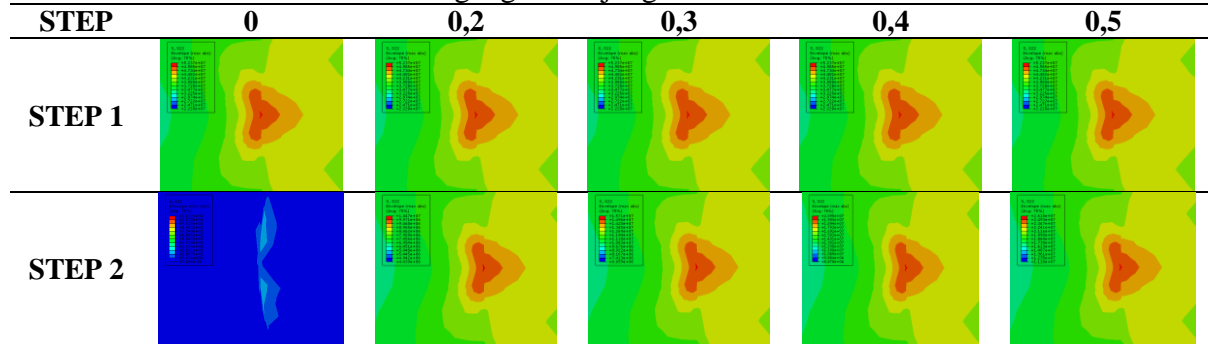




**Lampiran 3. Kontur Glass Fiber Composite Surface**

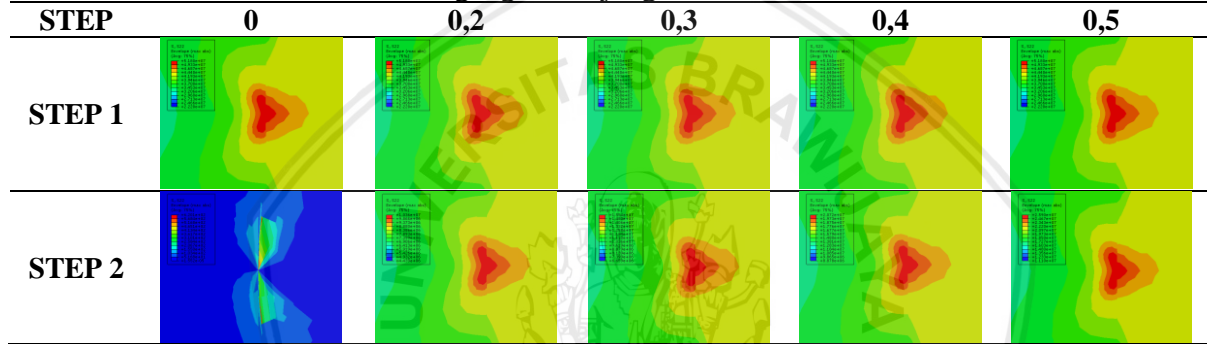
Tabel 15

Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 4 mm



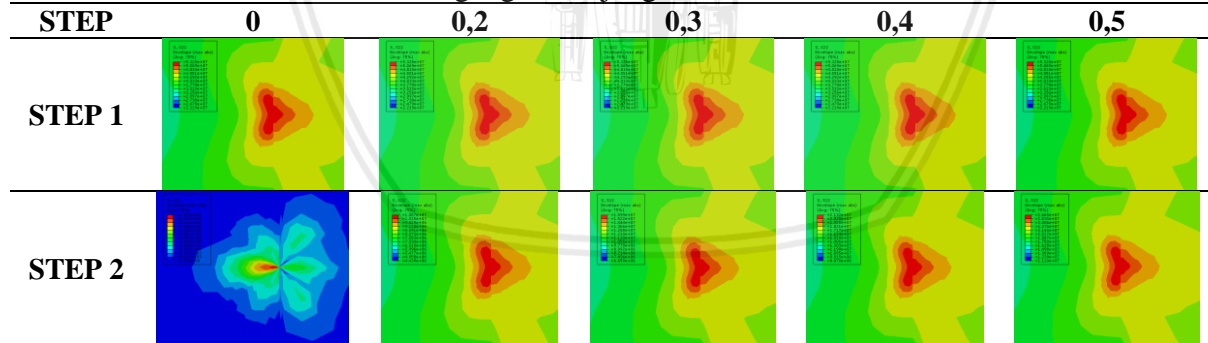
Tabel 16

Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 5 mm



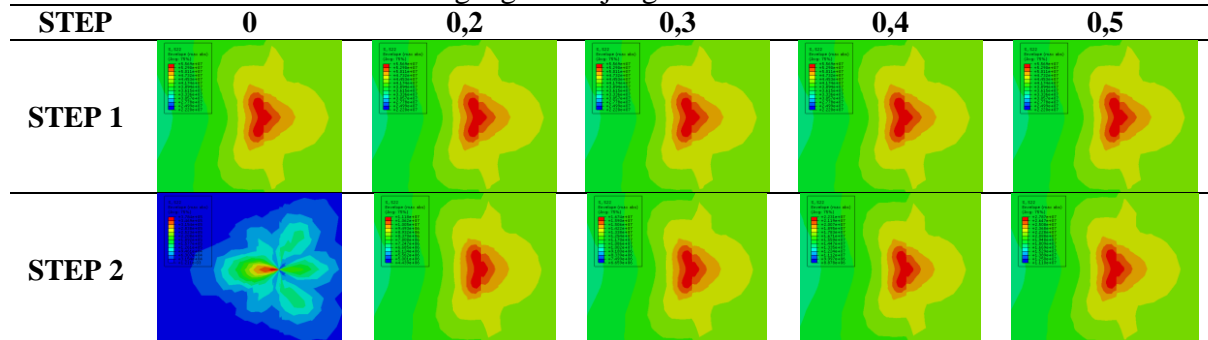
Tabel 17

Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 6 mm

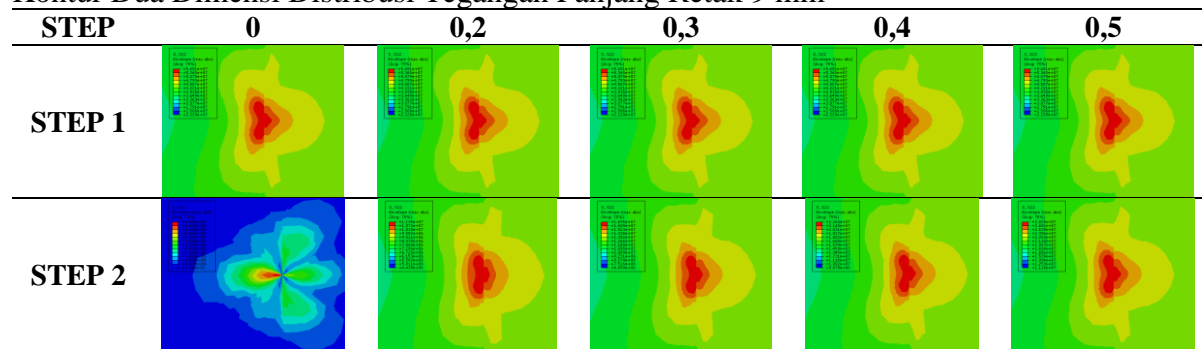


Tabel 18

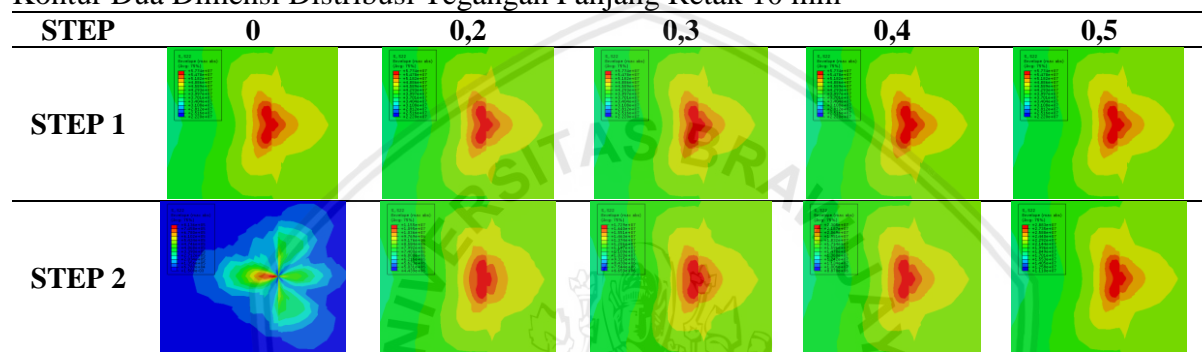
Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 8 mm



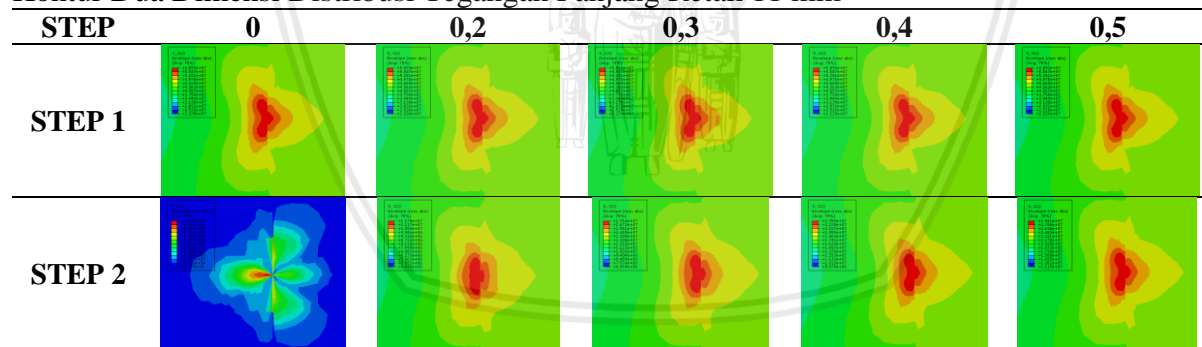
Tabel 19  
 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 9 mm



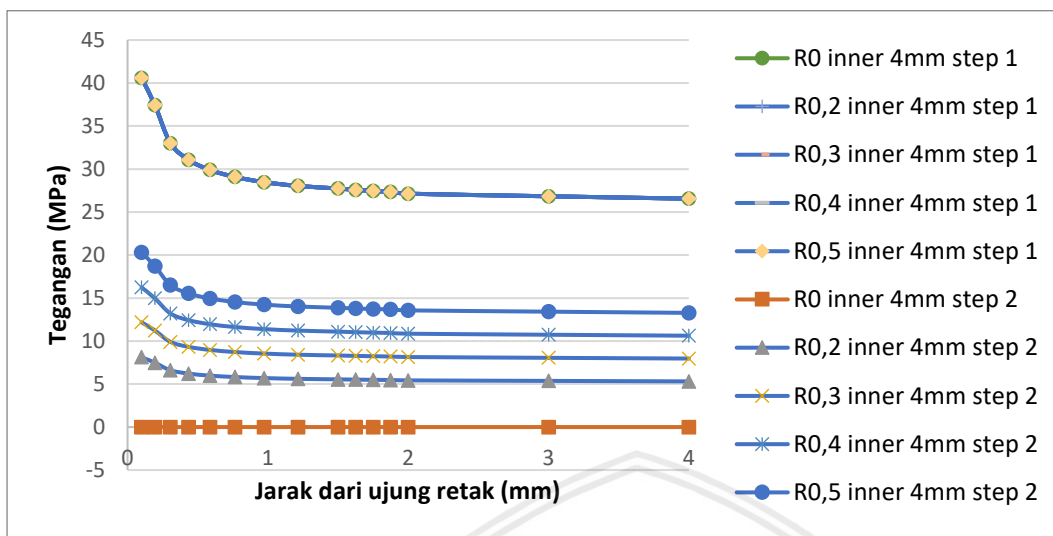
Tabel 20  
 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 10 mm



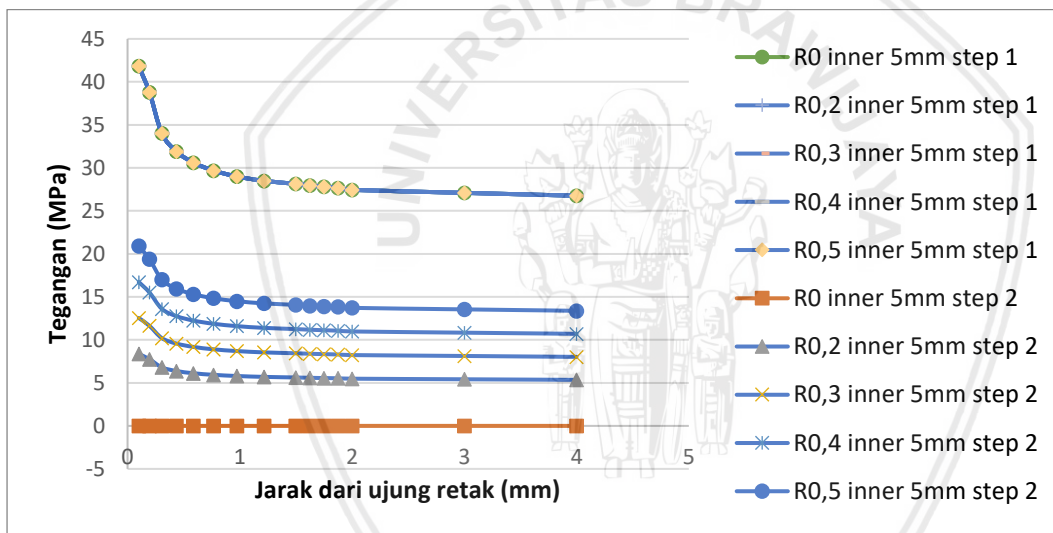
Tabel 21  
 Kontur Dua Dimensi Distribusi Tegangan Panjang Retak 11 mm



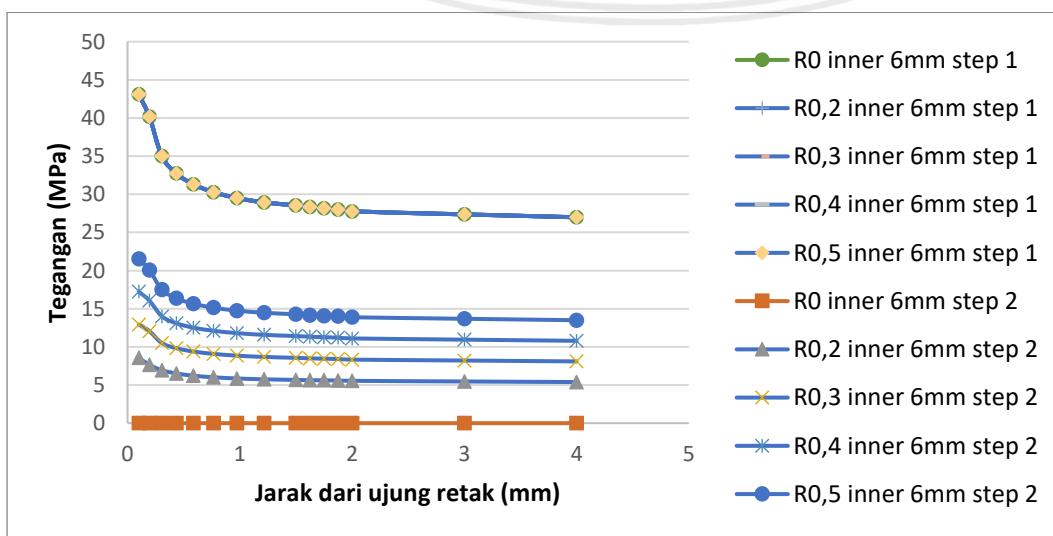
Lampiran 4. Grafik Distribusi Tegangan Pada *Inner Aluminium Surface*



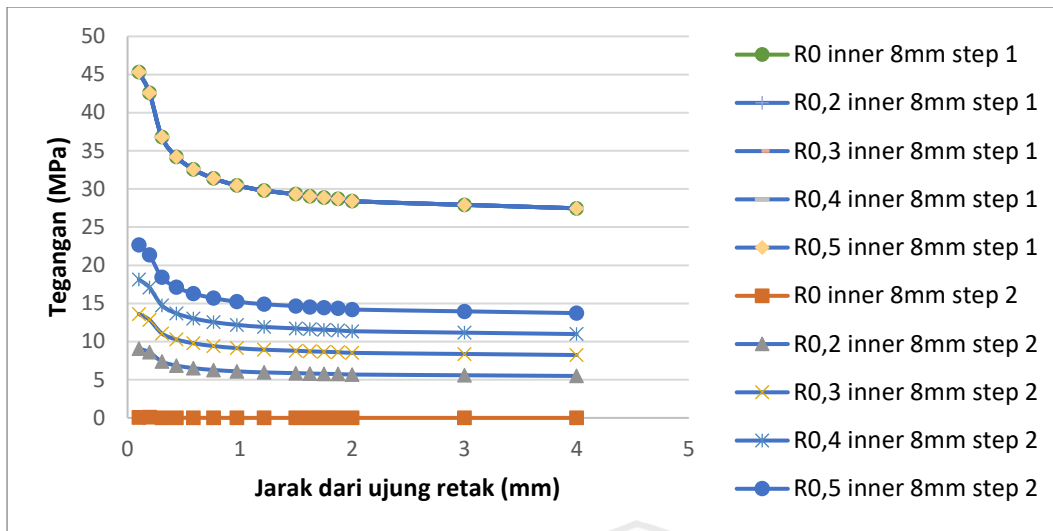
Gambar 1 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak pada panjang retak 4 mm



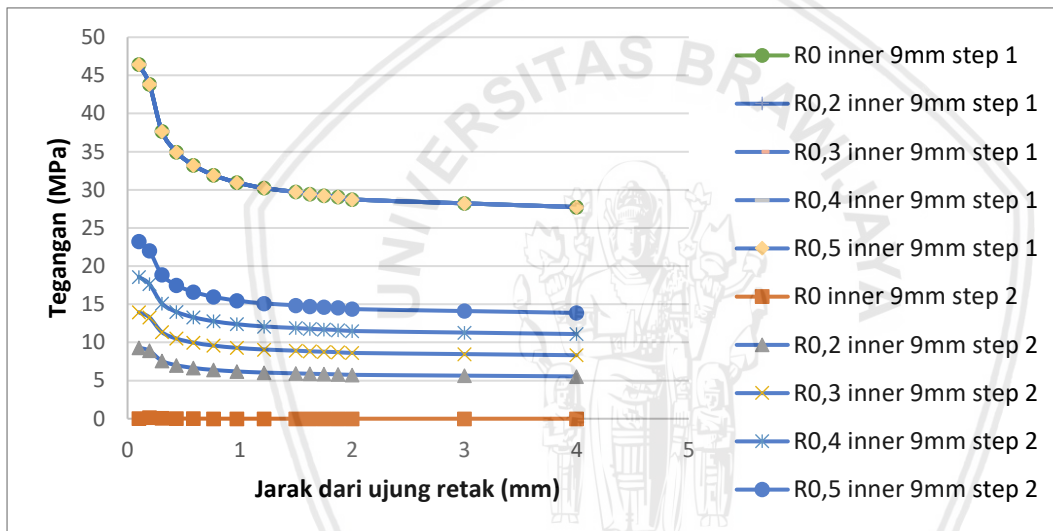
Gambar 2 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak pada panjang retak 5 mm



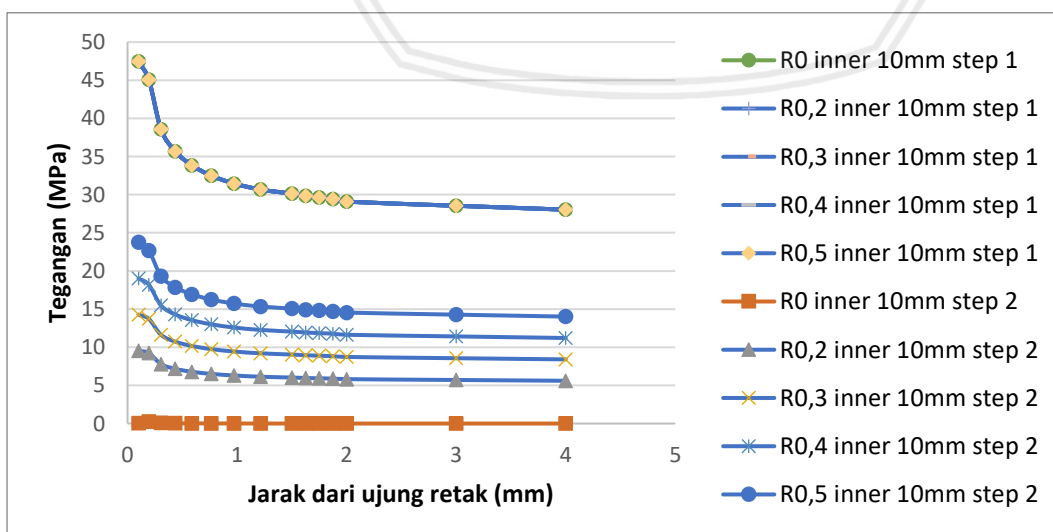
Gambar 3 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak pada panjang retak 6 mm



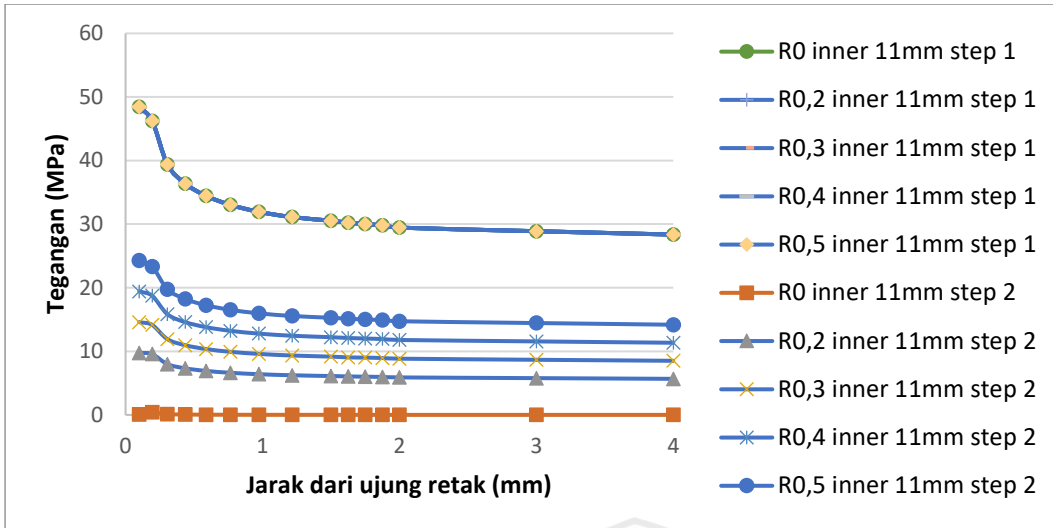
Gambar 4 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak pada panjang retak 8 mm



Gambar 5 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak pada panjang retak 9 mm

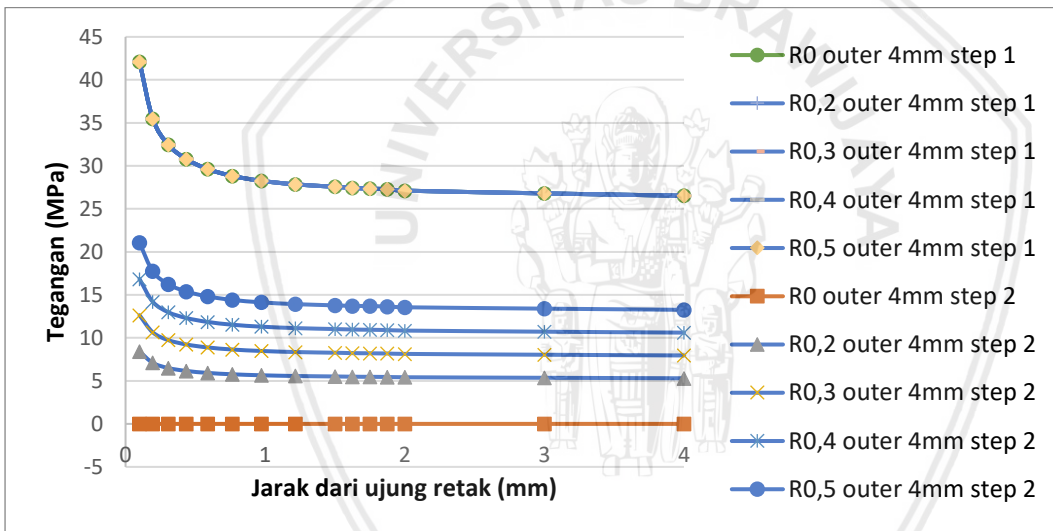


Gambar 6 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak pada panjang retak 10 mm

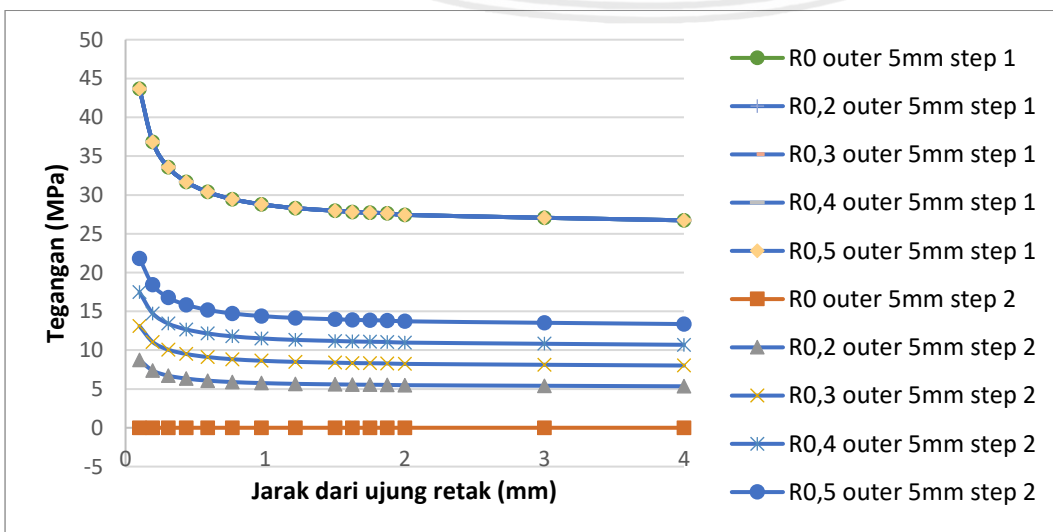


Gambar 7 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 11mm

**Lampiran 5. Grafik Distribusi Tegangan Pada *Outer Aluminium Surface***

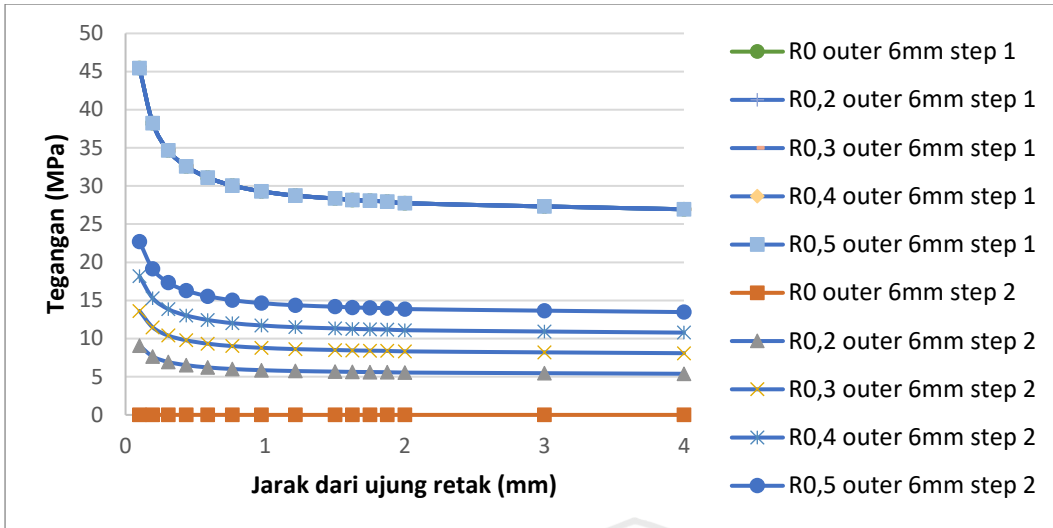


Gambar 8 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak pada panjang retak 4 mm

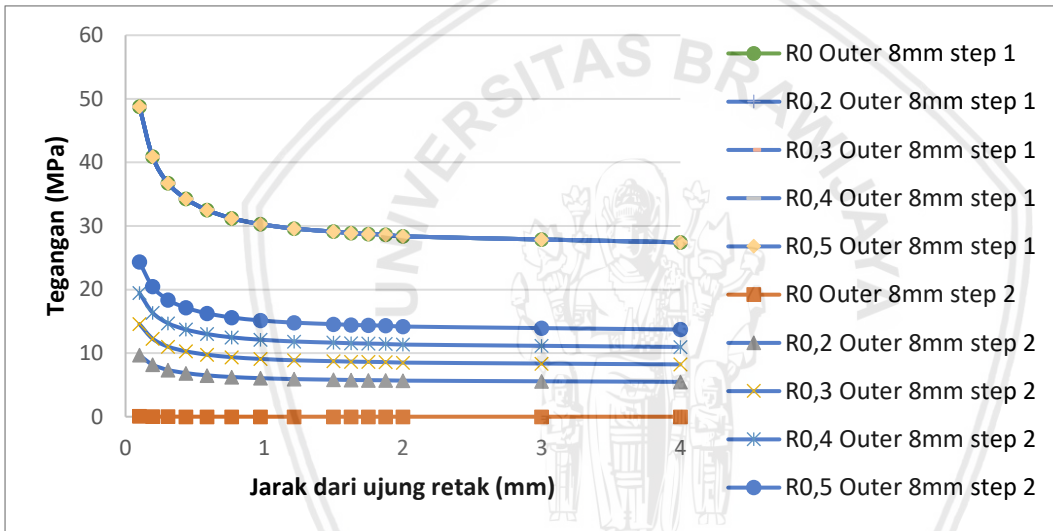


Gambar 9 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak pada panjang retak 5 mm

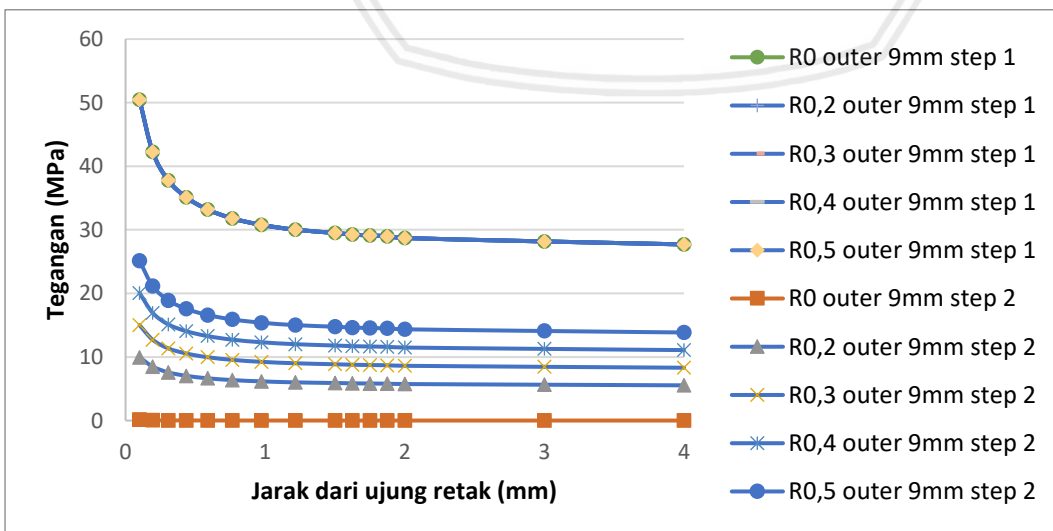




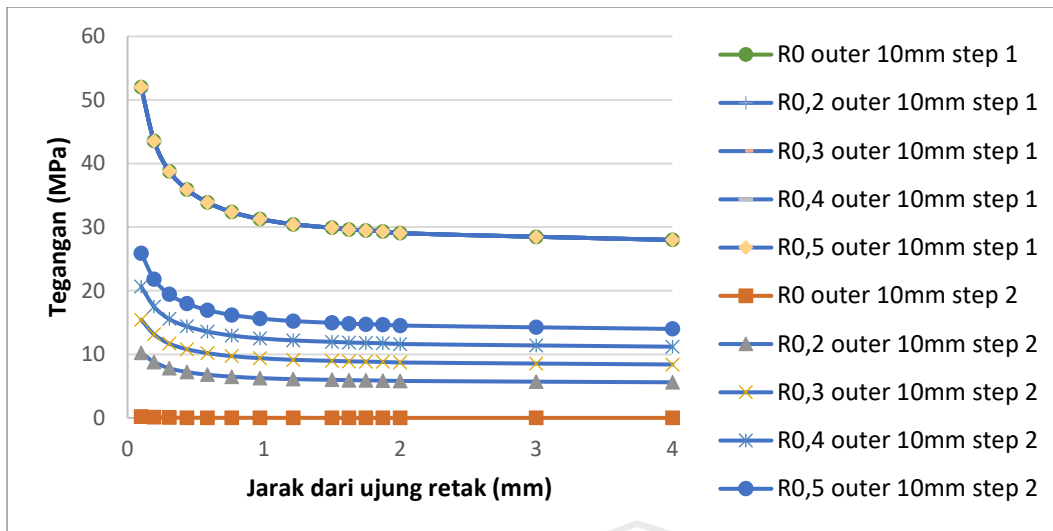
Gambar 10 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 6 mm



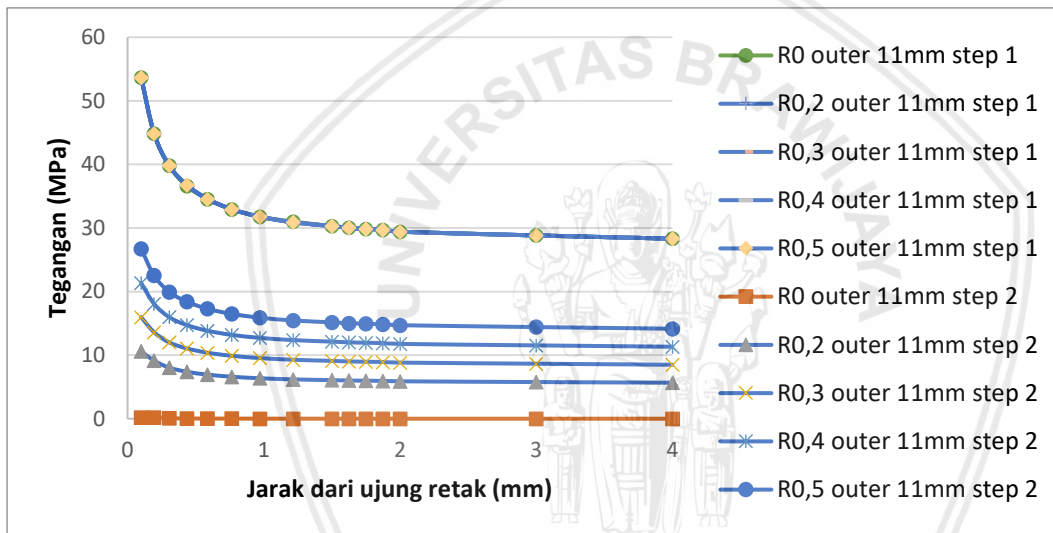
Gambar 11 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 8 mm



Gambar 12 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 9 mm

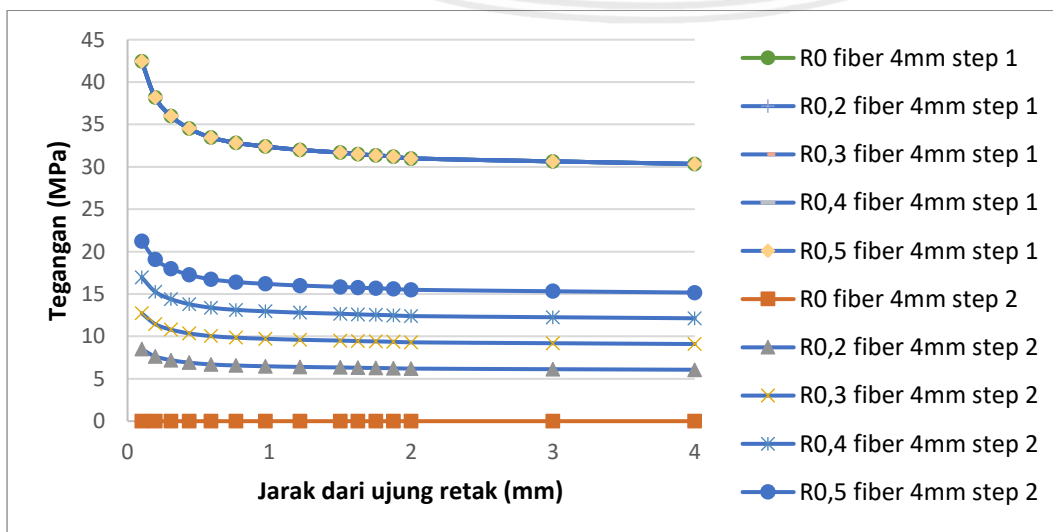


Gambar 13 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 10 mm

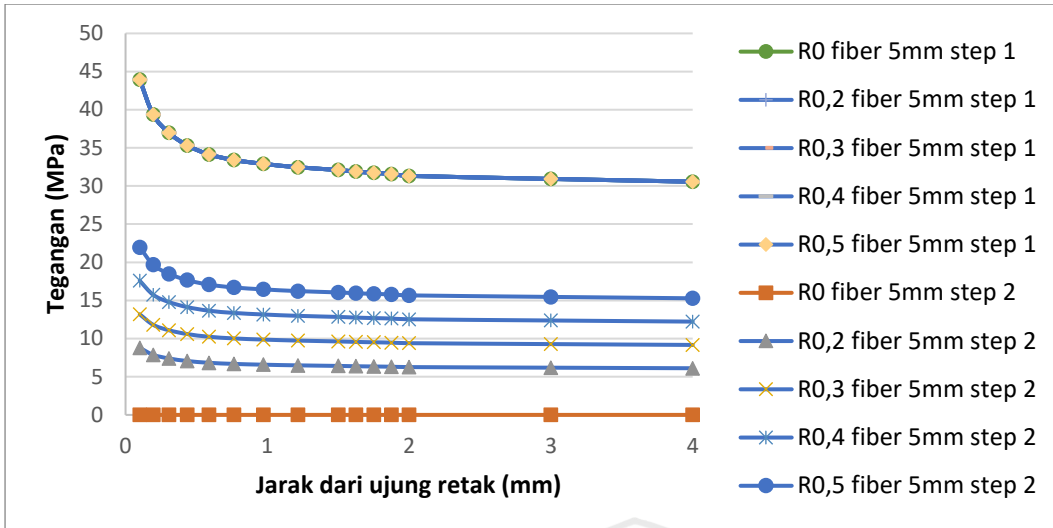


Gambar 14 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 11 mm

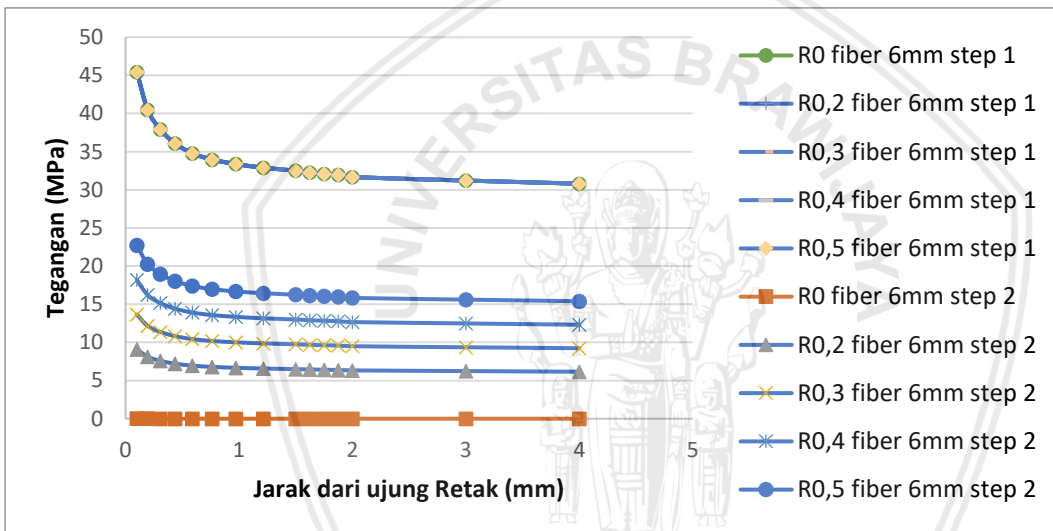
**Lampiran 6. Grafik Distribusi Tegangan Pada *Glass Fiber Composite Surface***



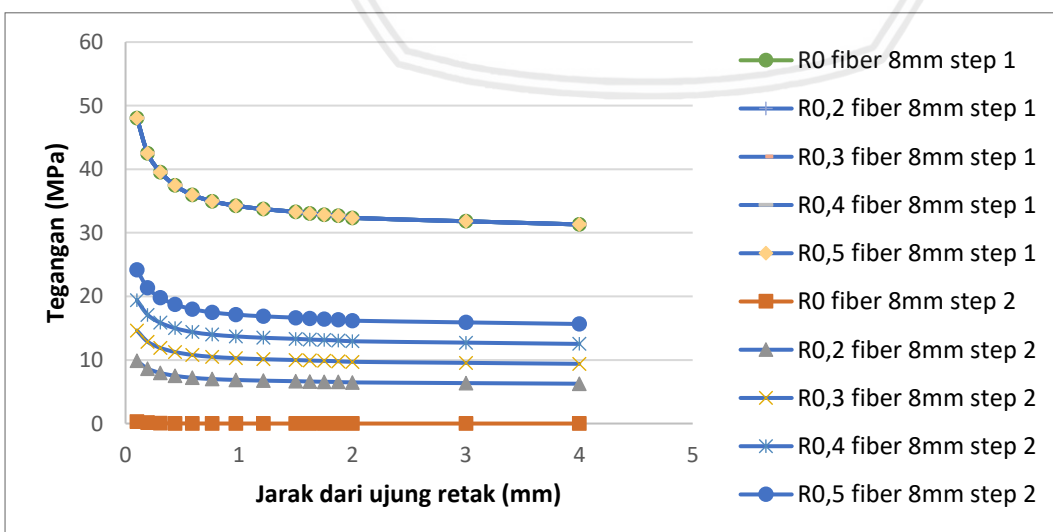
Gambar 15 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 4 mm



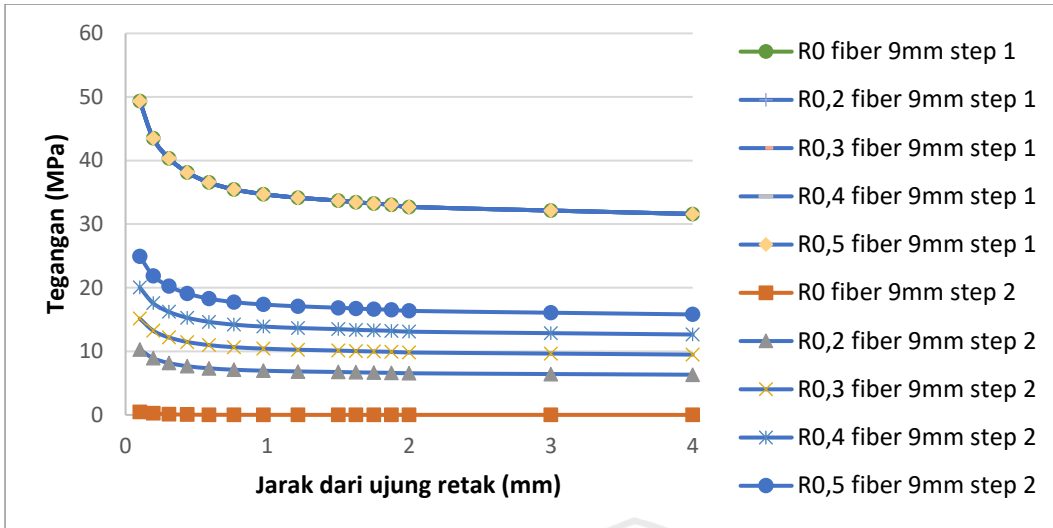
Gambar 16 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 5 mm



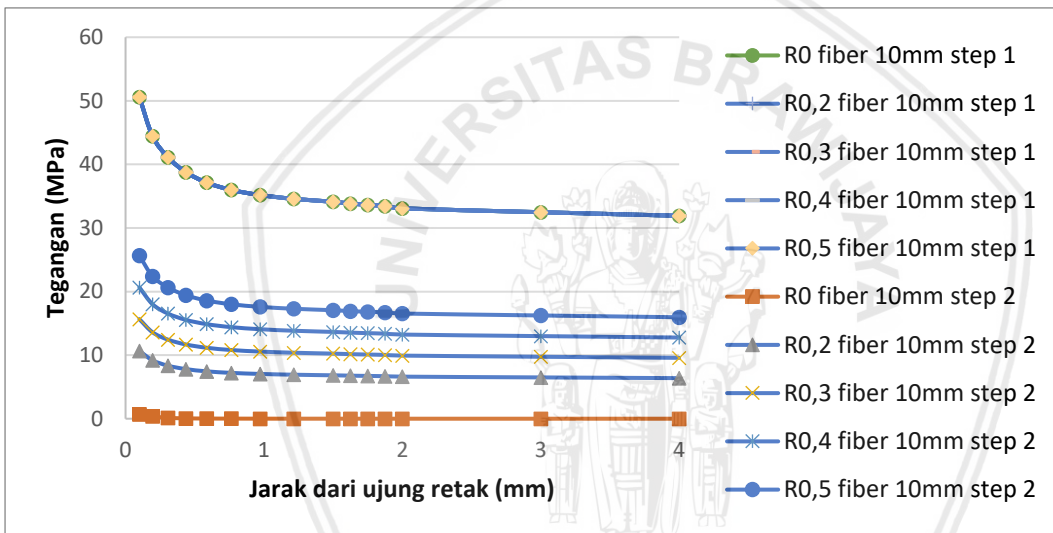
Gambar 17 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 6 mm



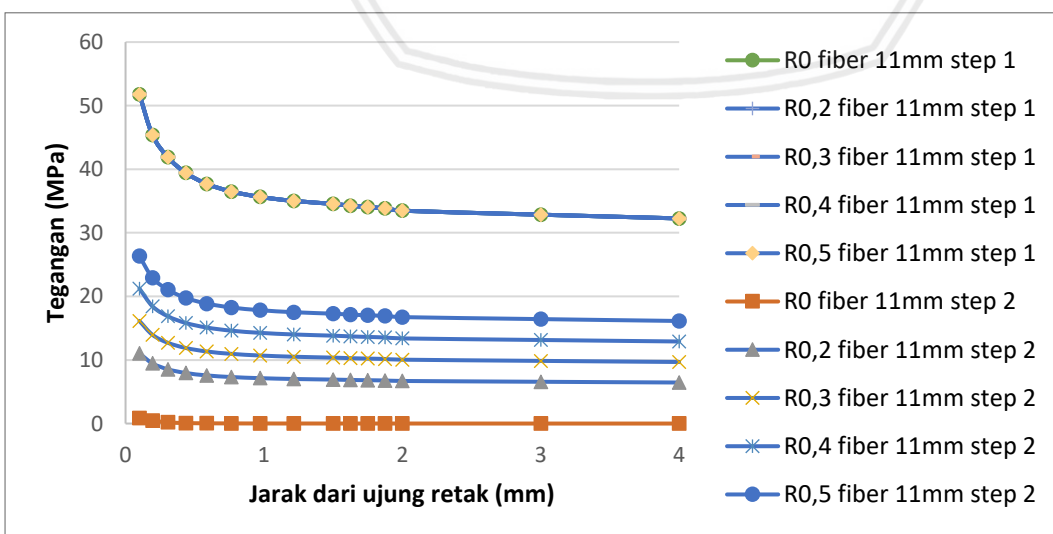
Gambar 18 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 8 mm



Gambar 19 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 9 mm



Gambar 20 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 10 mm



Gambar 21 Grafik distribusi tegangan terhadap jarak dari ujung retak panjang retak 11 mm

## Lampiran 7. Tabel Tegangan Pada *Inner Aluminium Surface*

### Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 3 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000	1	39,08356	39,08356	39,08356	39,08356	39,08356
0,19479		35,83299	35,83299	35,83299	35,83299	35,83299
0,30568		31,86335	31,86335	31,86335	31,86335	31,86335
0,43542		30,12543	30,12543	30,12543	30,12543	30,12543
0,58721		29,09876	29,09876	29,09876	29,09876	29,09876
0,7648		28,40104	28,40104	28,40104	28,40104	28,40104
0,97256		27,89384	27,89384	27,89384	27,89384	27,89384
1,21563		27,52605	27,52605	27,52605	27,52605	27,52605
1,5		27,28643	27,28643	27,28643	27,28643	27,28643
1,625		27,14798	27,14798	27,14798	27,14798	27,14798
1,75		27,05023	27,05023	27,05023	27,05023	27,05023
1,875		26,94819	26,94819	26,94819	26,94819	26,94819
2		26,7916	26,7916	26,7916	26,7916	26,7916
3		26,55918	26,55918	26,55918	26,55918	26,55918
4		26,33776	26,33776	26,33776	26,33776	26,33776
0,10000		2	6,12E-05	7,816763	11,72511	15,63347
0,19479	5,08E-07		7,166599	10,7499	14,3332	17,9165
0,30568	2,68E-06		6,372674	9,559009	12,74534	15,93168
0,43542	1,52E-06		6,025088	9,03763	12,05017	15,06272
0,58721	7,17E-07		5,819754	8,72963	11,63951	14,54938
0,7648	2,83E-07		5,68021	8,520314	11,36042	14,20052
0,97256	3,76E-07		5,57877	8,368154	11,15754	13,94692
1,21563	4,09E-07		5,505211	8,257815	11,01042	13,76302
1,5	3,25E-07		5,457287	8,18593	10,91457	13,64322
1,625	2,45E-07		5,429596	8,144394	10,85919	13,57399
1,75	2,12E-07		5,410048	8,11507	10,82009	13,52512
1,875	2,09E-07		5,38964	8,084459	10,77928	13,4741
2	1,45E-07		5,358321	8,03748	10,71664	13,3958
3	1,63E-08		5,311838	7,967756	10,62367	13,27959
4	-3,1E-09		5,267553	7,90133	10,53511	13,16888

### Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 4 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000	1	40,59622	40,59622	40,59622	40,59622	40,59622
0,19479		37,42844	37,42844	37,42844	37,42844	37,42844
0,30568		33,01382	33,01382	33,01382	33,01382	33,01382
0,43542		31,07101	31,07101	31,07101	31,07101	31,07101
0,58721		29,89567	29,89567	29,89567	29,89567	29,89567
0,7648		29,07978	29,07978	29,07978	29,07978	29,07978
0,97256		28,47714	28,47714	28,47714	28,47714	28,47714
1,21563		28,03225	28,03225	28,03225	28,03225	28,03225
1,5		27,7392	27,7392	27,7392	27,7392	27,7392
1,625		27,57376	27,57376	27,57376	27,57376	27,57376
1,75		27,45954	27,45954	27,45954	27,45954	27,45954
1,875		27,33416	27,33416	27,33416	27,33416	27,33416
2		27,13302	27,13302	27,13302	27,13302	27,13302
3		26,83553	26,83553	26,83553	26,83553	26,83553
4		26,55199	26,55199	26,55199	26,55199	26,55199



0,10000		6,59E-05	8,119307	12,17893	16,23855	20,29816
0,19479		2,3E-06	7,485689	11,22853	14,97138	18,71422
0,30568		3,73E-06	6,602768	9,904149	13,20553	16,50691
0,43542		2,16E-06	6,214205	9,321305	12,42841	15,53551
0,58721		1,02E-06	5,979136	8,968702	11,95827	14,94784
0,7648		3,73E-07	5,815958	8,723936	11,63191	14,53989
0,97256		3,59E-07	5,695429	8,543142	11,39086	14,23857
1,21563	2	3,42E-07	5,606451	8,409676	11,2129	14,01613
1,5		2,15E-07	5,547841	8,321761	11,09568	13,8696
1,625		1,17E-07	5,514754	8,27213	11,02951	13,78688
1,75		6,74E-08	5,491909	8,237862	10,98382	13,72977
1,875		7E-08	5,466833	8,200249	10,93366	13,66708
2		2,57E-08	5,426606	8,139908	10,85321	13,56651
3		-7,1E-08	5,367107	8,05066	10,73421	13,41777
4		-7E-08	5,310398	7,965596	10,6208	13,27599

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 5 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		41,82387	41,82387	41,82387	41,82387	41,82387
0,19479		38,79817	38,79817	38,79817	38,79817	38,79817
0,30568		34,01453	34,01453	34,01453	34,01453	34,01453
0,43542		31,90451	31,90451	31,90451	31,90451	31,90451
0,58721		30,60497	30,60497	30,60497	30,60497	30,60497
0,7648		29,6871	29,6871	29,6871	29,6871	29,6871
0,97256		29,00168	29,00168	29,00168	29,00168	29,00168
1,21563	1	28,48807	28,48807	28,48807	28,48807	28,48807
1,5		28,14319	28,14319	28,14319	28,14319	28,14319
1,625		27,94616	27,94616	27,94616	27,94616	27,94616
1,75		27,81058	27,81058	27,81058	27,81058	27,81058
1,875		27,66914	27,66914	27,66914	27,66914	27,66914
2		27,44369	27,44369	27,44369	27,44369	27,44369
3		27,09622	27,09622	27,09622	27,09622	27,09622
4		26,76081	26,76081	26,76081	26,76081	26,76081
0,10000		5,86E-05	8,364851	12,54724	16,72962	20,912
0,19479		3,05E-06	7,759639	11,63946	15,51927	19,39909
0,30568		5,76E-06	6,80291	10,20436	13,60581	17,00727
0,43542		3,99E-06	6,380905	9,571356	12,76181	15,95226
0,58721		2,15E-06	6,120996	9,181493	12,24199	15,30249
0,7648		1,21E-06	5,937422	8,906132	11,87484	14,84355
0,97256		1,23E-06	5,800337	8,700504	11,60067	14,50084
1,21563	2	1,2E-06	5,697615	8,546422	11,39523	14,24404
1,5		9,59E-07	5,628639	8,442958	11,25728	14,0716
1,625		7,61E-07	5,589233	8,383848	11,17846	13,97308
1,75		6,68E-07	5,562117	8,343174	11,12423	13,90529
1,875		6,49E-07	5,533829	8,300742	11,06766	13,83457
2		4,82E-07	5,488739	8,233109	10,97748	13,72185
3		1,51E-07	5,419245	8,128867	10,83849	13,54811
4		5,86E-08	5,352162	8,023576	10,70432	13,3804

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 6 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		43,0958	43,0958	43,0958	43,0958	43,0958
0,19479		40,15634	40,15634	40,15634	40,15634	40,15634
0,30568		35,00268	35,00268	35,00268	35,00268	35,00268
0,43542		32,72096	32,72096	32,72096	32,72096	32,72096
0,58721		31,29642	31,29642	31,29642	31,29642	31,29642
0,7648		30,27851	30,27851	30,27851	30,27851	30,27851
0,97256		29,51307	29,51307	29,51307	29,51307	29,51307
1,21563	1	28,93485	28,93485	28,93485	28,93485	28,93485
1,5		28,54543	28,54543	28,54543	28,54543	28,54543
1,625		28,32502	28,32502	28,32502	28,32502	28,32502
1,75		28,17426	28,17426	28,17426	28,17426	28,17426
1,875		28,0163	28,0163	28,0163	28,0163	28,0163
2		27,76147	27,76147	27,76147	27,76147	27,76147
3		27,3667	27,3667	27,3667	27,3667	27,3667
4		26,98557	26,98557	26,98557	26,98557	26,98557
0,10000		0,007565	8,579763	12,93365	17,2426	21,55154
0,19479		0,012038	7,651044	12,05493	16,06943	20,08393
0,30568		0,004133	6,932685	10,50354	14,00342	17,50331
0,43542		0,002022	6,515011	9,817621	13,08953	16,36144
0,58721		0,001103	6,223036	9,389652	12,51919	15,64873
0,7648		0,000659	6,012335	9,083985	12,11177	15,13956
0,97256		0,000422	5,861041	8,8542	11,80547	14,75673
1,21563	2	0,000286	5,74782	8,680643	11,5741	14,46756
1,5		0,000207	5,672138	8,563764	11,41829	14,27281
1,625		0,000171	5,634542	8,497618	11,3301	14,16259
1,75		0,000152	5,612904	8,452376	11,26979	14,0872
1,875		0,000134	5,593227	8,404978	11,2066	14,00821
2		0,000108	5,548595	8,328511	11,10465	13,88079
3		6,98E-05	5,464387	8,210055	10,94672	13,68338
4		4,3E-05	5,390375	8,095699	10,79425	13,49281

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 7 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		44,26843	44,26843	44,26843	44,26843	44,26843
0,19479		41,43181	41,43181	41,43181	41,43181	41,43181
0,30568		35,93316	35,93316	35,93316	35,93316	35,93316
0,43542		33,49282	33,49282	33,49282	33,49282	33,49282
0,58721		31,95301	31,95301	31,95301	31,95301	31,95301
0,7648		30,84329	30,84329	30,84329	30,84329	30,84329
0,97256		30,004	30,004	30,004	30,004	30,004
1,21563	1	29,36658	29,36658	29,36658	29,36658	29,36658
1,5		28,93614	28,93614	28,93614	28,93614	28,93614
1,625		28,69442	28,69442	28,69442	28,69442	28,69442
1,75		28,52998	28,52998	28,52998	28,52998	28,52998
1,875		28,3578	28,3578	28,3578	28,3578	28,3578
2		28,07724	28,07724	28,07724	28,07724	28,07724
3		27,64045	27,64045	27,64045	27,64045	27,64045
4		27,21944	27,21944	27,21944	27,21944	27,21944

0,10000		0,025338	8,871373	13,29595	17,72052	22,14508
0,19479		0,047003	8,322251	12,46094	16,59962	20,7383
0,30568		0,015957	7,198637	10,79045	14,38225	17,97406
0,43542		0,007835	6,704484	10,05302	13,40156	16,7501
0,58721		0,004292	6,393854	9,588747	12,78364	15,97854
0,7648		0,002574	6,170613	9,254698	12,33878	15,42287
0,97256		0,001641	6,002048	9,002292	12,00254	15,00278
1,21563	2	0,001117	5,874167	8,810718	11,74727	14,68382
1,5		0,000809	5,787842	8,681379	11,57492	14,46845
1,625		0,000668	5,739387	8,608766	11,47814	14,34752
1,75		0,000587	5,706438	8,559381	11,41232	14,26527
1,875		0,000526	5,671956	8,507686	11,34342	14,17915
2		0,00042	5,615763	8,423448	11,23113	14,03882
3		0,000271	5,528291	8,292311	11,05633	13,82035
4		0,000168	5,444013	8,165942	10,88787	13,6098

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 8 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		45,32566	45,32566	45,32566	45,32566	45,32566
0,19479		42,62211	42,62211	42,62211	42,62211	42,62211
0,30568		36,80157	36,80157	36,80157	36,80157	36,80157
0,43542		34,21942	34,21942	34,21942	34,21942	34,21942
0,58721		32,57764	32,57764	32,57764	32,57764	32,57764
0,7648		31,38604	31,38604	31,38604	31,38604	31,38604
0,97256		30,4811	30,4811	30,4811	30,4811	30,4811
1,21563	1	29,79075	29,79075	29,79075	29,79075	29,79075
1,5		29,32371	29,32371	29,32371	29,32371	29,32371
1,625		29,0632	29,0632	29,0632	29,0632	29,0632
1,75		28,88698	28,88698	28,88698	28,88698	28,88698
1,875		28,70253	28,70253	28,70253	28,70253	28,70253
2		28,39954	28,39954	28,39954	28,39954	28,39954
3		27,92565	27,92565	27,92565	27,92565	27,92565
4		27,46958	27,46958	27,46958	27,46958	27,46958
0,10000		0,043051	9,093903	13,62286	18,15181	22,68076
0,19479		0,098566	8,599999	12,85276	17,10552	21,35827
0,30568		0,032936	7,385334	11,06236	14,73939	18,41641
0,43542		0,016136	6,856253	10,27665	13,69704	17,11744
0,58721		0,008838	6,522346	9,779258	13,03617	16,29308
0,7648		0,005288	6,281314	9,419404	12,5575	15,69559
0,97256		0,003364	6,098849	9,14663	12,19441	15,24219
1,21563	2	0,002288	5,959943	8,938794	11,91765	14,8965
1,5		0,001657	5,866032	8,798242	11,73045	14,66266
1,625		0,001366	5,813699	8,719887	11,62608	14,53226
1,75		0,001201	5,778323	8,666905	11,55549	14,44407
1,875		0,001078	5,741339	8,611488	11,48164	14,35179
2		0,00086	5,680568	8,52044	11,36031	14,20018
3		0,000556	5,585548	8,378061	11,17057	13,96309
4		0,000347	5,494175	8,2411	10,98803	13,73495

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 9 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		46,42434	46,42434	46,42434	46,42434	46,42434
0,19479		43,85537	43,85537	43,85537	43,85537	43,85537
0,30568		37,69015	37,69015	37,69015	37,69015	37,69015
0,43542		34,9592	34,9592	34,9592	34,9592	34,9592
0,58721		33,21317	33,21317	33,21317	33,21317	33,21317
0,7648		31,93921	31,93921	31,93921	31,93921	31,93921
0,97256		30,96904	30,96904	30,96904	30,96904	30,96904
1,21563	1	30,22643	30,22643	30,22643	30,22643	30,22643
1,5		29,72362	29,72362	29,72362	29,72362	29,72362
1,625		29,44444	29,44444	29,44444	29,44444	29,44444
1,75		29,25699	29,25699	29,25699	29,25699	29,25699
1,875		29,0603	29,0603	29,0603	29,0603	29,0603
2		28,73548	28,73548	28,73548	28,73548	28,73548
3		28,22825	28,22825	28,22825	28,22825	28,22825
4		27,74072	27,74072	27,74072	27,74072	27,74072
0,10000		0,050953	9,320136	13,95709	18,59505	23,23312
0,19479		0,179429	8,91295	13,28053	17,64837	22,01619
0,30568		0,056971	7,583114	11,34636	15,10973	18,87314
0,43542		0,02746	7,0138	10,50694	14,00012	17,4933
0,58721		0,014987	6,654721	9,974524	13,29433	16,61414
0,7648		0,00888	6,395071	9,588092	12,78111	15,97413
0,97256		0,005602	6,198411	9,294744	12,39107	15,4874
1,21563	2	0,003793	6,048415	9,070672	12,09293	15,11518
1,5		0,002743	5,946974	8,919058	11,89114	14,86322
1,625		0,002262	5,890735	8,83495	11,77916	14,72338
1,75		0,001993	5,853024	8,778522	11,70402	14,62951
1,875		0,001782	5,813515	8,719365	11,62521	14,53106
2		0,001425	5,748253	8,621658	11,49506	14,36846
3		0,000925	5,646387	8,46912	11,29185	14,11459
4		0,000581	5,548603	8,322617	11,09663	13,87065

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 10 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		47,45837	47,45837	47,45837	47,45837	47,45837
0,19479		45,06148	45,06148	45,06148	45,06148	45,06148
0,30568		38,55455	38,55455	38,55455	38,55455	38,55455
0,43542		35,6826	35,6826	35,6826	35,6826	35,6826
0,58721		33,83888	33,83888	33,83888	33,83888	33,83888
0,7648		32,48771	32,48771	32,48771	32,48771	32,48771
0,97256		31,45604	31,45604	31,45604	31,45604	31,45604
1,21563	1	30,66459	30,66459	30,66459	30,66459	30,66459
1,5		30,12833	30,12833	30,12833	30,12833	30,12833
1,625		29,8321	29,8321	29,8321	29,8321	29,8321
1,75		29,63447	29,63447	29,63447	29,63447	29,63447
1,875		29,42736	29,42736	29,42736	29,42736	29,42736
2		29,08356	29,08356	29,08356	29,08356	29,08356
3		28,54689	28,54689	28,54689	28,54689	28,54689
4		28,03343	28,03343	28,03343	28,03343	28,03343

0,10000		0,064026	9,537078	14,27592	19,01544	23,75577
0,19479		0,282927	9,236686	13,71448	18,19242	22,67054
0,30568		0,088363	7,781172	11,62767	15,47426	19,32096
0,43542		0,042158	7,170309	10,73431	14,29832	17,86236
0,58721		0,022933	6,786271	10,16784	13,54941	16,93099
0,7648		0,013506	6,508522	9,755922	13,00332	16,25072
0,97256		0,00848	6,298159	9,442898	12,58763	15,73237
1,21563	2	0,005739	6,137637	9,203511	12,26938	15,33525
1,5		0,004162	6,029072	9,041483	12,05389	15,0663
1,625		0,003441	5,969224	8,952086	11,93495	14,91781
1,75		0,003039	5,929368	8,892509	11,85565	14,81879
1,875		0,002719	5,887686	8,830147	11,77261	14,71507
2		0,002181	5,818481	8,726617	11,63475	14,54289
3		0,001431	5,710519	8,565065	11,41961	14,27416
4		0,000909	5,607407	8,410659	11,21391	14,01716

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 11 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		48,46428	48,46428	48,46428	48,46428	48,46428
0,19479		46,24357	46,24357	46,24357	46,24357	46,24357
0,30568		39,40018	39,40018	39,40018	39,40018	39,40018
0,43542		36,39164	36,39164	36,39164	36,39164	36,39164
0,58721		34,45541	34,45541	34,45541	34,45541	34,45541
0,7648		33,03217	33,03217	33,03217	33,03217	33,03217
0,97256		31,94427	31,94427	31,94427	31,94427	31,94427
1,21563	1	31,10882	31,10882	31,10882	31,10882	31,10882
1,5		30,54288	30,54288	30,54288	30,54288	30,54288
1,625		30,23203	30,23203	30,23203	30,23203	30,23203
1,75		30,0259	30,0259	30,0259	30,0259	30,0259
1,875		29,81014	29,81014	29,81014	29,81014	29,81014
2		29,45106	29,45106	29,45106	29,45106	29,45106
3		28,89089	28,89089	28,89089	28,89089	28,89089
4		28,35872	28,35872	28,35872	28,35872	28,35872
0,10000		0,081038	9,749792	14,58759	19,42564	24,26429
0,19479		0,398546	9,564601	14,14906	18,73362	23,31834
0,30568		0,125342	7,979937	11,90729	15,83465	19,76208
0,43542		0,05932	7,326021	10,95919	14,59236	18,22554
0,58721		0,032124	6,917108	10,3594	13,80169	17,24397
0,7648		0,018774	6,621806	9,923116	13,22442	16,52572
0,97256		0,011744	6,398577	9,591804	12,78502	15,97824
1,21563	2	0,007934	6,228353	9,338425	12,44849	15,55855
1,5		0,005765	6,11333	9,167033	12,22073	15,27443
1,625		0,00478	6,050326	9,04187	12,09576	15,11848
1,75		0,004233	6,008643	9,010806	12,01297	15,01512
1,875		0,003787	5,965131	8,945763	11,92639	14,90702
2		0,00305	5,892699	8,837498	11,7823	14,72709
3		0,002022	5,779792	8,668678	11,55757	14,44645
4		0,001301	5,672778	8,508521	11,34426	14,18001



Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 12 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		49,52602	49,52602	49,52602	49,52602	49,52602
0,19479		47,49292	47,49292	47,49292	47,49292	47,49292
0,30568		40,29749	40,29749	40,29749	40,29749	40,29749
0,43542		37,14724	37,14724	37,14724	37,14724	37,14724
0,58721		35,11594	35,11594	35,11594	35,11594	35,11594
0,7648		33,61886	33,61886	33,61886	33,61886	33,61886
0,97256		32,47331	32,47331	32,47331	32,47331	32,47331
1,21563	1	31,593	31,593	31,593	31,593	31,593
1,5		30,99689	30,99689	30,99689	30,99689	30,99689
1,625		30,67112	30,67112	30,67112	30,67112	30,67112
1,75		30,45656	30,45656	30,45656	30,45656	30,45656
1,875		30,23277	30,23277	30,23277	30,23277	30,23277
2		29,85932	29,85932	29,85932	29,85932	29,85932
3		29,2791	29,2791	29,2791	29,2791	29,2791
4		28,73474	28,73474	28,73474	28,73474	28,73474
0,10000		0,095936	9,971658	14,91445	19,85776	24,80136
0,19479		0,531034	9,919247	14,61544	19,3119	24,00849
0,30568		0,168468	8,193936	12,20671	16,21951	20,23235
0,43542		0,079464	7,493444	11,20015	14,90684	18,61354
0,58721		0,042989	7,058107	10,56536	14,07258	17,57981
0,7648		0,025004	6,744333	10,10368	13,463	16,82231
0,97256		0,015629	6,50768	9,753415	12,99912	16,24482
1,21563	2	0,01056	6,327423	9,485646	12,64385	15,80204
1,5		0,007698	6,205755	9,304664	12,40356	15,50245
1,625		0,006402	6,139493	9,205958	12,27242	15,33887
1,75		0,005685	6,095981	9,141062	12,18614	15,23121
1,875		0,00509	6,050739	9,073501	12,09626	15,11901
2		0,004119	5,975231	8,960748	11,94626	14,93177
3		0,002766	5,858029	8,785662	11,7133	14,64093
4		0,001811	5,748387	8,62168	11,49497	14,36827

Lampiran 8. Tabel Tegangan Pada *Outer Aluminium Surface*

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 3 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		40,48825	40,48825	40,48825	40,48825	40,48825
0,19479		34,04924	34,04924	34,04924	34,04924	34,04924
0,30568		31,30285	31,30285	31,30285	31,30285	31,30285
0,43542		29,81111	29,81111	29,81111	29,81111	29,81111
0,58721		28,82276	28,82276	28,82276	28,82276	28,82276
0,7648		28,14245	28,14245	28,14245	28,14245	28,14245
0,97256		27,67923	27,67923	27,67923	27,67923	27,67923
1,21563	1	27,34935	27,34935	27,34935	27,34935	27,34935
1,5		27,13392	27,13392	27,13392	27,13392	27,13392
1,625		27,02986	27,02986	27,02986	27,02986	27,02986
1,75		26,97098	26,97098	26,97098	26,97098	26,97098
1,875		26,91538	26,91538	26,91538	26,91538	26,91538
2		26,7812	26,7812	26,7812	26,7812	26,7812
3		26,52713	26,52713	26,52713	26,52713	26,52713
4		26,31351	26,31351	26,31351	26,31351	26,31351

0,10000		2,11E-05	8,097667	12,14649	16,19531	20,24414
0,19479		-1,9E-06	6,809847	10,21477	13,61969	17,02462
0,30568		-5,2E-07	6,260572	9,390857	12,52114	15,65143
0,43542		2,56E-07	5,962224	8,943335	11,92445	14,90556
0,58721		6,16E-08	5,764554	8,646829	11,52911	14,41138
0,7648		7,53E-07	5,628492	8,442736	11,25698	14,07122
0,97256		1,06E-06	5,535849	8,303771	11,07169	13,83962
1,21563	2	9,55E-07	5,469872	8,204806	10,93974	13,67467
1,5		6,4E-07	5,426786	8,140178	10,85357	13,56696
1,625		4,06E-07	5,405974	8,10896	10,81195	13,51493
1,75		2,55E-07	5,394198	8,091296	10,78839	13,48549
1,875		1,52E-07	5,383077	8,074615	10,76615	13,45769
2		5,78E-08	5,356241	8,03436	10,71248	13,3906
3		5,48E-09	5,305428	7,958141	10,61085	13,26357
4		4,69E-09	5,262703	7,894055	10,52541	13,15676

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 4 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		42,11384	42,11384	42,11384	42,11384	42,11384
0,19479		35,49208	35,49208	35,49208	35,49208	35,49208
0,30568		32,47141	32,47141	32,47141	32,47141	32,47141
0,43542		30,78228	30,78228	30,78228	30,78228	30,78228
0,58721		29,63515	29,63515	29,63515	29,63515	29,63515
0,7648		28,82692	28,82692	28,82692	28,82692	28,82692
0,97256		28,26169	28,26169	28,26169	28,26169	28,26169
1,21563	1	27,84728	27,84728	27,84728	27,84728	27,84728
1,5		27,57134	27,57134	27,57134	27,57134	27,57134
1,625		27,43579	27,43579	27,43579	27,43579	27,43579
1,75		27,35505	27,35505	27,35505	27,35505	27,35505
1,875		27,28179	27,28179	27,28179	27,28179	27,28179
2		27,11842	27,11842	27,11842	27,11842	27,11842
3		26,80091	26,80091	26,80091	26,80091	26,80091
4		26,52578	26,52578	26,52578	26,52578	26,52578
0,10000		2,08E-05	8,422786	12,63417	16,84555	21,05693
0,19479		-1,7E-06	7,098417	10,64763	14,19683	17,74604
0,30568		-3,5E-07	6,494284	9,741424	12,98857	16,23571
0,43542		3,23E-07	6,156458	9,234685	12,31291	15,39114
0,58721		2,75E-08	5,927032	8,890546	11,85406	14,81758
0,7648		6,33E-07	5,765388	8,648079	11,53077	14,41346
0,97256		8,66E-07	5,652341	8,47851	11,30468	14,13085
1,21563	2	6,93E-07	5,569458	8,354185	11,13891	13,92364
1,5		3,48E-07	5,51427	8,271404	11,02854	13,78567
1,625		1,06E-07	5,487159	8,230738	10,97432	13,7179
1,75		-4,8E-08	5,471011	8,206515	10,94202	13,70365
1,875		-1,4E-07	5,45636	8,184539	10,91272	13,6409
2		-2,1E-07	5,423686	8,135528	10,84737	13,55921
3		-2,2E-07	5,360183	8,040273	10,72036	13,40045
4		-1,6E-07	5,305157	7,957735	10,61031	13,26289

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 5 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		43,6609	43,6609	43,6609	43,6609	43,6609
0,19479		36,82967	36,82967	36,82967	36,82967	36,82967
0,30568		33,55098	33,55098	33,55098	33,55098	33,55098
0,43542		31,67664	31,67664	31,67664	31,67664	31,67664
0,58721		30,37905	30,37905	30,37905	30,37905	30,37905
0,7648		29,45044	29,45044	29,45044	29,45044	29,45044
0,97256		28,78886	28,78886	28,78886	28,78886	28,78886
1,21563	1	28,29753	28,29753	28,29753	28,29753	28,29753
1,5		27,96958	27,96958	27,96958	27,96958	27,96958
1,625		27,80723	27,80723	27,80723	27,80723	27,80723
1,75		27,71312	27,71312	27,71312	27,71312	27,71312
1,875		27,62833	27,62833	27,62833	27,62833	27,62833
2		27,43024	27,43024	27,43024	27,43024	27,43024
3		27,05508	27,05508	27,05508	27,05508	27,05508
4		26,72969	26,72969	26,72969	26,72969	26,72969
0,10000		2,12E-05	8,732209	13,0983	17,46439	21,83048
0,19479		-1,7E-06	7,365937	11,04891	14,73187	18,41484
0,30568		1,03E-07	6,710199	10,0653	13,4204	16,77549
0,43542		6,62E-07	6,335332	9,502996	12,67066	15,83832
0,58721		9,99E-07	6,075812	9,113716	12,15162	15,18953
0,7648		2,37E-06	5,890091	8,835134	11,78018	14,72522
0,97256		2,94E-06	5,757776	8,636662	11,51555	14,39443
1,21563	2	2,57E-06	5,65951	8,489262	11,31902	14,14877
1,5		1,83E-06	5,593919	8,390877	11,18784	13,98479
1,625		1,29E-06	5,561447	8,34217	11,12289	13,90361
1,75		9,34E-07	5,542625	8,313937	11,08525	13,85656
1,875		6,78E-07	5,525667	8,2885	11,05133	13,81417
2		4,12E-07	5,48605	8,229074	10,9721	13,71512
3		1,93E-07	5,411017	8,116524	10,82203	13,52754
4		1,11E-07	5,34594	8,018909	10,69188	13,36485

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 6 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		45,43726	45,43726	45,43726	45,43726	45,43726
0,19479		38,24922	38,24922	38,24922	38,24922	38,24922
0,30568		34,65701	34,65701	34,65701	34,65701	34,65701
0,43542		32,57084	32,57084	32,57084	32,57084	32,57084
0,58721		31,11222	31,11222	31,11222	31,11222	31,11222
0,7648		30,05958	30,05958	30,05958	30,05958	30,05958
0,97256		29,30367	29,30367	29,30367	29,30367	29,30367
1,21563	1	28,73802	28,73802	28,73802	28,73802	28,73802
1,5		28,3599	28,3599	28,3599	28,3599	28,3599
1,625		28,17208	28,17208	28,17208	28,17208	28,17208
1,75		28,06397	28,06397	28,06397	28,06397	28,06397
1,875		27,96565	27,96565	27,96565	27,96565	27,96565
2		27,74259	27,74259	27,74259	27,74259	27,74259
3		27,32168	27,32168	27,32168	27,32168	27,32168
4		26,95172	26,95172	26,95172	26,95172	26,95172

0,10000		0,00859	9,079763	13,62453	18,16929	22,71405
0,19479		0,001952	7,651044	11,47585	15,30065	19,12546
0,30568		0,00181	6,932685	10,39823	13,86378	17,32933
0,43542		0,001169	6,515011	9,771992	13,02897	16,28596
0,58721		0,000804	6,223036	9,334185	12,44533	15,55648
0,7648		0,000558	6,012335	9,018241	12,02415	15,03005
0,97256		0,000403	5,861041	8,79137	11,7217	14,65203
1,21563	2	0,000283	5,74782	8,621594	11,49537	14,36914
1,5		0,000206	5,672138	8,508108	11,34408	14,18005
1,625		0,000168	5,634542	8,451734	11,26893	14,08612
1,75		0,000148	5,612904	8,419286	11,22567	14,03205
1,875		0,00013	5,593227	8,38978	11,18633	13,98289
2		0,000105	5,548595	8,322844	11,09709	13,87134
3		6,79E-05	5,464387	8,196549	10,92871	13,66087
4		4,21E-05	5,390375	8,085544	10,78071	13,47588

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 7 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		47,19299	47,19299	47,19299	47,19299	47,19299
0,19479		39,62601	39,62601	39,62601	39,62601	39,62601
0,30568		35,73192	35,73192	35,73192	35,73192	35,73192
0,43542		33,43895	33,43895	33,43895	33,43895	33,43895
0,58721		31,8218	31,8218	31,8218	31,8218	31,8218
0,7648		30,64895	30,64895	30,64895	30,64895	30,64895
0,97256		29,80112	29,80112	29,80112	29,80112	29,80112
1,21563	1	29,1656	29,1656	29,1656	29,1656	29,1656
1,5		28,7405	28,7405	28,7405	28,7405	28,7405
1,625		28,52938	28,52938	28,52938	28,52938	28,52938
1,75		28,40765	28,40765	28,40765	28,40765	28,40765
1,875		28,29793	28,29793	28,29793	28,29793	28,29793
2		28,05305	28,05305	28,05305	28,05305	28,05305
3		27,59138	27,59138	27,59138	27,59138	27,59138
4		27,1828	27,1828	27,1828	27,1828	27,1828
0,10000		0,038504	9,403777	14,12734	18,8509	23,57447
0,19479		0,006607	7,928656	11,89079	15,85292	19,81505
0,30568		0,006742	7,15105	10,72365	14,29624	17,86884
0,43542		0,00448	6,691	10,03449	13,37798	16,72147
0,58721		0,003121	6,366664	9,548555	12,73045	15,91234
0,7648		0,002179	6,131436	9,196125	12,26082	15,3255
0,97256		0,001575	5,961435	8,941395	11,92136	14,90132
1,21563	2	0,001111	5,83398	8,750433	11,66689	14,58334
1,5		0,000809	5,748724	8,622696	11,49667	14,37064
1,625		0,000656	5,706378	8,559254	11,41213	14,26501
1,75		0,000574	5,681966	8,522676	11,36339	14,2041
1,875		0,000507	5,659969	8,489714	11,31946	14,14921
2		0,000407	5,610915	8,416182	11,22145	14,02672
3		0,000263	5,518472	8,277586	11,0367	13,79581
4		0,000164	5,43668	8,154945	10,87321	13,59147

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 8 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000	1	48,79684	48,79684	48,79684	48,79684	48,79684
0,19479		40,90397	40,90397	40,90397	40,90397	40,90397
0,30568		36,74883	36,74883	36,74883	36,74883	36,74883
0,43542		34,26734	34,26734	34,26734	34,26734	34,26734
0,58721		32,50359	32,50359	32,50359	32,50359	32,50359
0,7648		31,21839	31,21839	31,21839	31,21839	31,21839
0,97256		30,28598	30,28598	30,28598	30,28598	30,28598
1,21563		29,5864	29,5864	29,5864	29,5864	29,5864
1,5		29,11905	29,11905	29,11905	29,11905	29,11905
1,625		28,88721	28,88721	28,88721	28,88721	28,88721
1,75		28,754	28,754	28,754	28,754	28,754
1,875		28,63428	28,63428	28,63428	28,63428	28,63428
2		28,37049	28,37049	28,37049	28,37049	28,37049
3		27,8735	27,8735	27,8735	27,8735	27,8735
4		27,43105	27,43105	27,43105	27,43105	27,43105
0,10000		2	0,085023	9,683514	14,57264	19,46176
0,19479	0,017709		8,191531	12,28056	16,3696	20,45864
0,30568	0,014711		7,360268	11,03383	14,70739	18,38096
0,43542	0,009382		6,860379	10,28624	13,71211	17,13798
0,58721	0,006452		6,505635	9,755378	13,00512	16,25487
0,7648	0,004481		6,247189	9,368588	12,48999	15,61139
0,97256	0,003235		6,059784	9,088058	12,11633	15,14461
1,21563	0,002278		5,919112	8,877522	11,83593	14,79434
1,5	0,001655		5,825131	8,73687	11,64861	14,56035
1,625	0,00134		5,778498	8,667087	11,55568	14,44426
1,75	0,00117		5,751713	8,626999	11,50229	14,37757
1,875	0,001034		5,727651	8,590979	11,45431	14,31764
2	0,000829		5,674728	8,511698	11,34867	14,18564
3	0,000538		5,575104	8,362404	11,1497	13,937
4	0,000337		5,486462	8,229536	10,97261	13,71568

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 9 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000	1	50,44576	50,44576	50,44576	50,44576	50,44576
0,19479		42,24491	42,24491	42,24491	42,24491	42,24491
0,30568		37,7883	37,7883	37,7883	37,7883	37,7883
0,43542		35,10604	35,10604	35,10604	35,10604	35,10604
0,58721		33,19263	33,19263	33,19263	33,19263	33,19263
0,7648		31,79474	31,79474	31,79474	31,79474	31,79474
0,97256		30,77917	30,77917	30,77917	30,77917	30,77917
1,21563		30,0171	30,0171	30,0171	30,0171	30,0171
1,5		29,50906	29,50906	29,50906	29,50906	29,50906
1,625		29,25741	29,25741	29,25741	29,25741	29,25741
1,75		29,11353	29,11353	29,11353	29,11353	29,11353
1,875		28,98452	28,98452	28,98452	28,98452	28,98452
2		28,70309	28,70309	28,70309	28,70309	28,70309
3		28,17305	28,17305	28,17305	28,17305	28,17305
4		27,70031	27,70031	27,70031	27,70031	27,70031



0,10000		0,175875	9,943496	15,00481	20,0675	25,13051
0,19479		0,045096	8,483335	12,703	16,92325	21,14353
0,30568		0,027697	7,579515	11,35545	15,13156	18,90768
0,43542		0,016438	7,034398	10,5433	14,05226	17,56123
0,58721		0,010932	6,647484	9,965614	13,28376	16,60191
0,7648		0,007448	6,365173	9,54387	12,72257	15,90127
0,97256		0,005346	6,16036	9,23772	12,31507	15,39242
1,21563	2	0,003754	6,006601	9,007922	12,00924	15,01055
1,5		0,002721	5,904096	8,854724	11,80535	14,75597
1,625		0,002202	5,853307	8,778825	11,70434	14,62985
1,75		0,001925	5,824285	8,735443	11,6466	14,55775
1,875		0,001699	5,798282	8,696563	11,59484	14,49312
2		0,001365	5,741713	8,611886	11,48206	14,35223
3		0,000889	5,635316	8,452532	11,26975	14,08697
4		0,000561	5,540507	8,310482	11,08046	13,85043

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 10 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		52,02436	52,02436	52,02436	52,02436	52,02436
0,19479		43,54918	43,54918	43,54918	43,54918	43,54918
0,30568		38,80903	38,80903	38,80903	38,80903	38,80903
0,43542		35,93669	35,93669	35,93669	35,93669	35,93669
0,58721		33,87865	33,87865	33,87865	33,87865	33,87865
0,7648		32,37106	32,37106	32,37106	32,37106	32,37106
0,97256		31,27413	31,27413	31,27413	31,27413	31,27413
1,21563	1	30,4518	30,4518	30,4518	30,4518	30,4518
1,5		29,90499	29,90499	29,90499	29,90499	29,90499
1,625		29,63454	29,63454	29,63454	29,63454	29,63454
1,75		29,48054	29,48054	29,48054	29,48054	29,48054
1,875		29,3431	29,3431	29,3431	29,3431	29,3431
2		29,04587	29,04587	29,04587	29,04587	29,04587
3		28,488	28,488	28,488	28,488	28,488
4		27,9906	27,9906	27,9906	27,9906	27,9906
0,10000		0,233146	10,21427	15,43864	20,66409	25,89085
0,19479		0,105546	8,792856	13,13647	17,48062	21,82541
0,30568		0,05086	7,802416	11,67798	15,5537	19,42961
0,43542		0,027668	7,209652	10,80043	14,39127	17,98218
0,58721		0,017467	6,790047	10,17609	13,56215	16,94824
0,7648		0,011579	6,483863	9,719755	12,95565	16,19156
0,97256		0,008148	6,26169	9,388252	12,51481	15,64137
1,21563	2	0,005678	6,095142	9,139734	12,18432	15,2289
1,5		0,004104	5,984425	8,974504	11,96458	14,95465
1,625		0,003328	5,929655	8,892771	11,85589	14,819
1,75		0,002918	5,898494	8,846254	11,79401	14,74177
1,875		0,002585	5,870714	8,804765	11,73882	14,67286
2		0,002087	5,810849	8,715229	11,61961	14,52399
3		0,001372	5,698692	8,547356	11,39602	14,24468
4		0,000877	5,598818	8,39779	11,19676	13,99574

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 11 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		53,65296	53,65296	53,65296	53,65296	53,65296
0,19479		44,85352	44,85352	44,85352	44,85352	44,85352
0,30568		39,81027	39,81027	39,81027	39,81027	39,81027
0,43542		36,5704	36,5704	36,5704	36,5704	36,5704
0,58721		34,55184	34,55184	34,55184	34,55184	34,55184
0,7648		32,94076	32,94076	32,94076	32,94076	32,94076
0,97256		31,76854	31,76854	31,76854	31,76854	31,76854
1,21563	1	31,00035	31,00035	31,00035	31,00035	31,00035
1,5		30,31079	30,31079	30,31079	30,31079	30,31079
1,625		30,02447	30,02447	30,02447	30,02447	30,02447
1,75		29,86182	29,86182	29,86182	29,86182	29,86182
1,875		29,71766	29,71766	29,71766	29,71766	29,71766
2		29,40846	29,40846	29,40846	29,40846	29,40846
3		28,82886	28,82886	28,82886	28,82886	28,82886
4		28,3142	28,3142	28,3142	28,3142	28,3142
0,10000		0,17383	10,58862	15,97006	21,35138	26,73341
0,19479		0,212758	9,140009	13,60338	18,06671	22,5304
0,30568		0,086849	8,031929	12,00402	15,97607	19,94822
0,43542		0,043636	7,385363	11,05578	14,72618	18,3966
0,58721		0,026091	6,932034	10,38452	13,83697	17,28943
0,7648		0,01675	6,602356	9,894682	13,18698	16,47928
0,97256		0,011477	6,363558	9,539213	12,71485	15,89048
1,21563	2	0,007881	6,18513	9,273501	12,36186	15,45021
1,5		0,005655	6,066941	9,097439	12,12793	15,15841
1,625		0,004587	6,008714	9,010694	12,01267	15,01464
1,75		0,00403	5,975677	8,961452	11,94722	14,93299
1,875		0,003582	5,946441	8,917847	11,88925	14,86066
2		0,002906	5,884025	8,824581	11,76514	14,70569
3		0,001928	5,767306	8,65	11,53269	14,41539
4		0,001249	5,663835	8,495131	11,32643	14,15772

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 12 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		55,36439	55,36439	55,36439	55,36439	55,36439
0,19479		46,23319	46,23319	46,23319	46,23319	46,23319
0,30568		40,8682	40,8682	40,8682	40,8682	40,8682
0,43542		37,61211	37,61211	37,61211	37,61211	37,61211
0,58721		35,27174	35,27174	35,27174	35,27174	35,27174
0,7648		33,55414	33,55414	33,55414	33,55414	33,55414
0,97256		32,30457	32,30457	32,30457	32,30457	32,30457
1,21563	1	31,37208	31,37208	31,37208	31,37208	31,37208
1,5		30,75598	30,75598	30,75598	30,75598	30,75598
1,625		30,45346	30,45346	30,45346	30,45346	30,45346
1,75		30,28201	30,28201	30,28201	30,28201	30,28201
1,875		30,13121	30,13121	30,13121	30,13121	30,13121
2		29,81101	29,81101	29,81101	29,81101	29,81101
3		29,21298	29,21298	29,21298	29,21298	29,21298
4		28,68746	28,68746	28,68746	28,68746	28,68746

0,10000		0,086715	11,00373	16,54826	22,09212	27,6356
0,19479		0,343286	9,521573	14,11005	18,69834	23,28653
0,30568		0,130064	8,278941	12,35256	16,42603	20,49944
0,43542		0,062768	7,573932	11,32875	15,08346	18,83813
0,58721		0,036433	7,084897	10,60834	14,13167	17,65498
0,7648		0,02295	6,730526	10,08356	13,43651	16,78944
0,97256		0,015492	6,474378	9,703226	12,93201	16,16077
1,21563	2	0,010549	6,28356	9,419676	12,55575	15,69181
1,5		0,007547	6,157638	9,232462	12,30726	15,38205
1,625		0,006136	6,095832	9,140554	12,18526	15,22997
1,75		0,005404	6,060863	9,088518	12,11617	15,14381
1,875		0,004819	6,030166	9,042803	12,05544	15,06807
2		0,003932	5,965359	8,946066	11,92677	14,90748
3		0,002639	5,844697	8,765732	11,68677	14,6078
4		0,001742	5,738882	8,607454	11,47603	14,3446

### Lampiran 9. Tabel Tegangan Pada *Glass Fiber Composite Surface*

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 3 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		40,57184	40,57184	40,57184	40,57184	40,57184
0,19479		36,76293	36,76293	36,76293	36,76293	36,76293
0,30568		34,84162	34,84162	34,84162	34,84162	34,84162
0,43542		33,57655	33,57655	33,57655	33,57655	33,57655
0,58721		32,7015	32,7015	32,7015	32,7015	32,7015
0,7648		32,17544	32,17544	32,17544	32,17544	32,17544
0,97256		31,82931	31,82931	31,82931	31,82931	31,82931
1,21563	1	31,49365	31,49365	31,49365	31,49365	31,49365
1,5		31,22474	31,22474	31,22474	31,22474	31,22474
1,625		31,05538	31,05538	31,05538	31,05538	31,05538
1,75		30,93446	30,93446	30,93446	30,93446	30,93446
1,875		30,8189	30,8189	30,8189	30,8189	30,8189
2		30,6382	30,6382	30,6382	30,6382	30,6382
3		30,36374	30,36374	30,36374	30,36374	30,36374
4		30,12481	30,12481	30,12481	30,12481	30,12481
0,10000		3,08E-05	8,114394	12,17157	16,22876	20,28594
0,19479		4,31E-06	7,35259	11,02888	14,70517	18,38147
0,30568		2,39E-06	6,968326	10,45249	13,93665	17,42081
0,43542		2,28E-06	6,715313	10,07297	13,43062	16,78828
0,58721		1,78E-06	6,540302	9,810451	13,0806	16,35075
0,7648		1,32E-06	6,435087	9,65263	12,87018	16,08772
0,97256		7,82E-07	6,365862	9,548793	12,73172	15,91466
1,21563	2	5,82E-07	6,298728	9,448092	12,59746	15,74682
1,5		5,22E-07	6,244946	9,36742	12,48989	15,61237
1,625		4,36E-07	6,211075	9,316614	12,42215	15,52769
1,75		3,3E-07	6,186891	9,280337	12,37378	15,46723
1,875		2E-07	6,16378	9,24567	12,32756	15,40945
2		8,16E-08	6,127639	9,191458	12,25528	15,3191
3		2,39E-08	6,072748	9,109122	12,1455	15,18187
4		1,06E-08	6,024962	9,037443	12,04993	15,06241

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 4 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		42,44071	42,44071	42,44071	42,44071	42,44071
0,19479		38,1833	38,1833	38,1833	38,1833	38,1833
0,30568		35,99908	35,99908	35,99908	35,99908	35,99908
0,43542		34,51018	34,51018	34,51018	34,51018	34,51018
0,58721		33,47025	33,47025	33,47025	33,47025	33,47025
0,7648		32,82998	32,82998	32,82998	32,82998	32,82998
0,97256		32,39955	32,39955	32,39955	32,39955	32,39955
1,21563	1	31,99912	31,99912	31,99912	31,99912	31,99912
1,5		31,68557	31,68557	31,68557	31,68557	31,68557
1,625		31,4928	31,4928	31,4928	31,4928	31,4928
1,75		31,35406	31,35406	31,35406	31,35406	31,35406
1,875		31,21625	31,21625	31,21625	31,21625	31,21625
2		30,99284	30,99284	30,99284	30,99284	30,99284
3		30,64781	30,64781	30,64781	30,64781	30,64781
4		30,34105	30,34105	30,34105	30,34105	30,34105
0,10000		3,16E-05	8,48817	12,73224	16,97631	21,22037
0,19479		5,76E-06	7,636667	11,455	15,27333	19,09166
0,30568		3,72E-06	7,19982	10,79973	14,39964	17,99954
0,43542		3,18E-06	6,902039	10,35306	13,80407	17,25509
0,58721		2,37E-06	6,694052	10,04108	13,3881	16,73513
0,7648		1,54E-06	6,565997	9,848994	13,13199	16,41499
0,97256		9,82E-07	6,479908	9,719863	12,95982	16,19977
1,21563	2	6,52E-07	6,399824	9,599736	12,79965	15,99956
1,5		6,49E-07	6,337112	9,505669	12,67423	15,84278
1,625		7,64E-07	6,29856	9,44784	12,59712	15,7464
1,75		5,42E-07	6,270811	9,406216	12,54162	15,67703
1,875		3,45E-07	6,24325	9,364876	12,4865	15,60813
2		3,03E-07	6,198567	9,297851	12,39714	15,49642
3		2,51E-07	6,129561	9,194341	12,25912	15,3239
4		1,95E-07	6,068211	9,102316	12,13642	15,17053

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 5 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		43,95033	43,95033	43,95033	43,95033	43,95033
0,19479		39,35867	39,35867	39,35867	39,35867	39,35867
0,30568		36,9827	36,9827	36,9827	36,9827	36,9827
0,43542		35,31648	35,31648	35,31648	35,31648	35,31648
0,58721		34,14554	34,14554	34,14554	34,14554	34,14554
0,7648		33,40286	33,40286	33,40286	33,40286	33,40286
0,97256		32,90132	32,90132	32,90132	32,90132	32,90132
1,21563	1	32,45244	32,45244	32,45244	32,45244	32,45244
1,5		32,10032	32,10032	32,10032	32,10032	32,10032
1,625		31,88078	31,88078	31,88078	31,88078	31,88078
1,75		31,72417	31,72417	31,72417	31,72417	31,72417
1,875		31,5749	31,5749	31,5749	31,5749	31,5749
2		31,32822	31,32822	31,32822	31,32822	31,32822
3		30,93039	30,93039	30,93039	30,93039	30,93039
4		30,5662	30,5662	30,5662	30,5662	30,5662

0,10000		2,32E-05	8,790087	13,18512	17,58014	21,97518
0,19479		8,76E-06	7,871738	11,8076	15,74347	19,67934
0,30568		1E-05	7,396543	11,09481	14,79308	18,49135
0,43542		6,85E-06	7,0633	10,59495	14,12659	17,65824
0,58721		4,56E-06	6,829111	10,24366	13,65822	17,07277
0,7648		3,34E-06	6,680573	10,02086	13,36114	16,70143
0,97256		1,93E-06	6,580263	9,870395	13,16053	16,45066
1,21563	2	1,33E-06	6,490487	9,735731	12,98098	16,22622
1,5		1,24E-06	6,420062	9,630094	12,84013	16,05016
1,625		1,06E-06	6,376155	9,564233	12,75231	15,94039
1,75		8,56E-07	6,344833	9,51725	12,68967	15,86208
1,875		6,09E-07	6,31498	9,472471	12,62996	15,78745
2		3,3E-07	6,265644	9,398466	12,53129	15,66411
3		1,45E-07	6,186078	9,279117	12,37216	15,4652
4		7,72E-08	6,11324	9,16986	12,22648	15,2831

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 6 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		45,42654	45,42654	45,42654	45,42654	45,42654
0,19479		40,49767	40,49767	40,49767	40,49767	40,49767
0,30568		37,91634	37,91634	37,91634	37,91634	37,91634
0,43542		36,08562	36,08562	36,08562	36,08562	36,08562
0,58721		34,79437	34,79437	34,79437	34,79437	34,79437
0,7648		33,95355	33,95355	33,95355	33,95355	33,95355
0,97256		33,38185	33,38185	33,38185	33,38185	33,38185
1,21563	1	32,89319	32,89319	32,89319	32,89319	32,89319
1,5		32,51199	32,51199	32,51199	32,51199	32,51199
1,625		32,27572	32,27572	32,27572	32,27572	32,27572
1,75		32,10646	32,10646	32,10646	32,10646	32,10646
1,875		31,94318	31,94318	31,94318	31,94318	31,94318
2		31,66738	31,66738	31,66738	31,66738	31,66738
3		31,2182	31,2182	31,2182	31,2182	31,2182
4		30,80322	30,80322	30,80322	30,80322	30,80322
0,10000		0,040438	9,1171	13,65575	18,1944	22,73305
0,19479		0,020945	8,116061	12,16375	16,21145	20,25914
0,30568		0,007294	7,588991	11,3799	15,17082	18,96173
0,43542		0,00307	7,219509	10,82777	14,43603	18,04429
0,58721		0,001519	6,960011	10,4393	13,9186	17,39789
0,7648		0,000878	6,791353	10,18663	13,5819	16,97717
0,97256		0,000532	6,67678	10,01491	13,35304	16,69118
1,21563	2	0,000327	6,578885	9,868173	13,15746	16,44675
1,5		0,000223	6,502561	9,75374	13,00492	16,2561
1,625		0,000182	6,455275	9,682831	12,91039	16,13794
1,75		0,000163	6,421408	9,63204	12,84267	16,0533
1,875		0,000146	6,38874	9,583045	12,77735	15,97166
2		0,000119	6,333563	9,50029	12,66702	15,83375
3		7,89E-05	6,243699	9,365512	12,48733	15,60914
4		4,87E-05	6,16068	9,240998	12,32132	15,40163



Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 7 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		46,80342	46,80342	46,80342	46,80342	46,80342
0,19479		41,55332	41,55332	41,55332	41,55332	41,55332
0,30568		38,77447	38,77447	38,77447	38,77447	38,77447
0,43542		36,79729	36,79729	36,79729	36,79729	36,79729
0,58721		35,40138	35,40138	35,40138	35,40138	35,40138
0,7648		34,46902	34,46902	34,46902	34,46902	34,46902
0,97256		33,83312	33,83312	33,83312	33,83312	33,83312
1,21563	1	33,3142	33,3142	33,3142	33,3142	33,3142
1,5		32,91031	32,91031	32,91031	32,91031	32,91031
1,625		32,66026	32,66026	32,66026	32,66026	32,66026
1,75		32,48066	32,48066	32,48066	32,48066	32,48066
1,875		32,30591	32,30591	32,30591	32,30591	32,30591
2		32,00541	32,00541	32,00541	32,00541	32,00541
3		31,51196	31,51196	31,51196	31,51196	31,51196
4		31,0523	31,0523	31,0523	31,0523	31,0523
0,10000		0,158717	9,486412	9,486412	18,81575	23,48041
0,19479		0,082522	8,376033	8,376033	16,67038	20,81755
0,30568		0,028887	7,777702	7,777702	15,52691	19,40151
0,43542		0,012147	7,368987	7,368987	14,72607	18,40461
0,58721		0,005993	7,084795	7,084795	14,16394	17,70352
0,7648		0,003473	6,89637	6,89637	13,78954	17,23612
0,97256		0,002093	6,768263	6,768263	13,53448	16,91759
1,21563	2	0,00128	6,663816	6,663816	13,32641	16,65771
1,5		0,000871	6,582707	6,582707	13,16461	16,45556
1,625		0,00071	6,532567	6,532567	13,06449	16,33045
1,75		0,000633	6,496588	6,496588	12,99261	16,24062
1,875		0,00057	6,461593	6,461593	12,92267	16,15321
2		0,000466	6,401422	6,401422	12,80242	16,00292
3		0,000309	6,302619	6,302619	12,60495	15,75612
4		0,000193	6,210602	6,210602	12,42103	15,52624

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 8 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		48,07292	48,07292	48,07292	48,07292	48,07292
0,19479		42,51829	42,51829	42,51829	42,51829	42,51829
0,30568		39,56106	39,56106	39,56106	39,56106	39,56106
0,43542		37,45609	37,45609	37,45609	37,45609	37,45609
0,58721		35,97103	35,97103	35,97103	35,97103	35,97103
0,7648		34,95762	34,95762	34,95762	34,95762	34,95762
0,97256		34,26592	34,26592	34,26592	34,26592	34,26592
1,21563	1	33,72461	33,72461	33,72461	33,72461	33,72461
1,5		33,30322	33,30322	33,30322	33,30322	33,30322
1,625		33,04227	33,04227	33,04227	33,04227	33,04227
1,75		32,8542	32,8542	32,8542	32,8542	32,8542
1,875		32,67013	32,67013	32,67013	32,67013	32,67013
2		32,34855	32,34855	32,34855	32,34855	32,34855
3		31,8158	31,8158	31,8158	31,8158	31,8158
4		31,31688	31,31688	31,31688	31,31688	31,31688

0,10000		0,312258	9,86332	14,63954	19,41576	24,19198
0,19479		0,165098	8,635128	12,87053	17,10593	21,34133
0,30568		0,059188	7,959289	11,90951	15,85974	19,80996
0,43542		0,024998	7,511026	11,25416	14,9973	18,74043
0,58721		0,012279	7,203592	10,79952	14,39546	17,99139
0,7648		0,007083	6,996844	10,49194	13,98704	17,48214
0,97256		0,004269	6,856583	10,28275	13,70892	17,13509
1,21563	2	0,002611	6,74693	10,11914	13,49135	16,86356
1,5		0,001775	6,661963	9,99212	13,32228	16,65244
1,625		0,001448	6,609507	9,913602	13,2177	16,52179
1,75		0,001291	6,571776	9,857079	13,14238	16,42769
1,875		0,001164	6,534876	9,801783	13,06869	16,3356
2		0,000954	6,470416	9,705183	12,93995	16,17472
3		0,00064	6,363639	9,545159	12,72668	15,9082
4		0,000403	6,263678	9,395328	12,52698	15,65863

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 9 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		49,36952	49,36952	49,36952	49,36952	49,36952
0,19479		43,51372	43,51372	43,51372	43,51372	43,51372
0,30568		40,367	40,367	40,367	40,367	40,367
0,43542		38,13087	38,13087	38,13087	38,13087	38,13087
0,58721		36,55596	36,55596	36,55596	36,55596	36,55596
0,7648		35,46372	35,46372	35,46372	35,46372	35,46372
0,97256		34,71692	34,71692	34,71692	34,71692	34,71692
1,21563	1	34,15188	34,15188	34,15188	34,15188	34,15188
1,5		33,71263	33,71263	33,71263	33,71263	33,71263
1,625		33,44054	33,44054	33,44054	33,44054	33,44054
1,75		33,24374	33,24374	33,24374	33,24374	33,24374
1,875		33,04989	33,04989	33,04989	33,04989	33,04989
2		32,70835	32,70835	32,70835	32,70835	32,70835
3		32,13893	32,13893	32,13893	32,13893	32,13893
4		31,60399	31,60399	31,60399	31,60399	31,60399
0,10000		0,493225	10,27082	15,15851	20,0456	24,93279
0,19479		0,266283	8,916785	13,2415	17,56606	21,89067
0,30568		0,099426	8,153517	12,18029	16,20698	20,23368
0,43542		0,042187	7,660239	11,46912	15,27795	19,08678
0,58721		0,020453	7,327268	10,98088	14,63447	18,28805
0,7648		0,011637	7,10142	10,64654	14,19185	17,73716
0,97256		0,007033	6,948784	10,41963	13,89067	17,36171
1,21563	2	0,004305	6,8338	10,24857	13,66333	17,07808
1,5		0,00292	6,7448	10,11578	13,48676	16,85774
1,625		0,002376	6,689939	10,03376	13,37759	16,72141
1,75		0,002123	6,650383	9,97455	13,29872	16,62289
1,875		0,001914	6,611467	9,916268	13,22107	16,52587
2		0,00158	6,542913	9,813592	13,08427	16,35495
3		0,001072	6,428636	9,642422	12,85621	16,07
4		0,000681	6,321338	9,481668	12,642	15,80233

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 10 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		50,6024	50,6024	50,6024	50,6024	50,6024
0,19479		44,4585	44,4585	44,4585	44,4585	44,4585
0,30568		41,139	41,139	41,139	41,139	41,139
0,43542		38,78259	38,78259	38,78259	38,78259	38,78259
0,58721		37,12596	37,12596	37,12596	37,12596	37,12596
0,7648		35,97757	35,97757	35,97757	35,97757	35,97757
0,97256		35,17846	35,17846	35,17846	35,17846	35,17846
1,21563	1	34,57699	34,57699	34,57699	34,57699	34,57699
1,5		34,1253	34,1253	34,1253	34,1253	34,1253
1,625		33,84491	33,84491	33,84491	33,84491	33,84491
1,75		33,64146	33,64146	33,64146	33,64146	33,64146
1,875		33,44024	33,44024	33,44024	33,44024	33,44024
2		33,08179	33,08179	33,08179	33,08179	33,08179
3		32,48156	32,48156	32,48156	32,48156	32,48156
4		31,91703	31,91703	31,91703	31,91703	31,91703
0,10000		0,679461	10,66683	15,65977	20,65215	25,64384
0,19479		0,375151	9,193078	13,60148	18,00975	22,41787
0,30568		0,14514	8,344543	12,44398	16,54333	20,6426
0,43542		0,062061	7,806518	11,6786	15,55063	19,42262
0,58721		0,02965	7,448752	11,15844	14,8681	18,57774
0,7648		0,01653	7,207905	10,80413	14,40034	17,99655
0,97256		0,01015	7,043273	10,56019	14,07709	17,59399
1,21563	2	0,006326	6,920422	10,3775	13,83458	17,29165
1,5		0,004366	6,828469	10,24057	13,65268	17,06478
1,625		0,003585	6,771761	10,1559	13,54005	16,92419
1,75		0,003213	6,730785	10,09462	13,45845	16,82228
1,875		0,002905	6,690324	10,03406	13,3778	16,72154
2		0,00241	6,618263	9,926203	13,23414	16,54208
3		0,001652	6,497625	9,745617	12,99361	16,2416
4		0,00106	6,38425	9,575847	12,76744	15,95904

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 11 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		51,78763	51,78763	51,78763	51,78763	51,78763
0,19479		45,37088	45,37088	45,37088	45,37088	45,37088
0,30568		41,88931	41,88931	41,88931	41,88931	41,88931
0,43542		39,42012	39,42012	39,42012	39,42012	39,42012
0,58721		37,68856	37,68856	37,68856	37,68856	37,68856
0,7648		36,48939	36,48939	36,48939	36,48939	36,48939
0,97256		35,64447	35,64447	35,64447	35,64447	35,64447
1,21563	1	35,01154	35,01154	35,01154	35,01154	35,01154
1,5		34,55012	34,55012	34,55012	34,55012	34,55012
1,625		34,26303	34,26303	34,26303	34,26303	34,26303
1,75		34,05427	34,05427	34,05427	34,05427	34,05427
1,875		33,84692	33,84692	33,84692	33,84692	33,84692
2		33,47454	33,47454	33,47454	33,47454	33,47454
3		32,84943	32,84943	32,84943	32,84943	32,84943
4		32,26283	32,26283	32,26283	32,26283	32,26283

0,10000		0,857401	11,04717	16,14071	21,2342	26,32728
0,19479		0,482287	9,461934	13,95079	18,43962	22,92836
0,30568		0,191316	8,531794	12,70161	16,87142	21,04118
0,43542		0,082325	7,950386	11,88417	15,81795	19,75171
0,58721		0,038679	7,568962	11,33395	15,09893	18,8639
0,7648		0,02102	7,314337	10,96124	14,60813	18,25502
0,97256		0,01314	7,138908	10,70211	14,26532	17,82852
1,21563	2	0,00841	7,008923	10,50925	14,00959	17,50992
1,5		0,005956	6,914618	10,36905	13,82349	17,27792
1,625		0,004949	6,856413	10,28223	13,70806	17,13388
1,75		0,004457	6,814303	10,21929	13,62428	17,02928
1,875		0,004058	6,772555	10,15685	13,54114	16,92544
2		0,003392	6,697583	10,0447	13,39182	16,73894
3		0,002351	6,571753	9,856462	13,14117	16,42588
4		0,001529	6,453787	9,679917	12,90605	16,13218

Tabel Tegangan Terhadap Jarak Dari Ujung Retak Pada Panjang Retak 12 mm

Jarak Dari Ujung Retak (mm)	Step	Tegangan (MPa)				
		Rasio Tegangan 0	Rasio Tegangan 0,2	Rasio Tegangan 0,3	Rasio Tegangan 0,4	Rasio Tegangan 0,5
0,10000		53,03597	53,03597	53,03597	53,03597	53,03597
0,19479		46,3398	46,3398	46,3398	46,3398	46,3398
0,30568		42,68942	42,68942	42,68942	42,68942	42,68942
0,43542		40,10422	40,10422	40,10422	40,10422	40,10422
0,58721		38,29586	38,29586	38,29586	38,29586	38,29586
0,7648		37,04513	37,04513	37,04513	37,04513	37,04513
0,97256		36,15193	36,15193	36,15193	36,15193	36,15193
1,21563	1	35,4867	35,4867	35,4867	35,4867	35,4867
1,5		35,01687	35,01687	35,01687	35,01687	35,01687
1,625		34,72377	34,72377	34,72377	34,72377	34,72377
1,75		34,51022	34,51022	34,51022	34,51022	34,51022
1,875		34,29731	34,29731	34,29731	34,29731	34,29731
2		33,91274	33,91274	33,91274	33,91274	33,91274
3		33,26747	33,26747	33,26747	33,26747	33,26747
4		32,66591	32,66591	32,66591	32,66591	32,66591
0,10000		0,105419	11,45454	16,6529	21,8513	27,04975
0,19479		0,602561	9,752296	14,32588	18,89947	23,47309
0,30568		0,244283	8,734251	12,97871	17,22319	21,4677
0,43542		0,105803	8,106042	12,10585	16,10568	20,10551
0,58721		0,049726	7,699315	11,52391	15,3485	19,1731
0,7648		0,026752	7,430225	11,1321	14,83398	18,53585
0,97256		0,016568	7,243224	10,85681	14,47041	18,08401
1,21563	2	0,010829	7,105785	10,65339	14,20101	17,74863
1,5		0,007827	7,009347	10,51027	14,01121	17,51215
1,625		0,006584	6,949763	10,4215	13,89324	17,365
1,75		0,005952	6,906617	10,35705	13,8075	17,25796
1,875		0,005428	6,863686	10,29288	13,72208	17,15128
2		0,004559	6,786138	10,17696	13,56778	16,95861
3		0,003193	6,656032	9,98246	13,30889	16,63532
4		0,002111	6,534869	9,801249	13,06763	16,33401