



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH VARIASI JENIS *SEPARATOR* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN KETAHANAN BATERAI STRUKTURAL KOMPOSIT

DAFFA SATRYO

NRP 02111840000180

Dosen Pembimbing
Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D.

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH VARIASI JENIS
SEPARATOR TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN
KETAHANAN BATERAI STRUKTURAL KOMPOSIT**

Daffa Satryo
NRP 02111840000180

Dosen Pembimbing
Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D.

Program Studi Sarjana
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



FINAL PROJECT - TM184835

**EXPERIMENTAL STUDY THE EFFECT OF VARIATION
SEPARATOR TYPES ON MECHANICAL PERFORMANCE
AND RESISTANCE OF STRUCTURAL COMPOSITE
BATTERIES**

DAFFA SATRYO

NRP 02111840000180

Advisor

Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D.

Undergraduate Study Program

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH VARIASI JENIS *SEPARATOR* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN KETAHANAN BATERAI STRUKTURAL KOMPOSIT

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana pada
Program Studi S-1
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **DAFFA SATRYO**

NRP. 02111840000180

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP. 198203032009121007
2. Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198512022014042002
3. Dr. Ir. H.C. Kis Agustin, DEA.
NIP. 196308151989032001
4. Fahmi Mubarak, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 197801152003121002



SURABAYA

Juli, 2022

Halaman sengaja dikosongkan..

APPROVAL SHEET

EXPERIMENTAL STUDY THE EFFECT OF VARIATION SEPARATOR TYPES ON MECHANICAL PERFORMANCE AND RESISTANCE OF STRUCTURAL COMPOSITE BATTERIES

FINAL PROJECT

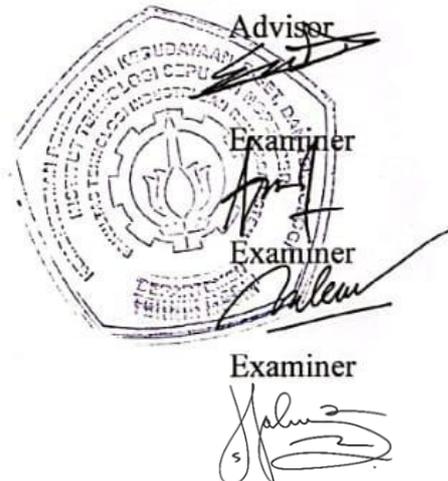
Submitted to fulfil one of the requirements
for obtaining a Bachelor degree at
Undergraduate Study Program
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **DAFFA SATRYO**

NRP. 02111840000180

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP. 198203032009121007
2. Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198512022014042002
3. Dr. Ir. H.C. Kis Agustin, DEA.
NIP. 196308151989032001
4. Fahmi Mubarok, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 197801152003121002



SURABAYA

July, 2022

Halaman sengaja dikosongkan..

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Daffa Satryo / 02111840000180

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D / 198203032009121007

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Jenis *Separator* Terhadap Sifat Mekanik Dan Ketahanan Baterai Struktural Komposit” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 15 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D)

NIP. 198203032009121007

Mahasiswa



(Daffa Satryo)

NRP. 02111840000180

Halaman sengaja dikosongkan..

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Daffa Satryo / 02111840000180
Department : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D / 198203032009121007

hereby declare that the Final Project with the title of “Experimental Study The Effect Of Variation Separator Types On Mechanical Performance And Resistance Of Structural Composite Batteries” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 15 July 2022

Advisor



(Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D)

NIP. 198203032009121007

Student



(Daffa Satryo)

NRP. 02111840000180

Halaman sengaja dikosongkan..

Nama Mahasiswa : Daffa Satryo
NRP : 0211184000180
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing I : Putu Suwarta, ST. MSc. Ph.D
Dosen Pembimbing II : Achmad Subhan, S.T., M.T.
Dosen Pembimbing III : Yatim Lailun Nimah S.Si, M.Si., Ph.D.

ABSTRAK

Electric vehicle masih berada pada tahap pengembangan terutama pada komponen baterai. Penambahan kapasitas baterai berbanding lurus dengan bertambahnya massa baterai untuk material penyusun baterai yang sama, seperti pada Tesla model S dengan kapasitas baterai 85 kWh yang memiliki berat 25% dari total berat kendaraan. Agar kinerja kendaraan listrik menjadi lebih efisien, diperlukan pengurangan berat kendaraan terutama pada bagian baterai yang dapat diganti dengan baterai struktural komposit yang bertujuan untuk menyediakan *mass-less energy storage* pada sistem struktur bertenaga listrik, menggunakan bahan ringan yang secara bersamaan dapat mengangkut ion litium serta menyimpan energi listrik sekaligus dapat mentransfer beban mekanis yang tinggi. Metode eksperimen yang digunakan adalah metode sintesa baterai struktural komposit dalam bentuk pouch cell. Komposit tersusun atas beberapa material yaitu Aluminium NMC532 sebagai katoda, *copper coated graphite* sebagai anoda, dan *glass fiber* sebagai *separator*. Matriks sekaligus elektrolit pada komposit ini adalah *solid polymer electrolyte* (SPE) dengan campuran garam LiFP6 dan EC beserta DMC yang dicampurkan dengan resin dan *hardener*. *Separator* yang digunakan pada penelitian ini adalah Whatman, *glass fiber* WR50, dan *glass fiber* WR200. Terdapat perbedaan geometri, jenis struktur, dan densitas. Untuk mengetahui performa mekanik pada setiap variasi ketebalan dan jenis *separator*, dilakukan pengujian *tensile* dan *flexural*. Pengamatan *optical microscope* selanjutnya dilakukan untuk mempelajari geometri baterai dan pola kegagalannya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa baterai dengan *separator* WR200 memiliki *strength* dan *stiffness* yang paling tinggi yaitu masing-masing sebesar 15,63 MPa dan 190,96 MPa. Data tersebut dikuatkan dengan hasil *tensile test* untuk mengetahui kekuatan *separator* yang didapatkan bahwa WR200 memiliki nilai *strength* yang paling tinggi yaitu sebesar 1495,62 MPa. Terdapat pengaruh *charge-discharge cycle* terhadap performa mekanik baterai. Terdapat penurunan performa mekanik yang disebabkan oleh degradasi pada material aktif baterai. Kegagalan pada baterai setelah *tensile test* didominasi oleh delaminasi, *debonding* dan *adherend failure*. Pengaruh *curvature* terhadap performa elektrokimia ditinjau melalui *flexural test*, baterai yang masih *self-discharge* dapat naik kembali voltasenya saat diberi gaya *bending*. Hasil dari penelitian ini yaitu *glass fiber woven roving* sangat cocok dijadikan *separator* pada baterai struktural komposit karena memiliki ketebalan yang tipis dan kekuatan yang tinggi. Baterai struktural komposit ini selain dapat menyimpan dan menyalurkan daya, juga memiliki kekuatan mekanik yang baik. Selain itu baterai struktural komposit juga bersifat lentur sehingga dapat dikategorikan sebagai *flex battery* karena voltase stabil seiring dengan bertambahnya nilai *curvature*.

Kata Kunci : Baterai Struktural Komposit, Separator, Performa Mekanik, Tensile test, Flexural Test

Halaman sengaja dikosongkan..

NRP : 02111840000180
Major : Mechanical Engineering
Advisor I : Putu Suwarta, ST. MSc. Ph.D
Advisor II : Achmad Subhan, S.T., M.T.
Advisor III : Yatim Lailun Nimah S.Si, M.Si., Ph.D.

ABSTRACT

Electric Vehicles are still in the development stage, especially in the battery component. The addition of a battery is directly proportional to the increase in battery mass for the same battery making material, as in the Tesla model S with a battery capacity of 85 kWh which weighs 25% of the total weight of the vehicle. In order for electric vehicles to be more efficient, it is necessary to reduce vehicle weight, especially in the battery section that can be replaced with structural composite batteries which aim to provide massless energy storage in electrically powered structural systems, using lightweight materials that can simultaneously transport lithium ions and store electrical energy. while being able to transfer high mechanical loads. The experimental method used is a composite battery synthesis method in the form of a pouch cell. The composite consists of several materials, namely Aluminum NMC532 as the cathode, copper-coated graphite as the anode, and glass fiber as the separator. The matrix as well as the electrolyte in this composite is a solid polymer electrolyte (SPE) with a mixture of LiFP6 and EC salts along with DMC mixed with resin and hardener. The separators used in this research are Whatman, glass fiber WR50, and glass fiber WR200. There are differences in geometry, type of structure, and density. To determine the mechanical performance of each thickness variation and type of separator, tensile and flexural tests were carried out. Optical microscopy was then carried out to study the battery geometry and failure patterns. The results showed that the battery with the WR200 separator had the highest strength and stiffness of 15.63 MPa and 190.96 MPa, respectively. The data is reinforced by the results of the tensile test to determine the strength of the separator, which shows that WR200 has the highest strength value of 1495.62 MPa. There is an effect of the charge-discharge cycle on the mechanical performance of the battery. There is a decrease in mechanical performance caused by the degradation of the battery's active material. Battery failure after tensile test was dominated by delamination, debonding, and adherend failure. The effect of curvature on electrochemical performance is reviewed through a flexural test, a battery that is still self-discharged can increase its voltage again when given a bending force. The result of this research is that glass fiber woven roving is very suitable to be used as a separator in composite structural composites because it has a thin thickness and high strength. This composite battery, besides being able to store and transmit power, also has good mechanical strength. In addition, composite batteries are also flexible so they can be categorized as flexible batteries because the voltage is stable as the curvature value increases.

Keywords : Structural Composite Battery, Separator, Mechanical Performance, Tensile test, Flexural Test

Halaman sengaja dikosongkan..

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberi rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “**Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Jenis Separator Terhadap Sifat Mekanik Dan Ketahanan Baterai Struktural Komposit**”. Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat kelulusan program S-1 Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir. Ucapan terima kasih Penulis sampaikan kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya kepada penulis.
2. Ayah, Bunda, dan Reza yang selalu memberikan doa dan dukungan dalam berbagai bentuk kepada penulis.
3. Bapak Putu Suwarta, S.T., M.Sc, Ph.D., Bapak Achmad Subhan, S.T., M.T., dan Ibu Yatim Lailun Ni'mah, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing, yang telah memberikan ilmu, motivasi, kritik, dan saran kepada Penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
4. Ibu Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc, Ph.D., Ibu Dr. Ir. H.C. Kis Agustin, DEA. Bapak Fahmi Mubarak, S.T., M.Sc, Ph.D., dan Bapak Suwarno, S.T., M.Sc, Ph.D selaku Dosen Penguji Seminar Proposal dan Sidang Akhir, yang telah memberikan kritik serta saran untuk kemajuan Tugas Akhir
5. Sheila Ratna Medina yang selalu mendengarkan curhatan, memberi doa, semangat, dan dukungan dalam bentuk apapun kepada penulis selama masa sulit perkuliahan dan pengerjaan Tugas Akhir.
6. Tim Riset Baterai Struktural Komposit, Bagus Alifah Hasyim dan Habib Saifuddin Fathoni yang telah berbagi ilmu, semangat, dan pengalaman dalam pengerjaan riset dan Laporan Tugas Akhir ini.
7. Sahabat anggota LBMM M61, Mesin Karting Club ITS, Tim Sapuangin ITS, dan Lab. Kompiler yang telah mendukung, menemani, dan menghibur penulis selama masa perkuliahan terutama dalam penulisan Laporan Tugas Akhir.
8. Sahabat Dikit Aja, Gading, Feryl, Fais, Aufa, Shafa, Hanif, yang telah menemani dan mendengarkan curhatan penulis selama masa perkuliahan.
9. Sahabat Pamulang, JFL, Info Julid 101, yang telah mendukung serta menemani penulis sejak SMP.
10. Pihak-pihak lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu pelaksanaan Tugas Akhir.

Semoga segala kebaikan dan pertolongan dari pihak di atas mendapat berkah dari Allah SWT. Penulis menyadari bahwa penyusunan Laporan Tugas Akhir ini belum sempurna dan masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu Penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak yang ingin memberikan kritik dan saran sebagai sebuah pengingat dan media pembelajaran bagi Penulis. Demikian Laporan Tugas Akhir ini Penulis susun, semoga bermanfaat bagi semua pihak. Akhir kata, Penulis ucapkan terima kasih.

Surabaya, 15 Juli 2022

Penulis

Halaman sengaja dikosongkan..

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	v
APPROVAL SHEET	viii
PERNYATAAN ORISINALITAS	x
STATEMENT OF ORIGINALITY	xii
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvii
KATA PENGANTAR	xviii
DAFTAR ISI	xx
DAFTAR GAMBAR	xxiii
DAFTAR TABEL	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Baterai Litium.....	13
2.3. <i>Solid Polymer Electrolyte (SPE)</i>	14
2.4 Baterai Struktural Komposit.....	14
2.4.1 Penyimpan Energi berdasarkan Struktur Multifungsi	15
2.4.2 Konsep Material Multifungsi.....	15
2.5 <i>Separator</i>	16
2.5.1 Microporous Film.....	16
2.5.2 <i>Nonwoven Separator</i>	16
2.5.3 <i>Ion Exchange Membranes</i>	17
2.5.4 <i>Supported Liquid Membranes</i>	17
2.5.5 <i>Solid Polymer Electrolyte</i>	17
2.5.6 <i>Solid Ion Conductors</i>	17
2.6 Fungsi Mekanis Baterai Struktural Komposit	18
2.6.1 Hubungan antara Potensi Kimia dan Tegangan Mekanis.....	18
2.6.2 Konveksi yang didorong oleh tegangan	18
2.7 Metode Pengujian	19
2.7.1 Flexural Test.....	19
2.7.2 <i>Tensile test</i> dengan standardisasi ASTM D3039.....	19
2.8 Kontribusi penelitian	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Flowchart Penelitian	23
3.2 Alat.....	26
3.3 Bahan.....	29

3.4 Langkah Penelitian.....	31
3.4.1 Studi Literatur	31
3.4.2 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian	31
3.4.3 <i>Tensile test</i> dan Pengukuran <i>Separator</i>	32
3.4.4 Pembuatan <i>Solid Polymer Electrolyte</i> (SPE).....	32
3.4.5 Manufaktur Baterai berbentuk <i>Pouch</i> dan Variasi Lapisan <i>Separator</i>	32
3.4.6 <i>Tensile test</i>	34
3.4.7 <i>Flexural Test</i>	36
BAB IV	38
HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Hasil Pengukuran <i>Separator</i>	39
4.2.1 Uji <i>one sample-T Separator</i> Whatman	40
4.2.2 Uji <i>one sample-T Separator</i> WR50	42
4.2.1 Uji <i>one sample-T Separator</i> WR200	46
4.2 Hasil <i>Tensile Test</i> untuk Ketiga Jenis <i>Separator</i>	50
4.3 Hasil <i>Tensile Test</i> Baterai Struktural Komposit.....	51
4.3.1 Nilai <i>Ultimate Tensile Strength</i>	54
4.3.2 Nilai <i>Ultimate Tensile Strain</i>	55
4.3.3 Nilai <i>Young Modulus</i>	57
4.3.4 Nilai <i>Failure Tensile Strength</i> dan <i>Failure Tensile Strain</i>	58
4.4 Hasil <i>Flexural Test</i>	61
4.5 Hasil Pengamatan dengan <i>Optical Microscope</i>	64
4.5.1 Baterai dengan <i>Separator</i> Whatman	64
4.5.2 Baterai dengan <i>Separator</i> WR50 dan WR200.....	64
4.6 Analisis Data	65
BAB V.....	69
KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA.....	71
LAMPIRAN.....	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Penggunaan Energi pada Kendaraan Kecil (kiri), Emisi CO ₂ yang Dihasilkan oleh Berbagai Sektor (kanan) (TotalEnergies, 2021)	1
Gambar 2.1 Desain baterai struktural (O'Brien et al., 2006)	5
Gambar 2.2 Sifat Multifungsi dari <i>Carbon Fiber</i> berkaitan dengan kapasitas elektrokimia pada siklus <i>charging</i> ketiga dengan kekuatan tarik spesifik (O'Brien et al., 2006).....	6
Gambar 2.3 (a) Hasil <i>three-point bend</i> untuk dua baterai komposit yang berbeda (90/10 dan 50/50). (b) Mode kegagalan untuk 50/50 baterai komposit (O'Brien et al., 2006).....	7
Gambar 2.4 Manufaktur baterai struktural komposit berbentuk <i>pouch cell</i> (Asp et al., 2021) .	8
Gambar 2.5 Hasil akhir baterai struktural komposit berbentuk <i>pouch cell</i> (Asp et al., 2021) ...	8
Gambar 2.6 Hasil uji tarik pada kedua penggunaan variasi <i>separator</i> (Asp et al., 2021).....	9
Gambar 2.7 Pengamatan SEM pada baterai struktural komposit dengan <i>separator</i> (a) <i>Whatman GF/A</i> dan (b) <i>GF plain weave</i> (Asp et al., 2021)	10
Gambar 2.8 Analisis <i>Thermal Gravimetric</i> dan Penyusutan Thermal (Luo et al., 2015)	11
Gambar 2.9 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Glass Fiber Fabric</i> (a) dan <i>Separator</i> Polimer(b)	12
Gambar 2.10 Hasil Pengujian Elektrokimia dari Kedua Jenis <i>Separator</i>	12
Gambar 2.11 Diagram Proses <i>Discharge</i> pada Baterai Ion Litium (Korthauer, 2018).....	14
Gambar 2.12 Konsep metode manufaktur material komposit struktur baterai (Pereira et al., 2009).....	15
Gambar 2.13 Susunan baterai komposit dengan menggunakan material <i>carbon fiber</i> , <i>glass fiber</i> , dan <i>structural electrolyte</i> (Carlson et al., 2010)	16
Gambar 2.14 Struktur nano <i>bi-continous</i> berpori (Carlson et al., 2010).....	18
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian	23
Gambar 3.2 Lanjutan <i>Flowchart</i> Penelitian	24
Gambar 3.3 Lanjutan <i>Flowchart</i> Penelitian	25
Gambar 3.4 Universal Testing Machine Mark-10 ESM301L (Lab Metalurgi.....	27
Gambar 3.5 <i>Chuck</i> untuk <i>Tensile test</i>	27
Gambar 3.6 <i>Load</i> dan <i>support bar four-point bending</i> untuk <i>flexural test</i> (Lab Metalurgi DTM-ITS).....	28
Gambar 3.7 <i>Glovebox</i> untuk pembuatan spesimen <i>pouch cell</i> (P2 Fisika Puspiptek, Serpong)	28
Gambar 3.8 <i>Magnetic Stirrer</i> (P2 Fisika Puspiptek, Serpong).....	28
Gambar 3.9 Aluminium NMC532.....	29
Gambar 3.10 <i>Copper Coated Graphite</i> yang digunakan sebagai Anoda	30
Gambar 3.11 Perbedaan Lebar Anyaman pada Glass Fiber WR50 (kiri), dan WR200 (kanan) dengan penggaris sebagai alat ukurnya	30
Gambar 3.12 Whatman No.93 yang digunakan sebagai <i>Separator</i>	31
Gambar 3.13 Skema <i>stacking</i> pembuatan <i>pouch cell</i>	33
Gambar 3.14 Proses Tahap Penyegelan Baterai Struktural Komposit dengan <i>Sealant</i> dan <i>Aluminium Sealer</i>	34
Gambar 0.1 Pengujian <i>flexural</i> dengan <i>Four Point Bending System</i>	37
Gambar 4.1 Pengukuran Lebar Anyaman (kiri) dan Tebal <i>Fiber</i> (kanan) pada <i>Separator</i> WR50.....	39
Gambar 4.2 Struktur dari Whatman yang diambil menggunakan SEM dengan Perbesaran 1000x	39
Gambar 4.3 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Pertama <i>Separator</i> Whatman. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar <i>Confidence Interval</i>	40

Gambar 4.4 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Pertama <i>Separator</i> Whatman. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar <i>Confidence Interval</i>	41
Gambar 4.5 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Ketiga <i>Separator</i> Whatman yang menunjukkan Seluruh Sampel berada didalam <i>Confidence Interval</i>	42
Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengukuran Lebar Anyaman Pengujian Pertama <i>Separator</i> WR50. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar <i>Confidence Interval</i>	43
Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Pertama <i>Separator</i> WR50. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar <i>Confidence Interval</i>	43
Gambar 4.8 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Kedua <i>Separator</i> WR50. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar <i>Confidence Interval</i>	44
Gambar 4.9 Grafik Hasil Pengukuran Lebar Anyaman Pengujian Kedua <i>Separator</i> WR50 yang menunjukkan Seluruh Sampel berada didalam <i>Confidence Interval</i>	45
Gambar 4.10 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Ketiga <i>Separator</i> WR50 yang menunjukkan Seluruh Sampel berada didalam <i>Confidence Interval</i>	46
Gambar 4.11 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Pertama <i>Separator</i> WR200. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar <i>Confidence Interval</i>	47
Gambar 4.12 Grafik Hasil Pengukuran Lebar Anyaman Pengujian Pertama <i>Separator</i> WR200. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar <i>Confidence Interval</i>	47
Gambar 4.13 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Kedua <i>Separator</i> WR200 yang menunjukkan Seluruh Sampel berada didalam <i>Confidence Interval</i>	48
Gambar 4.14 Grafik Hasil Pengukuran Lebar Anyaman Pengujian Kedua <i>Separator</i> WR200 yang menunjukkan Seluruh Sampel berada didalam <i>Confidence Interval</i>	49
Gambar 4.15 Spesimen <i>Tensile test</i> ASTM D3039	51
Gambar 4.16 Spesimen dalam Kondisi Siap Uji.....	52
Gambar 4.17 Grafik <i>Stress-Strain</i> Seluruh Variasi <i>Separator</i> Tanpa dilakukan <i>Charge-Discharge Cycle</i>	53
Gambar 4.18 Grafik <i>Stress-Strain</i> Seluruh Variasi <i>Separator</i> yang dilakukan <i>Charge-Discharge</i>	53
Gambar 4.19 Prosedur Analisis Nilai <i>Young's Modulus</i> menggunakan <i>Software</i> OriginPro..	57
Gambar 4.20 Nilai <i>Failure Tensile Stress</i> dan <i>Failure Tensile Strain</i> menggunakan <i>Software</i> OriginPro.....	59
Gambar 4.21 Kalibrasi Gambar menggunakan <i>Software</i> 'CorelDraw2017'	61
Gambar 4.22 Acuan Ukuran Gambar untuk Perhitungan Radius Berikutnya	62
Gambar 4.23 Pengukuran Radius pada <i>Software</i> 'Solidworks2017' Menggunakan 'Three-Point Arc'	62
Gambar 4.24 Kurva <i>Voltage-Curvature</i> untuk Seluruh Variasi <i>Separator</i>	63
Gambar 4.25 Tampak Samping Spesimen. Delaminasi Bagian Anoda pada Spesimen Whatman Setelah <i>Tensile Test</i>	64
Gambar 4.26 Tampak Samping Spesimen. Delaminasi Bagian Anoda pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR50 (kiri) dan WR200 (kanan) setelah <i>Tensile Test</i>	65
Gambar 4.27 Tampak Samping Spesimen. Kegagalan pada Bagian <i>Tab</i> untuk Spesimen dengan <i>Separator</i> WR200 (kiri) dan WR50 (kanan) Setelah <i>Tensile Test</i>	65
Gambar 4.28 Perbandingan Grafik <i>Stress-Strain</i> Baterai Melewati <i>Charge-Discharge Cycle</i> (kiri) dengan Baterai tanpa <i>Charge-Discharge Cycle</i> (Kanan)	66
Gambar 4.29 Tampak Samping. Morfologi Permukaan Baterai Struktural Komposit Sebelum <i>Tensile Test</i> . (a) Baterai dengan <i>Separator</i> Whatman. (b) Baterai dengan <i>Separator</i> WR50 .	67
Gambar 4.30 Kegagalan pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR50 (kiri) dan WR200 (kanan)..	68
Gambar 4.31 Kegagalan pada Baterai dengan <i>Separator</i> Whatman	68
Gambar 5.1 Grafik <i>Stress-Strain</i> Baterai Struktural Komposit dengan <i>Separator</i> Whatman .	73

Gambar 5.2 Fenomena Baterai dengan <i>Separator</i> Whatman Spesimen 1 saat <i>Tensile test</i>	74
Gambar 5.3 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> Whatman Spesimen 1 Tanpa Pengujian Elektrokimia (a) <i>Crack Initiation</i> pada <i>Separator</i> (b) <i>Crack Propagation</i> menuju Bagian Terluar Spesimen (c) <i>Final Fracture</i>	74
Gambar 5.4 Fenomena Baterai dengan <i>Separator</i> Whatman Spesimen 2 saat <i>Tensile test</i>	75
Gambar 5.5 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> Whatman Spesimen 2 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) <i>Crack Initiation</i> pada <i>Separator</i> . (b) <i>Crack Propagation</i> menuju Bagian Terluar Spesimen. (c) <i>Final Fracture</i>	75
Gambar 5.6 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> Whatman Spesimen 3 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) <i>Crack Initiation</i> pada <i>Separator</i> . (b) <i>Final Fracture</i>	76
Gambar 5.7 Fenomena Baterai dengan <i>Separator</i> Whatman Spesimen 3 saat <i>Tensile test</i>	76
Gambar 5.8 Fenomena Baterai dengan <i>Separator</i> Whatman Spesimen 4 saat <i>Tensile test</i>	77
Gambar 5.9 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> Whatman Spesimen 2 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) <i>Crack Initiation</i> pada <i>Separator</i> . (b) <i>Crack Propagation</i> menuju Bagian Terluar Spesimen. (c) <i>Final Fracture</i>	77
Gambar 5.10 Grafik <i>Stress-Strain</i> Baterai Struktural Komposit dengan <i>Separator</i> WR50	78
Gambar 5.11 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR50 Spesimen 2 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya <i>Failure</i> pada <i>Matrix</i> . (b) <i>Delaminasi</i> dan <i>Debonding</i> (c) <i>Final Failure</i>	79
Gambar 5.12 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR50 Spesimen 2 saat <i>Tensile test</i>	79
Gambar 5.13 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR50 Spesimen 2 saat <i>Tensile test</i>	80
Gambar 5.14 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR50 Spesimen 3 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya <i>Failure</i> pada <i>Matrix</i> . (b) <i>Crack Propagation</i> hingga anoda patah. (c) <i>Final Failure</i>	80
Gambar 5.15 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR50 Spesimen 5 saat <i>Tensile test</i>	81
Gambar 5.16 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR50 Spesimen 5 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya <i>Failure</i> pada <i>Matrix</i> dan Anoda. (b) <i>Delaminasi</i> dan <i>Debonding</i> (c) <i>Final Failure</i>	81
Gambar 5.17 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR50 Spesimen 6 Tanpa Pengujian Elektrokimia.. (a) Sesaat sebelum terjadinya <i>Failure</i> pada <i>Matrix</i> . (b) <i>Delaminasi</i> dan <i>Debonding</i> (c) <i>Final Failure</i>	82
Gambar 5.18 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR50 Spesimen 6 saat <i>Tensile test</i>	82
Gambar 5.19 Grafik <i>Stress-Strain</i> Baterai Struktural Komposit dengan <i>Separator</i> WR200 ...	83
Gambar 5.20 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR200 Spesimen 1 saat <i>Tensile test</i>	84
Gambar 5.21 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR200 Spesimen 1 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya <i>Failure</i> pada <i>Matrix</i> . (b) <i>Delaminasi</i> dan <i>Debonding</i> (c) <i>Final Failure</i>	84
Gambar 5.22 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR200 Spesimen 2 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) <i>Crack Initiation</i> pada <i>Matrix</i> . (b) <i>Delaminasi</i> dan <i>Debonding</i> (c) <i>Final Failure</i>	85
Gambar 5.23 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR200 Spesimen 2 saat <i>Tensile test</i>	85
Gambar 5.24 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR200 Spesimen 3 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) <i>Crack Initiation</i> pada <i>Matrix</i> . (b) <i>Delaminasi</i> dan <i>Debonding</i> . (c) <i>Final Failure</i>	86
Gambar 5.25 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR200 Spesimen 3 saat <i>Tensile test</i>	86

Gambar 5.26 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR200 Spesimen 4 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) <i>Crack Initiation</i> pada <i>Matrix</i> . (b) Delaminasi dan <i>Debonding</i> . (c) <i>Final Failure</i>	87
Gambar 5.27 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR200 Spesimen 4 saat <i>Tensile test</i>	87
Gambar 5.28 Grafik <i>Stress-Strain Separator</i> Whatman setelah Pengujian Elektrokimia	88
Gambar 5.29 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> Whatman Spesimen 1 saat <i>Tensile test</i>	89
Gambar 5.30 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> Whatman Spesimen 1 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) <i>Crack Initiation</i> pada <i>Separator</i> (b) <i>Crack Propagation</i> menuju Bagian Terluar Spesimen (c) <i>Final Fracture</i>	89
Gambar 5.31 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> Whatman Spesimen 2 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) <i>Crack Initiation</i> pada <i>Separator</i> (b) <i>Crack Propagation</i> menuju Bagian Terluar Spesimen (c) <i>Final Fracture</i>	90
Gambar 5.32 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> Whatman Spesimen 2 saat <i>Tensile test</i>	90
Gambar 5.33 Grafik <i>Stress-Strain Separator</i> WR50 setelah Pengujian Elektrokimia	91
Gambar 5.34 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR50 Spesimen 1 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya <i>Failure</i> pada <i>Matrix</i> . (b) Delaminasi dan <i>Debonding</i> (c) <i>Final Failure</i>	92
Gambar 5.35 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR50 Spesimen 1 saat <i>Tensile test</i>	92
Gambar 5.36 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR50 Spesimen 1 saat <i>Tensile test</i>	93
Gambar 5.37 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR50 Spesimen 1 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya <i>Failure</i> pada <i>Matrix</i> . (b) Delaminasi dan <i>Debonding</i> . (c) <i>Final Failure</i>	93
Gambar 5.38 Grafik <i>Stress-Strain Separator</i> WR200 setelah Pengujian Elektrokimia	94
Gambar 5.39 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR50 Spesimen 1 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya <i>Failure</i> pada <i>Matrix</i> . (b) Delaminasi dan <i>Debonding</i> (c) <i>Final Failure</i>	95
Gambar 5.40 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR200 Spesimen 1 saat <i>Tensile test</i>	95
Gambar 5.41 Fenomena pada Baterai dengan <i>Separator</i> WR200 Spesimen 1 saat <i>Tensile test</i>	96
Gambar 5.42 Grafik <i>Stress-Strain</i> pada <i>Separator</i> WR200 Spesimen 2 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya <i>Failure</i> pada <i>Matrix</i> . (b) Delaminasi dan <i>Debonding</i> (c) <i>Final Failure</i>	96

DAFTAR TABEL

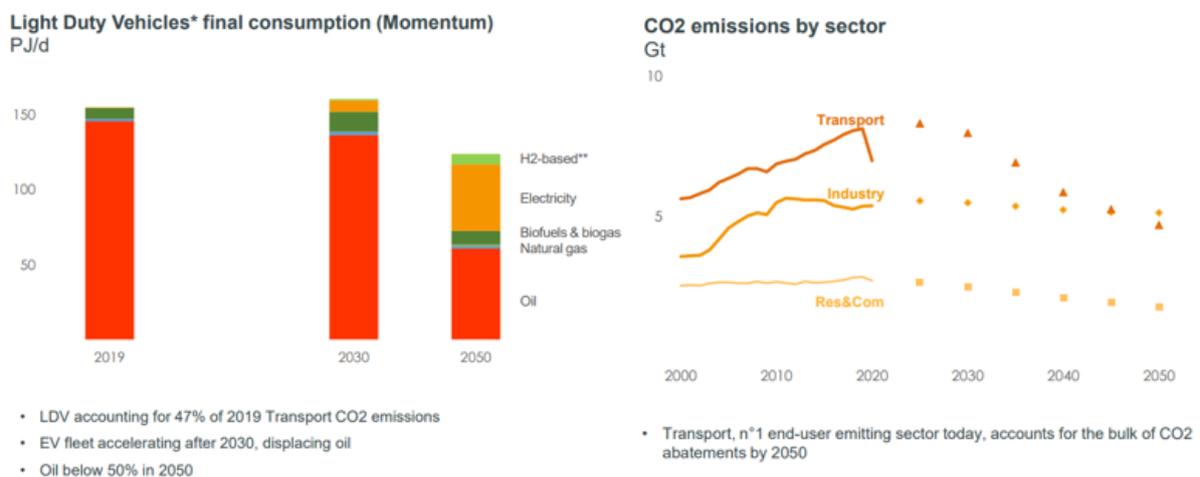
Tabel 2.1 Sifat Mekanik Ketiga Penggunaan Variasi <i>Separator</i> (Asp et al., 2021).....	9
Tabel 2.2 Hasil Pengujian Elektrokimia pada Kedua Penggunaan Variasi <i>Separator</i> (Asp et al., 2021)	10
Tabel 2.3 Kebutuhan Geometri Spesimen <i>Tensile</i> (ASTM D3039).....	19
Tabel 2.4 Rekomendasi Geometri Spesimen <i>Tensile</i> (ASTM D3039)	20
Tabel 3.1 Variasi dan Jumlah Spesimen Baterai Struktural Komposit	32
Tabel 3.2 Dimensi Spesimen Baterai dengan <i>Separator</i> Whatman	34
Tabel 3.3 Dimensi Spesimen Baterai dengan <i>Separator</i> WR50	35
Tabel 3.4 Dimensi Spesimen Baterai dengan <i>Separator</i> WR200	35
Tabel 3.5 Dimensi Spesimen Baterai dengan <i>Separator</i> Whatman Setelah CD.....	35
Tabel 3.6 Dimensi Spesimen Baterai dengan <i>Separator</i> WR50 Setelah CD	36
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Statistika Pengukuran <i>Separator</i>	49
Tabel 4.2 Nilai <i>Ultimate Tensile Strength</i> dari Seluruh Variasi <i>Separator</i>	54
Tabel 4.3 Nilai <i>Ultimate Tensile Strength</i> untuk Seluruh Variasi <i>Separator</i> setelah <i>Charge-Discharge Cycle</i>	55
Tabel 4.4 Nilai <i>Ultimate Tensile Strain</i> dari Seluruh Variasi <i>Separator</i>	56
Tabel 4.5 Nilai <i>Ultimate Tensile Strain</i> untuk Seluruh Variasi <i>Separator</i> setelah <i>Charge-Discharge Cycle</i>	56
Tabel 4.6 Nilai <i>Young's Modulus</i> dari Seluruh Variasi <i>Separator</i>	58
Tabel 4.7 Nilai <i>Young's Modulus</i> dari Seluruh Variasi <i>Separator</i> setelah <i>Charge-Discharge Cycle</i>	58
Tabel 4.8 <i>Failure Tensile Strength</i> pada Seluruh Spesimen per Variasi.....	59
Tabel 4.9 <i>Failure Tensile Strength</i> pada Seluruh Variasi <i>Separator</i> setelah <i>Charge-Discharge Cycle</i>	60
Tabel 4.10 <i>Failure Tensile Strain</i> pada Seluruh Spesimen per Variasi.....	60
Tabel 4.11 <i>Failure Tensile Strain</i> pada Seluruh Variasi <i>Separator</i> setelah <i>Charge-Discharge Cycle</i>	61
Tabel 5.1 Data hasil <i>flexural test</i> pada baterai dengan <i>separator</i> Whatman.....	97
Tabel 5.2 Data hasil <i>flexural test</i> pada baterai dengan <i>separator</i> WR50.....	98
Tabel 5.3 Data hasil <i>flexural test</i> pada baterai dengan <i>separator</i> WR200.....	98

Halaman sengaja dikosongkan..

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi yang semakin pesat berbanding lurus dengan konsumsi energi yang semakin melonjak. Hal tersebut membuat negara di dunia bersatu dan mengadakan konferensi tingkat tinggi yang membahas pencegahan perubahan iklim yang diakibatkan oleh emisi dari sektor industri, transportasi, dan lain-lain, kembali dilaksanakan pada tahun 2021, konferensi yang juga dikenal dengan nama COP26 (*Conferences of Parties* ke 26) yang diselenggarakan di Glasgow, Britania Raya. Semua negara partisipan konferensi tersebut setuju dan menganggap kondisi bumi dengan kondisi penuh polusi ini tidak bisa dibiarkan, termasuk Presiden Indonesia, Bapak Joko Widodo, yang mengatakan bahwa Indonesia berkomitmen dalam mereduksi jejak karbon pada sektor energi yang akan menghasilkan industri dengan *clean energy*. Komitmen tersebut dapat dilakukan dengan mengurangi penggunaan bahan bakar berbasis fosil.



Gambar 1.1 Penggunaan Energi pada Kendaraan Kecil (kiri), Emisi CO₂ yang Dihasilkan oleh Berbagai Sektor (kanan) (TotalEnergies, 2021)

Peningkatan populasi dan taraf hidup masyarakat diikuti dengan peningkatan kebutuhan energi yang berdampak pada tingginya laju pertumbuhan emisi CO₂ apabila tidak diikuti dengan pemilihan jenis bahan bakar yang berkadar karbon rendah serta penggunaan teknologi yang efisien dan ramah lingkungan seperti yang ditunjukkan oleh gambar 1.1 (IESR, 2021). Salah satu teknologi baru untuk mengurangi emisi CO₂ di dunia adalah *electric vehicle* (EV). Produk EV beberapa tahun ini mulai ramai di pasaran, baik jenis kendaraan mobil ataupun motor. Masyarakat mulai bergeser dari kendaraan dengan *internal combustion engine* (ICE) ke jenis transportasi EV. Jumlah EV juga diperkirakan akan meningkat pada tahun 2021, seperti yang sudah direncanakan oleh pemerintah dengan melakukan pengadaan publik mobil listrik untuk kendaraan dinas kementerian, dimulai dari Kementerian Perhubungan hingga pemerintah daerah. Selanjutnya, dengan pembebasan pajak barang mewah yang berlaku resmi setelah Oktober 2021, tingkat adopsi mobil listrik diproyeksikan meningkat lebih signifikan di akhir tahun. Beberapa teknologi EV buatan sendiri, seperti motor listrik, pengontrol, sistem manajemen baterai, dan kemasan baterai, dikembangkan untuk kendaraan roda dua dan mobil listrik (IESR, 2021).

Jenis transportasi EV di dunia masih berada pada tahap pengembangan, terutama pada komponen baterai. Baterai berfungsi untuk menyimpan energi kimia yang akan diubah menjadi energi listrik saat digunakan. Untuk menambah jarak tempuh dapat dilakukan dengan meningkatkan kapasitas baterai. Namun penambahan kapasitas baterai berbanding lurus dengan bertambahnya massa baterai untuk material penyusun baterai yang sama. Contohnya adalah masalah yang muncul pada baterai mobil Tesla model S dengan kapasitas baterai 85 kWh yang memiliki berat 25% dari total berat kendaraan (Tesla Model S Owner's Manual, 2018). Dapat disimpulkan bahwa sistem baterai saat ini hanya menambahkan bobot tanpa dapat memberi kontribusi pada kinerja struktural. Agar kinerja kendaraan listrik menjadi lebih efisien, diperlukan pengurangan berat kendaraan terutama pada bagian baterai yang dapat diganti dengan baterai struktural komposit (Asp et al., 2021).

Baterai struktural komposit bertujuan untuk menyediakan *mass-less energy storage* pada sistem struktur bertenaga listrik, menggunakan bahan ringan yang secara bersamaan dapat mengangkut ion litium serta menyimpan energi listrik sekaligus dapat mentransfer beban mekanis yang tinggi (Asp & Greenhalgh, 2014). Riset untuk membuat baterai komposit struktural multifungsi pertama kali dilakukan oleh *US Army Research Labs* (ARL) (O'Brien et al., 2006). *U.S Army Research Laboratory* menggunakan *carbon fiber* T300 sebagai anoda, campuran dari *LiFePO₄*, *acetylene black*, dan *polymer binder* sebagai katoda, serta *ion conductive resin* berbentuk gel sebagai elektrolit struktural. Manufaktur pada penelitian tersebut menggunakan metode VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*) yang dapat meminimalisir *void* serta meningkatkan volume fraksi pada *fiber* dibanding metode *hand lay-up*. Pengujian *cyclic voltammetry* dilakukan untuk melihat performa elektrokimia. Pada pengujian tersebut baterai dapat mengalirkan arus sebesar 6×10^{-4} pada 1 V. Selain pengujian elektrokimia juga dilakukan karakterisasi mekanik yaitu dengan metode *three-point bending* yang menghasilkan *stiffness* sekitar 5-90 GPa. Menurut *U.S Army Research Laboratory* riset ini kurang memuaskan karena baterai masih belum bisa untuk menghidupkan lampu, kemungkinan kegagalan diakibatkan terjadinya *short circuit* pada baterai struktural komposit.

Penelitian tentang baterai struktural komposit lainnya dilakukan oleh Prof. Leif E. Asp dari *Chalmers University*. Penelitian tersebut menggunakan berbagai jenis *separator*, *separator* sendiri merupakan komponen pada baterai yang berfungsi untuk memisahkan anoda dan katoda secara fisik, utamanya ketika terjadinya proses *ion transport* pada baterai dan untuk menghindari adanya arus pendek listrik internal (Orendorff, 2012). Selain sebagai pemisah, *separator* dengan bahan tertentu dapat berperan sebagai penguat struktur. Untuk itu, penelitian ini berfokus mengevaluasi performa mekanik sekaligus elektrokimia pada baterai struktural komposit. Jenis *separator* yang dijadikan variasi pada penelitian ini adalah Whatman GF/A dan *glass fiber plain weave*. Hasil yang didapat dari pengujian tersebut adalah untuk performa elektrokimia, *energy density* yang dihasilkan pada 0,05C untuk Whatman GF/A dan *glass fiber plain weave* secara berurutan adalah 23.6 Wh Kg⁻¹ dan 11.6 Wh Kg⁻¹. Untuk performa mekanik didapatkan nilai *elastic modulus* untuk Whatman GF/A dan *glass fiber plain weave* secara berurutan adalah 13.3 GPa dan 25,4 GPa. Angka tersebut merupakan hasil terbaik dari beberapa penelitian yang dilakukan oleh Prof. Leif E. Asp Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa pentingnya memiliki pemisah tipis dan kaku, serta fraksi volume *glass fiber* yang tinggi (Asp et al., 2019).

Xi Luo et al. (2015) dari *Tsinghua University* meneliti tentang *glass fiber fabric* sebagai *separator* pada baterai litium ion yang memiliki kinerja keselamatan yang tinggi. *Separator* memiliki peran penting dalam keselamatan kinerja baterai ion litium, banyak kejadian yang disebabkan oleh *internal shorting* pada baterai yang menyebabkan baterai tersebut rusak. *Separator* diharapkan memiliki stabilitas termal, dan memiliki performa mekanik dan elektrokimia yang baik. Material *glass fiber fabric* menjadi salah satu material yang baik digunakan sebagai *separator* untuk baterai ion litium karena memiliki stabilitas termal yang

baik, kekuatan mekanik yang tinggi, sifat elektrokimia yang baik, namun resistansi ion nol (Luo et al., 2015). Penelitian ini membandingkan penggunaan *glass fiber fabric* dengan *separator* komersial yang berbahan *polypropylene* (PP). Karakterisasi yang dilakukan adalah termodinamika dan mekanik, elektrokimia, dan morfologi. *Glass fiber fabric* memiliki penyusutan termal yang lebih rendah dibanding *separator* PP, selain itu *glass fiber* juga tetap stabil pada suhu tinggi dibandingkan dengan *separator* PP yang berkurang kekuatannya pada suhu tinggi. Uji tarik dilakukan untuk karakterisasi mekanik, didapatkan hasil bahwa modulus elastis dari *glass fiber fabric* empat kali lebih besar dibanding dengan PP. Untuk performa elektrokimia dilakukan *charge-discharge cycle* dengan arus 40mAh/g. *Glass fiber fabric* menunjukkan keandalan dan stabilitas yang luar biasa sebagai *separator*, dengan demikian, *glass fiber fabric* sebagai *separator* memiliki kinerja siklus serta elektrokimia yang serupa dengan *separator* komersial. Pada karakterisasi morfologi yang dilakukan dengan SEM menunjukkan bahwa kain serat kaca memiliki struktur berpori untuk memungkinkan ion lithium untuk melewati *separator*. Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah kinerja keselamatan baterai ion litium bisa sangat meningkat jika menggunakan *glass fiber fabric* sebagai *separator* karena terbukti memiliki kekuatan mekanik dan ketahanan termal yang baik, serta performa elektrokimia yang sebanding dengan *separator* komersial (Luo et al., 2015)

Berdasarkan ketiga penelitian tersebut, *separator* sebagai material multifungsi memiliki peranan yang sangat penting pada baterai struktural komposit yaitu berfungsi sebagai pemisah antara katoda dan anoda sekaligus penguat struktur pada baterai struktural komposit. Penelitian yang dilakukan oleh Prof Leif E. Asp dan *U.S Army Research Laboratory* memiliki kesamaan yaitu penelitian terhadap variasi material yang berbeda baik material anoda atau *separator*-nya. Untuk penelitian Xi Luo dkk. dari *Tsinghua University* menunjukkan kelebihan performa *glass fiber fabric* sebagai *separator* untuk baterai ion litium dibandingkan dengan *separator* komersial yaitu PP. Dengan begitu, terdapat kekosongan pada penelitian *separator* baterai struktural komposit mengenai pengaruh ketebalan *separator* dengan jenis material yang sama terhadap performa mekanik pada baterai struktural komposit. Selain itu juga terdapat kekosongan pada penelitian pengaruh *charge-discharge cycle* terhadap performa mekanik pada baterai struktural komposit, *charge-discharge cycle* pada baterai menimbulkan pertumbuhan litium dendrit yang dapat mempengaruhi mikro-struktur dari baterai, *charge-discharge cycle* juga dapat membentuk lapisan *solid electrolyte interphase* (SEI) yang muncul akibat dekomposisi elektrolit. Untuk itu, perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai pengaruh ketebalan *separator* dengan jenis material yang sama dan *charge-discharge cycle* terhadap performa mekanik pada baterai struktural komposit dengan menggunakan *separator* jenis *woven glass fiber* dengan dua variasi tenunan yaitu WR50 dan WR200. Ketebalan menjadi penting dikarenakan akan mempengaruhi volume dan massa dari baterai struktural komposit yang juga sangat berpengaruh pada performa mekaniknya yang difokuskan pada penelitian ini, selain itu juga mempengaruhi performa elektrokimia yang diteliti oleh saudara Bagus Alifah Hasyim.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian baterai struktural komposit ini, muncul beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh jenis *separator* terhadap performa mekanik baterai struktural komposit?
2. Bagaimana pengaruh *charge-discharge cycle* terhadap performa mekanik dari baterai struktural komposit?
3. Bagaimana pengaruh kelengkungan pada baterai struktural komposit terhadap performa elektrokimia?

1.3 Batasan Masalah

Batasan meliputi ketersediaan bahan penelitian, manufaktur baterai struktural komposit, serta kemampuan alat dan pengujian yang dilakukan. Berikut adalah batasan pada penelitian ini.

1. Material yang digunakan sebagai *separator* pada baterai struktural komposit adalah *woven glass fiber*. Terdapat dua variasi kerapatan yaitu *glass fiber* WR50 dan WR200. Kedua jenis *separator* dibandingkan dengan *separator* komersial yaitu Whatman GF/A.
2. Komponen yang digunakan pada baterai struktural komposit seperti tembaga dilapisi dengan grafit sebagai anoda, aluminium dilapisi dengan NMC532 sebagai katoda, *current collector* menggunakan bahan aluminium *foil* untuk katoda dan tembaga *foil* untuk anoda. Bahan yang digunakan dianggap sudah teruji sebagai komponen material baterai, dapat dibaca pada paper dan technical data sheet yang ada untuk aluminium NMC532 dan *copper coated graphite*.
3. Campuran *solid polymer electrolyte* (SPE) dianggap homogen.
4. Pembuatan *pouch cell* dan SPE untuk spesimen yang akan diuji mekanik dilakukan diluar *glove box*. Pembuatan *pouch cell* dan SPE untuk spesimen yang akan dilakukan pengujian elektrokimia dan *charge-discharge* di dalam *glovebox* pada suhu 20°C, di *glove box* tingkat konsentrasi H₂O diatur pada level yang kurang dari 1 ppm dan 0,16 ppm konsentrasi oksigen, dan *vacuum pressure* sebesar 0,19 mbar.

1.4 Tujuan

Penelitian baterai struktural komposit ini dilakukan untuk mencapai suatu target, untuk itu diperlukan tujuan penelitian yang jelas. Berikut adalah tujuan dari penelitian ini:

1. Menganalisis pengaruh jenis *separator* terhadap performa mekanik baterai struktural komposit.
2. Menganalisis pengaruh *charge-discharge cycle* terhadap performa mekanik dari baterai struktural komposit.
3. Menganalisis pengaruh kelengkungan pada baterai struktural komposit terhadap performa elektrokimia.

1.5 Manfaat Penelitian

Bagian ini menjelaskan apa saja manfaat yang diperoleh dalam penelitian ini. Selain untuk mendapatkan hasil dan kesimpulan berdasarkan tujuan yang sudah ditentukan, penelitian ini juga diharapkan memiliki dampak terhadap perkembangan teknologi terutama pada pengembangan baterai struktural komposit. Berikut adalah manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini.

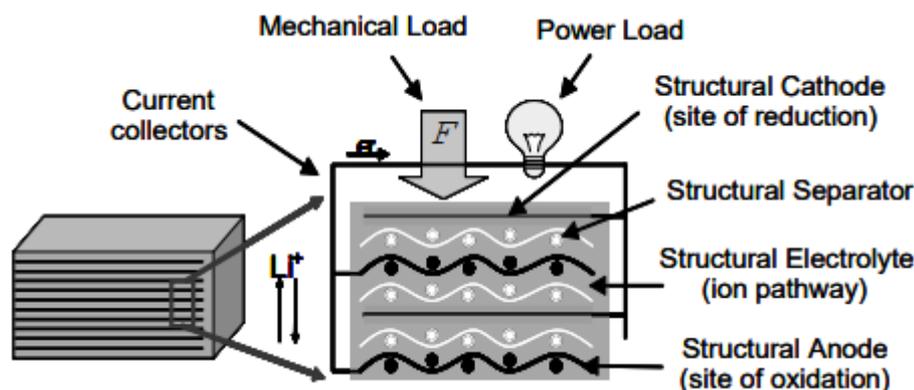
1. Melanjutkan penelitian tentang kemampuan mekanik dari baterai struktural komposit.
2. Dapat digunakan sebagai referensi bagi para pembaca guna menentukan modifikasi jenis *separator* pada baterai struktural komposit.

BAB II DASAR TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

(O'Brien et al., 2006) *U.S Army Research Laboratory* meneliti mengenai pengembangan komposit polimer struktural yang memiliki fungsi baterai. Pendekatan yang berbeda adalah merancang baterai yang juga menahan beban. Baterai ini menggunakan bahan-bahan yang dapat mengurangi berat secara signifikan, pengurangan berat dengan mengganti inert komponen struktural bersamaan memberikan tambahan daya untuk aplikasi beban ringan. Untuk menjalankan sistem ini, baterai menggunakan komponen pengganti yaitu anoda menggunakan *carbon fiber*, katoda struktural, dan polimer elektrolit struktural bebas pelarut, semua komponen tersebut dipilih untuk menghasilkan kombinasi antara kekuatan mekanik dan performa elektrokimia yang baik.

Desain dasar pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 2.1**. *Carbon fiber* berperan sebagai anoda, katoda struktural menggunakan bahan seperti *metal* atau *carbon fiber* (material konduktif) yang dilapisi dengan struktural substrat, lalu *solid polymer electrolyte* (SPE) yang mencakup semua komponen bersamaan. Bahan kimia berbasis lithium dipilih sebagai material SPE karena tingginya *energy density* dan kompatibilitas dengan berbasis polimer elektrolit (Xu, 2004). Lapisan *separator* berfungsi sebagai *structural support* dan lapisan *isolator* antara katoda dan anoda. SPE sebagai penghantar ion antar elektroda dan mentransfer beban kepada komponen lainnya.



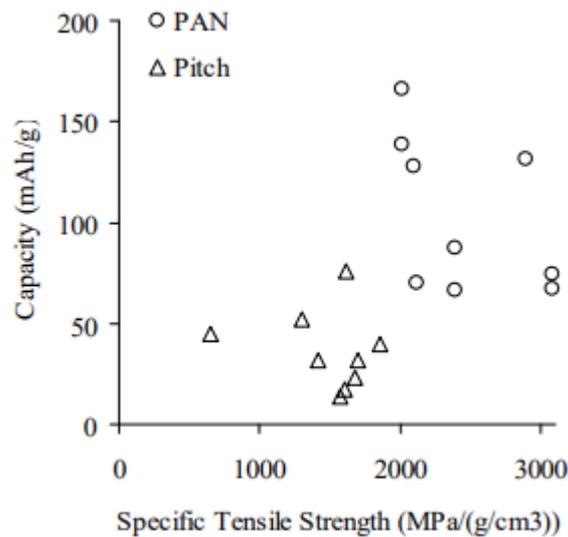
Gambar 2.1 Desain baterai struktural (O'Brien et al., 2006)

(O'Brien et al., 2006) Makalah ini membahas tentang pengembangan serta optimalisasi dari setiap komponen dari baterai struktural yaitu anoda, katoda dan SPE. Katoda menggunakan Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄, 82%) sebagai bahan interkalasi aktif yang menyediakan kapasitas elektrokimia. Asetilena hitam (18%), suatu bentuk bubuk karbon dengan konduktivitas tinggi, paling sering digunakan sebagai aditif konduktif. Setelah digiling, bubuk itu dikombinasikan dengan poli (*vinylidene fluoride*) (PVDF) agen pengikat dalam sistem pelarut campuran. Formulasi yang tepat dari LiFePO₄, asetilena hitam dan pengikat polimer, serta digiling dan kondisi saat *hot press* adalah semua variabel yang saling bergantung agar mendapat kerja katoda yang baik. Kapasitas elektrokimia hanya disediakan oleh LiFePO₄, konsentrasi akan mempengaruhi. Campuran digiling, lalu dicor ke 17% PVdF. Setelah berbentuk lembaran, dilanjut dengan hot pressing pada T300 *carbon fabric* pada suhu 150°C dan tekanan sebesar 900 kg.

Elektrolit struktural dirancang untuk membawa dan mentransfer beban bersamaan dengan mempertahankan ion yang memadai konduktivitas. Ini adalah pengembangan pada elektrolit, dimana elektrolit cair dicampur dengan resin akan menghasilkan elektrolit berbentuk

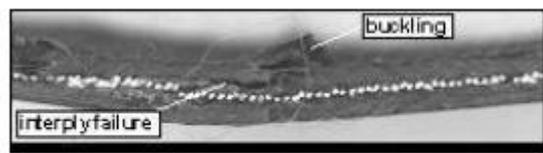
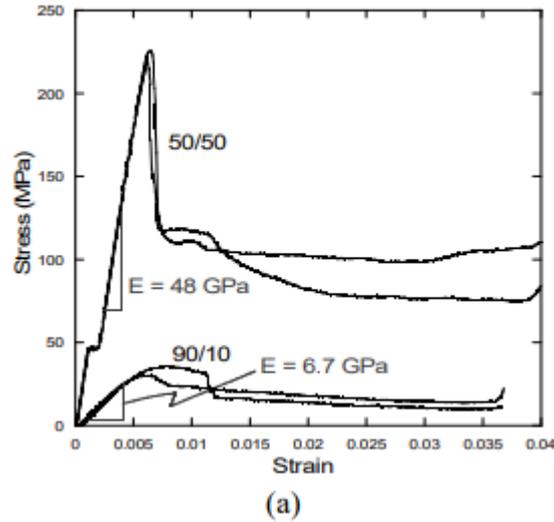
gel. Elektrolit yang baik adalah elektrolit yang tipis, karena memungkinkan untuk arus baterai yang lebih tinggi dengan membatasi atau mengurangi jarak yang harus ditempuh ion antar elektroda. Meminimalkan fraksi volume dari matriks elektrolit juga memungkinkan volume fraksi dari bahan elektroda struktural yang lebih baik, memungkinkan pengembangan kapasitas serta kekuatan baterai komposit struktural yang lebih tinggi. Elektrolit berbentuk gel ini di karakterisasi dengan *electrochemical impedance spectroscopy* dan uji tekan. Pengukuran impedansi dilakukan menggunakan Solartron 1260 Analyzer dan Solartron 1287 Electrochemical Interface pada rentang 106 Hz – 10 Hz pada suhu ruang (18-20°C). Untuk uji tekan menggunakan MTS *load frame* dengan beban 5 kN dan kecepatan *cross-head* sebesar 1 mm/menit.

Carbon fiber memiliki sifat yang kaku dan keras. Selain itu *carbon fiber* juga memiliki karakteristik elektrokimia yang luar biasa, dengan kapasitas spesifik yang sangat tinggi dan efisiensi coulombic (Asp and Greenhalgh 2015). Serat karbon dapat berfungsi sebagai media untuk interkalasi ion lithium untuk kimia baterai berbasis lithium (Takami et al., 2001). Sifat elektrokimia *carbon fiber* pada baterai struktural sangat kompleks dan bergantung pada komposisi serat. Beberapa jenis anoda yang digunakan pada penelitian ini adalah *PAN-based carbon fiber*, *pitch-based carbon fiber*, dan *graphite*.



Gambar 2.2 Sifat Multifungsi dari *Carbon Fiber* berkaitan dengan kapasitas elektrokimia pada siklus *charging* ketiga dengan kekuatan tarik spesifik (O'Brien et al., 2006)

Grafik pada **Gambar 2.2** jelas menunjukkan bahwa serat berbasis PAN untuk memberikan keunggulan sifat multifungsi. Penelitian ini menunjukkan bahwa T300 memiliki kombinasi penyimpanan energi yang paling diinginkan (160 mAh/g setelah 50 siklus; densitas area praktis minimal 3,0 mAh/cm² diantisipasi dalam sel kerja) dan sifat mekanik (kekuatan tarik 3,5 GPa, modulus tarik 230 GPa).

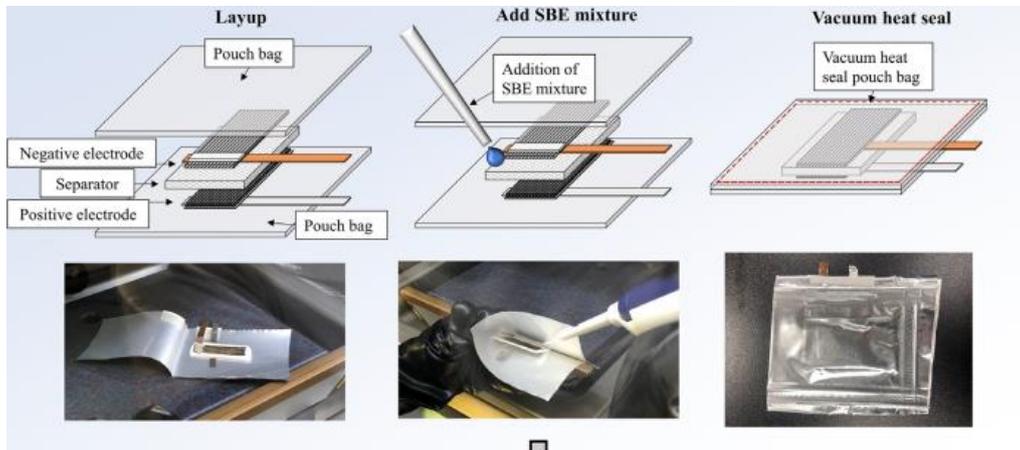


Gambar 2.3 (a) Hasil *three-point bend* untuk dua baterai komposit yang berbeda (90/10 dan 50/50). **(b)** Mode kegagalan untuk 50/50 baterai komposit (O'Brien et al., 2006)

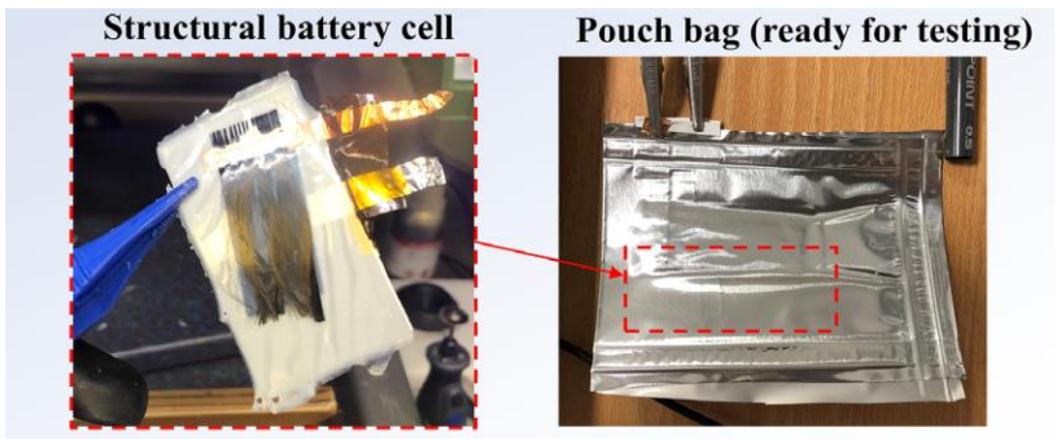
Dapat dilihat pada **gambar 2.3 (a)** Kurva "50/50" dihasilkan untuk komposit yang elektrolit polimernya terdiri dari 50 vol% PEG metil eter akrilat dan 50% PEG(660)2 *bisphenol-A dimethacrylate*, sedangkan kurva "90/10" adalah diukur untuk komposit dengan elektrolit polimer terdiri yang dari 90% vol% PEG metil eter akrilat dan 10%, relatif PEG(660)2 *bisphenol-A dimethacrylate*. Komposit 90/10 menunjukkan kekakuan yang lebih rendah, dan kegagalan yang lebih baik. Kegagalan uji tekan dapat dilihat pada **Gambar 2.3 (b)**, kegagalan didominasi dengan kegagalan *interply* dan *buckling* pada serat. Kegagalan tersebut merupakan kegagalan yang tidak diharapkan pada komposit. Kegagalan *interply* menunjukkan pentingnya adhesi penguatan matriks.

(Asp et al., 2021) melakukan penelitian untuk menciptakan sistem penyimpanan energi listrik dengan berat yang ringan atau disebut juga dengan baterai struktural komposit. Penelitian ini mengevaluasi dua aspek, yaitu performa mekanik dan elektrokimia dengan harapan terciptanya suatu baterai multifungsi yang dapat menyimpan energi dan menjadi struktur. Penelitian meneruskan beberapa penelitian yang sudah dilakukan, salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh *US Army Research Laboratory* pada 2007 yang berfokus pada pengembangan teknologi baterai komposit. Penelitian menggunakan konsep multifungsi dari segi material konstituen *baterai struktural komposit*. Baterai struktural komposit terdiri dari *carbon fiber* yang bertindak sebagai anoda yang berfungsi sebagai tempat singgahnya lithium, pengantar elektron, dan sekaligus sebagai penguat struktur, lalu aluminium yang dilapisi oleh LFP yang bertindak sebagai katoda yang menyediakan fungsi mekanik dan elektrokimia. Anoda dan katoda dipisahkan oleh *separator* berbahan *glass fiber* yang berfungsi untuk mencegah adanya arus pendek listrik yang dihasilkan oleh anoda dan katoda. Seluruh komponen tersebut dibasahi oleh *structural battery electrolyte* (SBE) yang berfungsi sebagai transport litium ion serta transfer beban mekanis antara serat, partikel, dan lapisan. Fokus penelitian ini ada pada bagian *separator* yang divariasikan menggunakan dua jenis material yaitu *glass fiber plain weave separator* dan *Whatman GF/A Separator* untuk dianalisis

pengaruh dari jenis, bentuk, dan ketebalan *separator* terhadap performa mekanik melalui uji tarik dan elektrokimia yang diukur menggunakan *galvanostatic charge-discharge cycles*. Manufaktur baterai struktural komposit menggunakan teknik manufaktur baterai *pouch cell* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.4**. Hasil akhir dari baterai struktural komposit ditunjukkan pada **Gambar 2.5**

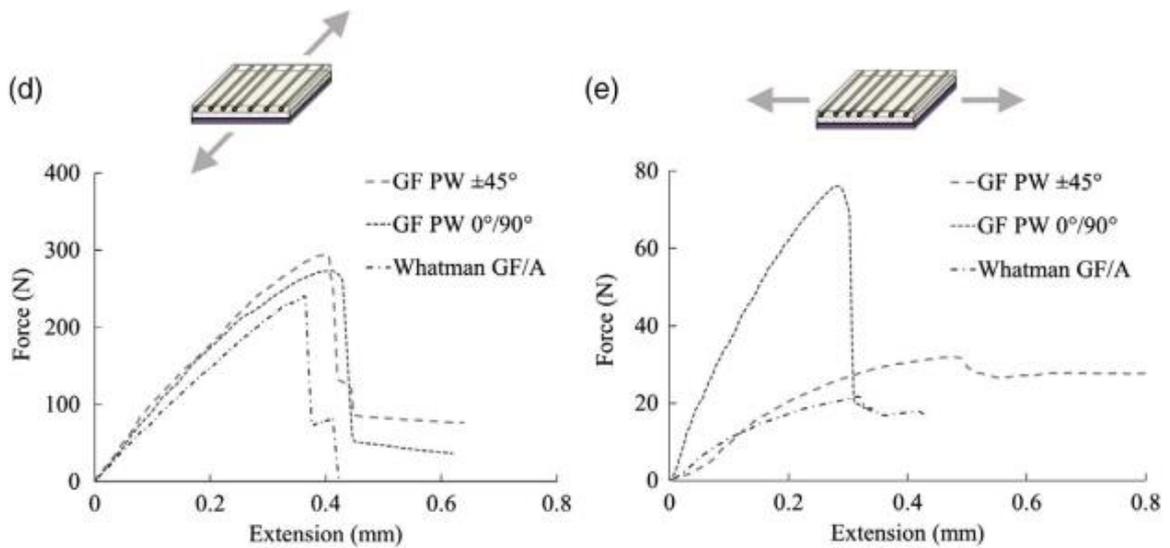


Gambar 2.4 Manufaktur baterai struktural komposit berbentuk *pouch cell* (Asp et al., 2021)



Gambar 2.5 Hasil akhir baterai struktural komposit berbentuk *pouch cell* (Asp et al., 2021)

Kurva *load-displacement* representatif untuk ketiga jenis spesimen dan arah pembebanan ditunjukkan pada **Gambar 2.6**. Modulus tinggi dan respons linier diharapkan karena CF kaku di elektroda negatif berorientasi sejajar dengan arah pembebanan. CF di elektroda negatif dan *glass fiber plain weave separator* ditempatkan dengan serat memanjang baik dalam arah orientasi 45 atau 0/90, di mana arah 0 sejajar dengan arah x.



Gambar 2.6 Hasil uji tarik pada kedua penggunaan variasi *separator* (Asp et al., 2021)

Modulus elastisitas pada arah x (E_x) tertinggi ada pada baterai struktural komposit dengan *separator glass fiber plain weave separator* orientasi 0/90 yang diuntungkan dengan orientasinya. GF yang memanjang ke arah 0 keduanya memperkuat baterai struktural komposit secara maksimal dan untuk arah beban ini. Modulus elastisitas dalam arah y (E_y) untuk baterai struktural yang terbuat dari tenunan polos GF berorientasi 45 dan pemisah Whatman GF/A cukup rendah dibandingkan dengan 0/90. Pada *glass fiber plain weave separator* orientasi 45 baterai struktural karena komposit ini menopang beban geser yang cukup besar. Terdapat kemungkinan bahwa hasil uji tarik terganggu oleh kegagalan prematur pada kecacatan permukaan baterai struktural komposit serta konsentrasi tegangan pada *clamping region*. Hasil yang terdapat pada **tabel 2.1** harus dianggap lebih rendah dari batas kekuatan baterai struktural komposit yang diuji. Kekuatan *glass fiber plain weave separator* bisa mencapai dua kalinya *Whatman GF/A separator* baik dalam arah x maupun y . Kekuatan tarik paling besar pada arah x ada pada *glass fiber plain weave separator* orientasi 45 yaitu 312 MPa sedangkan pada arah y ada pada *glass fiber plain weave separator* orientasi 0/90 yaitu 72 MPa

Tabel 2.1 Sifat Mekanik Ketiga Penggunaan Variasi *Separator* (Asp et al., 2021)

Property	Separator type		
	Whatman GF/A	GF plain weave $\pm 45^\circ$	GF plain weave $0^\circ/90^\circ$
E_x [GPa]	18.3(± 0.9)	14.6(± 0.6)	25.4(± 3.3)
E_y [GPa]	2.9(± 0.5)	2.8(± 0.2)	13.3(± 0.7)
X [MPa]	>163	>312	>287
Y [MPa]	>16	>34	>72

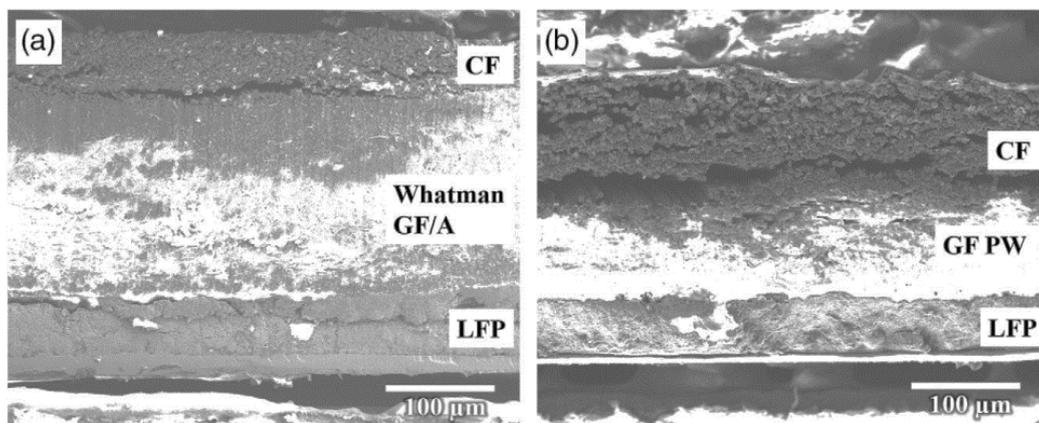
Untuk pengujian elektrokimia, didapatkan perbedaan *energy density* pada kedua variasi penggunaan *separator*. Pada *charge* sebesar 0.05C selama 20 jam menghasilkan *energy density* pada *Whatman GF/A* dan *GF plain weave* sebesar 11.6 dan 23.6 Wh Kg⁻¹ secara berturut-turut.

Angka ini didapatkan melalui massa total dari spesimen. Perbedaan *energy density* disebabkan oleh adanya perbedaan ketebalan *separator*.

Tabel 2.2 Hasil Pengujian Elektrokimia pada Kedua Penggunaan Variasi *Separator* (Asp et al., 2021)

Separat			ave	
	Battery cell	Active mat.	Battery cell	Active mat.
Specific capacity [Ah kg^{-1}]	4.13	32.2	8.55	38.4
Energy density [Wh kg^{-1}]	11.6	90.1	23.6	106
Calculated maximum energy density [Wh kg^{-1}]	37.7	220	60.6	220
Specific power [W kg^{-1}]	5.94	34.7	9.56	34.7
Total mass of cell [g cm^{-2}]	0.074		0.046	
Cell thickness [mm]	0.40		0.27	

Pada pengamatan SEM, *separator GF Plain weave* memiliki ketebalan sebesar $70 \mu\text{m}$ dan *Whatman GF/A* memiliki ketebalan sebesar $185 \mu\text{m}$. Ketebalan yang lebih pada *Whatman GF/A* menyebabkan terjadinya resistansi internal yang meningkat sehingga berkurangnya kemampuan untuk menggunakan kapasitas maksimum dari *energy density* material aktif yang ada. Pada penelitian ini tidak berfokus pada adanya kapasitas yang hilang akibat pemberian siklus pengecasan secara berkelanjutan.

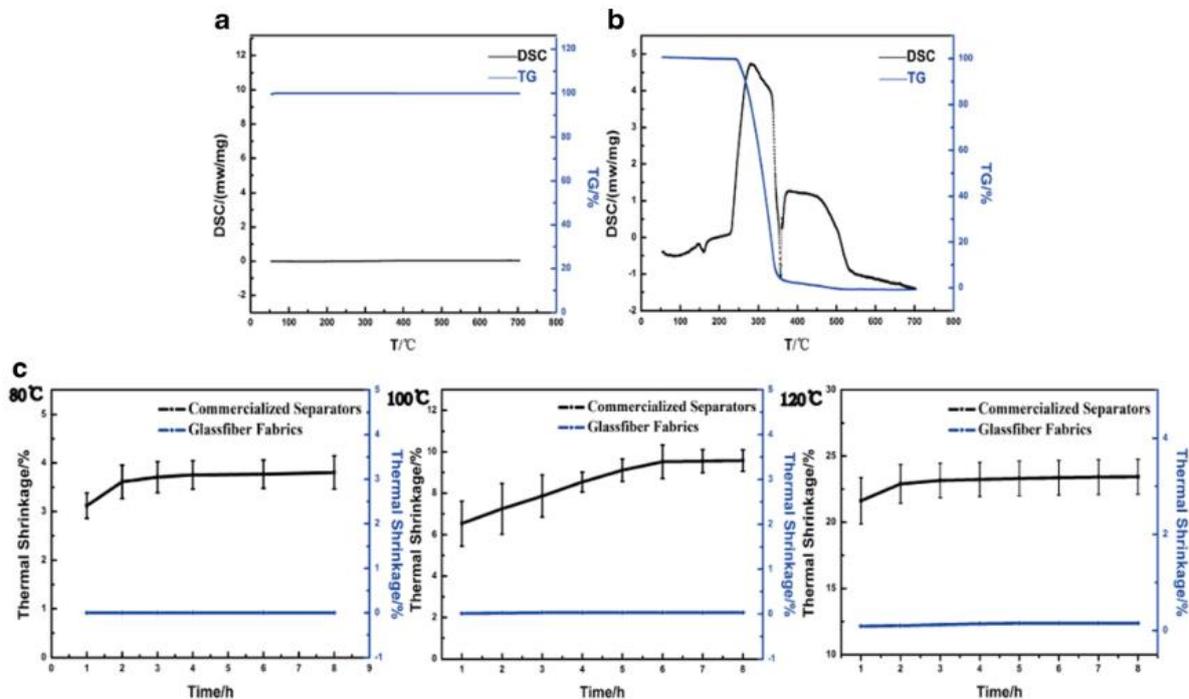


Gambar 2.7 Pengamatan SEM pada Baterai Struktural Komposit dengan *Separator* (a) *Whatman GF/A* dan (b) *GF plain weave* untuk Melihat Perbedaan Ketebalan (Asp et al., 2021)

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah pentingnya menggunakan *separator* yang tipis dan kaku untuk meningkatkan ketebalan relatif dan volume fraksi yang akan mempengaruhi performa mekanik dan elektrokimia.

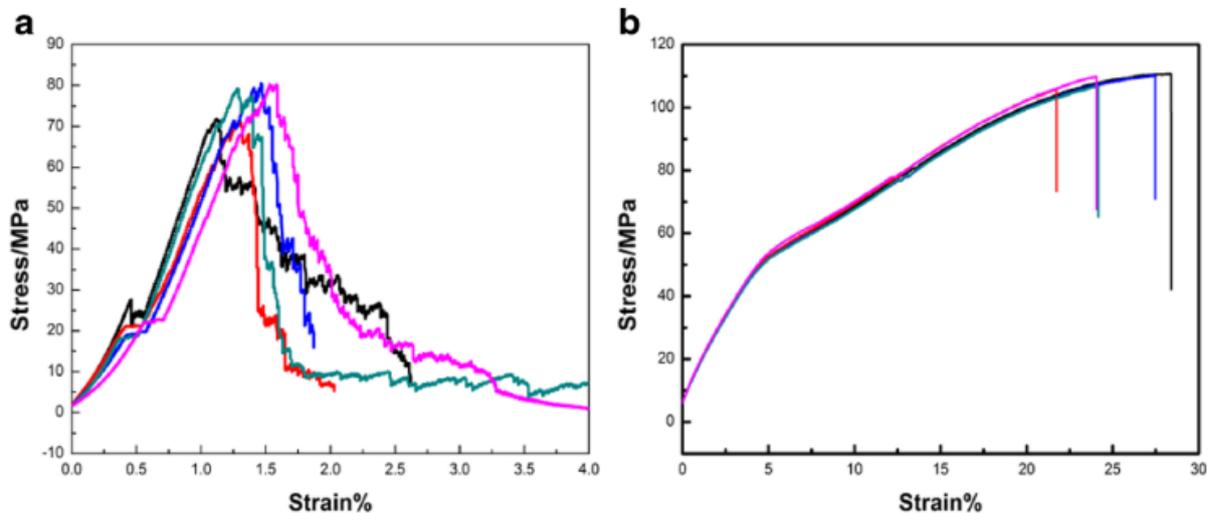
(Luo et al., 2015) melakukan tentang peranan *glass fiber fabric* sebagai *separator* pada baterai ion litium. *Separator* memiliki peran penting sebagai pengaman pada baterai agar tidak terjadi *short circuit* yang dikarenakan oleh menempelnya katoda dan anoda. Idealnya, *separator* yang aman memiliki beberapa sifat ini, yaitu resistansi ion nol, ukuran pori yang tepat, kekuatan mekanik yang tinggi, dan stabilitas termal yang baik. Struktur *separator* dapat mempengaruhi resistansi internal dan struktur *interface*. Dua hal tersebut mempengaruhi kinerja, kapasitas baterai, serta keamanan pada baterai ion litium. Penelitian ini meneliti dua jenis *separator* yaitu *glass fiber fabric* dan *separator* berbasis polimer.

Karakterisasi yang dilakukan meliputi pengujian mekanik, termal, dan elektrokimia. **Gambar 2.8** merupakan hasil dari pengujian termal. **Gambar 2.8a** merupakan analisis thermal gravimetric pada *glass fiber fabric*, terlihat grafik yang rata menunjukkan bahwa tidak ada perubahan berat atau penyerapan serta pelepasan panas selama pengujian. Sedangkan pada **Gambar 2.8b** menunjukkan grafik naik dan turun yang memiliki puncak pada suhu sekitar 280-380°C, terdapat penyusutan pada berat yang terjadi karena dekomposisi polimer pada suhu tinggi. **Gambar 2.8c** menunjukkan penyusutan yang diakibatkan oleh termal. *Glass fiber fabric separator* tidak mengalami perubahan penyusutan oleh suhu dan waktu. Pada *separator* polimer, penyusutan termal mencapai 23% pada temperatur 120°C yang dapat menyebabkan kerusakan pada permukaan.



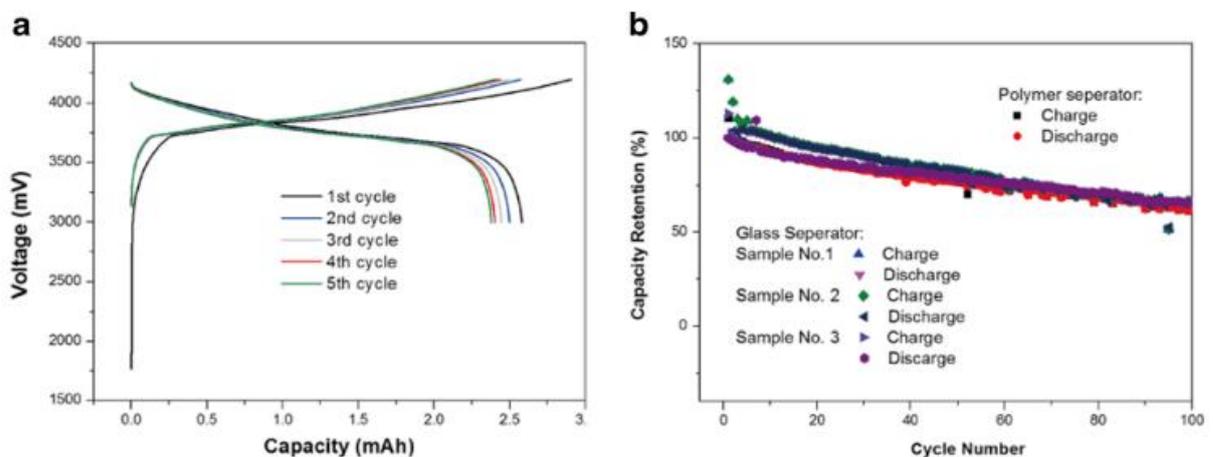
Gambar 2.8 Analisis *Thermal Gravimetric* dan Penyusutan Thermal (Luo et al., 2015)

Pengujian mekanik yang dilakukan adalah *tensile test*. Dapat dilihat pada **Gambar 2.9** menunjukkan grafik *stress-strain* pada kedua jenis *separator*. Keduanya memiliki kekuatan tarik yang tidak jauh beda yaitu untuk *glass fiber fabric* sebesar 80 MPa dan *separator* polimer 100 MPa. Namun dapat dilihat pada **Gambar 2.9a**, *glass fiber fabric* terlihat empat kali lebih elastis dibanding *separator* polimer. Dapat disimpulkan sifat mekanik pada *glass fiber fabric* membuatnya dapat digunakan sebagai *separator* pada baterai ion litium.



Gambar 2.9 Grafik *Stress-Strain* pada *Glass Fiber Fabric*(a) dan *Separator* Polimer(b)

Pengujian elektrokimia pada dua jenis *separator* ditunjukkan pada **Gambar 2.10**. Untuk *charge-discharge cycle* pertama terlihat baterai memiliki garis yang lebih panjang yaitu mencapai 3,8v. **Gambar 2.10b** menunjukkan *cycling performance* dari dua jenis *separator*, terlihat *glass fiber fabric* memiliki performa elektrokimia yang mirip dengan *separator* polimer. Selain itu, *glass fiber fabric* memiliki keandalan dan stabilitas yang baik.



Gambar 2.10 Hasil Pengujian Elektrokimia dari Kedua Jenis *Separator*

Kesimpulan dari penelitian yang dilakukan oleh Luo dkk. adalah *glass fiber fabric* sangat mumpuni untuk digunakan sebagai *separator* pada baterai ion litium karena memiliki stabilitas termal, performa mekanik dan elektrokimia yang baik dibandingkan dengan *separator* polimer

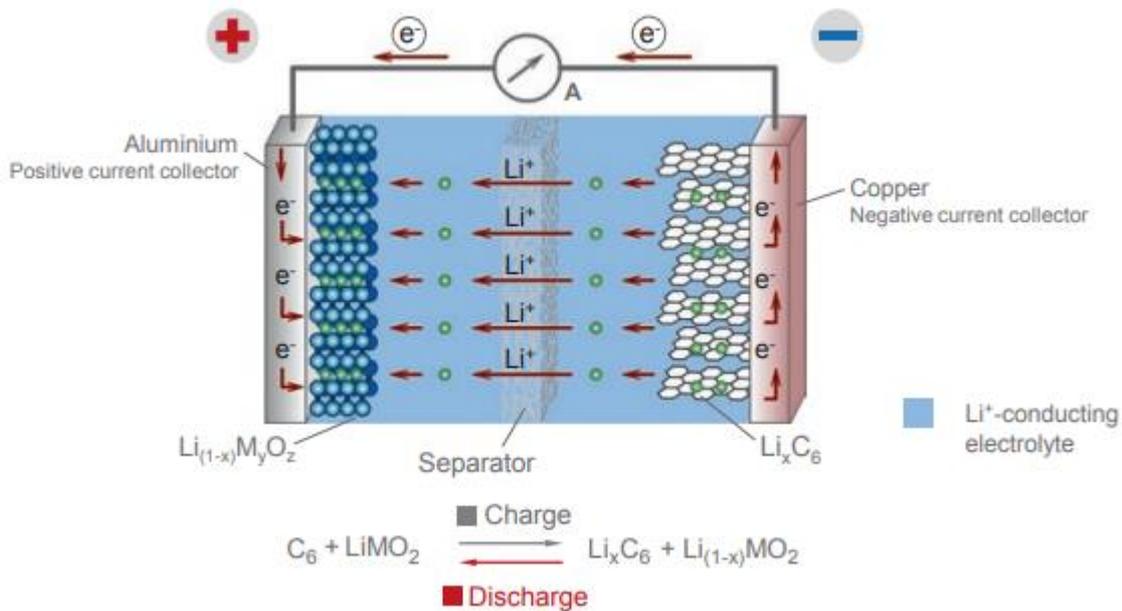
2.2 Baterai Litium

Baterai merupakan perangkat yang dapat mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan aktif menjadi energi listrik secara langsung melalui reaksi oksidasi-reduksi (redoks) sebuah elektrokimia. Dalam kasus sistem isi ulang, baterai diisi oleh pembalikan proses. Jenis reaksi melibatkan transfer elektron dari satu materi ke yang lain melalui sebuah sirkuit listrik. Oleh karena itu, baterai mampu memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi (Linden and Reddy, 2002). Baterai litium hadir dalam berbagai macam bentuk yaitu *cylindrical*, *prismatic*, dan *pouch cell*. Baterai dapat dijadikan satu sel baterai atau beberapa sel baterai tergantung pada aplikasinya, yang dihubungkan secara seri ataupun paralel bergantung pada kapasitas yang dibutuhkan (Korthauer, 2018).

Untuk baterai litium dikategorikan sebagai penyimpan energi dengan densitas energi yang cukup tinggi, efisiensi tinggi, dan memiliki umur yang panjang. Penyimpan energi ini biasanya memiliki tegangan sebesar 4 V dengan densitas energi di antara 100 Wh kg^{-1} dan 150 Wh kg^{-1} (Linden and Reddy, 2002). Secara konvensional, baterai litium terdiri dari anoda yang terbuat dari grafit, katoda yang terbuat dari logam lithium oksida, dan elektrolit yang terdiri dari larutan garam litium. Yang dimana pada baterai tersebut, dipasang *separator* antara anoda dan katoda. Untuk meningkatkan densitas energi spesifik, dapat dilakukan dengan meminimalkan berat sel, bersamaan dengan memaksimalkan rasio berat litium dengan berat sel. Untuk sel ion litium, misalnya, nilai stoikiometri teoretis dari pengali anodik (fA) sama dengan 10,3 sedangkan untuk katoda (fC) adalah 25; dengan demikian, kepadatan energi spesifik teoretis maksimum untuk sel maksimum 4,2 V (dengan *discharge*, tegangan menurun) dihitung antara 380 dan 460 Wh/kg bergantung pada apakah berat komponen tambahan diperhitungkan atau tidak. Tegangan operasi selama *discharge* diturunkan dari nilai maksimum 4,2 V ke nilai *cut off* 2,8 V, memberikan nilai rata-rata 3,35 V selama debit siklus. Oleh karena itu, kerapatan energi spesifik praktis berada di wilayah 160 Wh/kg untuk sel ion litium (Aifantis et al., 2010).

Seperti yang ditunjukkan pada **gambar 2.10** ion litium bergerak dari elektroda negatif ke elektroda positif melalui elektrolit dan *separator* selama proses *discharge*. Saat proses *discharge*, elektron yang berperan sebagai pembawa listrik bermigrasi dari elektroda negatif melalui kabel ke elektroda positif yaitu aluminium sebagai *current collector*. Untuk *charge*, proses berjalan sebaliknya yaitu ion litium bermigrasi dari elektroda positif melalui elektrolit dan *separator* menuju elektroda negatif (Korthauer, 2018).

Proses insersi atau ekstraksi ion merupakan tahapan yang juga dapat dikatakan sebagai proses *charge* dan *discharge* baterai litium. Proses dekomposisi terjadi pada bagian anoda dan katoda sehingga akan mengonsumsi massa dan elektrolit. Hal tersebut menyebabkan kapasitas serta keamanan mengalami penurunan. Perlu fokus dalam memastikan performa dan kualitas dari baterai agar fenomena dekomposisi ini dapat dikendalikan untuk menjamin kinerja dari baterai (Scrosati and Garche, 2010).



Gambar 2.11 Diagram Proses *Discharge* pada Baterai Ion Litium (Korthauer, 2018)

2.3. Solid Polymer Electrolyte (SPE)

SPE memiliki beberapa keuntungan daripada elektrolit berbentuk cairan ataupun gel, yaitu berbobot ringan, memiliki fleksibilitas, serta dapat SPE dapat membentuk benda berbentuk rumit. SPE dapat menjadi kaku jika difungsikan sebagai matriks dari suatu bahan seperti fiber. Contoh polimer yang digunakan untuk SPE adalah polietilen oksida (PEO), poliakrilonitril (PAN), polivinilidena (PVDF), polivinil alkohol (PVA), dan polimetil metakrilat (PMMA). Masing-masing polimer tersebut memiliki keunggulan. Transport pengisian dan mobilitas molekul sangat mempengaruhi konduktivitas dari elektrolit polimer yang digunakan (Shukla et al., 2014).

Semua elektrolit padat yang digunakan untuk baterai ion lithium harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

1. Konduktivitas ionik tinggi, terutama konduktivitas ionik yang relatif tinggi pada suhu kamar dan konduktivitas elektronik serendah mungkin untuk menghindari kebocoran arus.
2. Stabilitas struktur fasa yang baik, seharusnya tidak terjadi transisi fasa saat digunakan, dan rekristalisasi harus dicegah untuk elektrolit padat.
3. Stabilitas kimia yang baik harus dipertahankan, terutama selama proses pengisian dan tidak boleh ada reaksi redoks pada kontak dengan logam. Stabilitas elektrokimia yang baik, yaitu memiliki elektrokimia di atas 4,2 V (Wu, 2005).

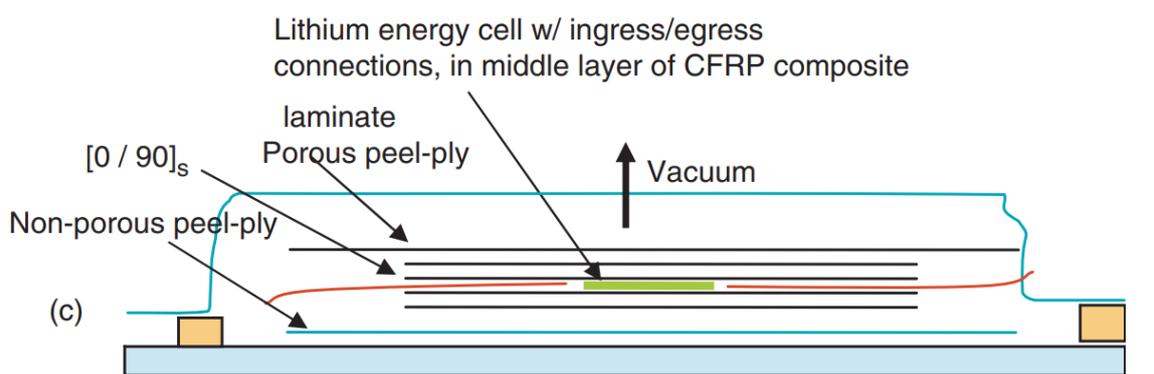
2.4 Baterai Struktural Komposit

Baterai struktural komposit merupakan material rekayasa yang dapat menyimpan energi listrik dan berfungsi sebagai struktur untuk menopang beban sehingga berpotensi untuk mengaplikasikan konsep desain ringan pada semua moda transportasi. Elektrolit padat, elektroda kuat, dan pemisah biasanya digunakan dalam baterai, tetapi baterai yang kaku dan kuat belum marak digunakan. Baterai pada umumnya menambah berat pada mesin atau sistem tanpa memberikan kontribusi pada performa strukturnya. Untuk itu, baterai struktural komposit muncul dengan konsep multifungsi yaitu baterai yang menunjang rangka struktur pada suatu sistem. Dengan kata lain, baterai komposit ini juga dapat disebut sebagai “*mass-less energy storage*” dan memiliki potensi besar untuk memulai revolusi dalam rancangan kendaraan listrik maupun mesin atau sistem lainnya (Asp, et al., 2021).

Konsep *structural power composites* mengedepankan multifungsionalitas. Dalam konsep perancangan menawarkan penghematan yang signifikan dalam massa dan volume tingkat sistem, parameter lainnya seperti ketahanan, peningkatan performa dari segi elektrokimia dan mekanik, dan harga yang murah juga termasuk proses optimasi (Asp & Greenhalgh, 2014). Pada pengembangan material penyimpan energi, terdapat dua konsep yang dapat digunakan untuk melakukan pendekatan saat melakukan proses sintesa material tersebut.

2.4.1 Penyimpan Energi berdasarkan Struktur Multifungsi

Konsep ini menggunakan pendekatan multifungsi tingkat struktur pada sintesa dari baterai struktural komposit. Strategi dari pendekatan ini adalah untuk mengoptimalkan sistem pengemasan baterai untuk mencapai tujuan multifungsi dengan metode menambahkan lapisan baterai yang tipis pada suatu struktur material komposit yang membentuk *sandwich structure* atau struktur bertumpuk. Dua komponen yaitu baterai dan material komposit yang memiliki fungsinya masing-masing disintesis menjadi satu kesatuan membentuk struktur bertumpuk sehingga dapat mengurangi volume serta massa. Hasil penelitian menunjukkan hasil yang kurang memuaskan karena terdapat kekurangan pada performa mekanik, menggabungkan kedua komponen menjadi satu kesatuan *sandwich structure* berpotensi untuk memicu delaminasi pada permukaan material. Walaupun juga memiliki kelebihan yaitu efisiensi volume dan massa yang ringan (Pereira et al., 2009).



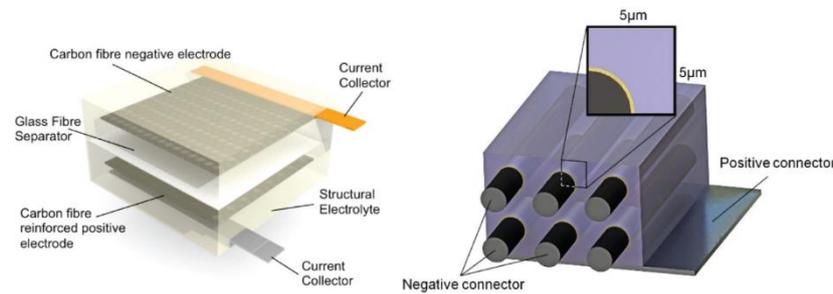
Gambar 2.12 Konsep metode manufaktur material komposit struktur baterai (Pereira et al., 2009)

2.4.2 Konsep Material Multifungsi

Konsep ini menggunakan pendekatan pada material yang memiliki kedua fungsi yaitu menyimpan energi dan dapat menerima pembebanan. Material yang digunakan terdiri dari material pembentuk komposit (matriks dan penguat), namun material tersebut juga berfungsi sebagai penyimpan energi

Pada pendekatan ini, baterai struktural komposit terdiri dari empat komponen utama, yaitu katoda, anoda, *separator*, dan *solid polymer electrolyte* (SPE). Selain sebagai komponen baterai, komponen tersebut juga berperan sebagai struktur dimana material tersebut dapat menahan pembebanan. Pada baterai struktural komposit ini, peran penguat anoda, katoda, dan *separator* berperan sebagai penguat pada komposit, dan SPE memiliki peran yaitu menghantarkan elektron sekaligus sebagai matriks yang mendistribusikan pembebanan dari luar permukaan ke penguat komposit. Konsep ini memiliki tantangan yaitu dengan konduktivitas ion pada SPE tidak sebesar *liquid*

electrolyte dan kekakuan pada SPE dapat mengurangi performa dari struktur baterai komposit (Asp et al., 2019).



Gambar 2.13 Susunan baterai komposit dengan menggunakan material *carbon fiber*, *glass fiber*, dan *structural electrolyte* (Carlson et al., 2010)

2.5 Separator

Separator merupakan salah satu komponen sel yang paling penting untuk memastikan keamanan sel. *Separator* adalah membran berpori tipis yang secara fisik memisahkan anoda dan katoda. Fungsi utama *separator* adalah untuk mencegah kontak fisik antara anoda dan katoda, sekaligus memfasilitasi transportasi ion dalam sel. Tantangan dengan merancang pemisah baterai yang aman adalah tercapainya kesetimbangan antara ketahanan mekanis dan porositas atau sifat transportasi (Orendorff, 2012). *Separator* untuk baterai alkali harus sangat tahan terhadap kondisi alkali yang sangat agresif, apalagi memiliki insulasi yang baik dan konduktivitas ionik dalam waktu yang bersamaan. Pemisah baterai tidak mengambil bagian dalam reaksi elektrokimia apa pun, namun pemisah memengaruhi kepadatan energi, masa pakai, dan keamanan baterai (Pléha et al., 2012). Terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan saat melakukan pemilihan *separator*. Selain insulasi listrik dan penghantar ion yang baik, *separator* harus memiliki kestabilan secara mekanik dan dimensi, kemudahan *separator* untuk terbasahi oleh elektrolit ketahanan terhadap bahan kimia yang baik agar tidak terdegradasi dengan mudah, dan memiliki sifat mekanik maupun kimia yang homogen pada seluruh bagian material. Sehingga terbentuklah baterai dengan kinerja optimal berdasarkan aspek elektrokimia, harga, serta keamanan (Arora & Zhang, 2004)

Separator yang biasa digunakan pada industri terbagi menjadi beberapa jenis, tergantung pada karakteristik fisik dan kimianya. Terdapat beberapa jenis *separator* yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan yang spesifik. Tiap jenis *separator* memiliki arsitektur dan performa kimiawi yang berbeda. Berdasarkan literatur yang dikutip, terdapat enam jenis *separator* yang digunakan dalam pembuatan baterai litium yaitu *microporous film*, *nonwoven*, *ion exchange membranes*, *supported liquid membranes*, *solid polymer electrolyte*, dan *solid ion conductors* (Arora & Zhang, 2004)

2.5.1 Microporous Film

Separator jenis ini dapat terdiri dari material organik maupun anorganik. Dari segi arsitektur, jenis *separator* ini memiliki pori-pori berdiameter sebesar 50-100 Å. Berikut adalah jenis material yang masuk dalam kategori *microporous film* yaitu *polyethylene* (PE), *polypropylene* (PP), *poly(tetrafluoroethylene)* (PTFE), *poly(vinyl chloride)* (PVC), dan material natural seperti halnya karet, asbestos, dan kayu (Arora & Zhang, 2004).

2.5.2 Nonwoven Separator

Separator jenis *nonwoven* merupakan produk tekstil yang dibuat menggunakan serat dengan metode manufaktur yang bermacam seperti tipe pembuatan lembaran, jaring, rajutan, berumbai, ataupun penggulangan maupun serat tak beraturan yang disatukan menggunakan gaya kohesi maupun tambahan material adhesi. Kemudian proses penggabungan selanjutnya dapat menggunakan proses kimia maupun termal. Ukuran pori yang ada pada jenis *nonwoven separator* ini berkisar antara 1 sampai 100 μm .

Penggunaan *separator* jenis ini digunakan pada beberapa jenis baterai. Keuntungan dari penggunaan *separator* ini yaitu pada konsistensi dari beberapa karakteristik pada material ini seperti halnya berat, ketebalan, porositas, dan kemampuan untuk mengurangi degradasi yang disebabkan oleh elektrolit. Material yang biasa digunakan pada *nonwoven* yakni *polyethylene* (PE), *polypropylene* (PP), *poly(vinyl chloride)* (PVC), *poly(tetrafluoroethylene)* (PTFE), dan *polyamide* (PA). Namun secara ukuran pori, *nonwoven separator* masih belum menyaingi *microporous film* dikarenakan terdapat kesulitan dalam pembuatan pori dengan ukuran di bawah 25 μm dengan performa mekanik yang dapat diterima (Arora & Zhang, 2004).

2.5.3 Ion Exchange Membranes

Jenis *separator* ini terbuat dari material polimer yang memiliki pori dengan diameter 20 Å. Karakteristik dari kemampuan transpor ion dari jenis *separator* ini memiliki interaksi yang kuat antara spesimen yang menyebar (contoh: ion litium) dan struktur molekuler dari polimer. Interaksi ini disebabkan oleh adanya kelompok dari ion yang dapat bertukar di dalam membran, yang memperbolehkan untuk membedakan antara ion yang menyebar maupun berpindah. Material yang biasa digunakan terbuat dari PP, PE, ataupun teflon yang memiliki ketahanan oksidasi yang sangat baik dan bahan kimia yang unggul ketahanan terhadap alkali (Arora & Zhang, 2004).

2.5.4 Supported Liquid Membranes

Tipe *separator* ini terdiri dari matriks padat dan fasa cair, yang dimana dijaga pada struktur mikro-poros dengan menggunakan gaya kapilaritas. Cairan yang ada pada *separator* ini harus tidak dapat dilarutkan di dalam elektrolit, secara kimia stabil, dan memiliki konduktivitas ion yang bagus. Beberapa tipe polimer yang biasa gunakan adalah *polypropylene* (PP), *polysulfone* (PS), *poly(tetrafluoroethylene)* (PTFE), dan *cellulose acetate* digunakan sebagai substrat untuk membran cair. Untuk baterai litium ion berbentuk polimer gel dapat menggunakan PvdF yang melapisi oleh membran *polyolefin-based microporous* (Arora & Zhang, 2004).

2.5.5 Solid Polymer Electrolyte

Selain menjadi elektrolit, *solid polymer electrolyte* juga dapat dikategorikan sebagai *separator* dikarenakan struktur yang cukup kaku. Namun, penggunaan dari SPE ini sebagai *separator* masih kurang diminati dikarenakan konduktivitas ion yang rendah pada suhu kamar. Material yang biasanya digunakan yakni *polyethylene oxide* (PEO) dan *poly(propylene oxide)*. (Arora & Zhang, 2004).

2.5.6 Solid Ion Conductors

Jenis *separator* ini merupakan material multifungsi, material ini digunakan sebagai *separator* sekaligus elektrolit. Material yang biasa digunakan terbuat dari material anorganik. Jenis *separator* ini memperbolehkan beberapa jenis ion untuk melakukan migrasi antar elektroda melalui kisi apabila terdapat perbedaan potensial maupun kimia (Arora & Zhang, 2004).

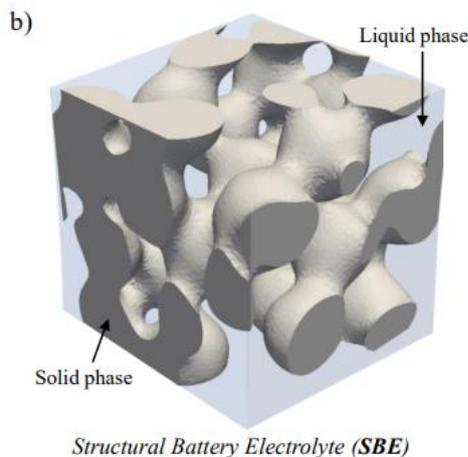
2.6 Fungsi Mekanis Baterai Struktural Komposit

Terdapat efek dari hubungan antara elektrokimia dan mekanik secara fungsi pada baterai struktural komposit. Material aktif pada baterai struktural komposit didesain untuk menahan beban mekanis dibanding dengan baterai konvensional yang hanya sebagai penghasil listrik. Berdasarkan hal tersebut, material aktif pada baterai struktural komposit mampu menerima tegangan dan regangan lebih besar dibandingkan dengan baterai konvensional (Carlson et al., 2010). Untuk sifat elastis material elektroda baterai, seperti serat karbon, grafit dan partikel elektroda positif, dapat dipengaruhi oleh konsentrasi litium. Modulus transversal dari *fiber* dapat meningkat lebih dari 100% ketika sepenuhnya *lithiated* (Carlstedt, 2022). *Lithiation* terjadi ketika litium bereaksi dengan elektroda pada baterai, elektroda yang digunakan pada penelitian ini adalah *carbon fiber* dan aluminium NMC. CF memiliki kekakuan tinggi, rasio kekuatan-terhadap-berat, dan mikrostruktur karbon yang memungkinkan interkalasi litium. *Lithiation* dan *delithiation* dapat berefek pada performa mekanik pada *carbon fiber* yang digunakan pada baterai struktural komposit. Modulus transversal dapat meningkat hingga dua kali lipat (bergantung pada jenis *carbon fiber*) namun modulus longitudinal menurun disebabkan oleh interkalasi litium dalam struktur *turbostratic graphitic crystal* yang disebabkan oleh meningkatnya volume serat. Modulus dan volume kembali seperti semula setelah proses *delithiation* (Duan et al., 2021).

2.6.1 Hubungan antara Potensi Kimia dan Tegangan Mekanis

Material elektroda menunjukkan hubungan voltase dan regangan, keadaan ini biasa disebut dengan efek *Piezo-Electro-Chemical-Transducer* (PECT). PECT adalah hubungan antara potensial elektrokimia dan regangan mekanis dalam penyisipan ion berbasis material elektroda. Perubahan potensial listrik dapat disebabkan oleh pemberian regangan mekanis yang diperkirakan datang dari hubungan antara potensi kimia dari *lithiated fiber* dan kondisi tegangan mekanis. Perubahan potensial listrik dapat diukur karena terkait dengan potensial kimia dari bahan elektroda aktif. PECT mempengaruhi struktur komposit. Fluks ion dapat secara langsung dipengaruhi oleh keadaan tegangan karena fakta bahwa kontribusi fluks yang didorong oleh difusi dikaitkan dengan perubahan dari potensial kimia dan tegangan mekanis (Carlstedt, 2022).

2.6.2 Konveksi yang didorong oleh tegangan



Gambar 2.14 Struktur nano *bi-continuous* berpori (Carlson et al., 2010)

Dapat dilihat pada **Gambar 2.14**, struktur *solid battery electrolyte* (SBE) menggunakan material berpori, beban mekanis yang diterapkan adalah: diharapkan untuk menginduksi perbedaan tekanan pada pori, tekanan tersebut dapat memberikan kontribusi terhadap perpindahan massa elektrolit dan transportasi ion. Tekanan pada pori adalah variabel independen yang dapat digunakan untuk mengevaluasi efek konveksi yang diakibatkan oleh tegangan (rembesan) pada fase cair SBE terhadap performa elektrokimia dan mekanik pada SBE. Tegangan efektif dipengaruhi oleh regangan yang terjadi serta modulus elastis material penyusun baterai. Performa SBE terkait langsung dengan keadaan tegangan (proses mekanis) dan fluks ion dalam elektrolit (proses elektrokimia) (Carlstedt, 2022).

2.7 Metode Pengujian

2.7.1 Flexural Test

Flexural test mengukur gaya yang diperlukan untuk menekuk balok bahan *plastic* dan menentukan resistensi terhadap lentur atau kekakuan suatu material. *Flex Modulus* adalah indikasi berapa banyak bahan dapat melenturkan sebelum deformasi permanen. (Shrivastava, 2018) *Flexural test* dapat dilakukan dengan *three-point bending* atau *four-point bending*. Untuk penggunaannya bergantung pada specimen yang diuji, untuk yang paling umum adalah *three-point bending* dengan berbagai rentang panjang untuk plastik dengan ekstensibilitas kecil besar. Dalam beberapa kasus seperti beberapa jenis *textile-fibre-reinforced plastics*, *four-point bending* lebih disukai. *Four-point bending* digunakan untuk mengurangi konsentrasi stres pada titik pembebanan tengah (Sims, 2003). Standar berikut berlaku untuk pengujian tersebut:

- ASTM D790-03 : Metode pengujian untuk mencari *flexural properties* untuk plastik yang diperkuat dan tidak, dan bahan isolasi listrik.
- ASTM D 7264/M7264 M : Metode pengujian untuk mencari *flexural properties* bahan komposit matriks polimer.
- ISO 178:2010 : Metode untuk menentukan *flexural properties* dari plastik kaku dan semi kaku.

2.7.2 Tensile test dengan standardisasi ASTM D3039

Parameter	Requirement
Coupon Requirements:	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed ^A
specimen width tolerance	±1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	±4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
Tab Requirements (if used):	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	±1 % tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

Tabel 2.3 Kebutuhan Geometri Spesimen *Tensile* (ASTM D3039)

Metode pengujian ini menentukan *tensile properties* dari bahan komposit matriks polimer yang diperkuat oleh serat. Spesimen berbentuk persegi panjang dan tipis yang dipasang pada mesin, diberi beban tegangan. Hasil yang didapat dari pengujian ini adalah *ultimate tensile strength* yang didapat dari beban maksimum sebelum gagal, *ultimate tensile strain*, *modulus of elasticity*, *poisson's ratio*, dan *transition strain*. Tabel 2.13 dan 2.14 dibawah merupakan hal yang perlu diperhatikan untuk menentukan geometri spesimen tensile

Tabel 2.4 Rekomendasi Geometri Spesimen *Tensile* (ASTM D3039)

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

Berikut adalah rumus dari *tensile strength*:

$$F^{tu} = \frac{p^{max}}{A}$$

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A}$$

Keterangan:

- F^{tu} = *Ultimate tensile strength*, MPa (psi)
- p^{max} = beban maksimal sebelum gagal, N (lbf)
- A = rata-rata luas *cross-section*, mm^2 (in^2).
- σ_i = *tensile strength* pada titik tertentu, MPa (psi)
- P_i = beban pada titik tertentu, N (lbf)
- A = rata-rata luas *cross-section*, mm^2 (in^2).

Berikut adalah rumus dari *tensile strain / ultimate tensile strain*:

$$\epsilon_i = \frac{\delta_i}{L_g}$$

Keterangan:

- ϵ_i = *tensile strain* pada titik tertentu
- δ_i = *extensometer displacement* pada titik tertentu, mm (in)
- L_g = panjang pengukur *extensometer*, mm (in).

Berikut adalah rumus dari *modulus of elasticity*:

$$E_f^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$$

Keterangan:

- E_f^{chord} = *tensile chord modulus of elasticity*, GPa (psi)
- $\Delta\sigma$ = perbedaan *tensile stress* antara keduanya titik regangan yang dipilih, MPa (psi)

$\Delta\epsilon$ = perbedaan antara dua titik regangan yang dipilih (nominal 0,002).

$\Delta\epsilon_l$ = perbedaan antara dua titik regangan longitudinal (nominal 0,001, 0,002, dan 0,005).

2.8 Kontribusi penelitian

Penelitian ini berfokus pada pengaruh jenis *separator* yang akan dilakukan variasi pada *separator* dengan menggunakan tiga jenis material yaitu *glass fiber* (WR50, WR200, dan *Whatman*) dan *solid polymer electrolyte* terhadap performa mekanik pada baterai struktural komposit berbentuk *pouch cell* yang akan ditinjau melalui *flexural test* dengan metode *four-point bending* untuk melihat pengaruh kelengkungan terhadap performa elektrokimia yang diukur dengan *multimeter* dan lampu yang disambungkan bersamaan saat pengujian dan *tensile test* yang mengacu pada ASTM D3039 untuk mendapatkan *mechanical properties* dari baterai struktural komposit. Selain itu penelitian ini juga berfokus pada pengaruh *charge-discharge cycle* atau yang telah melewati proses pengujian elektrokimia terhadap performa mekanik pada baterai struktural komposit. Untuk memperkuat hasil pengujian, dilakukan observasi dengan skala makro dan mikro pada baterai struktural komposit untuk mengetahui penyebab kegagalan. Hal ini dilakukan untuk mengisi kekosongan pada kedua penelitian yang dijadikan sebagai referensi, di mana penelitian *U.S Army Research Laboratory* berfokus pada pengembangan baterai struktural dengan membandingkan anoda dengan jenis yang berbeda, serta pengujian mekanik yang dilakukan adalah *flexural test* dengan metode *three-point bending*. Namun pengujian mekanik bukanlah fokus dari penelitian ini.

Leif E. Asp melakukan penelitian lanjutan dengan membandingkan dua jenis *separator* yaitu *glass fiber plain weave separator* dan *Whatman GF/A Separator* yang pada dasarnya kedua jenis tersebut menggunakan material yang mirip yaitu *glass fiber*. Pengujian mekanik yang dilakukan adalah uji tarik. Hasil yang didapat lebih baik *separator* jenis *glass fiber plain weave* pada sisi mekanik maupun elektrokimia, lalu juga *separator* yang tipis dan kaku sangat penting untuk meningkatkan volume fraksi, efek dari penggunaan *separator* yang tebal akan mengurangi *specific discharge capacity* yang dimiliki oleh baterai berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.

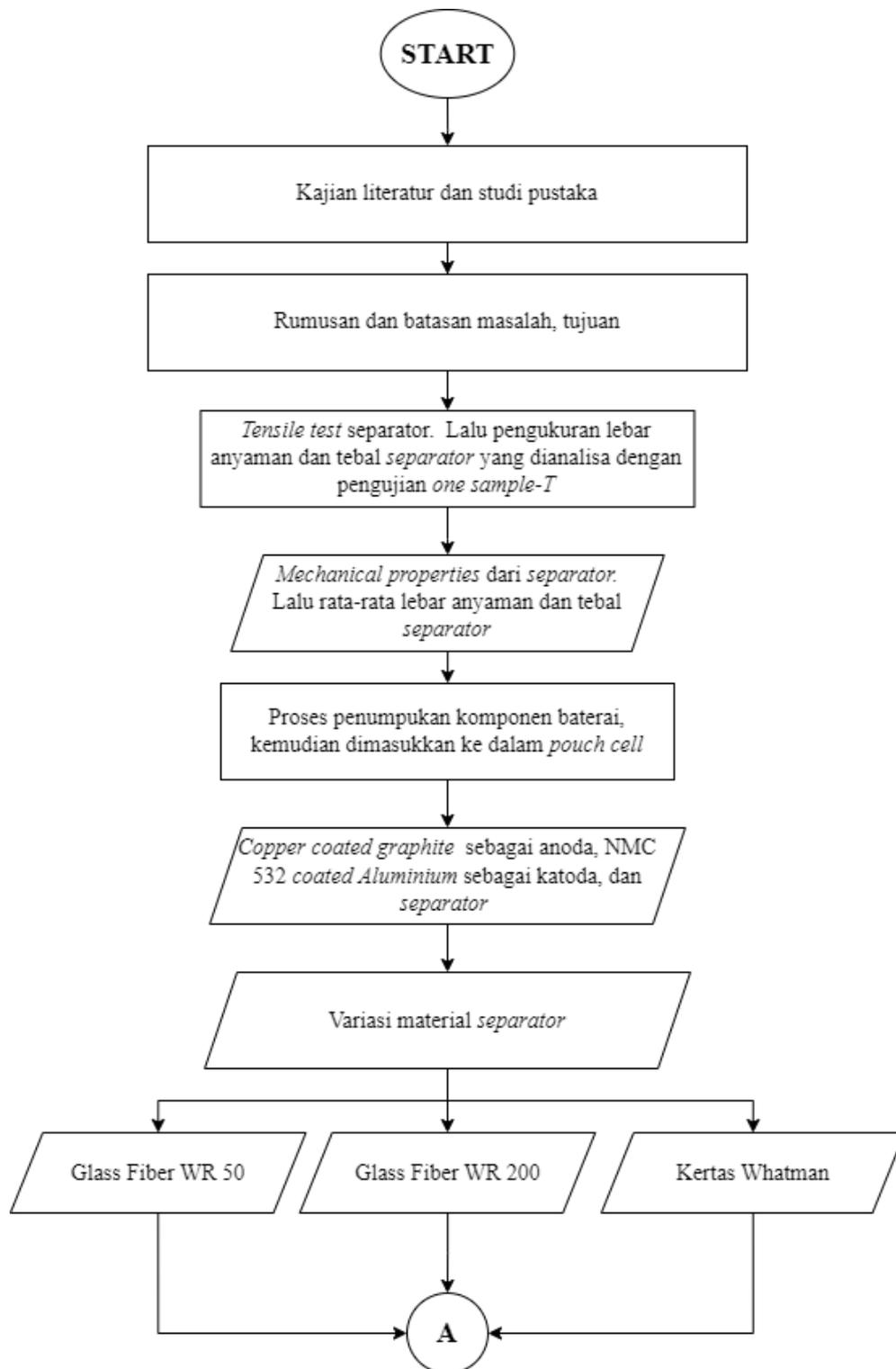
Penelitian yang penulis lakukan akan meneruskan serta mengisi kekosongan dari kedua penelitian tersebut. Harapannya, penulis dapat memberikan informasi mengenai pengaruh jenis *separator* dan *charge-discharge cycle* terhadap performa mekanik baterai struktural komposit lebih komprehensif sehingga dapat melengkapi riset yang sebelumnya sudah dilakukan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat membantu perkembangan dalam teknologi baterai struktural komposit yang saat ini dikembangkan oleh beberapa instansi maupun pihak.

Halaman sengaja dikosongkan..

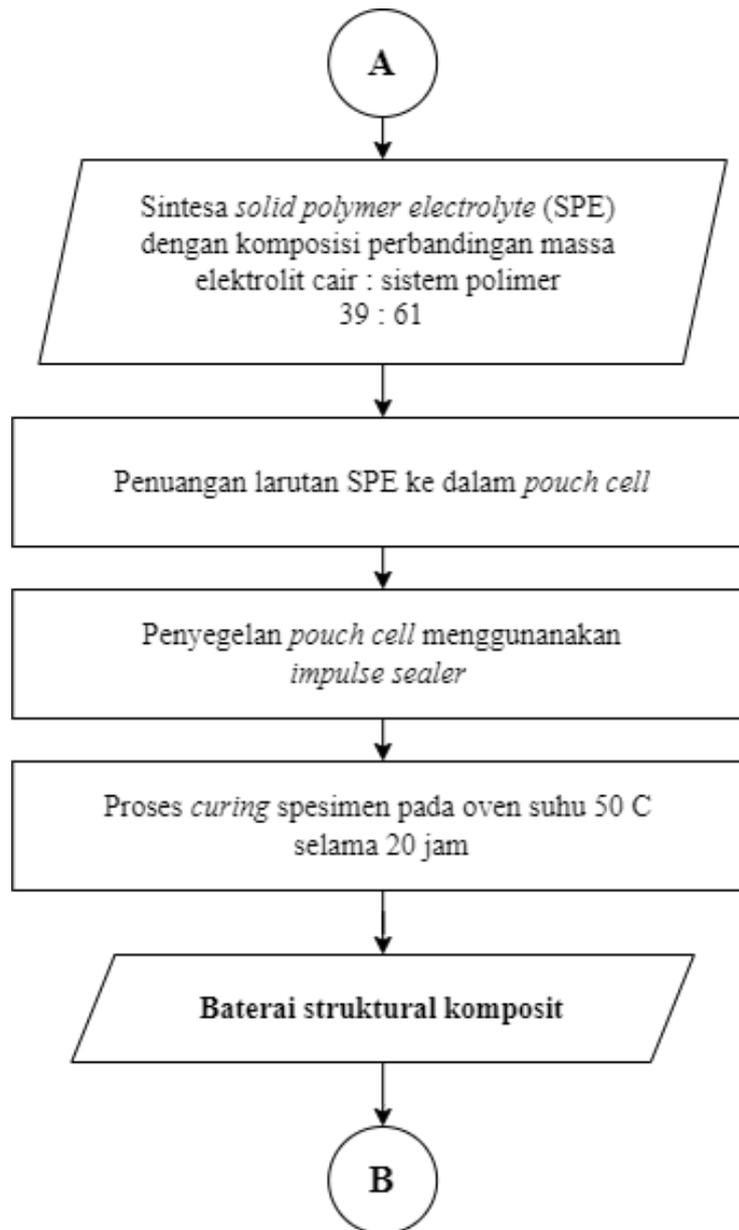
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Flowchart Penelitian

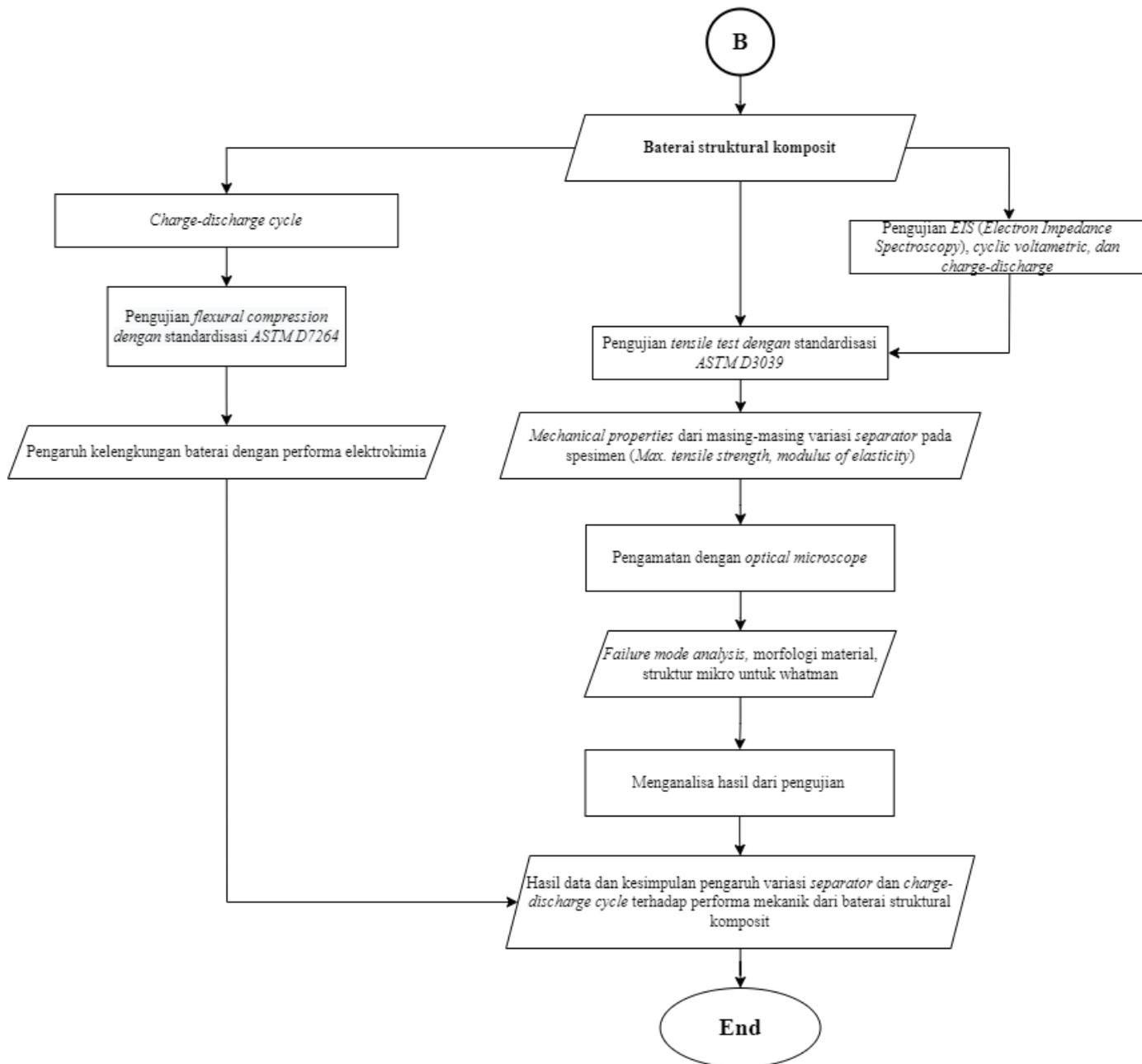
Berikut adalah rangkaian proses penelitian baterai komposit struktural dalam diagram alir yang bertujuan untuk membuat penelitian terarah dan sistematis.



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian



Gambar 3.2 Lanjutan *Flowchart* Penelitian



Gambar 3.3 Lanjutan *Flowchart* Penelitian

Berdasarkan *flowchart*, penelitian diawali dengan kajian literatur dan studi pustaka, kemudian penentuan rumusan dan batasan masalah serta tujuan penelitian. Setelah itu dilanjutkan dengan karakterisasi pada *separator* dengan melakukan *tensile test* pada ketiga jenis *separator* dan pengukuran jenis *separator* yang menjadi variabel bebas pada penelitian ini. Manufaktur diawali dengan proses pembuatan *solid polymer electrolyte*. Pengadukan campuran dilakukan hingga larutan elektrolit dan campuran resin hardener homogen, dapat dilihat secara visual. Kemudian, manufaktur baterai struktural komposit dengan *separator* sebagai variabel bebas dapat dimulai. Setelah manufaktur selesai, dilakukan *tensile test* untuk mendapat *mechanical properties* dan juga membandingkan kekuatan baterai yang melewati pengujian elektrokimia yaitu *Electron Impedance Spectroscopy* (EIS), *Cyclic Voltametric* (CV), dan *charge-discharge cycle* dengan yang tidak. Selain *tensile test*, dilakukan *flexural test* dengan prosedur *four-point bending* untuk mengetahui pengaruh kelengkungan terhadap performa elektrokimia pada baterai. Setelah itu dilakukan pengamatan dengan *optical microscope* menggunakan 2 spesimen yang berbeda (spesimen yang tidak dan telah melewati *charge-discharge cycle*) untuk melihat morfologi material serta *failure mode* yang terjadi pada material. Selain itu juga penelitian ini bertujuan untuk mempelajari efek dari jenis *separator* (densitas *woven*) yang berbeda terhadap performa mekanik baterai struktural komposit.

3.2 Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi tiga tahap, yaitu:

3.2.1 Tahap pembuatan *solid polymer electrolyte* (SPE)

Pada tahap pembuatan *solid polymer electrolyte* peralatan yang dibutuhkan yaitu gelas ukur, pipet titrasi, *magnetic stirrer*, *stirring bar*, botol dan gelas kimia, *curing oven*, dan neraca analitik.

3.2.2 Tahap manufaktur *pouch cell*

Pada tahap manufaktur baterai struktural komposit peralatan yang dibutuhkan adalah *glovebox*, alat *sealer* aluminium, gunting, dan timbangan.

3.2.3 Tahap pengujian performa mekanik

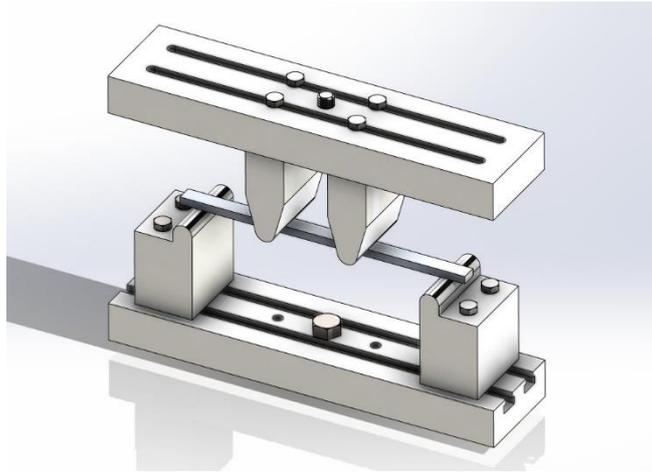
Pada tahap pengujian performa mekanik, peralatan yang dibutuhkan adalah mesin Mark-10 ESM301L. Untuk mengamati dan menganalisis *failure mode* pada spesimen maka digunakan *optical microscope* dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).



Gambar 3.4 Universal Testing Machine Mark-10 ESM301L (Lab Metalurgi DTM-ITS)



Gambar 3.5 Chuck untuk Tensile test



Gambar 3.6 Load dan support bar four-point bending untuk flexural test (Lab Metalurgi DTM-ITS)



Gambar 3.7 Glovebox untuk pembuatan spesimen pouch cell (P2 Fisika Puspiptek, Serpong)



Gambar 3.8 Magnetic Stirrer (P2 Fisika Puspiptek, Serpong)

3.3 Bahan

Penelitian baterai struktural komposit ini menggunakan beberapa jenis bahan, yaitu bahan yang digunakan sebagai struktur dan bahan kimia aktif yang digunakan untuk *solid polymer electrolyte*. Berikut adalah bahan-bahan yang digunakan.

- A. **Larutan Elektrolit LiPF₆**, Elektrolit cair digunakan sebagai campuran *solid polymer electrolyte* (SPE). Elektrolit komersial ini diperoleh dari perusahaan Dongguan Shansan Battery Material Co., Ltd. Kandungan pada larutan ini adalah garam *lithium hexafluorophosphate* (LiPF₆) sebesar 1 M yang dilarutkan pada pelarut *ethylene carbonate* (EC) dan *dimethyl carbonate* (DMC) dengan perbandingan pelarut 1:1. Berdasarkan *technical data sheet* (TDS) yang diperoleh, larutan ini memiliki massa jenis yang sebesar 1.308 *gr/ml*, dengan konduktivitas ion sebesar 11.42 *mS/cm*.
- B. **Resin Epoxy Bisphenol A Epichlorohydrin**, Bahan polimer ini memiliki viskositas sebesar 13,000 *mPa.s* dan massa jenis 1.17 *g/cm³* pada suhu 25°C. Suhu kristalisasi pada resin epoxy ini adalah pada rentang 60 – 70 °C.
- C. **Resin Hardener Cycloaliphatic Amine**, Bahan ini memiliki viskositas 0.5 – 1 *poise* dan massa jenis sebesar 1.010 *gr/cm³* pada suhu 25°C. Resin hardener digunakan sebagai bahan *curing agent* pada sistem polimer.
- D. **Aluminium dengan Lapisan Nikel-Mangan-Cobalt (NMC) 532**, Material ini berperan sebagai katoda pada baterai struktural komposit. Lapisan aluminium pada NMC 532 membantu agar struktur baterai menjadi kaku, sehingga proses elektrokimia tidak terganggu akibat pergeseran struktur.



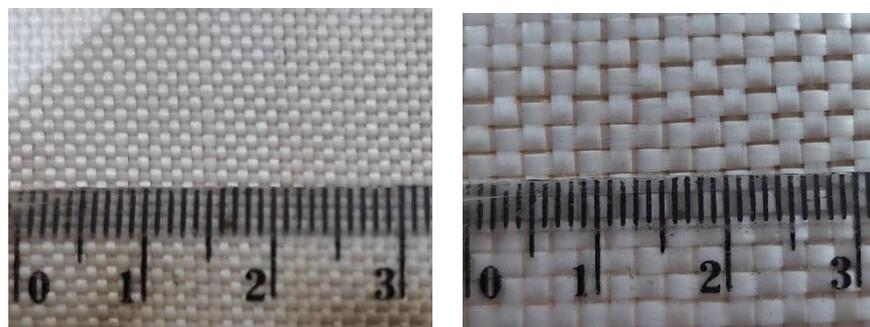
Gambar 3.9 Aluminium NMC532 yang digunakan Sebagai Katoda

- E. **Tembaga dengan lapisan Graphite**, Material ini berperan sebagai anoda, digunakan sebagai material penangkap ion litium pada baterai struktural komposit. Tembaga yang dilapisi oleh *graphite* diproduksi oleh perusahaan MTI. Satu lembar *graphite* memiliki dimensi $241\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 90\text{ }\mu\text{m}$ dengan massa material aktif pada satu lembarnya sebesar 5.0176 gr . Adapun kapasitas spesifik yang dihasilkan sebesar 330 mAh/g ,



Gambar 3.10 *Copper Coated Graphite* yang digunakan sebagai Anoda

- F. **Glass Fiber** (Woven Roving 50 & 200), digunakan sebagai *separator* antar katoda dan anoda. Hal ini dikarenakan *glass fiber* memiliki ketersediaan yang banyak, selain itu material ini memiliki porositas yang cukup baik sehingga sangat cocok untuk baterai berbasis polimer (berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Leif Asp dan Klein). WR50 berarti berat dari glass fiber tersebut adalah 50 g/m^2 , untuk WR200 berarti memiliki berat sebesar 200 g/m^2 . Selain kedua jenis tersebut, digunakan juga *separator* komersial yaitu Whatman GF/A sebagai pembanding *Glass fiber* juga berperan sebagai penguat struktur pada baterai struktural komposit. Perbedaan *glass fiber woven roving* 50 dan 200 dapat dilihat pada **Gambar 3.11**, terdapat perbedaan anyaman, ketebalan, dan fraksi volume fiber yang akan mempengaruhi performa mekanik serta elektrokimia baterai



Gambar 3.11 Perbedaan Lebar Anyaman pada Glass Fiber WR50 (kiri), dan WR200 (kanan) dengan penggaris sebagai alat ukurnya

- G. **Kertas Whatman GF/A**, Bahan ini digunakan sebagai *separator* baterai dikarenakan material ini merupakan salah satu *separator* baterai litium konvensional yang pada penelitian ini dijadikan variabel kontrol. Kertas

Whatman GF/A yang digunakan yakni no.93 dengan ukuran pori sebesar $10\ \mu\text{m}$.



Gambar 3.12 Whatman No.93 yang digunakan sebagai *Separator*

- H. ***Aluminium dan Copper Foil***, digunakan sebagai *collector* dan penghantar listrik. Untuk *aluminium foil* digunakan untuk *current collector* pada katoda sedangkan untuk *copper* digunakan sebagai *current collector* pada anoda. Jenis material yang digunakan berbeda untuk mencegah korosi. Pada deret volta aluminium sebagai reduktor dan cenderung lebih stabil pada voltase tinggi, sedangkan copper sebagai oksidator dan cenderung lebih stabil pada voltase rendah
- I. ***Aluminium Pouch***, digunakan sebagai pembungkus baterai struktural komposit guna membuat lingkungan sekitar baterai tetap vakum (tidak terkontaminasi udara luar) karena adanya O_2 , CO_2 , dan unsur yang tidak diinginkan dapat mengganggu proses elektrokimia pada baterai yang dapat menurunkan performa elektrokimia bahkan dapat menyebabkan baterai tersebut terbakar.

3.4 Langkah Penelitian

Penjelasan merinci mengenai langkah penelitian yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.4.1 Studi Literatur

Penulis melakukan studi literatur sebelum memulai proses penelitian, guna mendapatkan referensi dari jurnal penelitian terdahulu, dasar teori, dan metodologi produksi serta pengujian. Tahap ini dilakukan agar penulis mendapat acuan untuk memodifikasi variasi yang digunakan pada penelitian ini.

3.4.2 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Arah penelitian ini ditentukan dengan penyusunan rumusan masalah disertai dengan batasan masalah guna memperjelas lingkup penelitian yang akan dilakukan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan observasi dari suatu fenomena yaitu pengaruh ketebalan lapisan *separator* dan pengaruh *charge-discharge cycle* terhadap performa mekanik dari baterai struktural komposit dengan variasi ketebalan *separator*.

Tabel 3.1 Variasi dan Jumlah Spesimen Baterai Struktural Komposit

Nama	V1	V2	V3	Jumlah Spesimen per Variasi
Tanpa pengujian elektrokimia	<i>Whatman GF/A separator</i>	<i>Glass fiber WR50 separator</i>	<i>Glass fiber WR200 separator</i>	2
Melewati pengujian elektrokimia	<i>Whatman GF/A separator</i>	<i>Glass fiber WR50 separator</i>	<i>Glass fiber WR200 separator</i>	1
Pengujian <i>flexural</i>	<i>Whatman GF/A separator</i>	<i>Glass fiber WR50 separator</i>	<i>Glass fiber WR200 separator</i>	1
TOTAL				12

3.4.3 *Tensile test dan Pengukuran Separator*

Bagian yang diukur pada *separator* adalah lebar anyaman dan ketebalan material. Pengukuran dilakukan menggunakan *optical microscope* yang tersedia pada Laboratorium Metalurgi Teknik Mesin FTIRS-ITS. Pengukuran berjumlah 10 sampel untuk setiap aspek yang ditinjau. Setelah pengukuran selesai, data tersebut dianalisis menggunakan *software minitab* dengan metode *one sample-T* untuk mendapatkan nilai rata-rata dari lebar anyaman dan ketebalan material *separator*.

Selain pengukuran ketebalan dan lebar anyaman dari *separator*, dilakukan juga *tensile test* yang mengacu pada ASTM D5034-95 untuk mengetahui *mechanical properties* dari ketiga *separator* yang nantinya bisa digunakan untuk analisis hasil *tensile test* pada baterai struktural komposit.

3.4.4 *Pembuatan Solid Polymer Electrolyte (SPE)*

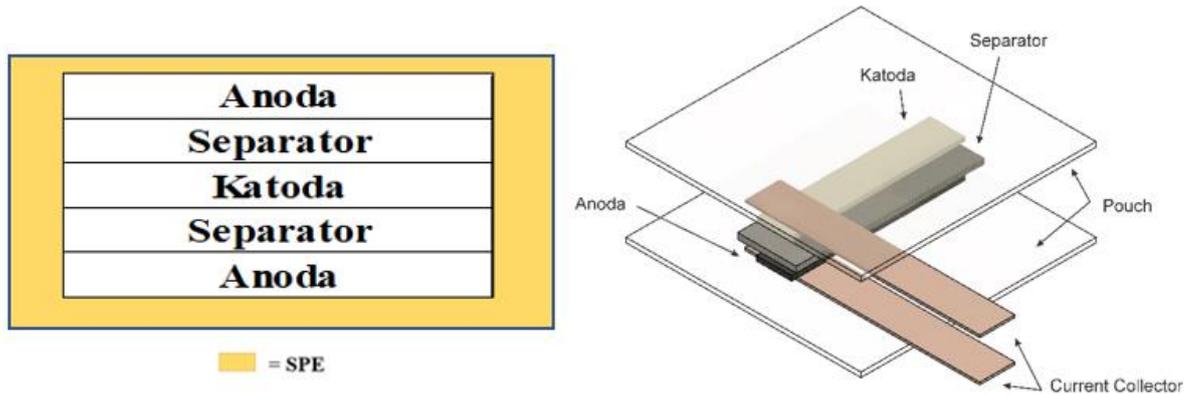
Solid polymer electrolyte (SPE) dibuat menggunakan campuran *liquid electrolyte* yaitu LiPF_6 1 M dengan pelarut *dimethyl carbonate (DMC)* dan *ethylene carbonate (EC)* 1:1 yang dicampur dengan sistem polimer, yaitu campuran resin epoxy (*Bisphenol A Epichlorohydrin*) dan hardener (*cycloaliphatic amine*) dengan perbandingan 1:1 persen massa. Pencampuran larutan elektrolit dan sistem polimer menggunakan perbandingan massa 39:61 secara berurutan, berdasarkan referensi dari penelitian terdahulu (Schneider, Ihrner, Zenkert, & Johansson, 2019).

Tahap pertama dilakukan pencampuran resin epoxy dengan *hardener* sebanyak 9.15 gram. Larutan diaduk secara manual menggunakan sendok kimia hingga larutan berubah warna menjadi kuning pucat. Kemudian larutan elektrolit dengan kondisi sudah disiapkan di dalam gelas ukur beserta sudah dilakukan proses pengadukan dengan *magnetic stirrer* sebanyak 11.7-gram, dicampurkan dengan sistem polimer dengan penuangan secara perlahan agar tidak terjadi proses yang membuat larutan tidak homogen. Larutan tersebut diaduk dengan kecepatan pengadukan 400 rpm dan suhu pengadukan 27°C, proses ini dilakukan sekitar 10-20 menit sampai dengan larutan secara visual homogen.

3.4.5 *Manufaktur Baterai berbentuk Pouch dan Variasi Lapisan Separator*

Untuk baterai yang digunakan untuk *tensile test*, manufaktur dilakukan diluar glove box, sedangkan baterai yang akan digunakan untuk pengujian elektrokimia

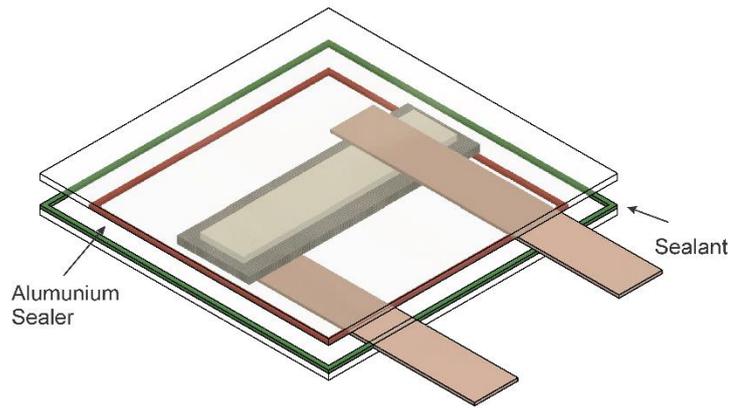
dilakukan didalam *glove box* untuk menghindari kontak unsur litium dengan udara bebas, terutama air dan oksigen. Baterai dibuat menggunakan metode *sandwich* atau tumpukan pada komponen katoda (NMC 532), anoda (*copper coated graphite*), dan *separator* (*glass fiber*). Sebelum penumpukan, katoda dan anoda terlebih dahulu dibalut dengan masing-masing elektroda, yaitu aluminium untuk katoda dan tembaga untuk anoda. Setelah pembalutan elektroda selesai, dilanjutkan dengan proses penumpukan komponen baterai yaitu katoda, anoda, dan separator sesuai dengan skema seperti pada **gambar 3.13** berikut.



Gambar 3.13 Skema *stacking* pembuatan *pouch cell*

Sistem baterai ini menggunakan dua tumpuk baterai untuk meminimalisir *spacing* di dalam *pouch*, sehingga jarak antar katoda dan anoda dapat dibuat lebih rapat dibanding satu tumpuk *Separator* yang digunakan memiliki variasi pada jenis material yang digunakan, yakni *glass fiber* WR200, *glass fiber* WR50, dan *Whatman separator* (sebagai variabel kontrol). Material *separator* yang dikarakterisasi terlebih dahulu dengan mengukur ketebalan, luas pori-pori, dan ketebalan dari fiber yang dilihat dari penampang x-y menggunakan *optical microscope* (WR50 dan WR200) dan *scanning electron microscopy* (untuk *Whatman*) sehingga parameter pada masing-masing jenis *separator* dapat terdefinisi dan dihubungkan dengan hasil performa baterai.

Setelah proses penumpukan selesai, seluruh material dimasukkan ke dalam *pouch* aluminium dengan menggunakan *pinset* agar tidak terjadi kontak antar katoda dan anoda. Kemudian SPE yang sudah ditimbang sebesar 30 gram/*pouch* dituangkan ke dalam *pouch*. Kemudian dilanjutkan dengan proses *sealing* sementara dengan penjepit berbahan akrilik sebelum dikeluarkan dari *glovebox*. Setelah dikeluarkan dari *glove box*, *pouch* di-seal dengan *impulse sealer* pada bagian *pouch* yang terbuka seperti pada **gambar 3.14**. Setelah seluruh bagian *pouch* tersegel, dilakukan proses penekanan menggunakan lembaran akrilik sehingga SPE dapat tersebar merata di dalam *pouch*. Baterai kemudian dimasukkan ke dalam oven pada suhu 50°C selama 20 jam sehingga SPE mengeras.



Gambar 3.14 Proses Tahap Penyegelan Baterai Struktural Komposit dengan *Sealant* dan *Aluminium Sealer*

3.4.6 Tensile test

Sebelum dilakukan *tensile test*, setiap spesimen dipotong dengan ukuran sesuai dengan standardisasi ASTM D3039. *Tensile test* ini dilakukan untuk mengetahui performa mekanik baterai struktural komposit dan mengetahui pengaruh *charge-discharge cycle* terhadap performa mekanik baterai struktural komposit.

Terdapat dua jenis pengujian, yaitu baterai yang tidak melewati pengujian elektrokimia dan baterai yang melewati pengujian elektrokimia. Berikut adalah jenis pengujian elektrokimia yang dilakukan:

- *Electron Impedance Spectroscopy* (EIS), digunakan untuk mengetahui impedansi dari baterai struktural komposit. Pengujian ini dilakukan satu kali untuk setiap spesimennya
- *Cyclic Voltametric* (CV), digunakan untuk mengetahui reaksi voltase dan arus oksidasi-reduksi dan reversibilitas dari baterai struktural komposit. Pengujian ini dilakukan lima kali untuk setiap spesimennya
- *Charge-Discharge Cycle* (CD), digunakan untuk mengetahui kapasitas *charge* dan *discharge* serta siklus umur baterai. Pengujian ini dilakukan delapan kali untuk setiap spesimennya

Dimensi untuk setiap spesimen dapat dilihat pada **tabel 3.2**, sampai dengan **tabel 3.7**. Sebagai keterangan, P adalah Panjang spesimen, l adalah lebar spesimen, t adalah tebal spesimen.

Tabel 3.2 Dimensi Spesimen Baterai dengan *Separator* Whatman Tanpa dilakukan *Charge-Discharge Cycle*

Whatman			
Spesimen	P (mm)	l (mm)	t (mm)
1	57,4	10,78	4,37
2	57,52	11,98	4,67
3	55,18	10,69	4,85
4	56,01	10,74	4,85
Average	56,53	11,05	4,69
St Dv	1,13	0,62	0,23
COV	2%	6%	5%

Tabel 3.3 Dimensi Spesimen Baterai dengan *Separator* WR50 Tanpa dilakukan *Charge-Discharge Cycle*

WR50			
Spesimen	P (mm)	l (mm)	t (mm)
2	56,32	9,76	4,26
3	55,6	10,4	4,58
5	56,46	11,09	4,5
6	56,35	11,43	4,6
Average	56,18	10,67	4,49
St Dv	0,39	0,74	0,16
COV	1%	7%	3%

Tabel 3.4 Dimensi Spesimen Baterai dengan *Separator* WR200 Tanpa dilakukan *Charge-Discharge Cycle*

WR200			
Spesimen	P (mm)	l (mm)	t (mm)
1	56,79	12,02	3,42
2	56,33	11,35	3,01
3	55,14	10,41	4,06
4	56,64	9,91	4,45
Average	56,23	10,92	3,74
St Dv	0,75	0,94	0,64
COV	1%	9%	17%

Tabel 3.5 Dimensi Spesimen Baterai dengan *Separator* Whatman Setelah dilakukan *Charge-Discharge Cycle*

Whatman			
Spesimen	P (mm)	l (mm)	t (mm)
1	55,91	9,79	4,63
2	56,49	10,56	3,4
Average	56,20	10,18	4,02
St Dv	0,41	0,54	0,87
COV	1%	5%	22%

Tabel 3.6 Dimensi Spesimen Baterai dengan *Separator* WR50 Setelah dilakukan *Charge-Discharge Cycle*

WR50			
Spesimen	P (mm)	l (mm)	t (mm)
1	55,85	10,12	4,26
2	56,32	9,76	4,58
Average	56,085	9,94	4,42
St Dv	0,33	0,25	0,23
COV	1%	3%	5%

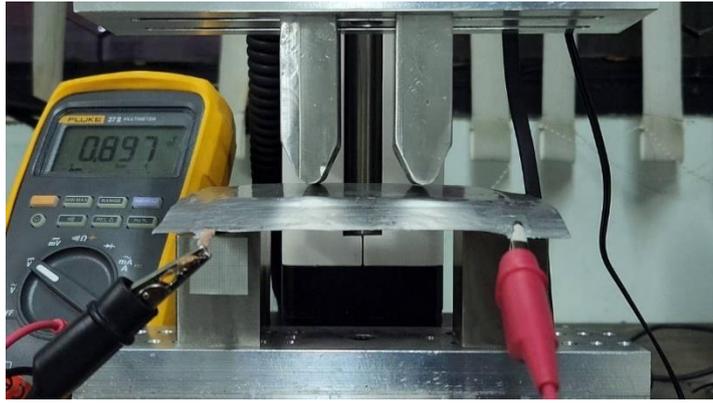
Tabel 3.7 Dimensi Spesimen Baterai dengan *Separator* WR200 Setelah dilakukan *Charge-Discharge Cycle*

WR200			
Spesimen	p (mm)	l (mm)	t (mm)
1	55,85	10,42	4,55
2	55,87	10,49	3,97
Average	55,86	10,46	4,26
St Dv	0,01	0,05	0,41
COV	0%	0%	10%

Tensile test mengacu pada ASTM D3039 untuk mencari sifat mekanik pada baterai struktural komposit. Pengujian dilakukan menggunakan mesin Mark-10 ESM301L dengan *grips* yang dapat menarik spesimen hingga 1,5 kN Mesin pengujian tersedia di Laboratorium Metalurgi Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS Data yang diperoleh setelah pengujian ini adalah *ultimate tensile strength* dan *modulus of elasticity*. Setelah data diperoleh, akan dilanjutkan dengan analisis variasi jenis *separator* dan pengaruh *charge-discharge cycle* terhadap performa mekanik pada baterai struktural komposit.

3.4.7 Flexural Test

Pengujian dilakukan menggunakan mesin Mark-10 ESM301L yang dapat menekan spesimen hingga 1,5 kN. Pengaturan *jig* mengacu pada ASTM D7264 menggunakan *Procedure B* yaitu dengan *four-point bending*. *Jig* diatur dengan panjang antar *support span* harus dua kali lebih besar dibanding *load span*-nya, pada pengujian ini menggunakan panjang antar *load span* sebesar 40mm dan panjang antar *support span* sebesar 80 mm. Pengujian dilakukan pada Laboratorium Metalurgi Teknik Mesin FTIRS-ITS. Pengujian dilakukan pada *speed of testing* minimum yaitu 10 mm/min . Sebelum melakukan pengujian, spesimen di-charge menggunakan *power supply unit* dengan *constant voltage* sebesar 4 V dengan arus yang masuk sebesar 0,2 mA selama dua jam. Data yang akan diperoleh dari pengujian ini adalah pengaruh *curvature* terhadap voltase yang diukur dengan *multimeter* yang disambungkan pada *current collector* baterai struktural komposit selama *flexural test* berlangsung seperti pada **gambar 3.15**



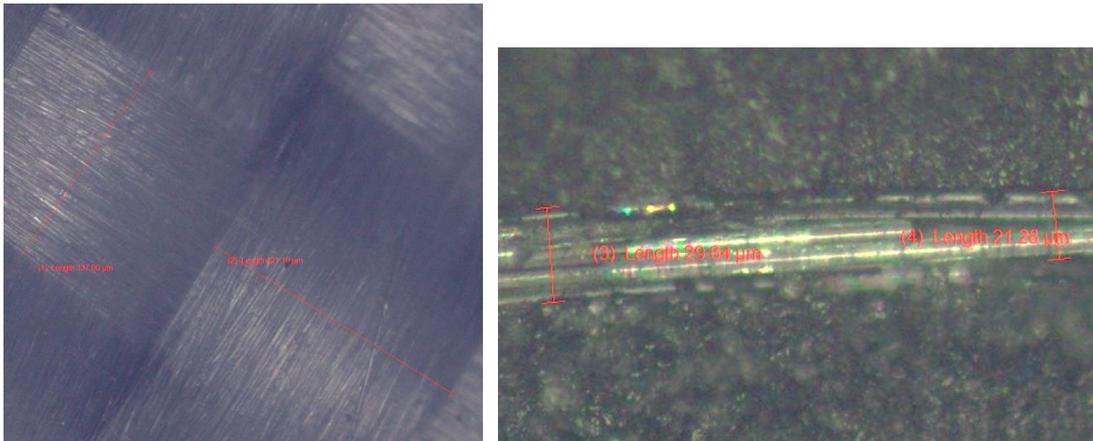
Gambar 0.1 Pengujian *flexural* dengan *Four Point Bending System*

Halaman sengaja dikosongkan..

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

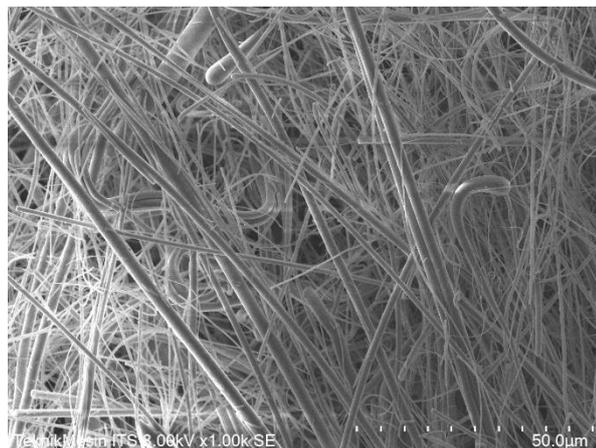
4.1 Hasil Pengukuran Separator

Pengukuran *separator* dilakukan dari material yang digunakan untuk mengetahui dimensi *separator* tersebut. Untuk *separator* WR50 dan WR200, parameter yang diukur adalah ketebalan dari material *separator* dan lebar anyaman serat. Ketebalan material dan lebar anyaman untuk WR50 dan WR200 dapat diukur menggunakan *optical microscope* seperti pada **gambar 4.1** WR50 dan WR200 memiliki orientasi arah serat *bidirectional*.



Gambar 4.1 Pengukuran Lebar Anyaman (kiri) dan Tebal *Fiber* (kanan) pada *Separator* WR50

Untuk *separator* Whatman, ketebalan material dapat diukur menggunakan *optical microscope* atau jangka sorong, namun untuk lebar anyaman tidak dapat diukur karena *separator* Whatman memiliki orientasi arah serat *random* dan *discontinuous* seperti pada **gambar 4.2**.



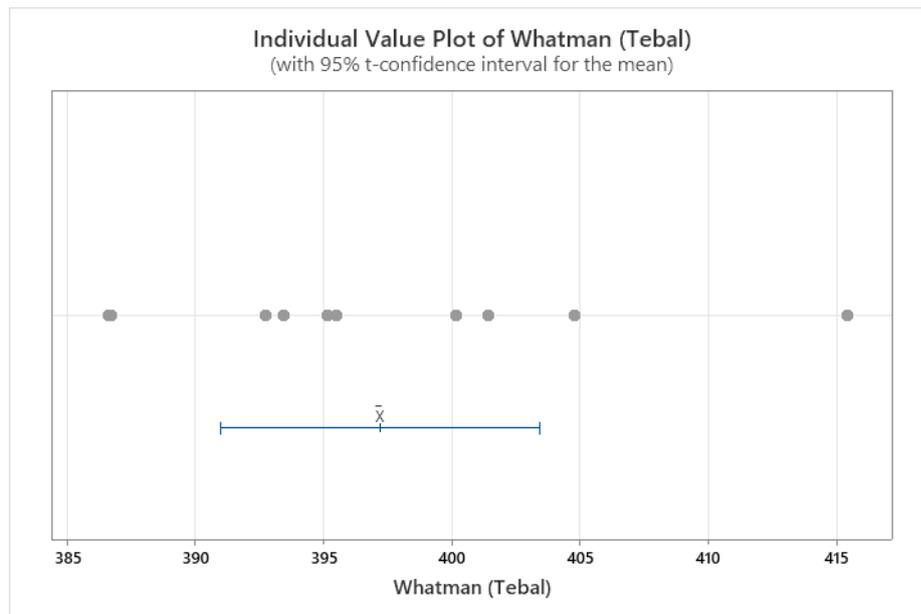
Gambar 4.2 Struktur dari Whatman yang diambil menggunakan SEM dengan Perbesaran 1000x

4.2.1 Uji *one sample-T Separator Whatman*

Descriptive Statistics

N	Mean (μm)	StDev	SE Mean	95% CI for μ
10	397,20	8,69	2,75	(390,98; 403,41)

μ : population mean of Whatman (Tebal)



Gambar 4.3 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Pertama *Separator Whatman*. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar *Confidence Interval*

Pada pengujian pertama, ukuran sampel pengukuran 10, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $397,20 \mu\text{m}$. Dengan menggunakan *confidence interval 95%*, didapatkan dengan nilai batas atas sebesar $403,41 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $390,98 \mu\text{m}$. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat empat sampel yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan yaitu 95%. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik pertama ditolak. Untuk itu, pengujian perlu dilakukan kembali dengan mengeliminasi empat sampel yang terdapat diluar *confidence interval*.

Descriptive Statistics

N	Mean (μ)	StDev	SE Mean	95% CI for μ
6	396,41	3,56	1,45	(392,67; 400,14)

μ : population mean of Whatman (Tebal)



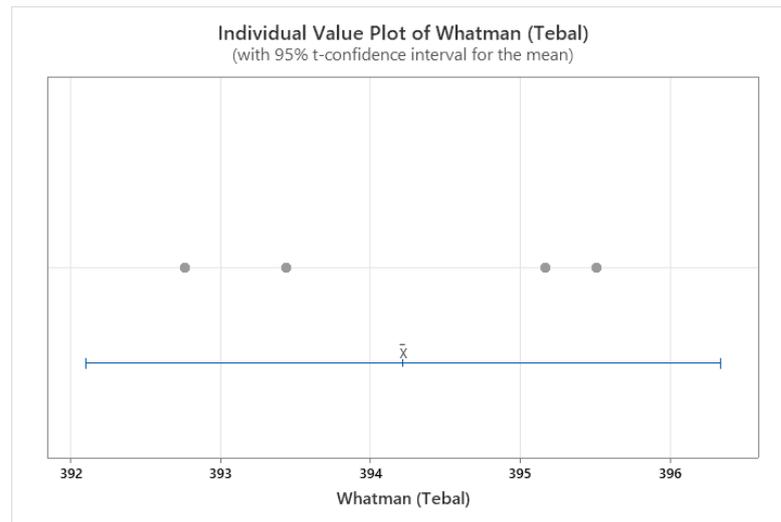
Gambar 4.4 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Pertama *Separator* Whatman. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar *Confidence Interval*

Pada pengujian kedua, ukuran sampel pengukuran enam, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $396,41 \mu\text{m}$. Dengan menggunakan *confidence interval 95%*, didapatkan nilai batas atas sebesar $400,14 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $392,67 \mu\text{m}$. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat dua sampel yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan yaitu 95%. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik kedua ditolak. Untuk itu, pengujian perlu dilakukan kembali dengan mengeliminasi sampel yang terdapat diluar *confidence interval*.

Descriptive Statistics

N	Mean (μ)	StDev	SE Mean	95% CI for μ
4	394,220	1,330	0,665	(392,104; 396,336)

μ : population mean of Whatman (Tebal)



Gambar 4.5 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Ketiga *Separator* Whatman yang menunjukkan Seluruh Sampel berada didalam *Confidence Interval*

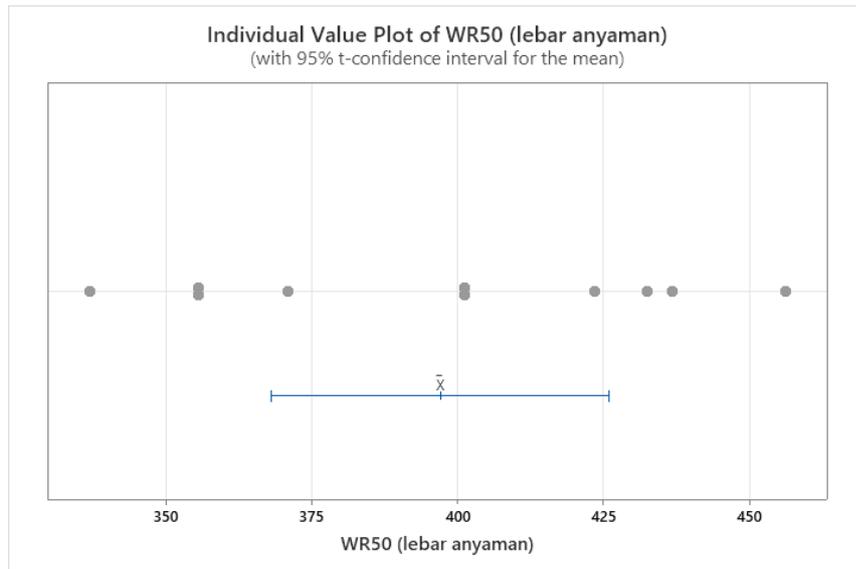
Pada pengujian ketiga, ukuran sampel pengukuran empat, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $394,220 \mu\text{m}$. Dengan menggunakan *confidence interval 95%*, didapatkan nilai batas atas sebesar $396,34 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $392,1 \mu\text{m}$. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan seluruh sampel berada didalam nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan yaitu 95% . Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik ketiga gagal ditolak. Ketebalan *separator* Whatman didapatkan.

4.2.2 Uji one sample-T Separator WR50

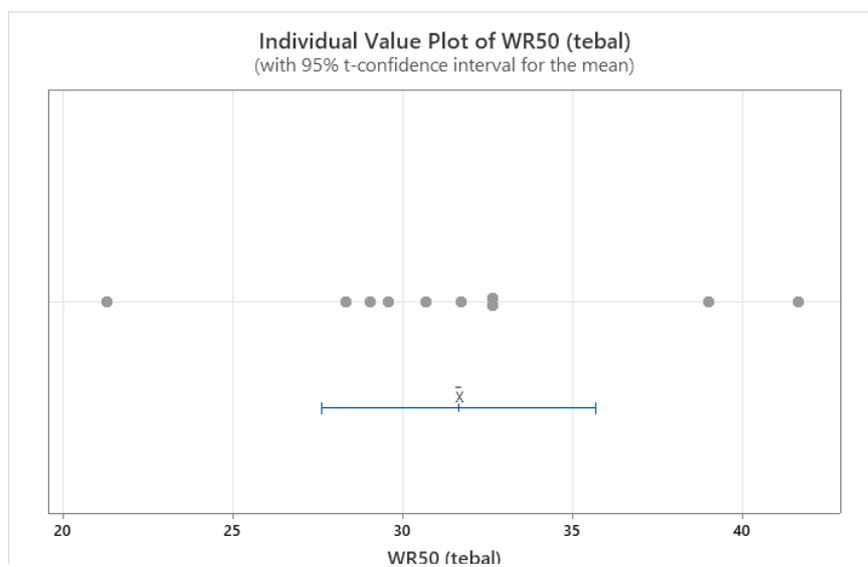
Descriptive Statistics

Pengukuran WR50	N	Mean (μm)	StDev	SE Mean	95% CI for μ
Ketebalan	10	31,66	5,65	1,79	(27,62; 35,70)
Lebar Anyaman	10	397,1	40,5	12,8	(368,1; 426,1)

μ : population mean of WR50 (tebal); WR50 (lebar anyaman)



Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengukuran Lebar Anyaman Pengujian Pertama Separator WR50. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar *Confidence Interval*



Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Pertama Separator WR50. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar *Confidence Interval*

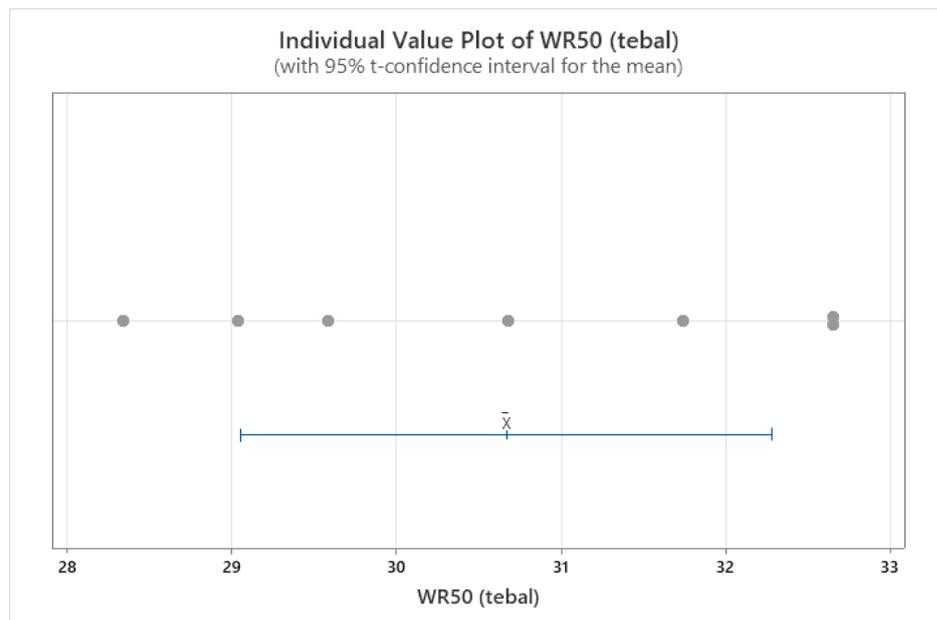
Pada pengujian ketebalan pertama, ukuran sampel pengukuran 10, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $31,66 \mu\text{m}$. Dengan menggunakan *confidence interval* 95%, didapatkan nilai batas atas sebesar $35,70 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $27,62 \mu\text{m}$. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat tiga sampel yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan yaitu 95%. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik pertama ditolak. Untuk itu, pengujian perlu dilakukan kembali dengan mengeliminasi sampel yang terdapat diluar *confidence interval*.

Pada pengujian lebar anyaman pertama, ukuran sampel pengukuran 10, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $397,1 \mu\text{m}$. Dengan menggunakan *confidence interval* 95%, didapatkan nilai batas atas sebesar $426,1 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $368,1 \mu\text{m}$. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat enam sampel yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan yaitu 95%. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik pertama ditolak. Untuk itu, pengujian perlu dilakukan kembali dengan mengeliminasi sampel yang terdapat diluar *confidence interval*.

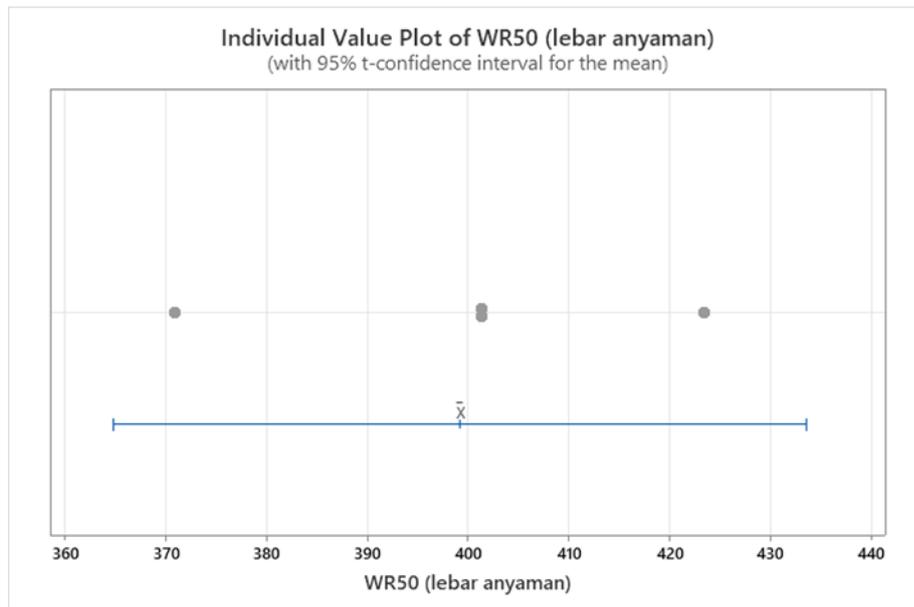
Descriptive Statistics

Pengukuran WR50	N	Mean (μm)	StDev	SE Mean	95% CI for μ
Ketebalan	7	30,669	1,745	0,659	(29,055; 32,282)
Lebar Anyaman	4	399,2	21,6	10,8	(364,8; 433,6)

μ : population mean of WR50 (tebal); WR50 (lebar anyaman)



Gambar 4.8 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Kedua *Separator* WR50. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar *Confidence Interval*



Gambar 4.9 Grafik Hasil Pengukuran Lebar Anyaman Pengujian Kedua *Separator* WR50 yang menunjukkan Seluruh Sampel berada didalam *Confidence Interval*

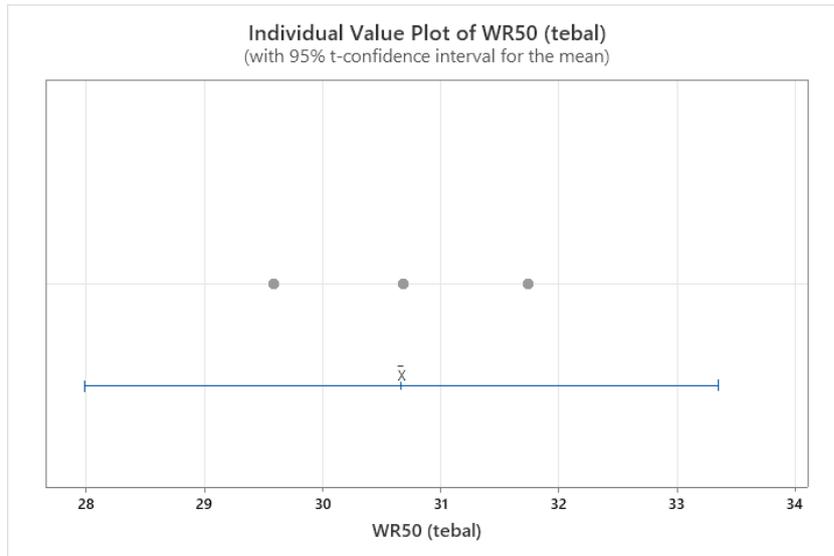
Pada pengujian ketebalan kedua, ukuran sampel pengukuran 7, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $30,67 \mu\text{m}$. Dengan menggunakan *confidence interval* 95%, didapatkan nilai batas atas sebesar $32,28 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $29,06 \mu\text{m}$. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat empat sampel yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan yaitu 95%. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik pertama ditolak. Untuk itu, pengujian perlu dilakukan kembali dengan mengeliminasi sampel yang terdapat diluar *confidence interval*.

Pada pengujian lebar anyaman kedua, ukuran sampel pengukuran empat, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $399,2 \mu\text{m}$. Dengan menggunakan *confidence interval* 95%, didapatkan nilai batas atas sebesar $433,6 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $364,8 \mu\text{m}$. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat enam sampel yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan yaitu 95%. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik kedua gagal ditolak. Lebar anyaman *separator* WR50 didapatkan.

Descriptive Statistics

N	Mean (μm)	StDev	SE Mean	95% CI for μ
3	30,667	1,080	0,624	(27,984; 33,350)

μ : population mean of WR50 (tebal)



Gambar 4.10 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Ketiga *Separator* WR50 yang menunjukkan Seluruh Sampel berada didalam *Confidence Interval*

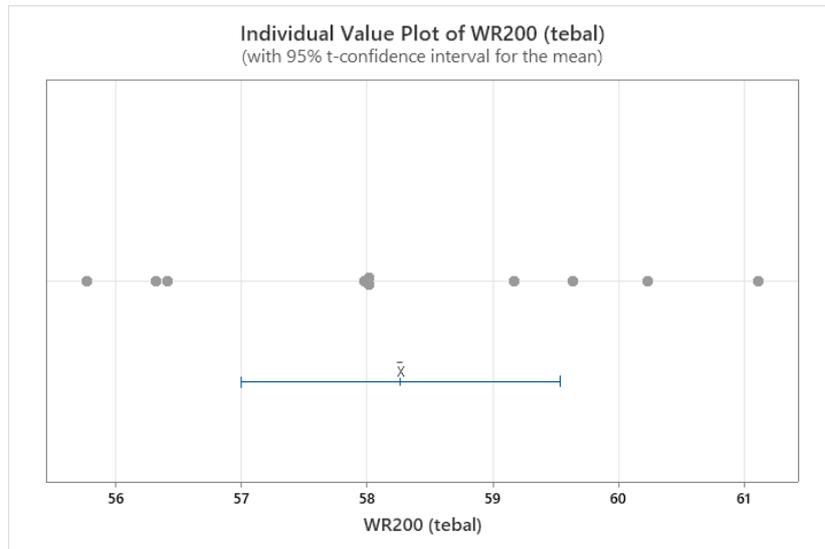
Pada pengujian ketebalan ketiga, ukuran sampel pengukuran tiga, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $30,67 \mu m$. Dengan menggunakan *confidence interval* 95%, didapatkan nilai batas atas sebesar $33,35 \mu m$ dan nilai batas bawah sebesar $27,98 \mu m$. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat seluruh sampel yang berada didalam batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan yaitu 95%. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik ketiga gagal ditolak. Ketebalan *separator* WR50 didapatkan.

4.2.1 Uji *one sample-T Separator* WR200

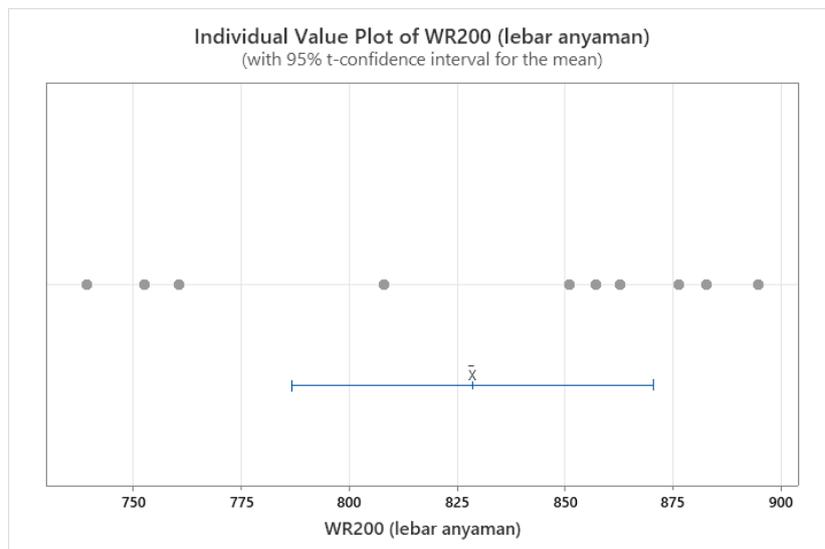
Descriptive Statistics

Pengukuran WR200	N	Mean (μm)	StDev	SE Mean	95% CI for μ
Ketebalan	10	58,265	1,774	0,561	(56,996; 59,534)
Lebar Anyaman	10	828,5	58,6	18,5	(786,6; 870,5)

μ : population mean of WR200 (tebal); WR200 (lebar anyaman)



Gambar 4.11 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Pertama *Separator* WR200. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar *Confidence Interval*



Gambar 4.12 Grafik Hasil Pengukuran Lebar Anyaman Pengujian Pertama *Separator* WR200. Menunjukkan Banyak Sampel berada diluar *Confidence Interval*

Pada pengujian ketebalan pertama, ukuran sampel pengukuran 10, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $58,27 \mu\text{m}$. Dengan menggunakan *confidence interval* 95%, didapatkan nilai batas atas sebesar $59,53 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $56,99 \mu\text{m}$. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat enam sampel yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada

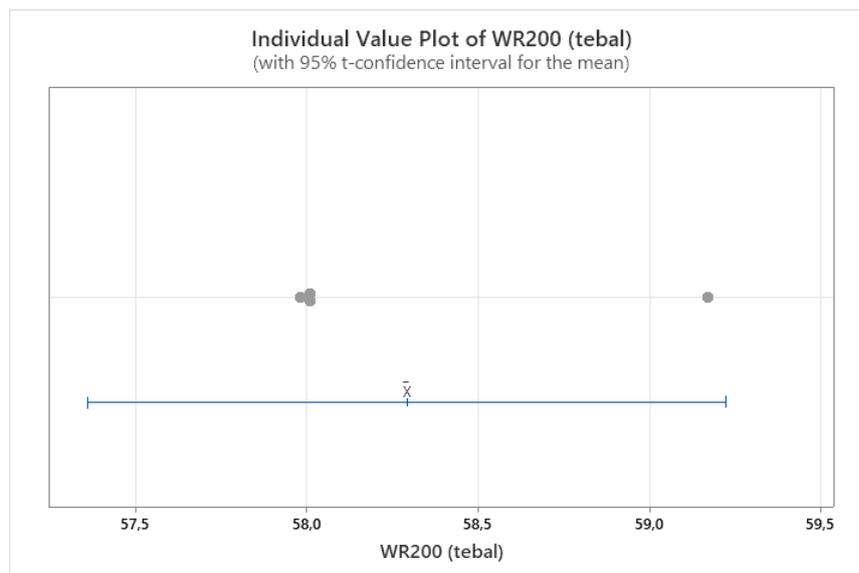
pengujian statistik pertama ditolak. Untuk itu, pengujian perlu dilakukan kembali dengan mengeliminasi sampel yang terdapat diluar *confidence interval*.

Pada pengujian lebar anyaman pertama, ukuran sampel pengukuran 10, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $828,5,1 \mu m$. Dengan menggunakan *confidence interval* 95%, didapatkan nilai batas atas sebesar $870,5 \mu m$ dan nilai batas bawah sebesar $786,6 \mu m$. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat enam sampel yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik pertama ditolak. Untuk itu, pengujian perlu dilakukan kembali dengan mengeliminasi sampel yang terdapat diluar *confidence interval*.

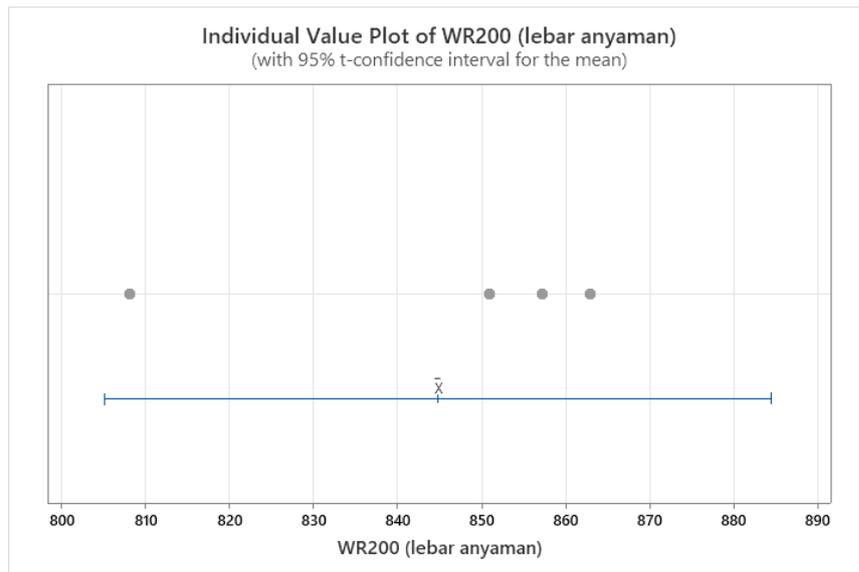
Descriptive Statistics

Pengukuran WR200	N	Mean (μm)	StDev	SE Mean	95% CI for μ
Ketebalan	4	58,292	0,585	0,293	(57,361; 59,224)
Lebar Anyaman	4	844,8	25,0	12,5	(805,1; 884,5)

μ : population mean of WR200 (tebal); WR200 (lebar anyaman)



Gambar 4.13 Grafik Hasil Pengukuran Ketebalan Pengujian Kedua *Separator* WR200 yang menunjukan Seluruh Sampel berada didalam *Confidence Interval*



Gambar 4.14 Grafik Hasil Pengukuran Lebar Anyaman Pengujian Kedua *Separator* WR200 yang menunjukkan Seluruh Sampel berada didalam *Confidence Interval*

Pada pengujian ketebalan kedua, ukuran sampel pengukuran 10, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $58,29 \mu\text{m}$. Dengan menggunakan *confidence interval* 95%, didapatkan nilai batas atas sebesar $59,22 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $57,36 \mu\text{m}$. Dari hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat enam sampel yang berada diluar batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran ketebalan pada pengujian statistik kedua gagal ditolak. Ketebalan *separator* WR50 didapatkan

Pada pengujian lebar anyaman kedua, ukuran sampel pengukuran 10, nilai rata-rata yang didapatkan yakni $844,8 \mu\text{m}$. Dengan menggunakan *confidence interval* 95%, didapatkan nilai batas atas sebesar $884,5 \mu\text{m}$ dan nilai batas bawah sebesar $805,1 \mu\text{m}$. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh sampel berada didalam batas dari nilai *confidence interval* yang telah ditetapkan. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hipotesis H_0 untuk pengukuran lebar anyaman pada pengujian statistik kedua gagal ditolak. Ketebalan *separator* WR50 didapatkan.

Berikut adalah tabel hasil pengujian statistik *one-sample T*. Telah didapatkan nilai ketebalan dan lebar anyaman dari setiap jenis *separator* yang dapat membantu analisis hasil pengujian mekanik pada baterai struktural komposit.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Statistika Pengukuran *Separator*

Jenis GF	Ketebalan (μm)	Lebar Anyaman (μm)
Whatman	394,22	-
WR50	30,67	399,2
WR200	58,29	844,8

4.2 Hasil *Tensile Test* untuk Ketiga Jenis *Separator*

Tensile test pada *separator* bertujuan untuk mengetahui *mechanical properties* dari ketiga jenis *separator* yang digunakan sebagai variasi dari penelitian ini. Pengujian ini menggunakan standar ASTM D5034-95 sebagai acuan *tensile test* untuk *glass fiber fabric* tanpa *matrix*. Pengujian menggunakan tiga spesimen untuk setiap jenis *separator*. Ukuran spesimen disamakan dengan ukuran *separator* pada baterai struktural komposit. Hasil *tensile test* yang didapat untuk ketiga jenis *separator* yaitu WR50, WR200, dan Whatman tertera pada **Tabel 4.2**. Pada tabel terdapat nilai *ultimate tensile strength* yang dihitung menggunakan **perhitungan 4.3 dan 4.4**, lalu terdapat nilai *ultimate tensile strain* yang merupakan nilai *strain* pada saat *ultimate tensile strength*, lalu juga terdapat nilai *Young's Modulus* yang dapat dicari dengan metode seperti pada **sub-bab 4.3.3**. Pada perhitungan tersebut juga terdapat hasil perhitungan standar deviasi yang digunakan untuk mengetahui kedekatan sampel dengan keseluruhan dari data yang diukur, berikut adalah rumus dari standar deviasi:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(Xi-\bar{X})^2}{n-1}} \dots\dots\dots(4.1)$$

dengan:

- S = Standar deviasi sampel
- Xi = Data individual
- \bar{X} = Rerata sampel
- n = Jumlah sampel

Adapun *coefficient of variation* (CV) merupakan nilai perbandingan antara standar deviasi dengan nilai rata-rata data. Berikut merupakan rumus dari CV:

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \times 100\% \dots\dots\dots(4.2)$$

Dengan:

- CV = *Coefficient of variation*
- s = Standar deviasi
- \bar{X} = Rerata sampel

WR200 memiliki nilai *ultimate tensile strength* paling tinggi dibanding dua jenis *separator* lainnya yaitu sebesar 1336,26 MPa. WR50 memiliki nilai *Young's Modulus* paling tinggi dibanding kedua jenis *separator* lainnya yaitu 21,04 GPa. Untuk Whatman, *ultimate tensile strength* sangatlah kecil dibandingkan kedua jenis *separator* lainnya, hal ini didukung dengan struktur Whatman yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.2**. Nilai *Young's Modulus* tidak dapat diketahui karena *universal testing machine* yang digunakan memiliki pembacaan minimal 0,5 kN.

Tabel 4.2 *Mechanical Properties* dari Ketiga Jenis Separator

Jenis	Spesimen	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strain (mm/mm)	Young's Modulus (GPa)
WR50	1	602,67	0,05	20,03
	2	740,39	0,04	22,82
	3	691,25	0,04	20,27
	AVERAGE	678,10	0,04	21,04
	STANDAR DEVIASI (s)	69,79	0,01	1,55
	CV	10%	13%	7%
WR200	1	1264,39	0,08	20,50
	2	1495,62	0,09	20,73
	3	1248,77	0,08	20,75
	AVERAGE	1336,26	0,08	20,66
	STANDAR DEVIASI (s)	112,86	0,00	0,11
	CV	8%	6%	1%
Whatman	1	0,38	0,02	-
	2	0,25	0,03	-
	AVERAGE	0,32	0,03	-
	STANDAR DEVIASI (s)	0,06	0,01	-
	CV	21%	20%	-

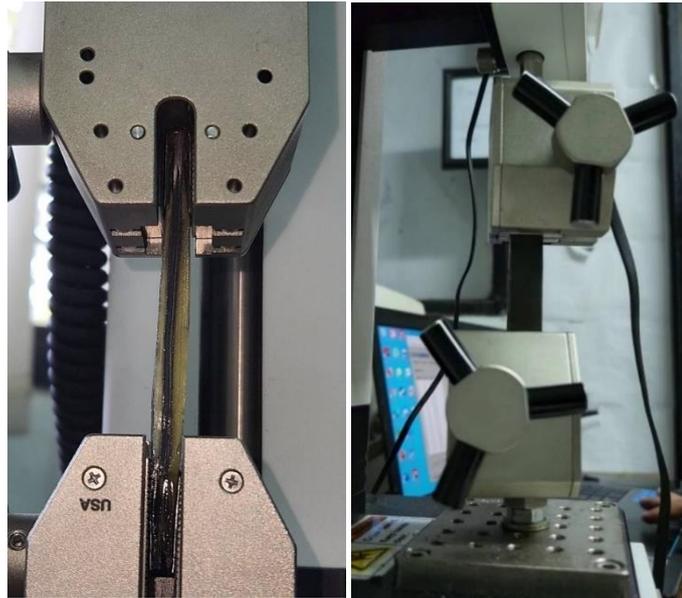
4.3 Hasil *Tensile Test* Baterai Struktural Komposit

Tensile test pada penelitian ini menggunakan standar ASTM D3039 sebagai acuan *tensile test* untuk *polymer matrix composite*. Selain itu, standar tersebut juga digunakan untuk mempermudah karakterisasi dan analisis *tensile properties* untuk setiap spesimennya. Sebelum pengujian, disiapkan empat spesimen untuk setiap variasinya dengan ukuran masing-masing spesimen ditunjukkan pada **Tabel 3.2** hingga **Tabel 3.7**. Pada ujung setiap spesimen diberikan *tab* seperti pada **Gambar 4.15**.



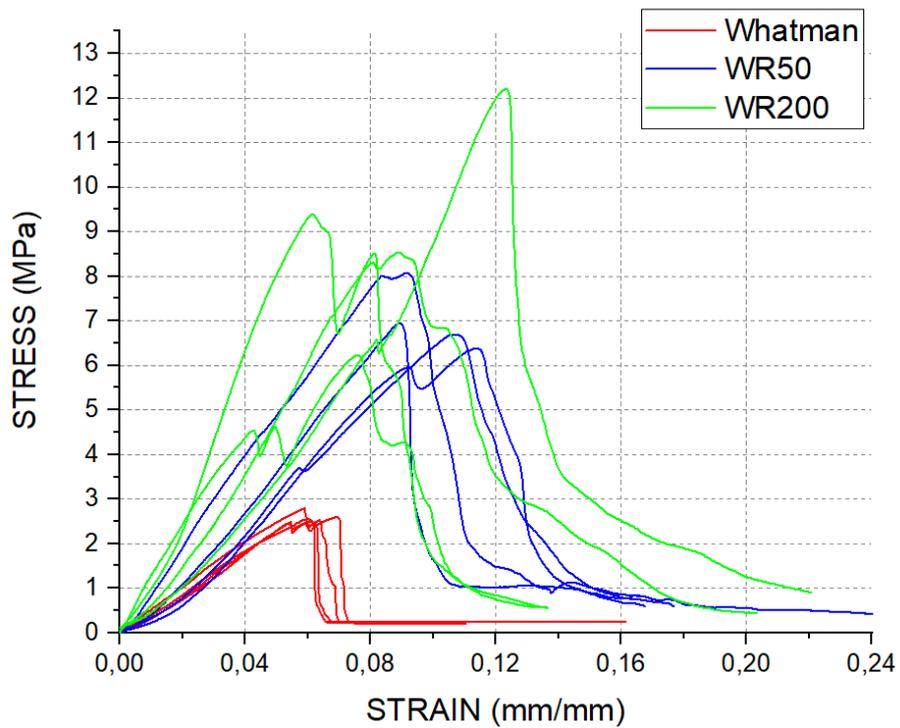
Gambar 4.15 Spesimen *Tensile test* ASTM D3039

Tab berbahan aluminium yang diberi resin epoxy dan *hardener* sebagai *matrix* untuk mengikat *tab* ke spesimen, tujuannya agar tidak terjadi *slip* saat pengujian dan menghindari rusaknya spesimen yang disebabkan oleh cengkaman dari *chuck*, kedua gangguan tersebut dapat mengganggu hasil pengujian. Setelah itu dilakukan *tensile test* seperti pada **Gambar 4.6** dengan *universal testing machine* dengan merk Mark-10 ESM301L yang dapat memberi beban hingga 1,5kN. Pengujian dilakukan dengan *speed of testing* sebesar 10^{mm}/min. Mesin tersebut tersedia pada Laboratorium Metalurgi Teknik Mesin FTIRS ITS

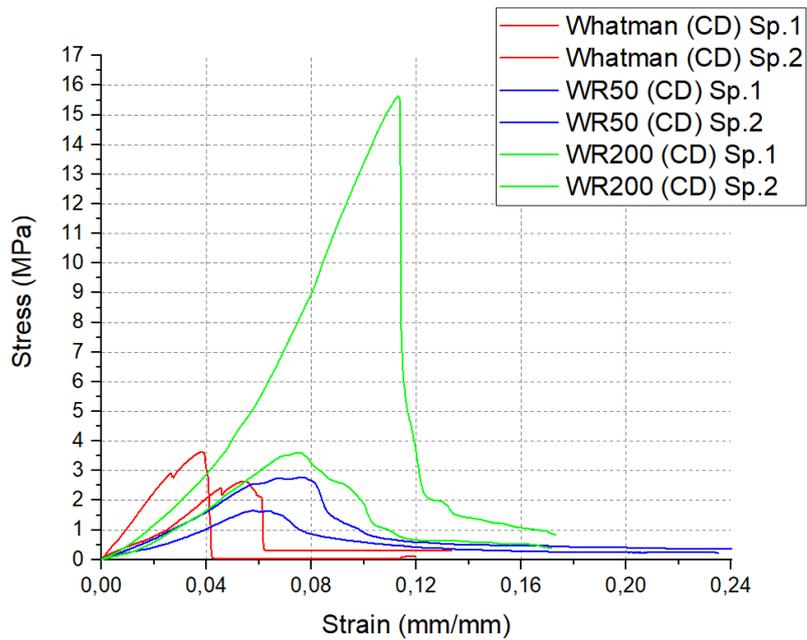


Gambar 4.16 Spesimen dalam Kondisi Siap Uji

Gambar 4.17 menunjukkan grafik *stress-strain* untuk baterai tanpa diberi *charge-discharge cycle*. Baterai dengan *separator* WR200 mampu menerima *stress* paling tinggi jika dibandingkan dengan *separator* WR50 dan Whatman. *Separator* Whatman memiliki grafik paling stabil diantara kedua jenis *separator* yang lainnya, namun *separator* Whatman paling lemah diantara yang lain. Analisis *tensile properties* dapat dilakukan berdasarkan grafik tersebut. **Gambar 4.18** menunjukkan grafik *stress-strain* untuk baterai yang telah diberi *charge-discharge cycle*, terlihat bahwa adanya perbedaan dan deviasi untuk setiap variasi *separator*. Baterai dengan *separator* WR200 memiliki deviasi yang sangat besar, namun terlihat bahwa baterai dengan *separator* WR200 merupakan yang paling kuat diikuti dengan baterai dengan *separator* Whatman, lalu baterai dengan *separator* WR50 memiliki kekuatan yang paling kecil. Analisis *tensile properties* dapat dilakukan berdasarkan grafik tersebut. Data yang akan didapat adalah nilai *ultimate tensile strength*, *ultimate tensile strain*, *young modulus*, *failure tensile strength*, dan *failure tensile strain*. Pada hasil perhitungan tersebut juga terdapat hasil perhitungan standar deviasi yang digunakan untuk mengetahui kedekatan sampel dengan keseluruhan dari data yang diukur menggunakan Microsoft Excel dengan rumus seperti pada **Perhitungan 4.1**. Setelah itu dapat dihitung *coefficient of variation* (CV) yang merupakan nilai perbandingan antara standar deviasi dengan nilai rata-rata data seperti pada **Perhitungan 4.2**.



Gambar 4.17 Grafik *Stress-Strain* Seluruh Variasi *Separator* Tanpa dilakukan *Charge-Discharge Cycle*



Gambar 4.18 Grafik *Stress-Strain* Seluruh Variasi *Separator* yang dilakukan *Charge-Discharge*

4.3.1 Nilai *Ultimate Tensile Strength*

Berdasarkan data *load-time* yang diperoleh dari *tensile test*, maka dapat dilakukan perhitungan untuk mendapat nilai *ultimate tensile strength*. Sebelum mendapatkan nilai *ultimate tensile strength* harus mengetahui nilai *stress* pada setiap *load* yang diberikan. Untuk mencari nilai *stress* dapat menggunakan Microsoft Excel dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Stress} = \frac{\text{Load yang diberikan}}{\text{Luas penampang cross-section}} \dots \dots \dots (4.3)$$

Setelah mendapatkan nilai *stress*, Nilai UTS dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$= \text{MAX}(\text{nilai stress paling awal / nilai stress paling akhir}) \dots \dots \dots (4.4)$$

Kemudian, seluruh nilai UTS dari seluruh spesimen digabung seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4.3 Nilai *Ultimate Tensile Strength* dari Seluruh Variasi *Separator* Tanpa dilakukan *Charge-Discharge Cycle*

Variasi	Spesimen	Ultimate Tensile Strength	Average (MPa)	Standar Deviasi (s)	COV
WR50	6	6,69	7,02	0,64	9%
	2	8,08			
	3	6,94			
	5	6,38			
WR200	1	9,39	9,09	2,14	24%
	2	6,22			
	3	8,54			
	4	12,20			
Whatman	1	2,55	2,57	0,15	6%
	2	2,36			
	3	2,79			
	4	2,59			

Baterai dengan *separator* WR200 memiliki nilai *ultimate tensile strength* tertinggi yaitu 12,20 MPa, diikuti dengan *separator* WR50 yang memiliki nilai *ultimate tensile strength* sebesar 8,08 MPa, sedangkan *separator* Whatman memiliki nilai *ultimate tensile strength* terendah yaitu 2,79. Data *ultimate tensile strength* diatas memiliki standar deviasi yang tinggi pada *separator* WR50 dan WR200, sedangkan *separator* Whatman memiliki standar deviasi yang kecil.

Tabel 4.4 Nilai *Ultimate Tensile Strength* untuk Seluruh Variasi *Separator* setelah *Charge-Discharge Cycle*

Variasi	Spesimen	Ultimate Tensile Strength	Average (MPa)	Standar Deviasi (s)	COV
WR50	1	1,66	2,21	0,55	25%
	2	2,76			
WR200	1	3,61	9,62	6,01	62%
	2	15,63			
Whatman	1	2,63	3,13	0,50	16%
	2	3,62			

Tabel 4.3 diatas menunjukkan nilai *ultimate tensile strength* untuk seluruh variasi baterai yang telah melewati *charge-discharge cycle*. Baterai dengan *separator* WR200 memiliki nilai *ultimate tensile strength* tertinggi yaitu 15,63 MPa, diikuti dengan *separator* Whatman yang memiliki nilai *ultimate tensile strength* tertinggi sebesar 3,62 MPa, sedangkan yang paling rendah adalah *separator* WR50 memiliki nilai *ultimate tensile strength* tertinggi yaitu 2,76. Data *ultimate tensile strength* diatas memiliki standar deviasi yang tinggi pada *separator* WR50 dan WR200, sedangkan *separator* Whatman memiliki standar deviasi yang kecil.

4.3.2 Nilai *Ultimate Tensile Strain*

Berdasarkan data *load-time* yang diperoleh dari *tensile test*, maka dapat dilakukan perhitungan untuk mendapat nilai *ultimate tensile strain*. Sebelum mendapatkan nilai *ultimate tensile strain* harus mengetahui nilai *strain* pada setiap waktu saat pengujian dilakukan. Untuk mencari nilai *strain* dapat menggunakan Microsoft Excel dengan rumus sebagai berikut:

$$Strain = \frac{Time \times Speed \ of \ testing}{Gage \ length}$$

Setelah nilai *strain* didapat, nilai dari *ultimate tensile strain* merupakan *strain* pada saat *ultimate tensile strength*. Berikut adalah nilai *ultimate tensile strain* dari seluruh variasi *separator* pada baterai struktural komposit tanpa melalui *charge-discharge cycle* dapat dilihat pada **tabel 4.4**

Tabel 4.5 Nilai *Ultimate Tensile Strain* dari Seluruh Variasi *Separator* Tanpa dilakukan *Charge-Discharge Cycle*

Variasi	Spesimen	Ultimate Tensile Strain	Average (mm/mm)	Standar Deviasi (s)	COV
WR50	6	0,11	0,10	0,01	10%
	2	0,09			
	3	0,09			
	5	0,11			
WR200	1	0,06	0,09	0,02	25%
	2	0,08			
	3	0,09			
	4	0,12			
Whatman	1	0,04	0,05	0,01	27%
	2	0,04			
	3	0,04			
	4	0,07			

Baterai dengan *separator* WR50 memiliki rata-rata nilai *ultimate tensile strain* tertinggi yaitu 0,10, diikuti dengan *separator* WR200 yang memiliki rata-rata nilai *ultimate tensile strain* sebesar 0,09, sedangkan *separator* Whatman memiliki rata-rata nilai *ultimate tensile strain* terendah yaitu 0,05. Standar deviasi pada setiap jenis *separator* tergolong kecil.

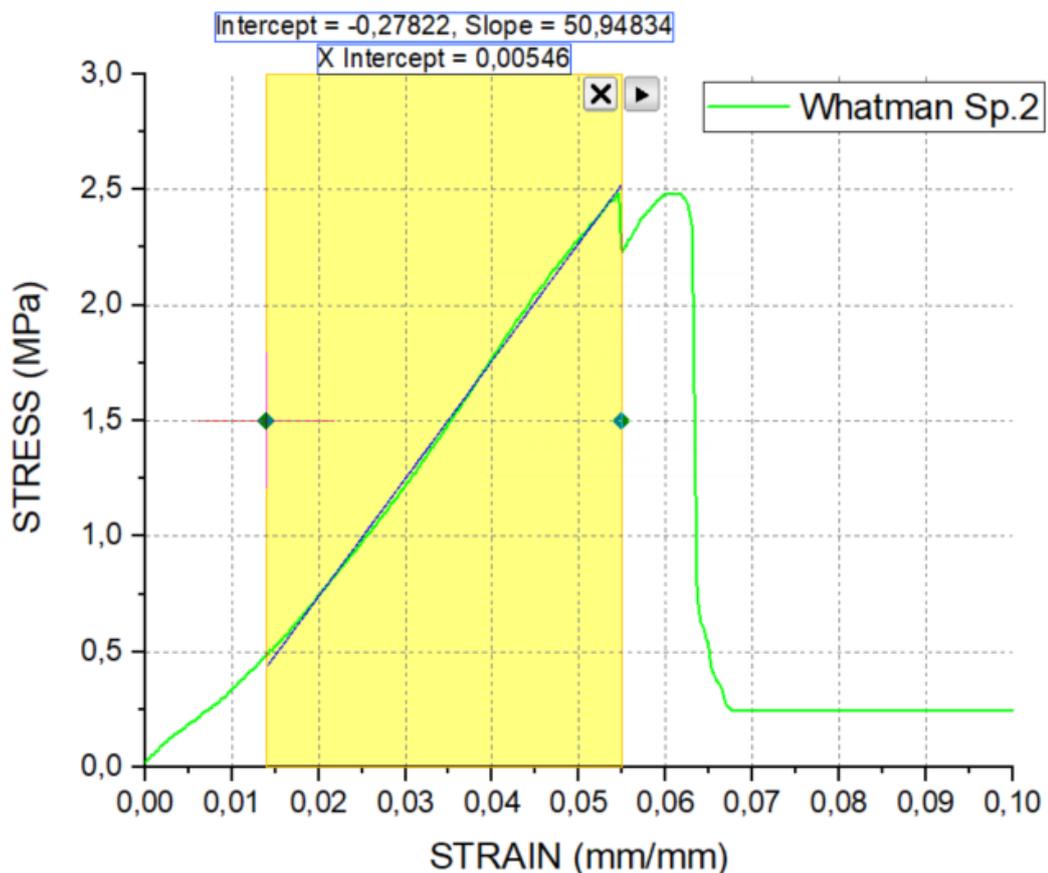
Tabel 4.6 Nilai *Ultimate Tensile Strain* untuk Seluruh Variasi *Separator* setelah *Charge-Discharge Cycle*

Variasi	Spesimen	Ultimate Tensile Strain	Average (MPa)	Standar Deviasi (s)	COV
WR50	1	0,06	0,07	0,01	8%
	2	0,07			
WR200	1	0,08	0,10	0,02	16%
	2	0,11			
Whatman	1	0,05	0,05	0,01	11%
	2	0,04			

Tabel 4.5 diatas menunjukkan nilai *ultimate tensile strain* untuk seluruh variasi baterai yang telah melewati *charge-discharge cycle*. Baterai dengan *separator* WR200 memiliki rata-rata nilai *ultimate tensile strain* tertinggi yaitu 0,10, diikuti dengan *separator* WR50 yang memiliki rata-rata nilai *ultimate tensile strain* sebesar 0,07, sedangkan *separator* Whatman memiliki rata-rata nilai *ultimate tensile strain* terendah yaitu 0,05. Standar deviasi pada setiap jenis *separator* tergolong kecil.

4.3.3 Nilai *Young's Modulus*

Untuk mendapat nilai *young modulus*, diperlukan membuat grafik *stress-strain*. Grafik tersebut dibuat menggunakan *software* OriginPro. Tahap pertama adalah membuat grafik terlebih dahulu. Setelah grafik muncul, pilih menu “*Gadgets*” lalu pilih “*Quick Fit*” dan klik “*Linear (system)*” seperti pada **Gambar 4.19**. Kemudian akan muncul daerah berwarna kuning yang bisa diatur. Untuk mendapatkan nilai *Young's Modulus*, daerah berwarna kuning harus diatur agar berada pada bagian linear atau pada *elastic region*. Nilai *slope* yang didapat merupakan nilai *young modulus* pada spesimen tersebut. Semakin tegak garis acuan pada daerah berwarna kuning maka semakin besar *slope* atau nilai *young modulus* dari suatu spesimen. Prosedur analisis dapat dilihat pada **Gambar 4.19**. Nilai *Young's Modulus* dari seluruh variasi *separator* pada baterai struktural komposit tanpa melalui *charge-discharge* dapat dilihat pada **Tabel 4.6**



Gambar 4.19 Prosedur Analisis Nilai *Young's Modulus* menggunakan *Software* OriginPro

Tabel 4.7 Nilai *Young's Modulus* dari Seluruh Variasi *Separator* Tanpa dilakukan *Charge-Discharge Cycle*

Variasi	Spesimen	Young's Modulus	Average (MPa)	Standar Deviasi (s)	COV
WR50	6	71,35	85,10	9,30	11%
	2	97,35			
	3	87,50			
	5	84,21			
WR200	1	172,87	127,35	26,57	21%
	2	109,52			
	3	118,57			
	4	108,44			
Whatman	1	48,22	47,03	1,69	4%
	2	46,90			
	3	48,66			
	4	44,32			

Baterai dengan *separator* WR200 memiliki nilai *young modulus* tertinggi yaitu sebesar 172,87 MPa, baterai yang menggunakan *separator* WR50 memiliki nilai *young modulus* sebesar 97,35 MPa, dan nilai *Young's Modulus* yang paling kecil adalah baterai yang menggunakan *separator* Whatman dengan nilai sebesar 48,66 MPa. Standar deviasi tergolong tinggi pada *separator* WR50 dan WR200, sedangkan standar deviasi tergolong kecil untuk *separator* Whatman. *Separator* dengan jenis *glass fiber woven roving* memiliki nilai *stiffness* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *separator* Whatman.

Tabel 4.8 Nilai *Young's Modulus* dari Seluruh Variasi *Separator* setelah *Charge-Discharge Cycle*

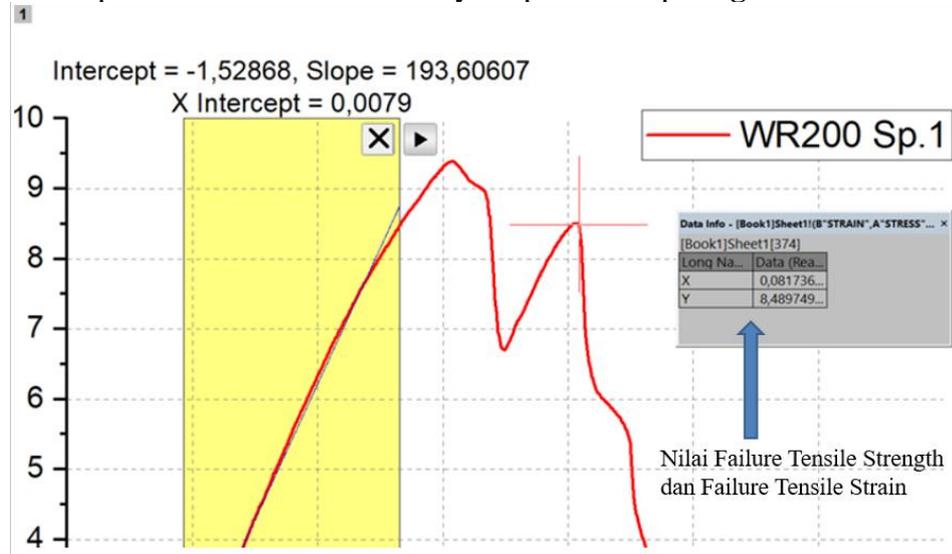
Variasi	Spesimen	Young's Modulus	Average (MPa)	Standar Deviasi (s)	COV
WR50	1	36,12	42,21	6,09	14%
	2	48,29			
WR200	1	61,09	126,03	64,94	52%
	2	190,96			
Whatman	1	51,38	75,42	24,04	32%
	2	99,45			

Tabel 4.7 diatas menunjukkan nilai *Young's Modulus* untuk seluruh variasi baterai yang telah melewati *charge-discharge cycle*. Baterai dengan *separator* WR200 memiliki nilai *young modulus* tertinggi yaitu sebesar 190,96 MPa, baterai dengan *separator* WR50 memiliki nilai *young modulus* sebesar 99,45 MPa, dan nilai *Young's Modulus* yang paling kecil adalah baterai yang menggunakan *separator* WR50 dengan nilai sebesar 48,29 MPa. Standar deviasi sangat tinggi pada baterai dengan *separator* WR200.

4.3.4 Nilai *Failure Tensile Strength* dan *Failure Tensile Strain*

Nilai ini merupakan *stress* dan *strain* sesaat sebelum spesimen mengalami *failure*. Untuk mengetahui nilai tersebut pada sebuah spesimen dapat menggunakan

kurva stress-strain yang sudah diplot sebelumnya menggunakan *software* OriginPro. Pada *software* tersebut terdapat *tools* yaitu ‘*data reader*’ yang dapat digunakan untuk membaca sebuah titik pada suatu kurva dengan cara klik lambang tersebut lalu arahkan kursor pada titik yang akan dibaca, lalu akan keluar nilai sumbu x dan y dimana pada kurva ini sumbu x menunjukkan nilai *strain* dan sumbu y menunjukkan nilai *stress* pada titik tersebut. Contohnya dapat dilihat pada **gambar 4.20**



Gambar 4.20 Nilai *Failure Tensile Stress* dan *Failure Tensile Strain* menggunakan *Software* OriginPro

Setelah mendapat data tersebut untuk semua spesimen pada setiap variasinya, nilai tersebut dikumpulkan menjadi suatu tabel pada Microsoft Excel. Nilai pada seluruh spesimen per variasi dapat dilihat pada **Tabel 4.8** dan **Tabel 4.9**

Tabel 4.9 *Failure Tensile Strength* pada Seluruh Spesimen per Variasi

Variasi	Spesimen	Failure Tensile Strength	Average (MPa)	Standar Deviasi (s)	COV
WR50	6	6,69	7,02	0,64	9%
	2	8,08			
	3	6,94			
	5	6,38			
WR200	1	8,50	8,38	2,81	34%
	2	4,27			
	3	8,54			
	4	12,20			
Whatman	1	2,55	2,54	0,04	2%
	2	2,48			
	3	2,53			
	4	2,59			

Berdasarkan **Tabel 4.8**, ada beberapa spesimen yang tidak langsung mengalami kegagalan setelah mencapai *ultimate tensile strength* (UTS). Baterai dengan *separator* WR200 spesimen satu sebesar 8,5 MPa serta WR200 spesimen dua

sebesar 4,27 MPa, dan Whatman spesimen dua sebesar 2,48 MPa serta Whatman spesimen tiga sebesar 2,53 MPa. Semua nilai *failure tensile strength* yang berbeda dengan nilai UTS-nya memiliki nilai *strength* yang lebih kecil. **Tabel 4.9** menunjukkan nilai *failure tensile strength* pada seluruh variasi baterai struktural komposit setelah melewati proses *charge-discharge*. Perbedaan hanya terdapat pada baterai dengan *separator* WR50 spesimen satu dengan nilai *strength* sebesar 1,65 MPa.

Tabel 4.10 *Failure Tensile Strength* pada Seluruh Variasi *Separator* setelah *Charge-Discharge Cycle*

Variasi	Spesimen	Failure Tensile Strength	Average (MPa)	Standar Deviasi (s)	COV
WR50	1	1,65	2,21	0,55	25%
	2	2,76			
WR200	1	3,61	9,62	6,01	62%
	2	15,63			
Whatman	1	2,63	3,13	0,50	16%
	2	3,62			

Tabel 4.11 *Failure Tensile Strain* pada Seluruh Spesimen per Variasi

Variasi	Spesimen	Failure Tensile Strain	Average (mm/mm)	Standar Deviasi (s)	COV
WR50	6	0,11	0,10	0,01	10%
	2	0,09			
	3	0,09			
	5	0,11			
WR200	1	0,08	0,10	0,02	16%
	2	0,09			
	3	0,09			
	4	0,12			
Whatman	1	0,06	0,06	0,00	7%
	2	0,06			
	3	0,06			
	4	0,07			

Berbanding terbalik dengan nilai *failure tensile strength*, nilai *failure tensile strain* justru selalu lebih besar dibandingkan nilai *ultimate tensile strain*. **Tabel 4.10** menunjukkan nilai *failure tensile strain* pada baterai struktural komposit tanpa melewati *charge-discharge cycle*. Baterai dengan *separator* WR200 spesimen satu dengan nilai *strain* sebesar 8% serta WR200 spesimen dua dengan nilai *strain* sebesar 9%, dan Whatman spesimen satu, dua, dan tiga memiliki nilai *strain* sebesar 6%. **Tabel 4.11** menunjukkan nilai *failure tensile strain* pada seluruh variasi baterai struktural komposit setelah melewati proses *charge-discharge*. Perbedaan terdapat pada baterai dengan *separator* WR50 spesimen satu dengan nilai *strain* sebesar 7% dan pada WR50 spesimen dua dengan nilai *strain* sebesar 8%.

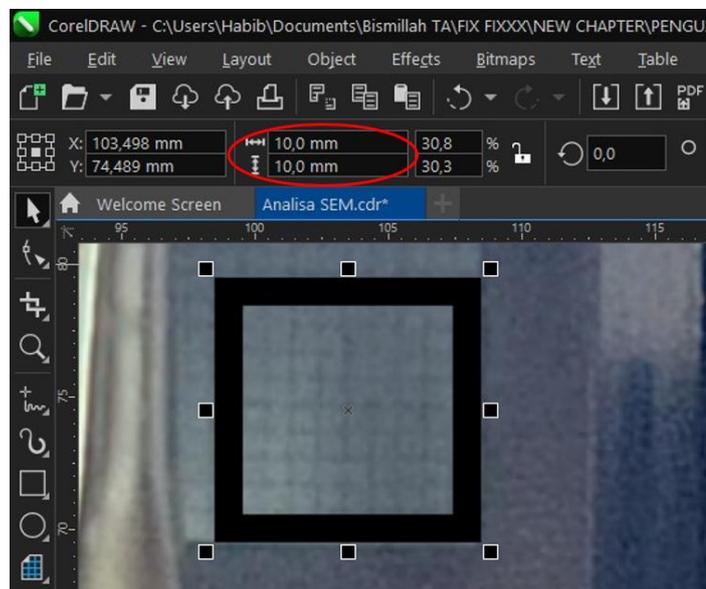
Pada spesimen, kegagalan tidak tepat setelah spesimen mencapai *ultimate tensile strength* serta *ultimate tensile strain*-nya disebabkan oleh sedikit *slip* pada bagian *end tab* karena delaminasi.

Tabel 4.12 *Failure Tensile Strain* pada Seluruh Variasi *Separator* setelah *Charge-Discharge Cycle*

Variasi	Spesimen	Failure Tensile Strain	Average (MPa)	Standar Deviasi (s)	COV
WR50	1	0,07	0,08	0,01	7%
	2	0,08			
WR200	1	0,08	0,10	0,02	16%
	2	0,11			
Whatman	1	0,05	0,05	0,01	11%
	2	0,04			

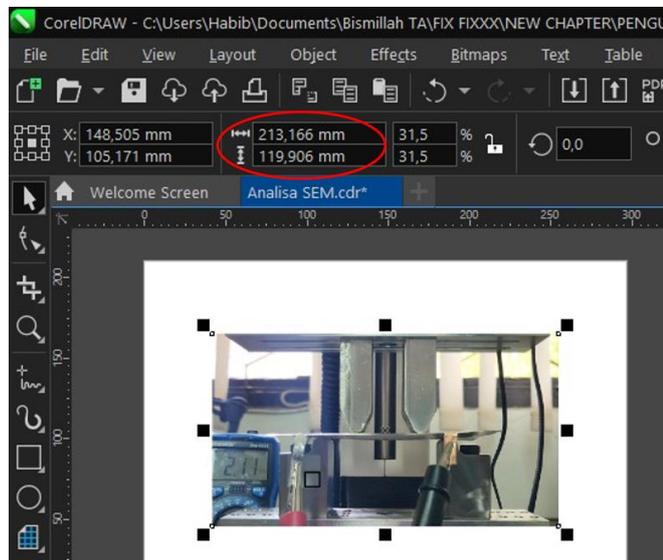
4.4 Hasil *Flexural Test*

Flexural test pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui ketahanan baterai struktural komposit dengan mendapatkan pengaruh *curvature* terhadap voltase pada baterai. Untuk metode dan persiapan pengujian dapat dilihat pada **sub-bab 3.4.7**. Pengujian dilakukan hingga kurva *load-time* yang dibaca mesin sudah turun dan *curvature* pada spesimen sudah sangat tinggi yang ditandai dengan sedikitnya bagian spesimen yang ditopang oleh *support span*. Data yang diperoleh dari pengujian adalah perubahan voltase pada setiap tingkat kelengkungan baterai. Pengolahan data menggunakan metode *image processing*. Gambar diambil setiap 10 detik. Pengukuran diawali dengan kalibrasi gambar menggunakan *milimeter block* sebagai acuan kalibrasinya seperti pada **Gambar 4.21**



Gambar 4.21 Kalibrasi Gambar menggunakan *Software 'CorelDraw2017'*

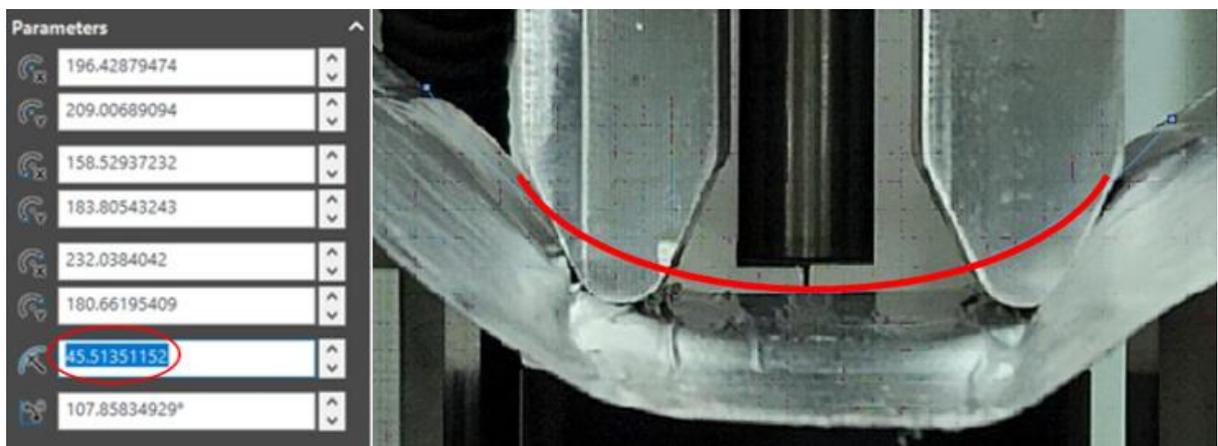
Kalibrasi dimulai dengan membuat persegi dengan ukuran 10x10mm sebagai acuan, lalu persegi tersebut ditempatkan pada *milimeter block*. Setelah itu dimensi gambar diatur hingga ukuran pada *milimeter block* sesuai dengan persegi. Terakhir, ukuran gambar dapat dilihat seperti pada **Gambar 4.22**. Ukuran tersebut menjadi acuan ukuran untuk semua gambar pada spesimen yang sama. Setelah dikalibrasi, dilakukan pengukuran radius menggunakan *software 'SolidWorks2017'* seperti pada **Gambar 4.23**.



Gambar 4.22 Acuan Ukuran Gambar untuk Perhitungan *Radius* Berikutnya

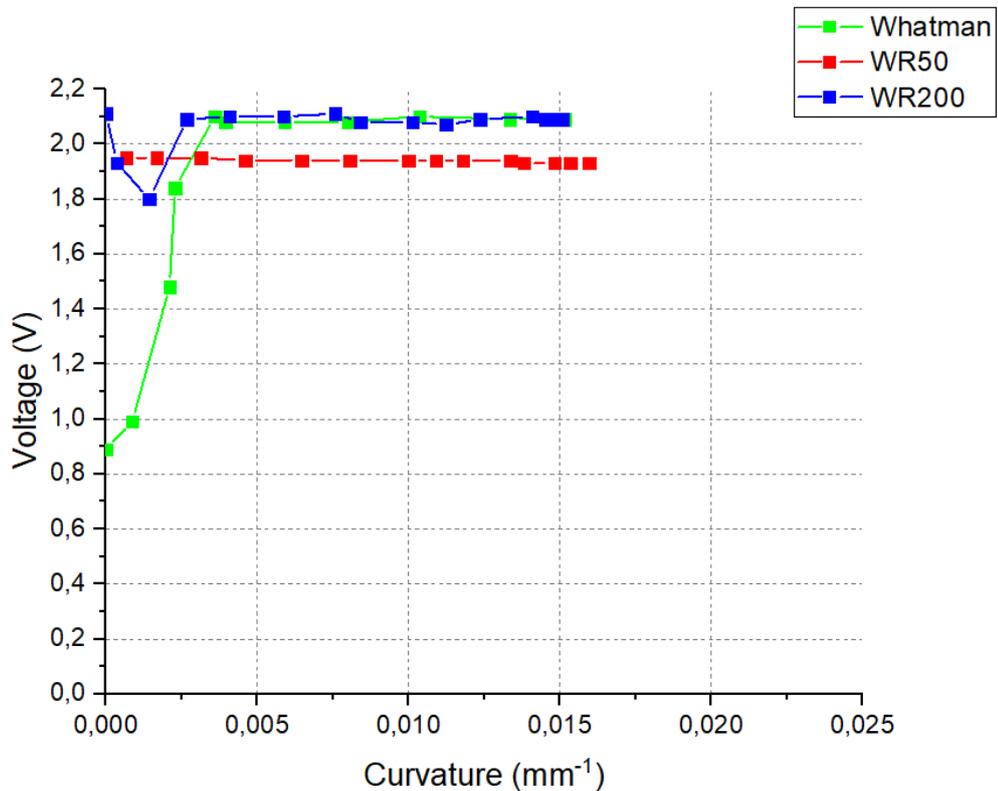
Setelah dikalibrasi, dilakukan pengukuran *radius* menggunakan *software 'SolidWorks2017'* seperti pada **Gambar 4.23**. Angka *radius* didapat dari lingkaran pengukur dengan metode *three-point arc* yang disesuaikan dengan kelengkungan pada baterai struktural komposit. Setelah pengukuran selesai dilakukan, nilai *curvature* pada setiap titiknya dapat dihitung dengan rumus:

$$Curvature = \frac{1}{Radius (mm)}$$



Gambar 4.23 Pengukuran Radius pada *Software 'Solidworks2017'* Menggunakan '*Three-Point Arc*'

Semakin besar kelengkungan pada baterai, maka *radius* lingkaran pengukur semakin kecil. Jika dihubungkan dengan rumus, maka semakin besar nilai *curvature*-nya. Setelah seluruh data pada setiap variasi didapat, maka kurva dapat diplot menggunakan *software* 'OriginPro2018'. Berikut adalah hasil data hubungan *curvature* terhadap perubahan voltase pada baterai struktural komposit untuk setiap variasi jenis *separator* yang dapat dilihat pada gambar 4.24.



Gambar 4.24 Kurva Voltage-Curvature untuk Seluruh Variasi Separator

Sebelum dilakukan pengujian, seluruh spesimen baterai di-charge hingga 4 V selama dua jam dengan arus yang masuk berkisar antar 0,2-0,4 mA. Namun ketika *power supply unit* dimatikan, voltase turun dengan cepat. Untuk baterai dengan *separator* WR200, voltase turun dari 4 V dan mulai stabil pada 2,1 V. Untuk baterai dengan *separator* WR50, voltase turun dari 4 V dan mulai stabil pada 1,9 V. Untuk baterai dengan *separator* Whatman, voltase turun dari 4 V dan mulai stabil pada 0,9 V. *Flexural test* dilakukan saat baterai mulai stabil untuk setiap variasinya.

Pada baterai dengan *separator* WR200, terjadi sedikit penurunan voltase menjadi 1,8 V pada rentang *curvature* 0-0,0025mm⁻¹, setelah itu voltase kembali stabil pada rentang 2-2,1 V seiring dengan meningkatnya nilai *curvature*. Pada baterai dengan *separator* WR50, voltase cenderung stabil seiring dengan meningkatnya nilai *curvature*.

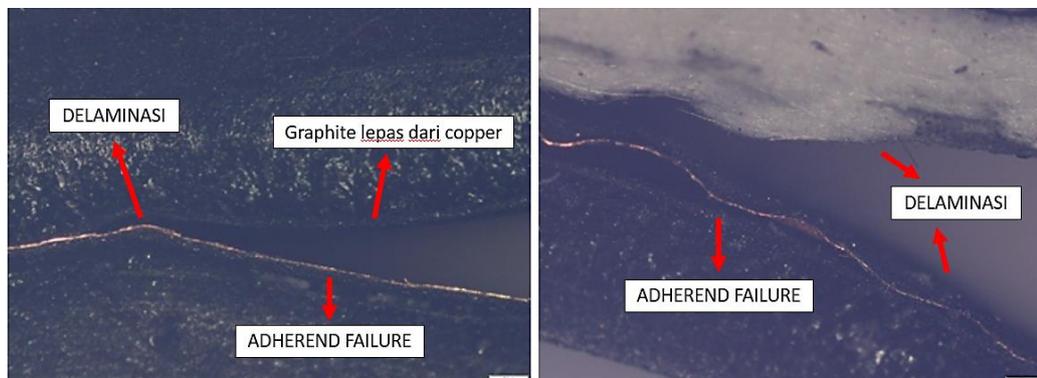
Fenomena unik terjadi saat *flexural test* pada baterai dengan *separator* Whatman. Voltase pada baterai yang awalnya hanya sebesar 0,8 V, terus naik seiring dengan bertambahnya nilai *curvature*. Pada nilai *curvature* sebesar 0,004, tegangan mulai stabil pada rentang 2-2,1V seiring dengan bertambahnya *curvature*. Saat pengujian selesai dan *load* dilepaskan, tegangan pada baterai kembali turun hingga 0,8 V.

4.5 Hasil Pengamatan dengan *Optical Microscope*

Pengamatan ini dilakukan untuk melihat *failure mode* yang terjadi pada baterai struktural komposit setelah seluruh spesimen melalui *tensile test*. Pengamatan bertempat pada Laboratorium Metalurgi Teknik Mesin ITS. Berikut adalah tipikal hasil pengamatan *failure mode* pada setiap variasi *separator*, yaitu:

4.5.1 Baterai dengan *Separator Whatman*

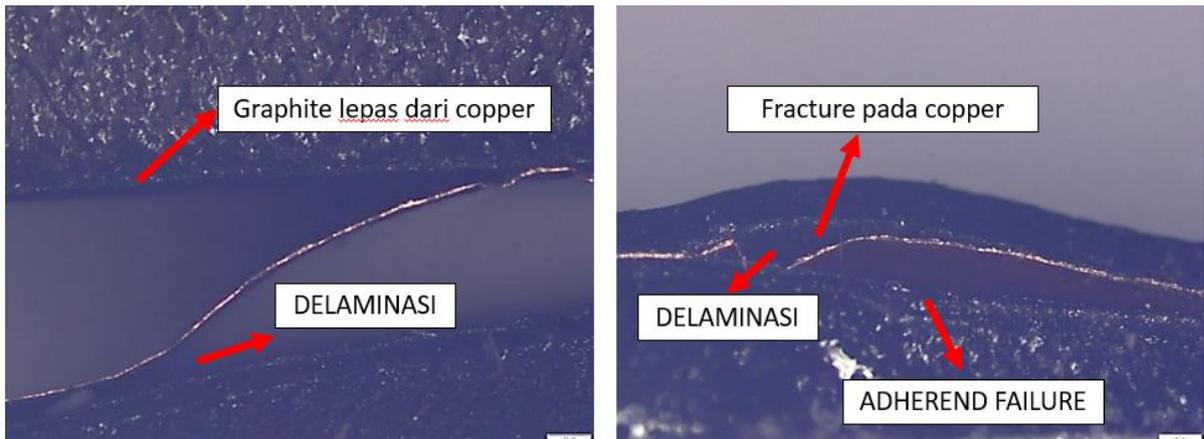
Proses terjadinya *failure* pada baterai terlampir. *Initial crack* terjadi pada bagian *separator*, kemudian *crack* merambat menuju bagian terluar baterai. Selain itu, kegagalan pada baterai dengan *separator Whatman* didominasi oleh delaminasi pada bagian anoda. Anoda menggunakan material tembaga yang dilapisi dengan grafit, namun permukaan tembaga sangat halus yang menyebabkan grafit tidak dapat menempel dengan kuat dan menimbulkan terjadinya *adherend failure*. Setelah seluruh lapisan diberi SPE, grafit cenderung menempel pada SPE yang juga berperan sebagai *matrix* lepas dari tembaga setelah *tensile test* seperti pada **gambar 4.26**.



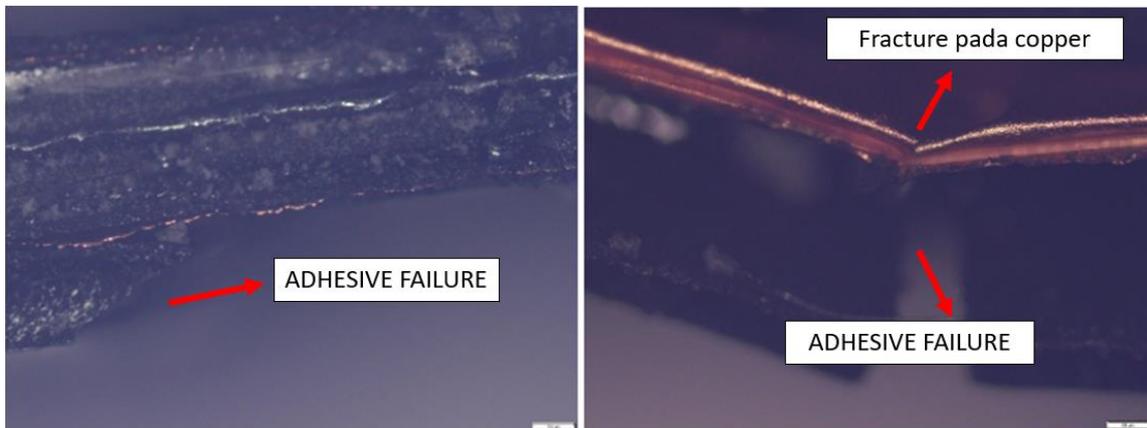
Gambar 4.25 Tampak Samping Spesimen. Delaminasi Bagian Anoda pada Spesimen Whatman Setelah *Tensile Test*

4.5.2 Baterai dengan *Separator WR50 dan WR200*

Proses terjadinya *failure* pada baterai terlampir. Kedua jenis *separator* ini memiliki pola kegagalan yang mirip. Kegagalan yang terjadi adalah delaminasi pada bagian anoda yang tidak dapat menempel dengan kuat pada *matrix* (SPE) seperti pada **Gambar 4.27**. Berdasarkan pengamatan, delaminasi juga disebabkan oleh *coating* dari grafit yang mudah lepas dari tembaga. *Matrix* yang terlalu tebal menyebabkan tegangan geser yang diterima oleh *matrix* pada bagian *tab* tidak dapat tersalurkan keseluruhan lapisan baterai, sehingga terjadi *crack* pada bagian *tab* dan baterai tidak dapat patah dengan sempurna seperti yang terlihat pada **Gambar 4.28**.



Gambar 4.26 Tampak Samping Spesimen. Delaminasi Bagian Anoda pada Baterai dengan *Separator* WR50 (kiri) dan WR200 (kanan) setelah *Tensile Test*

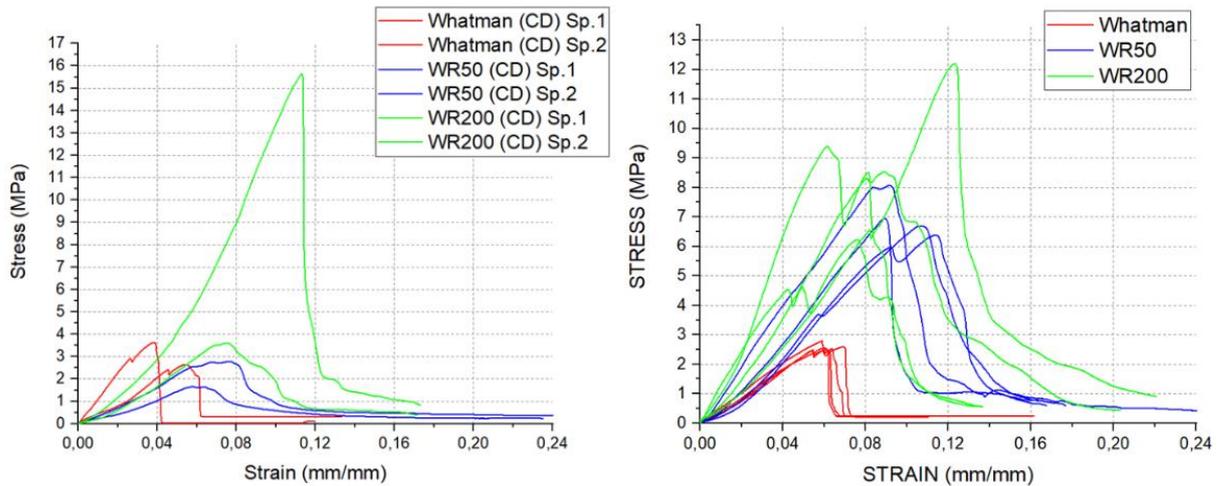


Gambar 4.27 Tampak Samping Spesimen. Kegagalan pada Bagian *Tab* untuk Spesimen dengan *Separator* WR200 (kiri) dan WR50 (kanan) Setelah *Tensile Test*

4.6 Analisis Data

Berdasarkan data yang telah diterima. *Separator* dengan jenis *glass fiber woving roven* memiliki nilai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *separator* jenis Whatman. *Glass fiber woven roving* memiliki orientasi arah serat *bidirectional* dan *continuous*. *Glass fiber woven roving* yang digunakan pada penelitian ini yaitu WR50 dan WR200, keduanya memiliki perbedaan pada ketebalan dan lebar anyaman. Lebar anyaman dan ketebalan berbanding lurus, semakin lebar anyaman maka semakin tebal glass fiber tersebut. WR200 memiliki lebar anyaman yang lebih besar daripada WR50 yang membuat *tensile strength* dan *stiffness* pada baterai dengan *separator* WR200 lebih tinggi dibandingkan dengan baterai dengan *separator* WR50 dan Whatman. *Separator* jenis Whatman memiliki orientasi arah serat *random* dan *discontinuous*. Perbedaan struktur tersebut yang membuat *strength* dari baterai dengan *separator* Whatman paling rendah dibandingkan kedua jenis *glass fiber woven roving*.

Hasil *tensile test* memiliki standar deviasi yang tinggi disebabkan oleh metode manufaktur baterai yang digunakan tidak mampu menyebarkan SPE secara merata pada setiap *layer*-nya, hal tersebut menyebabkan jarak antar katoda, anoda, dan *separator* bervariasi. Pendistribusi *matrix* kepada struktur baterai tidak dapat dikontrol, sehingga terjadi perbedaan ketebalan *matrix* untuk setiap lapisan pada baterai. Hal ini terjadi pada seluruh variasi *separator*. Pada beberapa baterai, *matrix* tebal di satu sisi seperti pada **Gambar 4.29** menyebabkan hasil *tensile test*-nya jauh dibawah baterai dengan ketebalan *matrix* yang lebih merata. *Strain energy release rate* tidak dapat diukur karena tebal *matrix* pada setiap layer berbeda dan juga terdapat banyak *misalignment* pada setiap layernya.



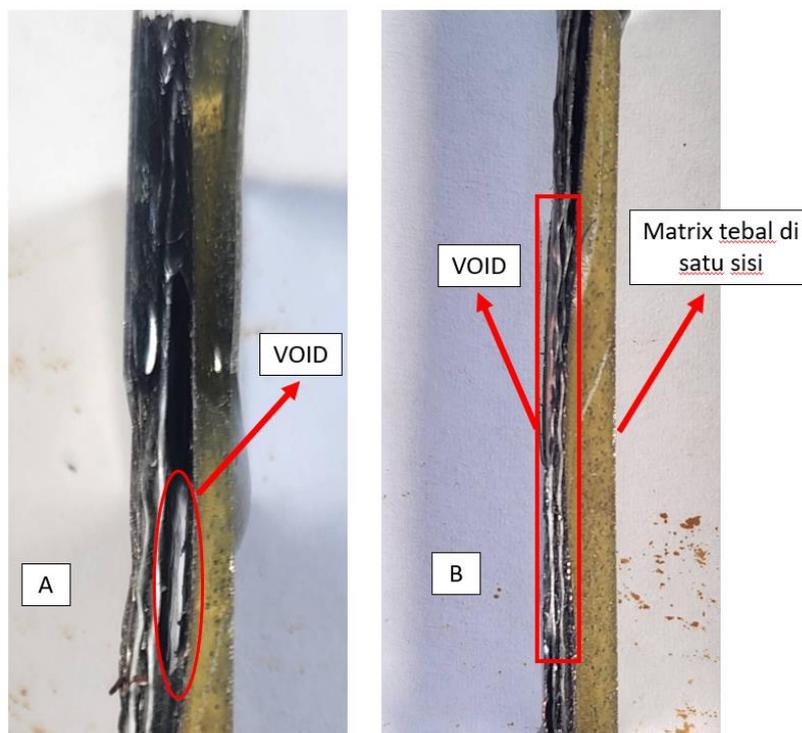
Gambar 4.28 Perbandingan Grafik *Stress-Strain* Baterai Melewati *Charge-Discharge Cycle* (kiri) dengan Baterai tanpa *Charge-Discharge Cycle* (Kanan)

Gambar 4.28 merupakan perbandingan grafik stress-strain untuk baterai yang melewati *charge-discharge cycle* dengan baterai tanpa melewati *charge-discharge cycle*. Terdapat perbedaan *strength* pada baterai struktural komposit yang melewati pengujian elektrokimia terutama pada baterai dengan separator WR50, untuk baterai dengan *separator* Whatman yang telah melewati pengujian elektrokimia sebelum *tensile test* juga terdapat penurunan, namun tidak sebesar pada WR50, untuk baterai dengan *separator* WR200 terdapat fenomena yang unik, yaitu terdapat spesimen yang kekuatannya lebih tinggi dibanding dengan baterai dengan *separator* WR200 tanpa melewati pengujian elektrokimia dan terdapat spesimen yang nilai kekuatannya lebih kecil dibanding baterai dengan *separator* WR200 tanpa pengujian elektrokimia. Seluruh hal tersebut dapat terjadi disebabkan oleh metode manufaktur yang kurang optimal dan juga adanya degradasi pada struktur baterai. Separator adalah komponen tidak aktif yang tidak berpartisipasi dalam reaksi, sehingga terjadinya degradasi cenderung minim (Warnecke, 2017). Separator berbahan *glass fiber* memiliki stabilitas termal yang sangat baik (Luo et al., 2015). Contoh perubahan morfologi oleh degradasi adalah retak partikel dan hilangnya kontak. Menurut jurnal dari Gilbert et al., terdapat retakan mikro di dalam partikel. Terlihat retakan di dalam NMC532 setelah siklus. Hal ini dapat menyebabkan hilangnya kontak partikel, yang mengakibatkan efek degradasi dan kombinasi lainnya, kapasitas memudar dan juga peningkatan resistensi oleh jalur yang lebih panjang untuk arus listrik melalui elektroda. Hal yang sama dapat terjadi juga pada anoda (Warnecke, 2017).

Metode manufaktur ini juga mempengaruhi *flexural test*. Baterai di-charge hingga 4 V namun voltase turun. Fenomena unik terjadi pada baterai dengan *separator* Whatman.

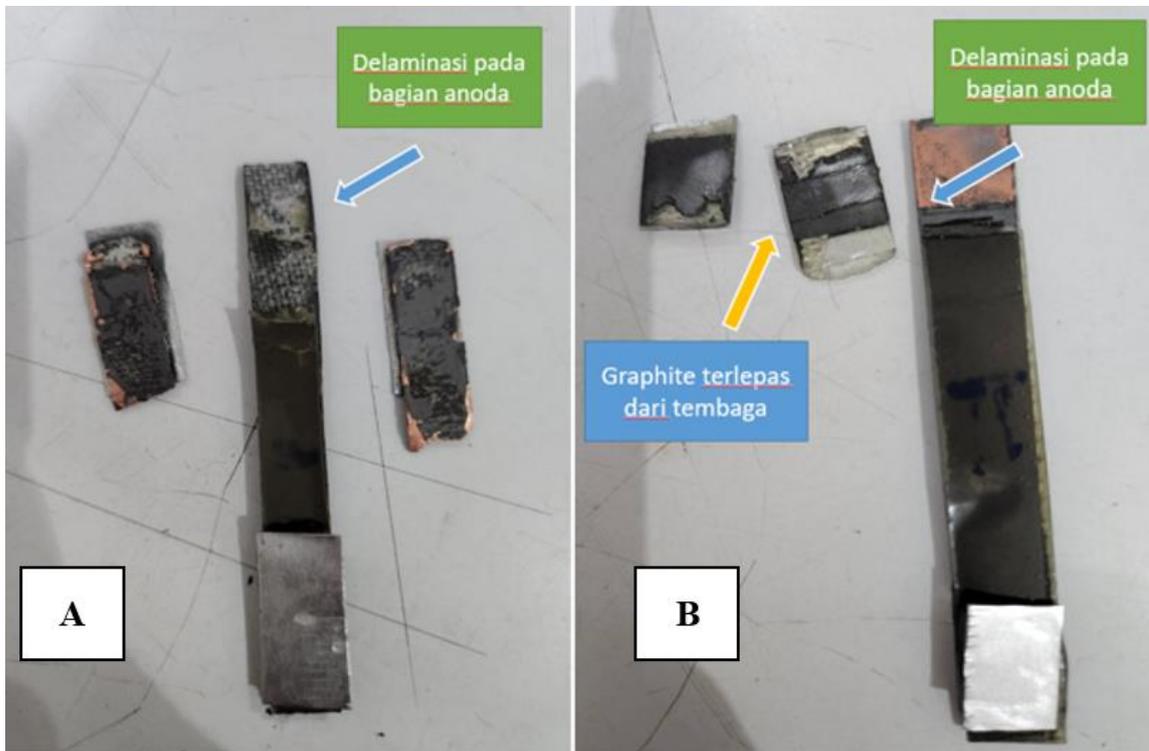
Baterai yang setelah *charging* voltasenya turun hingga 0,8 V, kemudian naik hingga stabil di 2,1 V seiring dengan bertambahnya *curvature*. Hal ini menandakan dengan metode produksi yang dilakukan masih menimbulkan banyak *void* dan persebaran SPE yang tidak merata. Ketika baterai ditekan, jarak antar anoda katoda dan *separator* semakin dekat dan ada kemungkinan luasan *void* semakin berkurang, hal inilah penyebab mengapa voltase pada baterai dengan *separator* Whatman dapat naik dan cenderung stabil seiring bertambahnya nilai *curvature*. Penyebab lainnya terjadi penurunan voltase adalah penggunaan material penyusun. Seluruh material penyusun baterai tersedia pada pasaran dan merupakan material konvensional pada baterai, kecuali pada bagian SPE yang menggunakan elektrolit konvensional yaitu campuran LiPF₆ yang dilaturkan dengan ethylene carbonate (EC) dan dimethyl carbonate (DMC) namun dicampur dengan resin (*bisphenol A*) dan *hardener* (*modified cycloaliphatic amine*) agar elektrolit tersebut berfasa solid. Belum diketahui apakah jenis resin dan *hardener* tersebut apakah *electrical conductive* atau tidak.

Morfologi baterai struktural komposit dapat dilihat pada **Gambar 4.29**. Terlihat bahwa persebaran SPE tidak merata pada kedua jenis *separator*. Pada beberapa *layer* juga terlihat kurang terbasahi oleh SPE yang menyebabkan timbulnya *void* pada baterai yang dapat mengurangi performa mekanik dan elektrokimianya. *Failure mode* yang terjadi pada baterai dapat dilihat setelah *tensile test*. *Failure* yang terjadi pada *separator glass fiber* WR50 dan WR200 didominasi oleh delaminasi dan *debonding* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.30**. Kegagalan diawali dengan tegangan geser yang terjadi pada *matrix* (SPE) pada bagian *tab*, lalu terjadi slip pada bagian anoda karena terjadi *adherend failure* pada grafit, kemudian terjadi *failure* pada bagian anoda pada sisi yang ditarik. Hal ini terjadi disebabkan oleh beberapa hal yaitu SPE yang berperan sebagai *matrix* terlalu tebal dan distribusinya tidak merata.



Gambar 4.29 Tampak Samping. Morfologi Permukaan Baterai Struktural Komposit Sebelum *Tensile Test*. (a) Baterai dengan *Separator* Whatman. (b) Baterai dengan *Separator* WR50

Pada baterai dengan *separator* Whatman, kegagalan justru diawali pada Whatman mengalami kegagalan terlebih dahulu karena Whatman memiliki *mechanical properties* yang jauh lebih rendah dibanding separator dengan jenis *glass fiber woving roven* sehingga lebih mudah patah pada nilai *strain to failure* yang lebih rendah. Kegagalan tersebut merambat keluar hingga menyebabkan kegagalan pada SPE (bagian terluar) lalu baterai patah dengan sempurna seperti pada **Gambar 4.31**.



Gambar 4.30 Kegagalan pada Baterai dengan *separator* (a) WR50, (b) WR200



Gambar 4.31 Kegagalan pada Baterai dengan *Separator* Whatman

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan studi literatur dan hasil analisis data dari penelitian yang telah dilakukan, berikut kesimpulan yang didapatkan adalah sebagai berikut:

1. Perbedaan jenis *separator* berpengaruh terhadap performa mekanik dari baterai struktural komposit. Baterai dengan *separator* jenis *glass fiber woven roving* dengan arah serat *bidirectional* dan *continuous* memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan *separator* jenis Whatman dengan arah serat *random* dan *discontinuous*. Pada penelitian ini, ada dua *separator* jenis *glass fiber woven roving* yaitu WR50 dan WR200. WR200 memiliki ketebalan serta lebar anyaman yang lebih besar dibandingkan dengan WR50. Hasil *tensile test* untuk mengetahui kekuatan *separator* tanpa *matrix* menunjukkan bahwa WR200 memiliki nilai *strength* yang paling besar yaitu 1336,26 MPa, diikuti dengan WR50 dengan nilai *strength* sebesar 678,10 MPa, dan yang memiliki nilai *strength* yang paling kecil adalah Whatman yaitu hanya sebesar 0,32 MPa. Baterai dengan *separator* WR200 mampu mempunyai nilai *strength* hingga 12,20 MPa dan nilai *stiffness* sebesar 172,87 MPa. Baterai dengan *separator* WR50 mampu mempunyai nilai *strength* hingga 8,08 MPa dan nilai *stiffness* sebesar 97,35 MPa. Baterai dengan *separator* Whatman mampu mempunyai nilai *strength* hingga 2,79 MPa dan nilai *stiffness* sebesar 48,66 MPa. Baterai dengan *separator* WR200 paling unggul dibanding kedua jenis *separator* lainnya.
2. Pengamatan dengan *optical microscope* menunjukkan pola kegagalan yang terjadi setelah *tensile test* pada baterai struktural komposit. Terdapat delaminasi antar lapisan terutama pada bagian anoda. Selain itu juga terdapat *adherend failure* pada bagian *graphite* yang diakibatkan oleh *coating* pada *copper* yang tidak terlalu kuat. *Adhesive failure* juga terjadi dikarenakan *solid polymer electrolyte* tebal pada satu sisi.
3. *Charge-discharge cycle* berpengaruh terhadap performa mekanik pada baterai struktural komposit. Terdapat penurunan *mechanical properties* pada baterai untuk setiap variasinya, namun terdapat beberapa spesimen memiliki hasil yang mirip dengan baterai struktural komposit tanpa melewati pengujian elektrokimia.
4. Penurunan performa mekanik pada baterai yang melewati *charge-discharge cycle* dapat diakibatkan oleh degradasi pada material aktif yaitu katoda dan anoda yang diakibatkan oleh proses transfer ion selama *charge-discharge*. Selain hal tersebut, metode manufaktur baterai yang belum optimal dan konsisten juga dapat menjadi salah satu penyebab penurunan performa.
5. Kelengkungan pada baterai tidak menyebabkan baterai tersebut kehilangan fungsinya sebagai penyimpan daya. Pada *flexural test* dengan prosedur *four-point bending*, kelengkungan yang tinggi tidak merusak struktur baterai karena campuran SPE pada baterai menghasilkan baterai yang kuat namun memiliki ketahanan yang baik terhadap beban *bending* hingga nilai *curvature* sebesar $0,016 \text{ mm}^{-1}$ seperti pada baterai dengan *separator* WR50. Voltase pada baterai dengan *separator* WR50 tidak berubah seiring dengan bertambahnya *curvature* yaitu stabil pada 1,9 V, hal ini dikarenakan WR50 memiliki ketebalan yang paling tipis diantara kedua jenis *separator*, ketebalan yang tipis membantu transfer ion dengan cepat. Sedangkan baterai dengan *separator* Whatman dan WR200 mengalami peningkatan voltase pada *curvature* 0 mm^{-1} hingga $0,0025 \text{ mm}^{-1}$ dan cenderung stabil pada 2,1 V seiringnya dengan bertambahnya *curvature*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil evaluasi dari penelitian yang telah dilakukan, adapun saran yang diberikan untuk memperbaiki kualitas spesimen maupun penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan metode manufaktur yang lebih efektif, metode harus bisa mengontrol ketebalan dan persebaran dari SPE sehingga kesalahan yang diakibatkan dari manufaktur dapat diminimalisir. Perbedaan kondisi antar spesimen juga semakin minim.
2. Penggunaan jenis campuran elektrolit konvensional dapat diganti dengan jenis elektrolit konvensional yang lebih baik guna meningkatkan performa elektrokimia baterai.
3. Menambah suatu material pada bagian terluar struktur baterai, dimana material tersebut memiliki kekuatan yang lebih tinggi dari struktur yang lain namun tetap ringan agar fungsi dari baterai struktural komposit tetap terjaga.

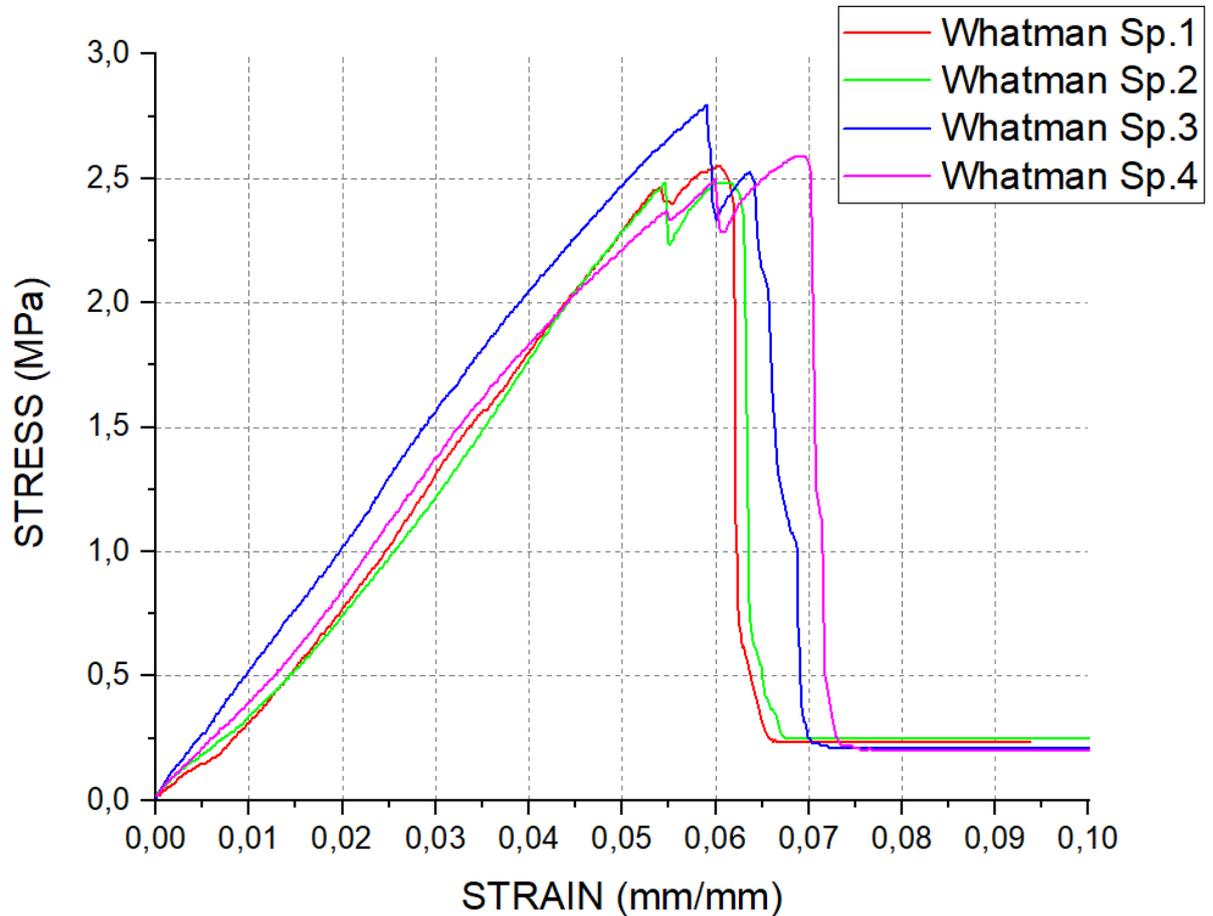
DAFTAR PUSTAKA

- Aifantis, K. E., Hackney, S. A., & Kumar, R. V. (2010). High Energy Density Lithium Batteries: Materials, Engineering, Applications. In *High Energy Density Lithium Batteries: Materials, Engineering, Applications*. <https://doi.org/10.1002/9783527630011>
- Arora, P., & Zhang, Z. (2004). Battery separators. *Chemical Reviews*, *104*(10), 4419–4462. <https://doi.org/10.1021/cr020738u>
- Asp, L. E., Bouton, K., Carlstedt, D., Duan, S., Harnden, R., Johannisson, W., Johansen, M., Johansson, M. K. G., Lindbergh, G., Liu, F., Peuvot, K., Schneider, L. M., Xu, J., & Zenkert, D. (2021). A Structural Battery and its Multifunctional Performance. *Advanced Energy and Sustainability Research*, *2*(3), 2000093. <https://doi.org/10.1002/aesr.202000093>
- Asp, L. E., & Greenhalgh, E. S. (2014). Structural power composites. *Composites Science and Technology*, *101*, 41–61. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.06.020>
- Asp, L. E., Johansson, M., Lindbergh, G., Xu, J., & Zenkert, D. (2019). Structural battery composites: A review. *Functional Composites and Structures*, *1*(4). <https://doi.org/10.1088/2631-6331/ab5571>
- Carlson, T., Ordéus, D., Wysocki, M., & Asp, L. E. (2010). Structural capacitor materials made from carbon fibre epoxy composites. *Composites Science and Technology*, *70*(7), 1135–1140. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.02.028>
- Carlstedt, D. (2022). *Computational modelling of structural battery composites*.
- Duan, S., Iyer, A. H. S., Carlstedt, D., Rittweger, F., Sharits, A., Maddox, C., Riemschneider, K. R., Mollenhauer, D., Colliander, M., Liu, F., & Asp, L. E. (2021). Effect of lithiation on the elastic moduli of carbon fibres. *Carbon*, *185*, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.09.037>
- IESR. (2021). Indonesia Energy Transition Outlook 2021. *Iesr*, 1–93.
- Korthauer, R. (2018). Lithium-ion batteries: Basics and applications. In *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53071-9>
- Luo, X., Pan, W., Liu, H., Gong, J., & Wu, H. (2015). Glass fiber fabric mat as the separator for lithium-ion battery with high safety performance. *Ionics*, *21*(11), 3135–3139. <https://doi.org/10.1007/s11581-015-1540-x>
- O'Brien, D. J., Baechle, D. M., & Wetzel, E. D. (2006). Multifunctional structural composite capacitors for U.S. Army applications. *International SAMPE Technical Conference*.
- Orendorff, C. J. (2012). The role of separators in lithium-ion cell safety. *Electrochemical Society Interface*, *21*(2), 61–65. <https://doi.org/10.1149/2.F07122if>
- Pereira, T., Zhanhu Guo, Nieh, S., Arias, J., & Hahn, H. T. (2009). Energy Storage Structural Composites: A Review. *Journal of Composite Materials*, *43*(5), 549–560. <https://doi.org/10.1177/0021998308097682>
- Pléha, D., Dvořák, P., Kunovjánek, M., Musil, M., & Čech, O. (2012). Battery Separators D. *Pléha*. *40*(1), 153–158.
- Shukla, N., Thakur, A. K., Shukla, A., & Marx, D. T. (2014). Ion conduction mechanism in solid polymer electrolyte: An applicability of almond-west formalism. *International Journal of Electrochemical Science*, *9*(12), 7644–7659.
- TotalEnergies. (2021). *TotalEnergies Energy Outlook 2021*. 2021(September), 1–40. https://totalenergies.com/system/files/documents/2021-09/2021_TotalEnergies_Energy_Outlook.pdf
- Warnecke, A. J. (2017). *Degradation Mechanisms in NMC-Based Lithium-Ion Batteries*. <https://publications.rwth-aachen.de/record/708098/files/708098.pdf>

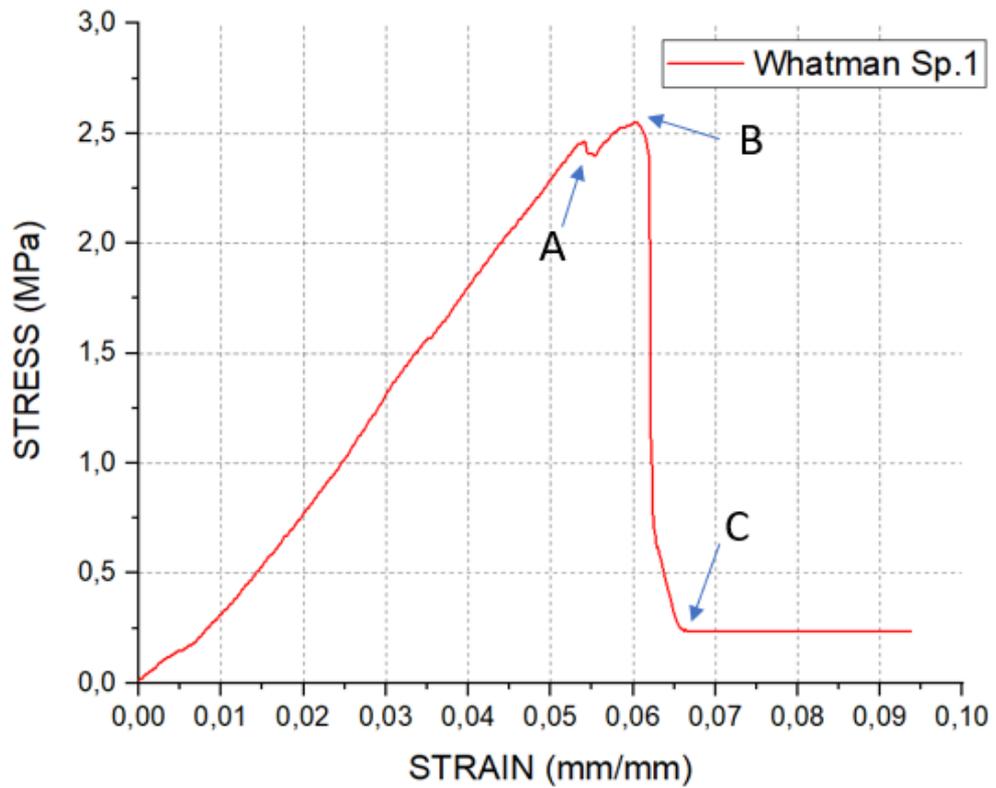
Halaman sengaja dikosongkan..

LAMPIRAN

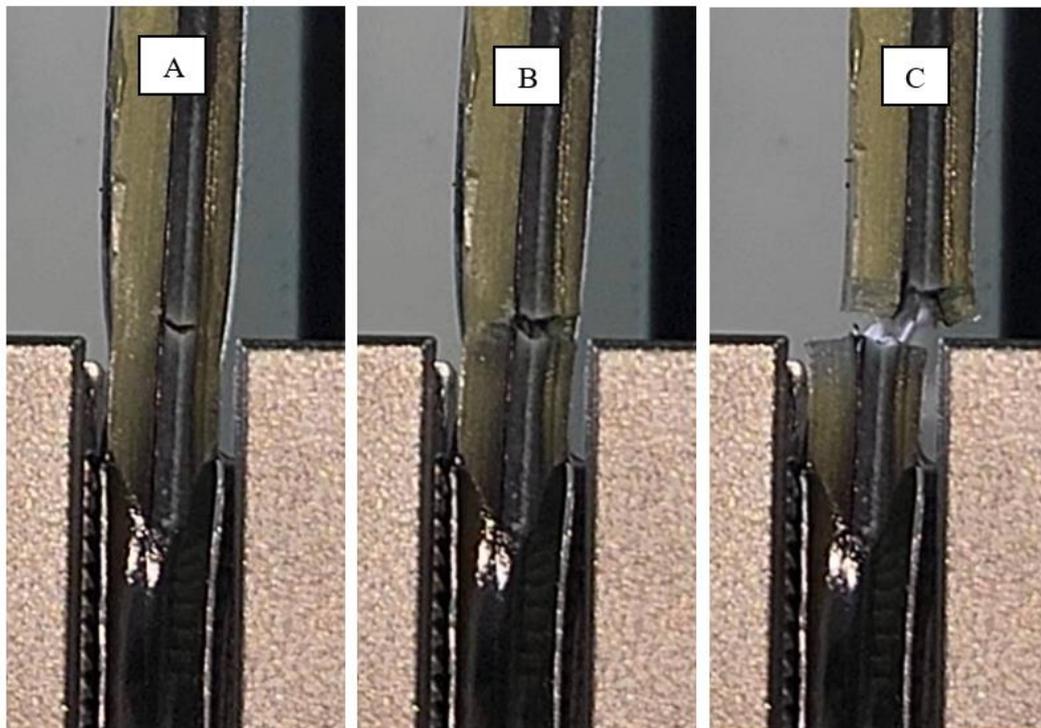
Berikut adalah grafik *stress-strain* baterai struktural komposit dengan *separator* Whatman yang tidak melewati pengujian elektrokimia pada setiap spesimennya beserta fenomena yang terjadi selama pengujian.



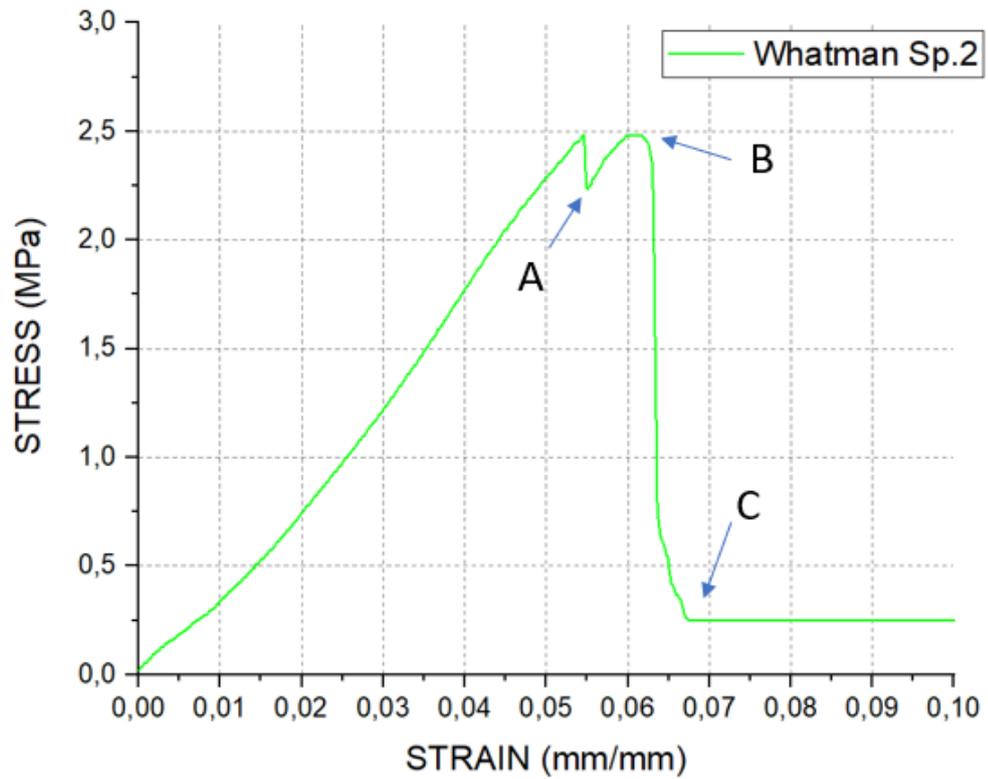
Gambar 5.1 Grafik *Stress-Strain* Baterai Struktural Komposit dengan *Separator* Whatman



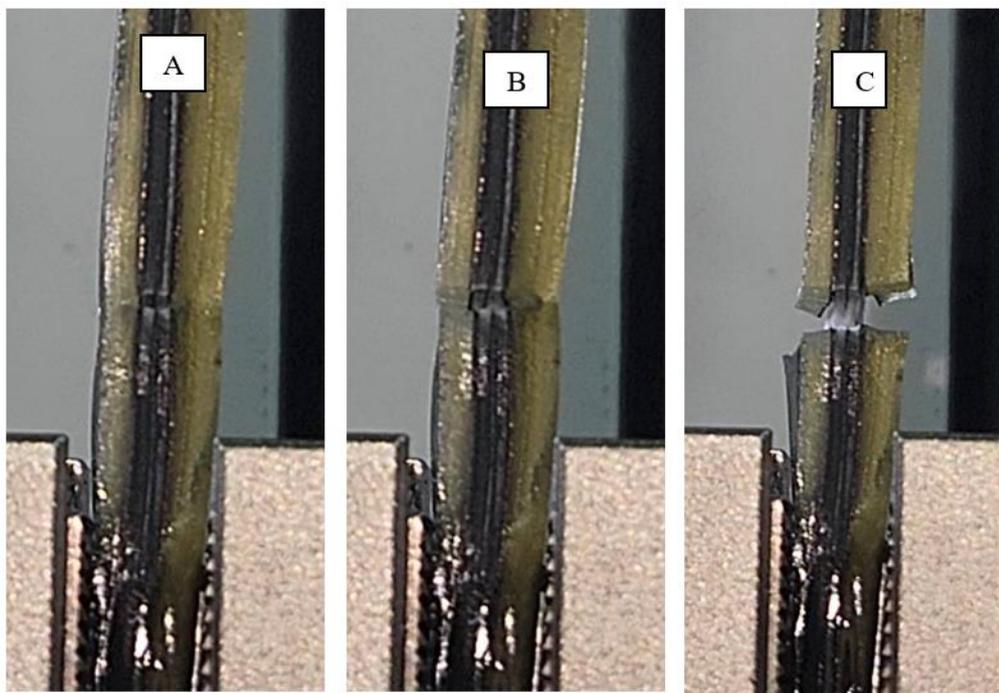
Gambar 5.3 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* Whatman Spesimen 1 Tanpa Pengujian Elektrokimia (a) *Crack Initiation* pada *Separator* (b) *Crack Propagation* menuju Bagian Terluar Spesimen (c) *Final Fracture*



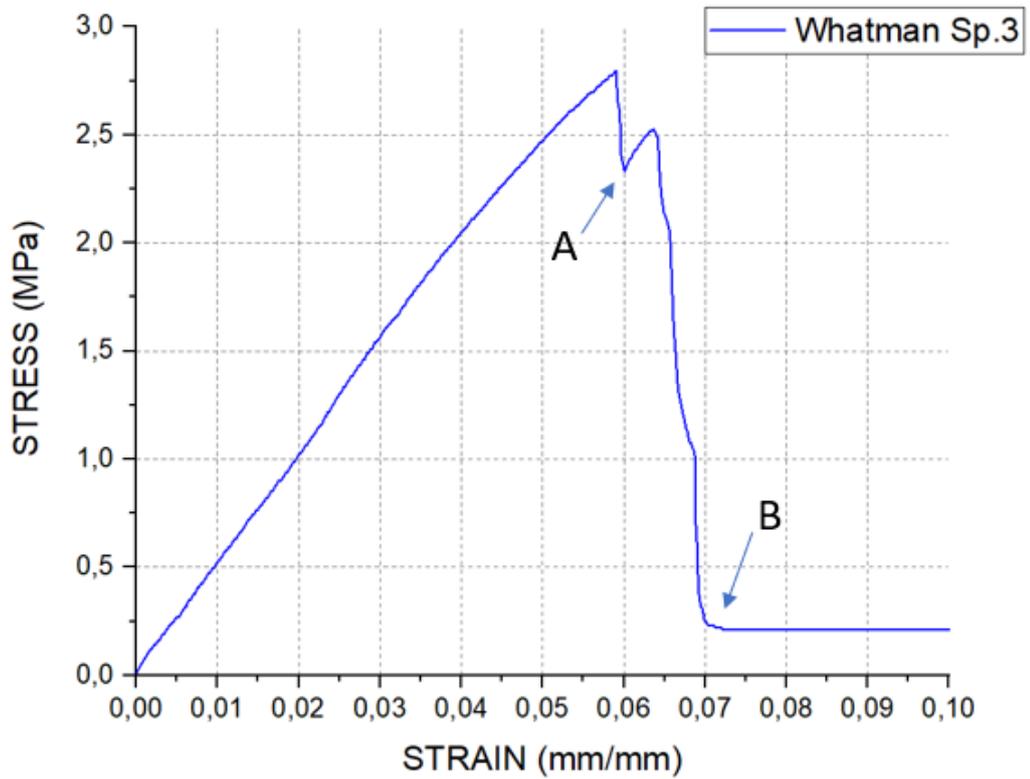
Gambar 5.2 Fenomena Baterai dengan *Separator* Whatman Spesimen 1 saat *Tensile test*



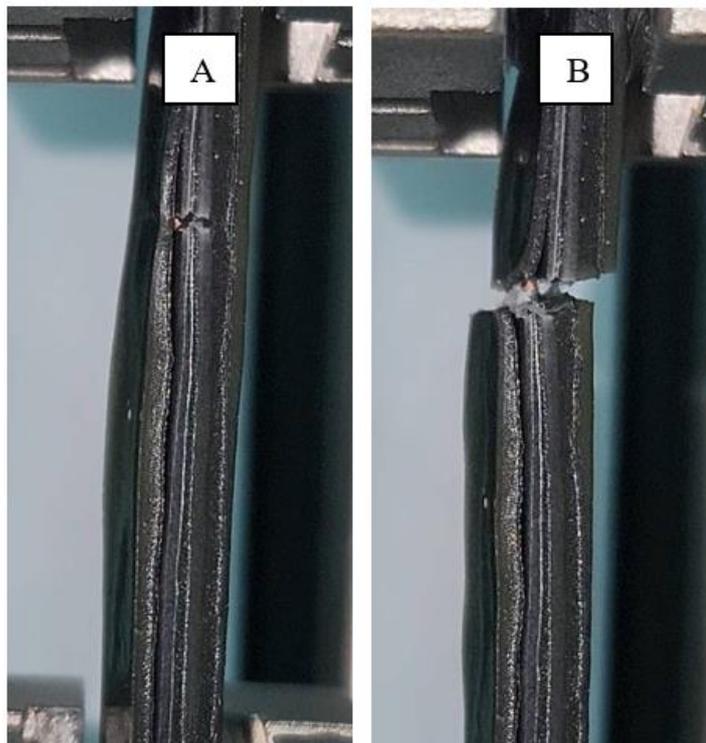
Gambar 5.5 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* Whatman Spesimen 2 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) *Crack Initiation* pada *Separator*. (b) *Crack Propagation* menuju Bagian Terluar Spesimen. (c) *Final Fracture*.



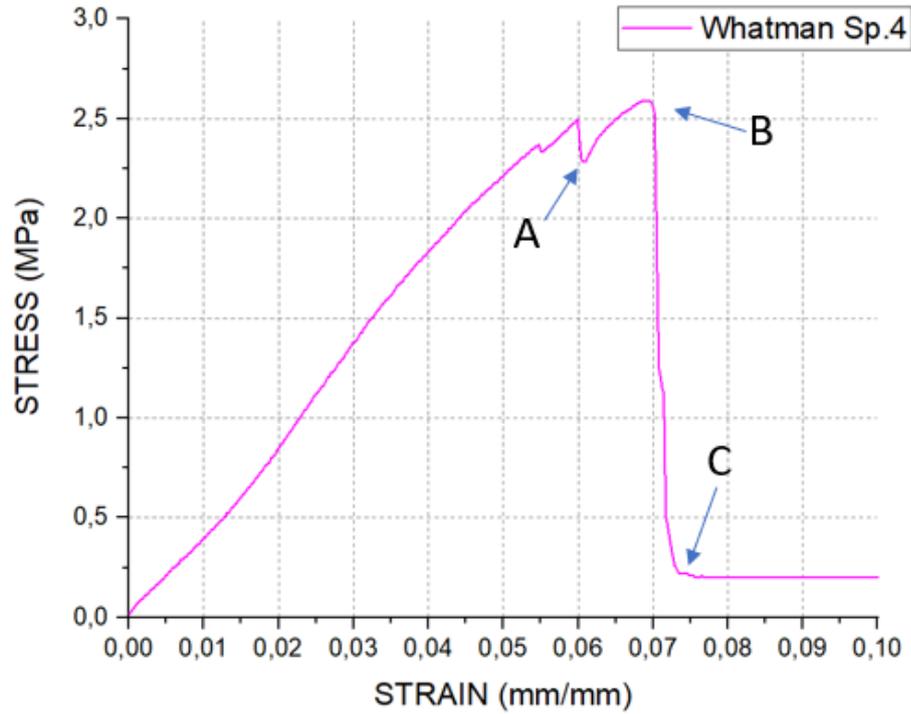
Gambar 5.4 Fenomena Baterai dengan *Separator* Whatman Spesimen 2 saat *Tensile test*



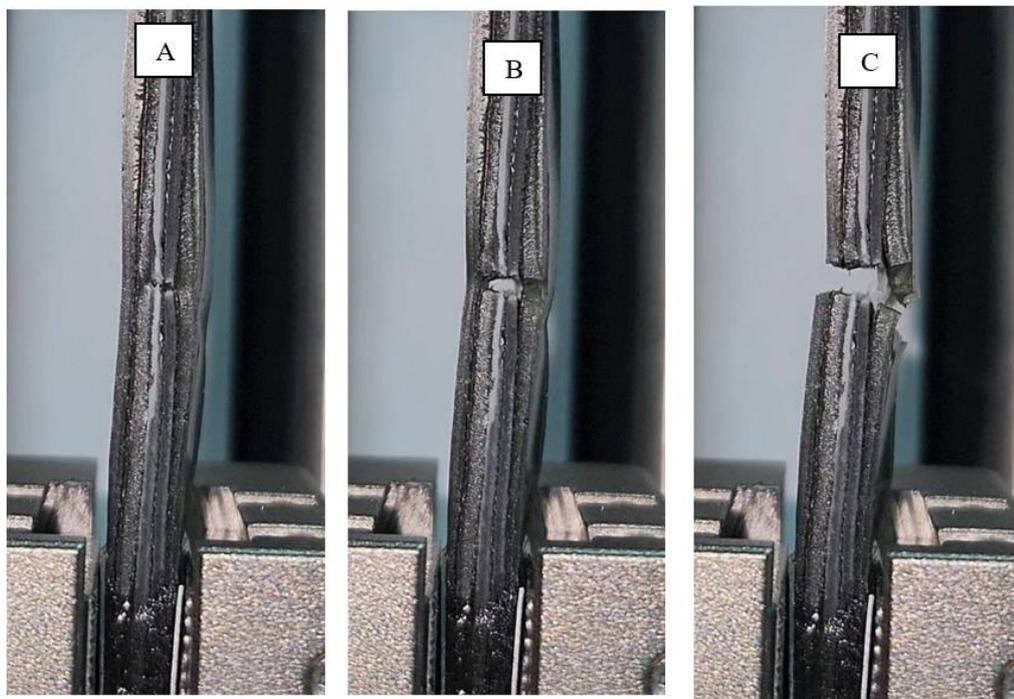
Gambar 5.6 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* Whatman Spesimen 3 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) *Crack Initiation* pada *Separator*. (b) *Final Fracture*.



Gambar 5.7 Fenomena Baterai dengan *Separator* Whatman Spesimen 3 saat *Tensile test*.

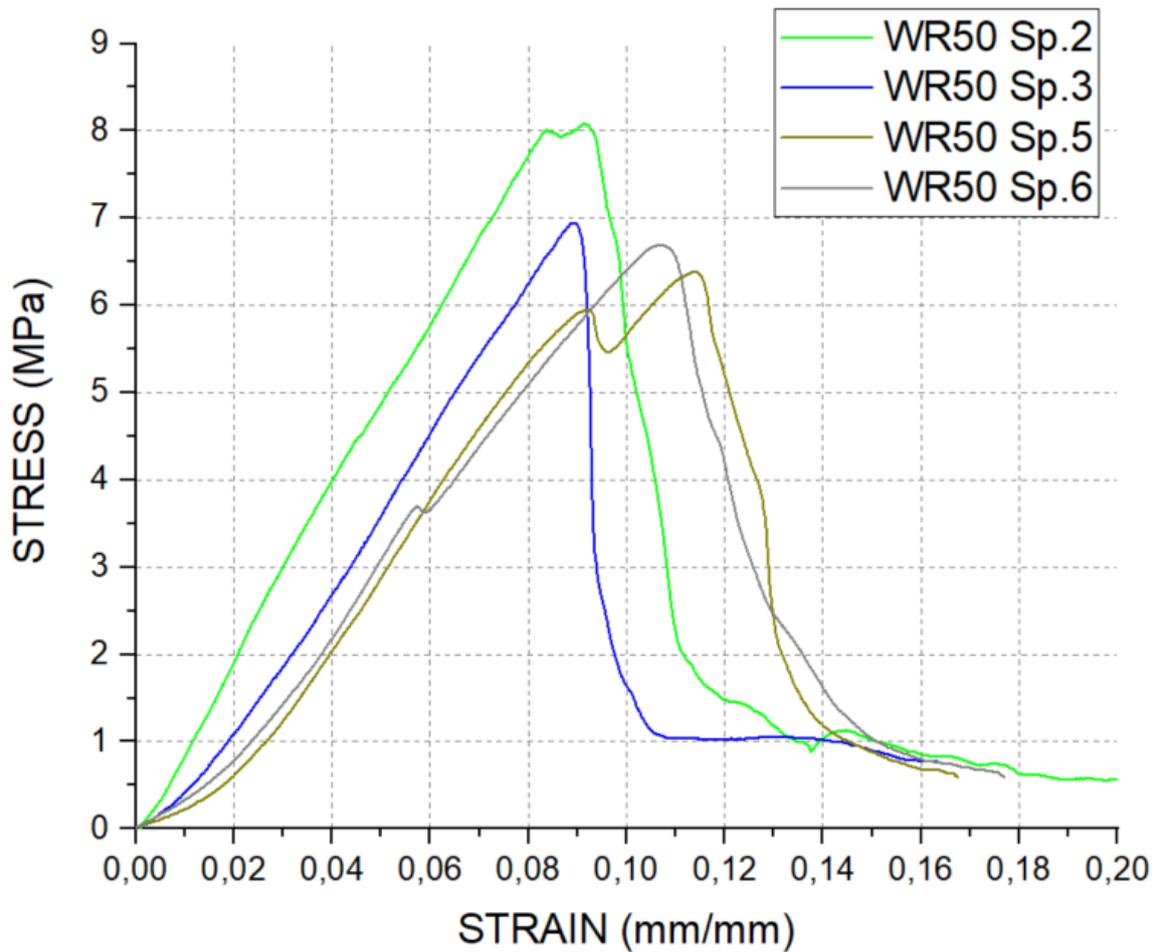


Gambar 5.9 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* Whatman Spesimen 2 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) *Crack Initiation* pada *Separator*. (b) *Crack Propagation* menuju Bagian Terluar Spesimen. (c) *Final Fracture*.

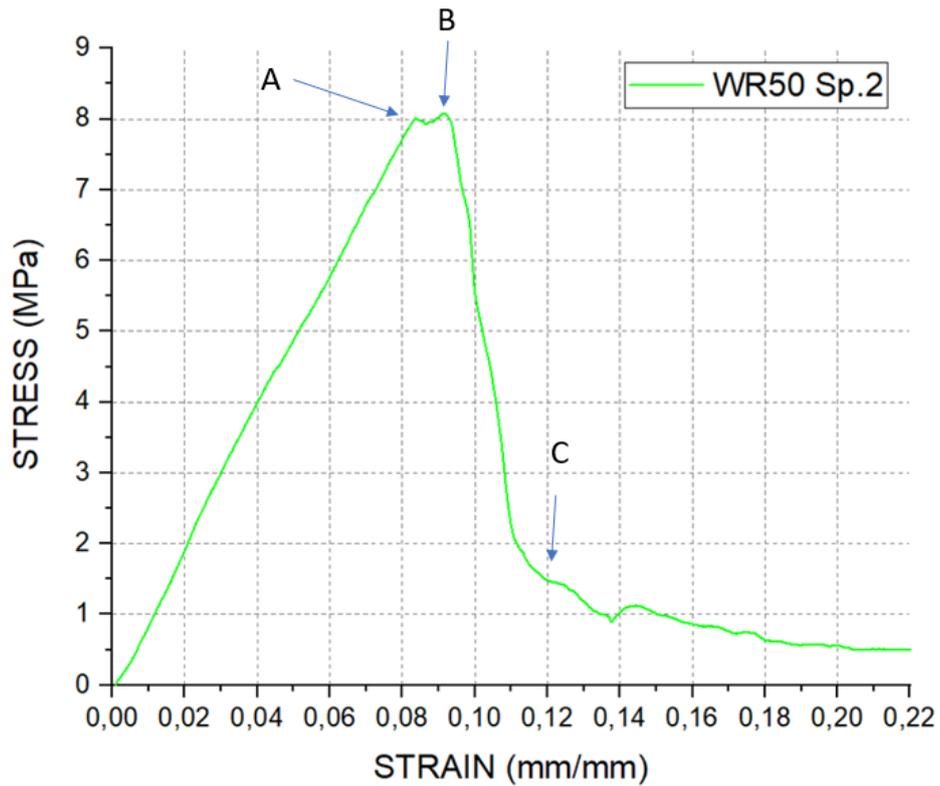


Gambar 5.8 Fenomena Baterai dengan *Separator* Whatman Spesimen 4 saat *Tensile test*

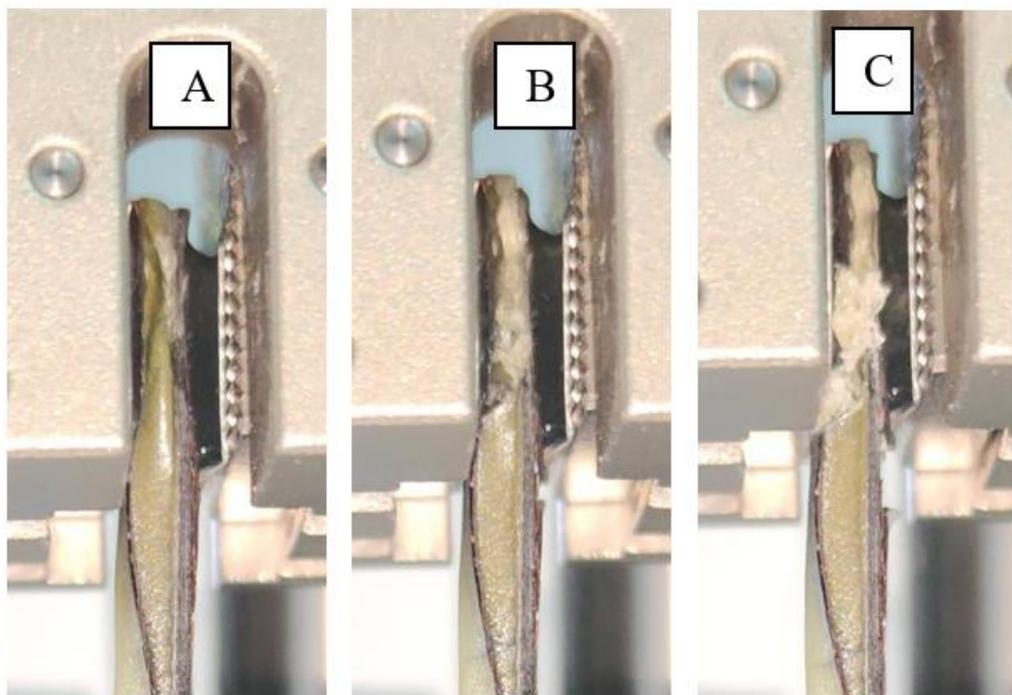
Berikut adalah grafik *stress-strain* baterai struktural komposit dengan *separator* WR50 yang tidak melewati pengujian elektrokimia pada setiap spesimennya beserta fenomena yang terjadi selama pengujian.



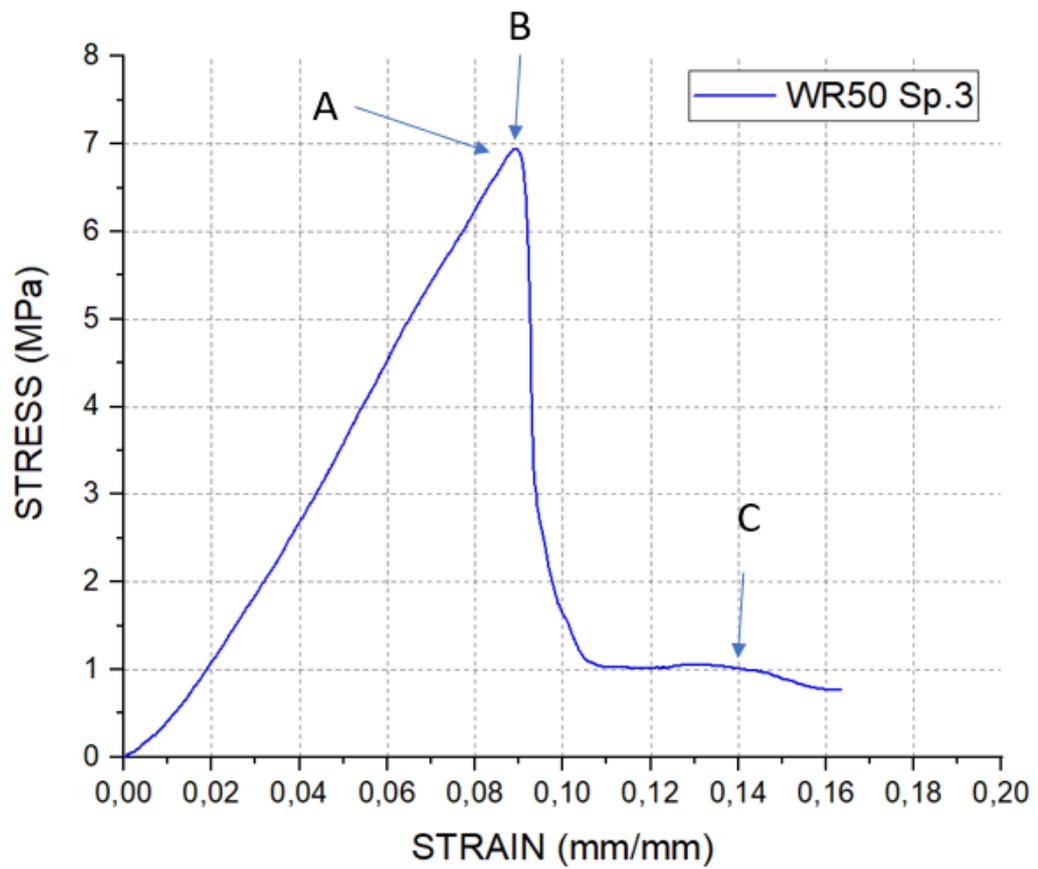
Gambar 5.10 Grafik Stress-Strain Baterai Struktural Komposit dengan *Separator* WR50



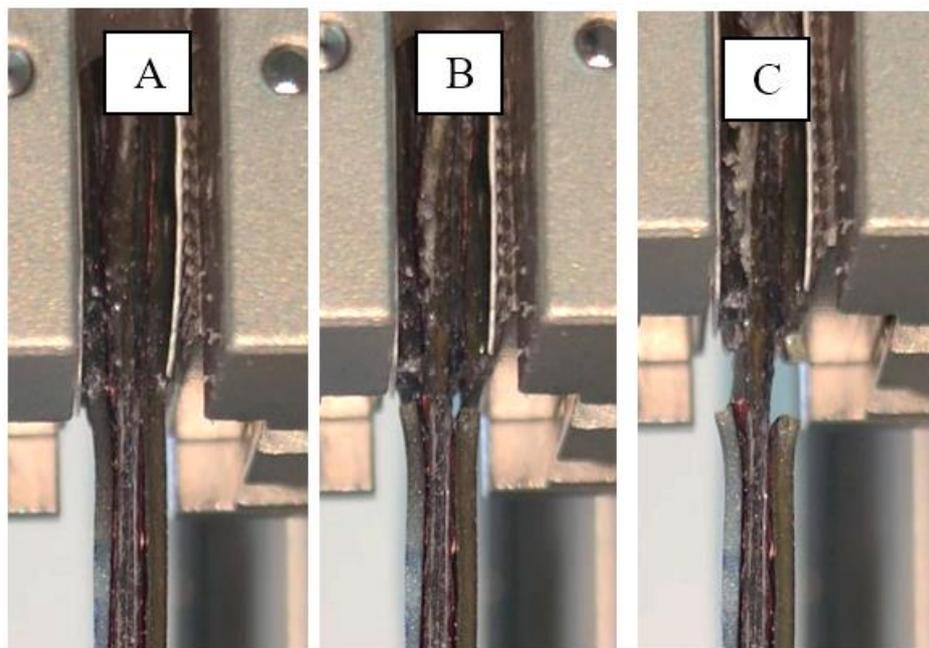
Gambar 5.11 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR50 Spesimen 2 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya *Failure* pada *Matrix*. (b) *Delaminasi* dan *Debonding* (c) *Final Failure*.



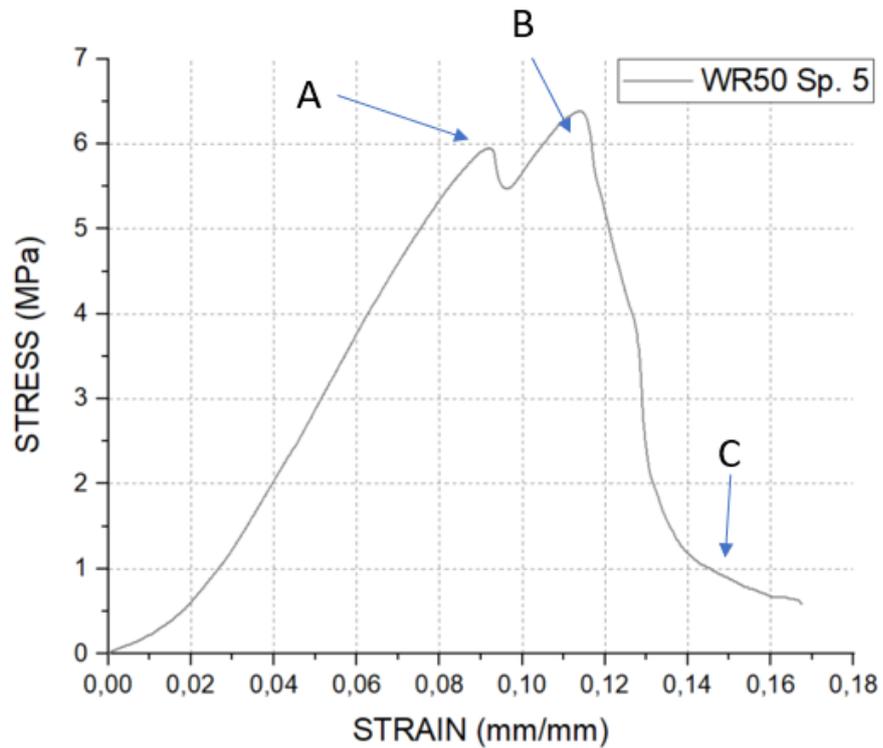
Gambar 5.12 Fenomena pada *Baterai* dengan *Separator* WR50 Spesimen 2 saat *Tensile test*



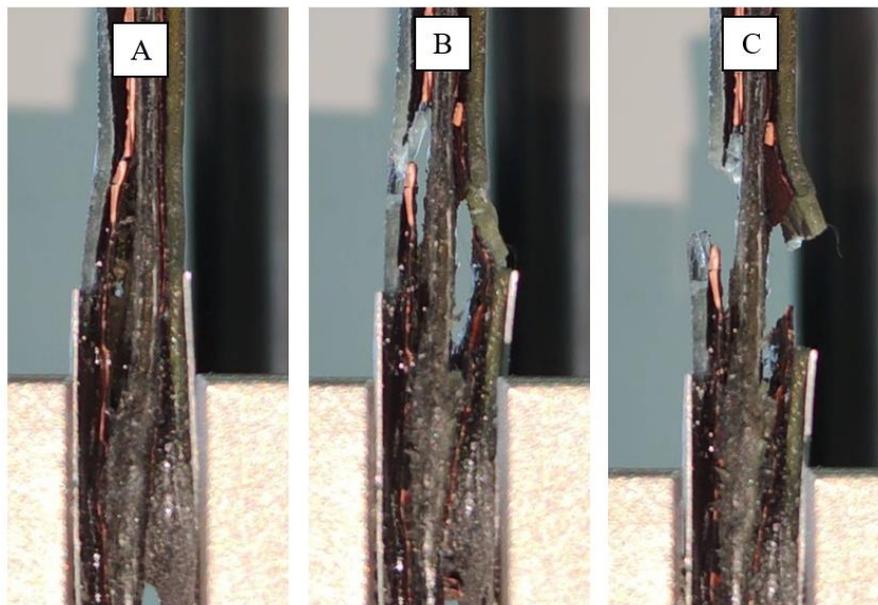
Gambar 5.14 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR50 Spesimen 3 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya *Failure* pada *Matrix*. (b) *Crack Propagation* hingga anoda patah. (c) *Final Failure*.



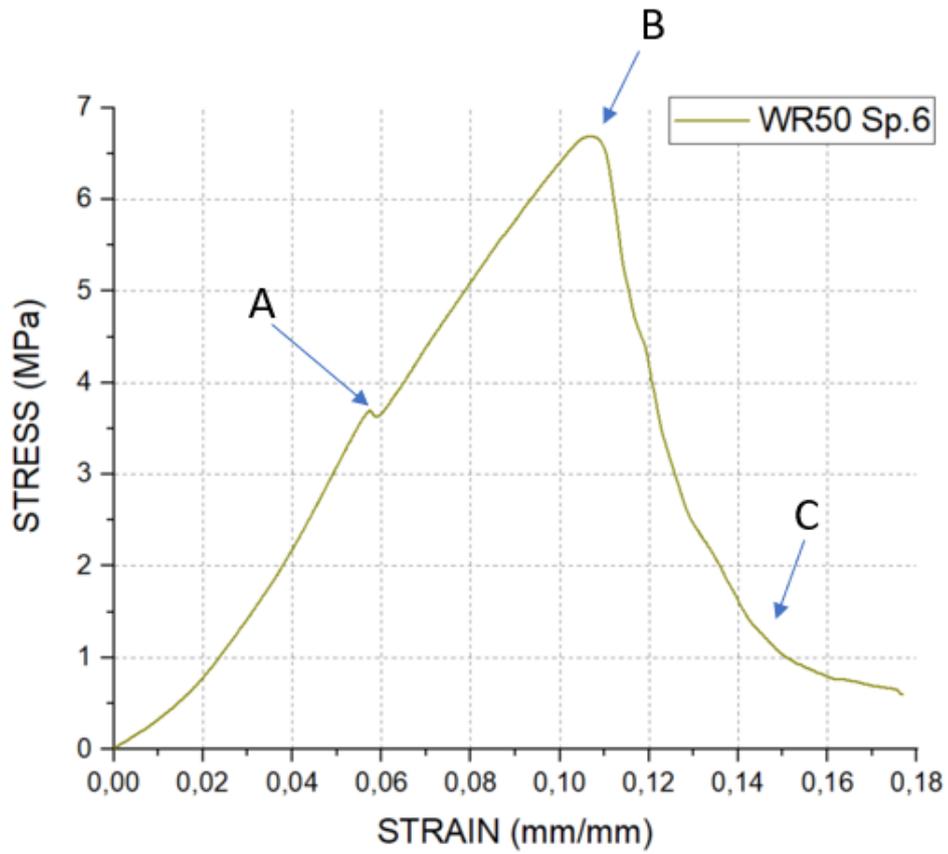
Gambar 5.13 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* WR50 Spesimen 2 saat *Tensile test*



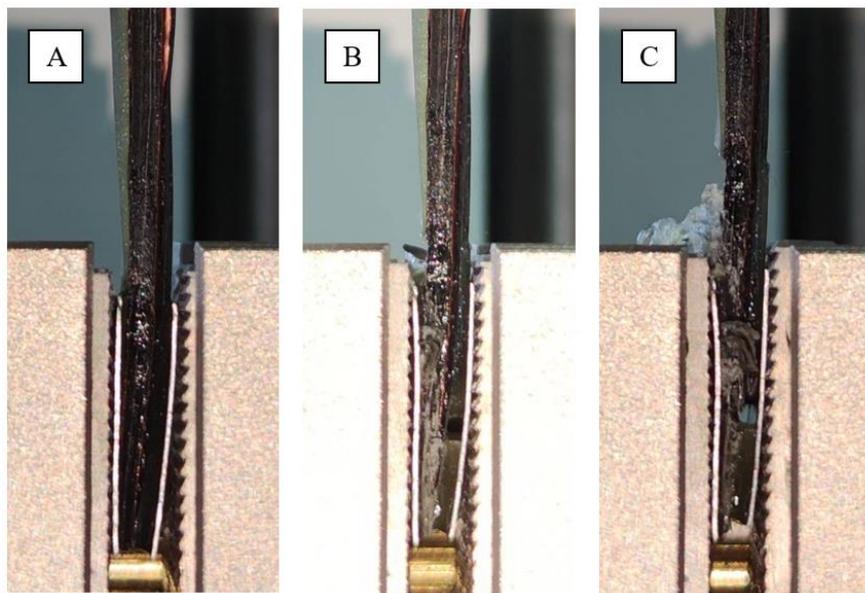
Gambar 5.16 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR50 Spesimen 5 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya *Failure* pada *Matrix* dan Anoda. (b) *Delaminasi* dan *Debonding* (c) *Final Failure*.



Gambar 5.15 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* WR50 Spesimen 5 saat *Tensile test*

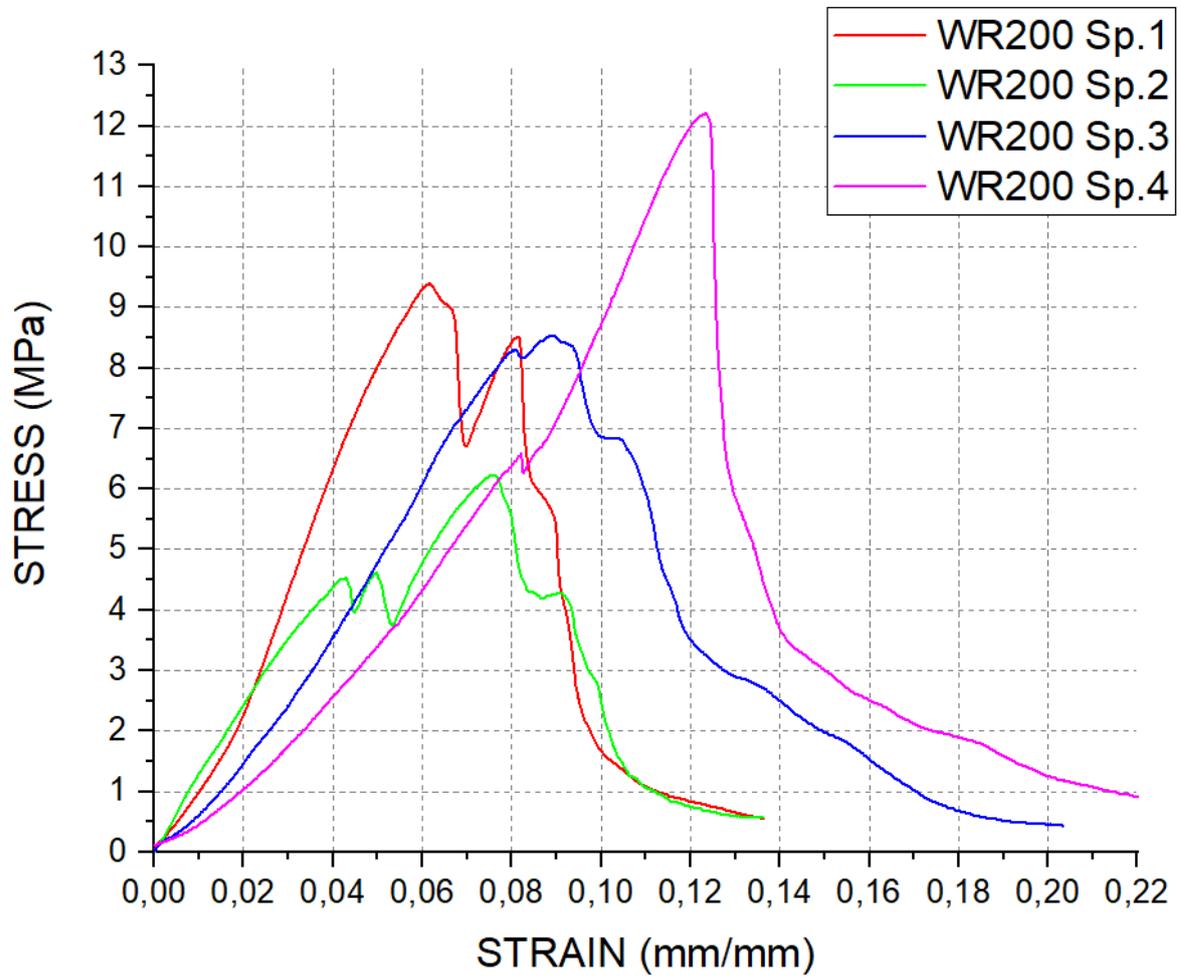


Gambar 5.17 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR50 Spesimen 6 Tanpa Pengujian Elektrokimia.. (a) Sesaat sebelum terjadinya *Failure* pada *Matrix*. (b) *Delaminasi* dan *Debonding* (c) *Final Failure*.

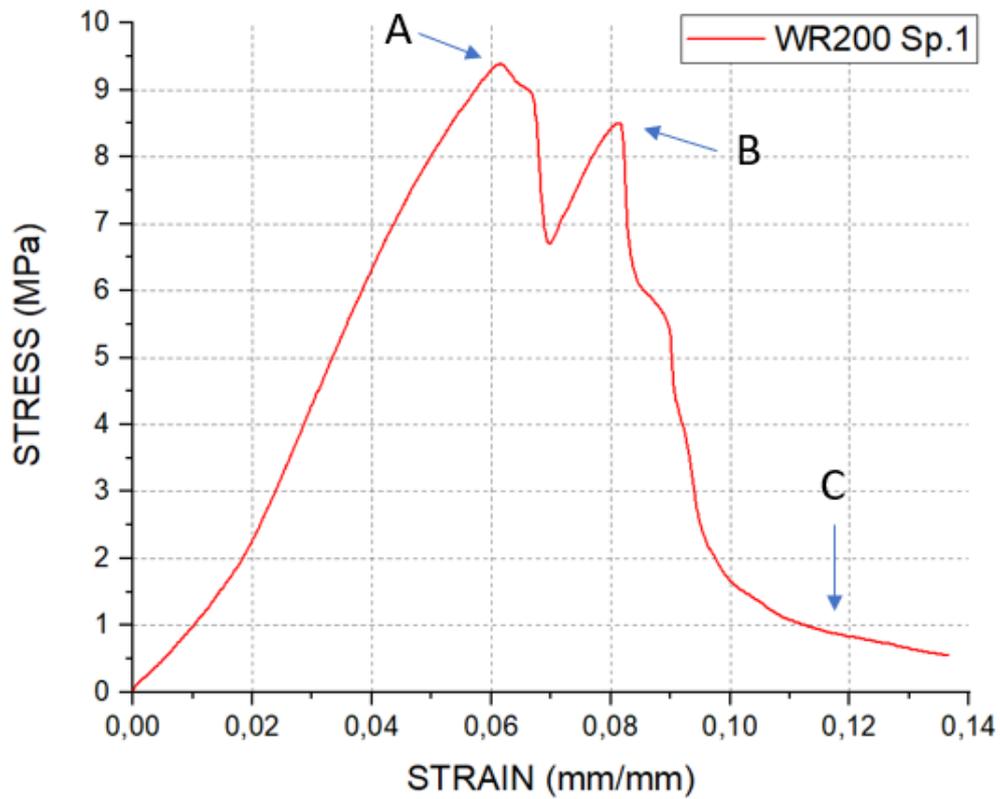


Gambar 5.18 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* WR50 Spesimen 6 saat *Tensile test*

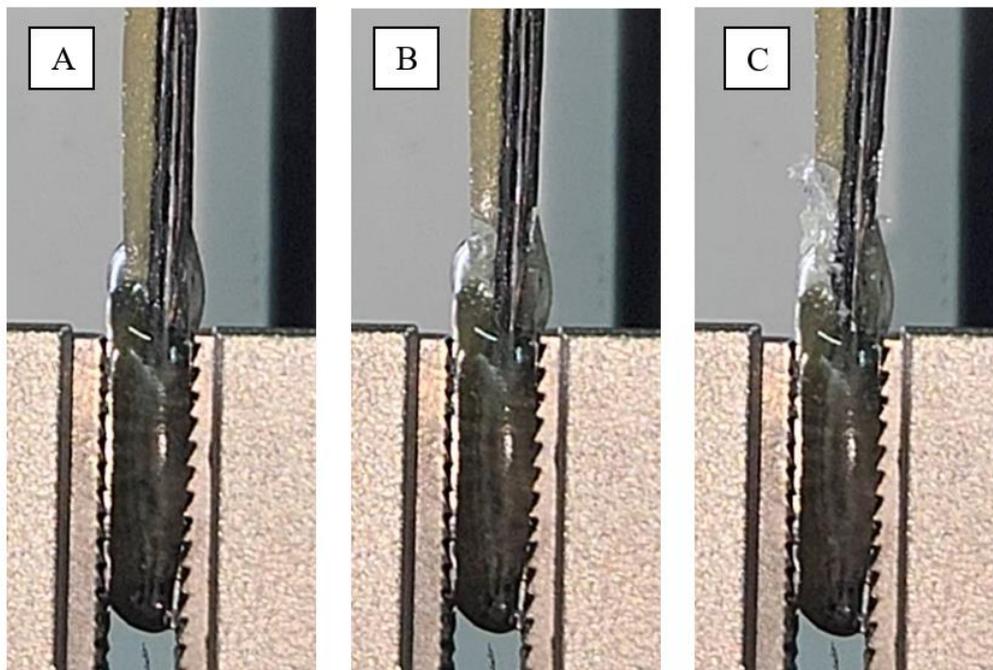
Berikut adalah grafik *stress-strain* baterai struktural komposit dengan *separator* WR200 yang tidak melewati pengujian elektrokimia pada setiap spesimennya beserta fenomena yang terjadi selama pengujian.



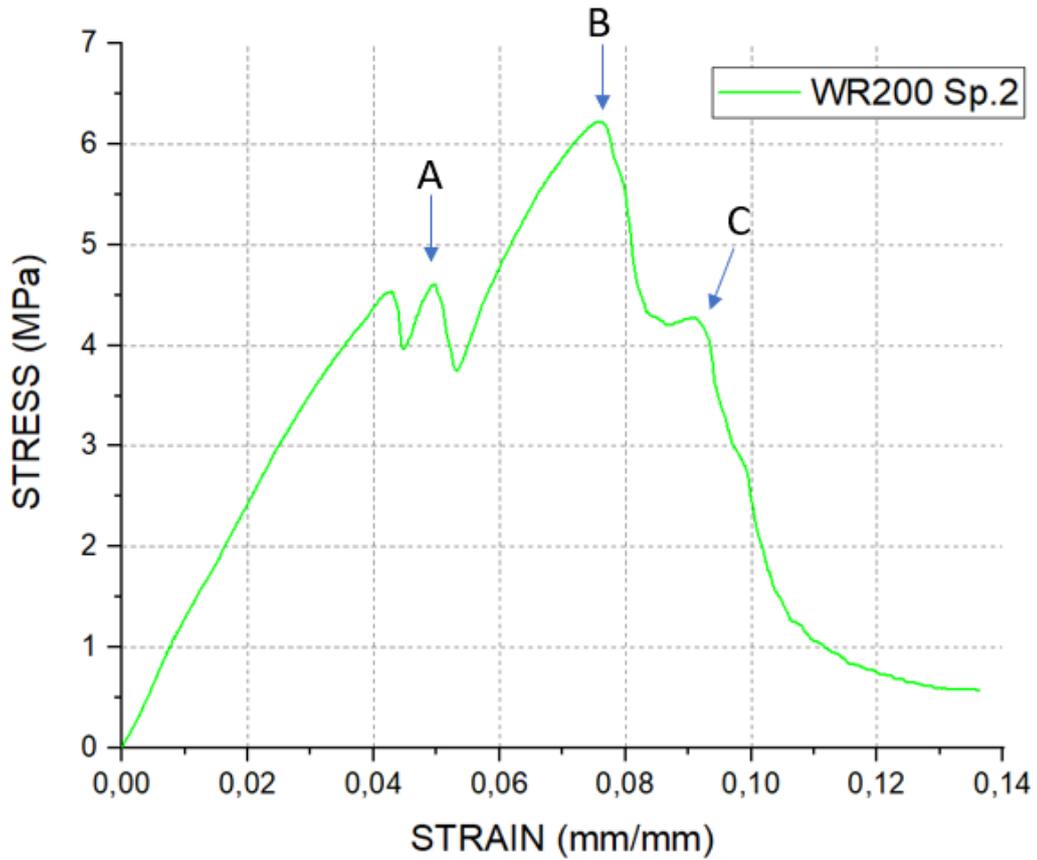
Gambar 5.19 Grafik Stress-Strain Baterai Struktural Komposit dengan *Separator* WR200



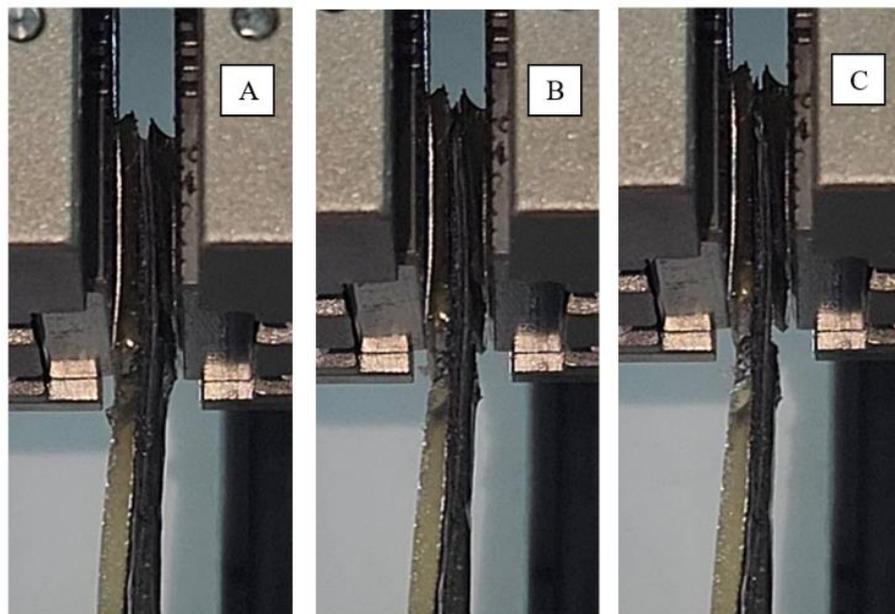
Gambar 5.21 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR200 Spesimen 1 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya *Failure* pada *Matrix*. (b) *Delaminasi* dan *Debonding* (c) *Final Failure*.



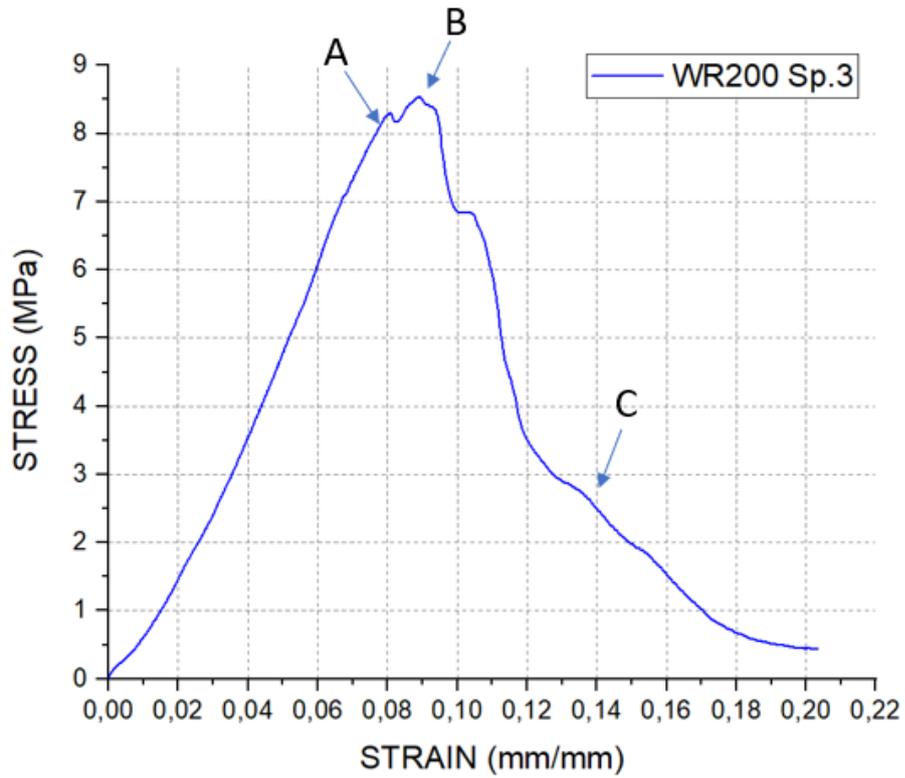
Gambar 5.20 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* WR200 Spesimen 1 saat *Tensile test*



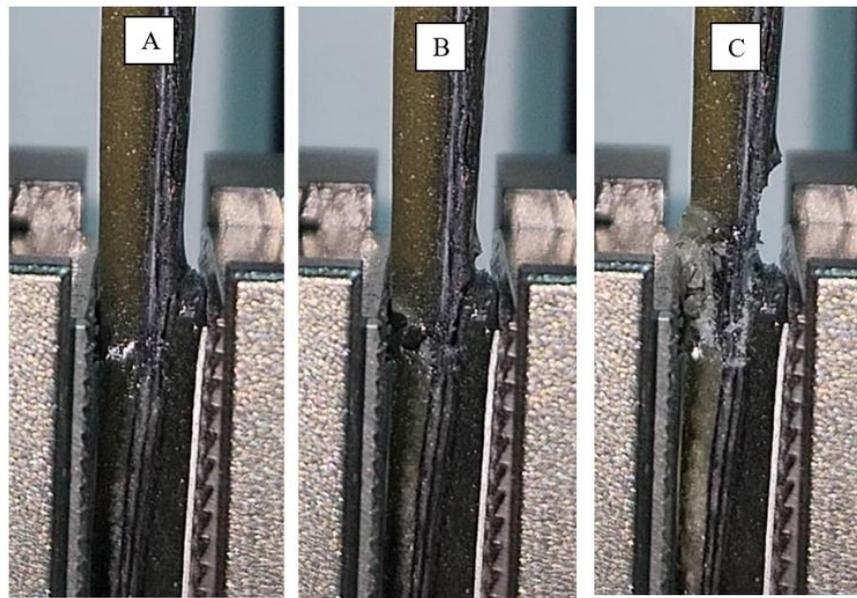
Gambar 5.22 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR200 Spesimen 2 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) *Crack Initiation* pada *Matrix*. (b) *Delaminasi dan Debonding* (c) *Final Failure*.



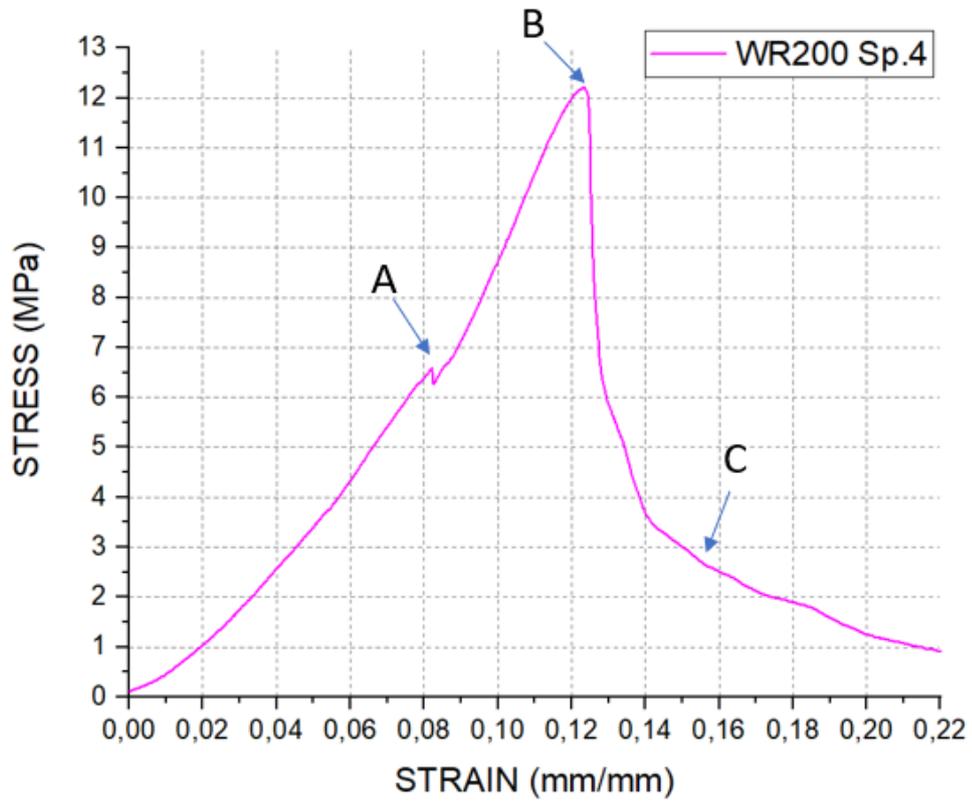
Gambar 5.23 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* WR200 Spesimen 2 saat *Tensile test*



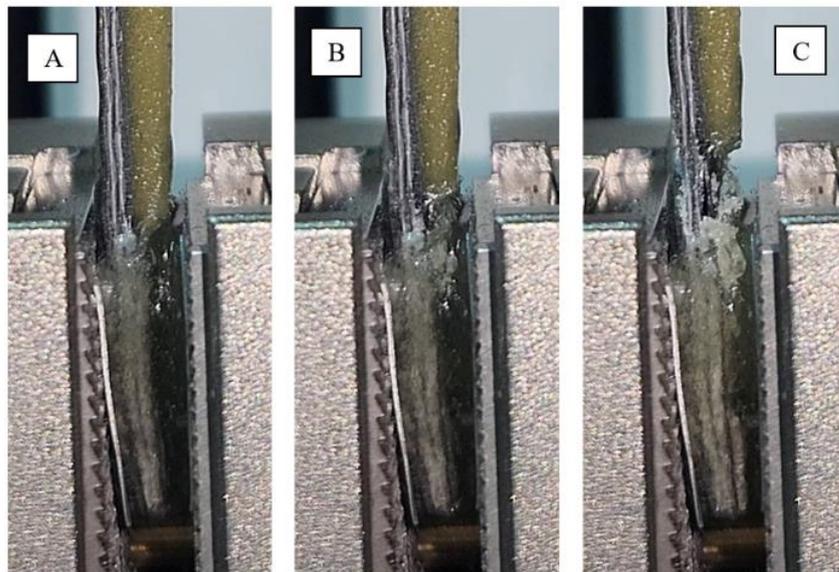
Gambar 5.24 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR200 Spesimen 3 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) *Crack Initiation* pada *Matrix*. (b) *Delaminasi dan Debonding*. (c) *Final Failure*.



Gambar 5.25 Fenomena pada *Baterai* dengan *Separator* WR200 Spesimen 3 saat *Tensile test*

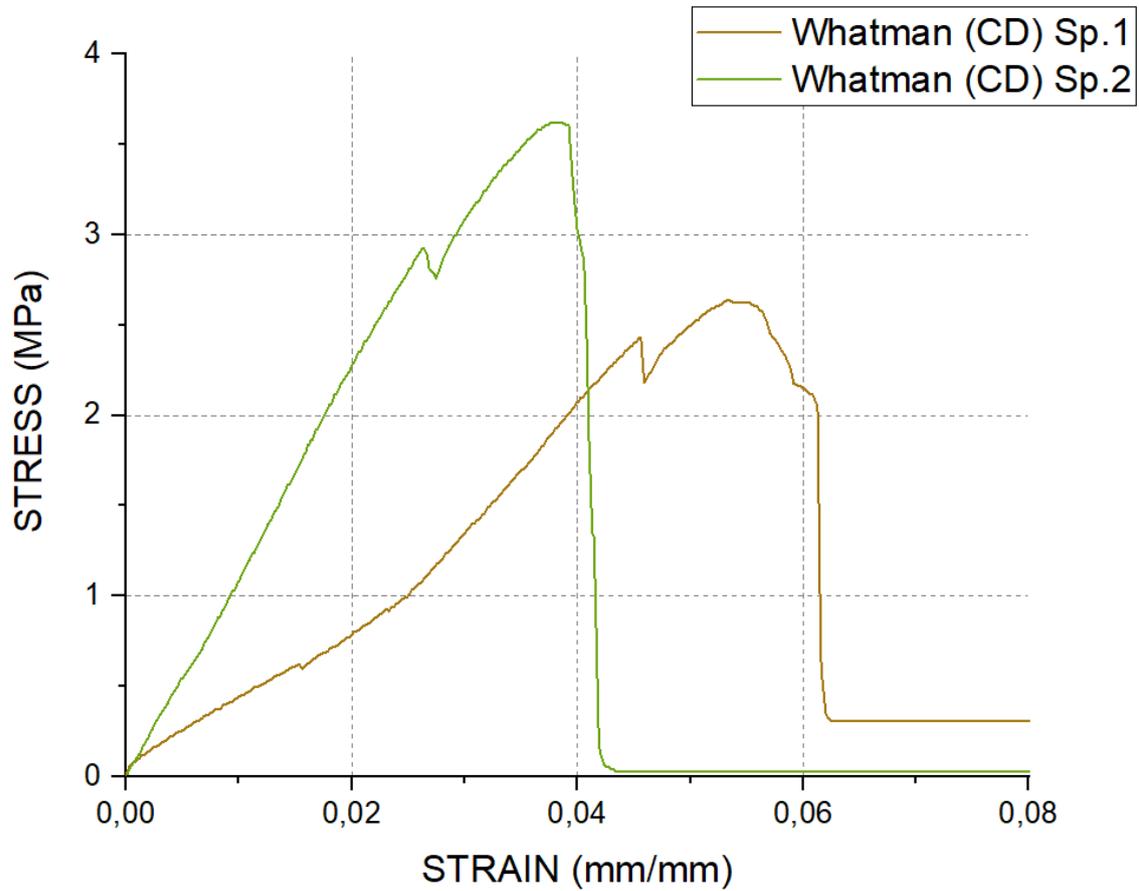


Gambar 5.26 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR200 Spesimen 4 Tanpa Pengujian Elektrokimia. (a) *Crack Initiation* pada *Matrix*. (b) *Delaminasi dan Debonding*. (c) *Final Failure*.

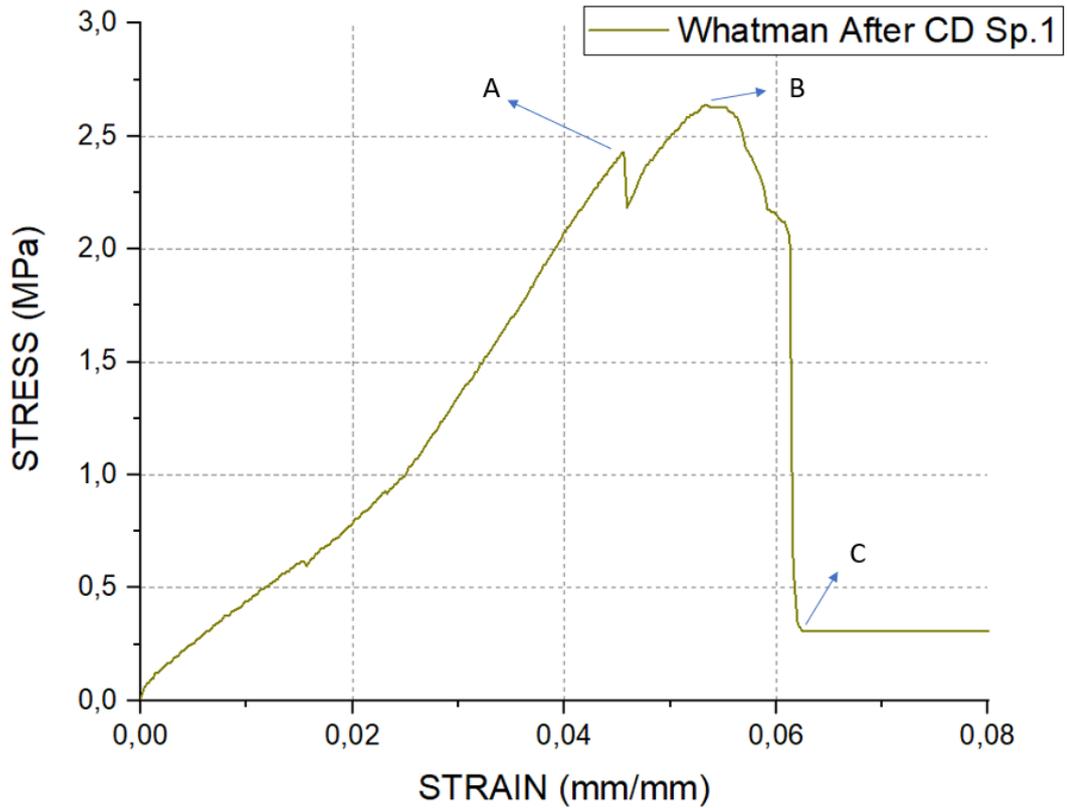


Gambar 5.27 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* WR200 Spesimen 4 saat *Tensile test*

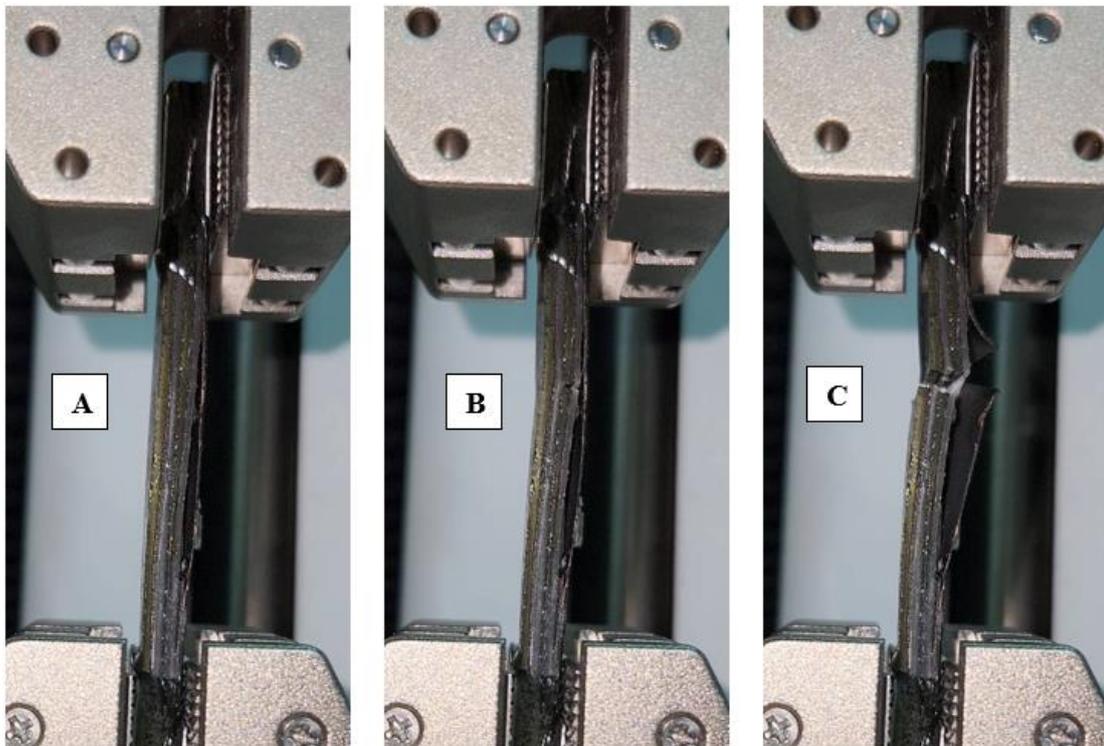
Berikut adalah grafik *stress-strain* baterai struktural komposit dengan *separator* Whatman yang melewati pengujian elektrokimia pada setiap spesimennya beserta fenomena yang terjadi selama pengujian.



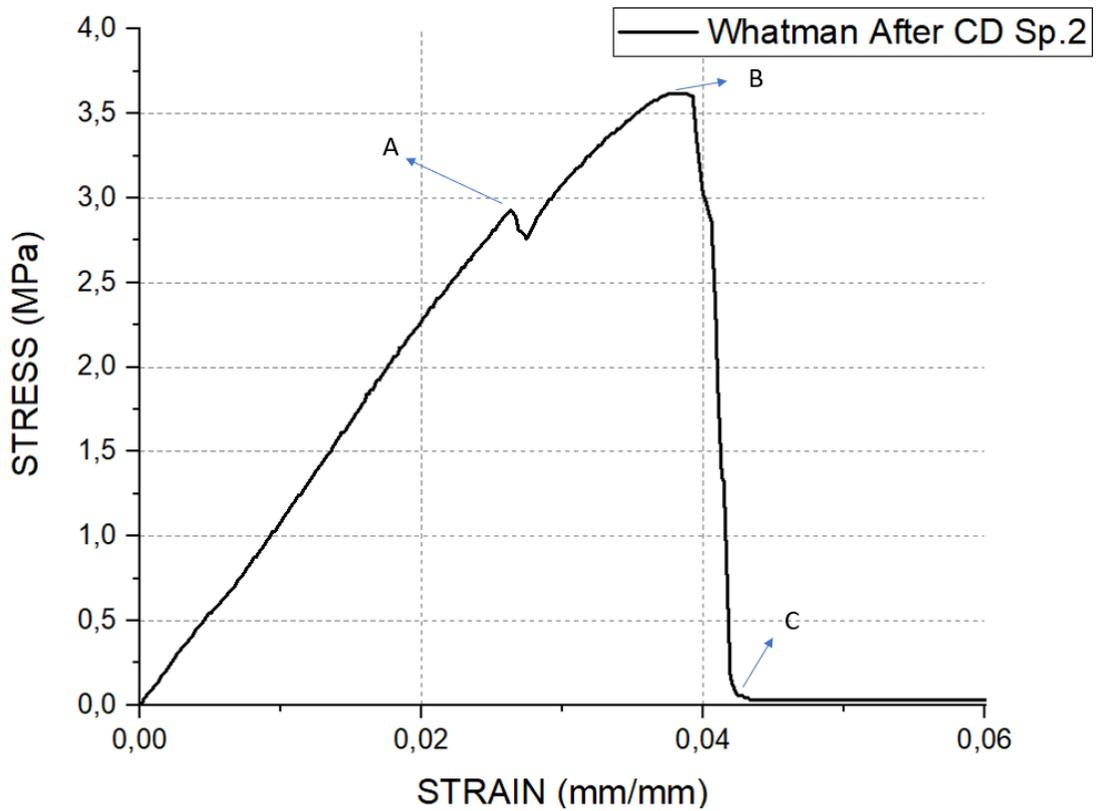
Gambar 5.28 Grafik *Stress-Strain Separator* Whatman setelah Pengujian Elektrokimia



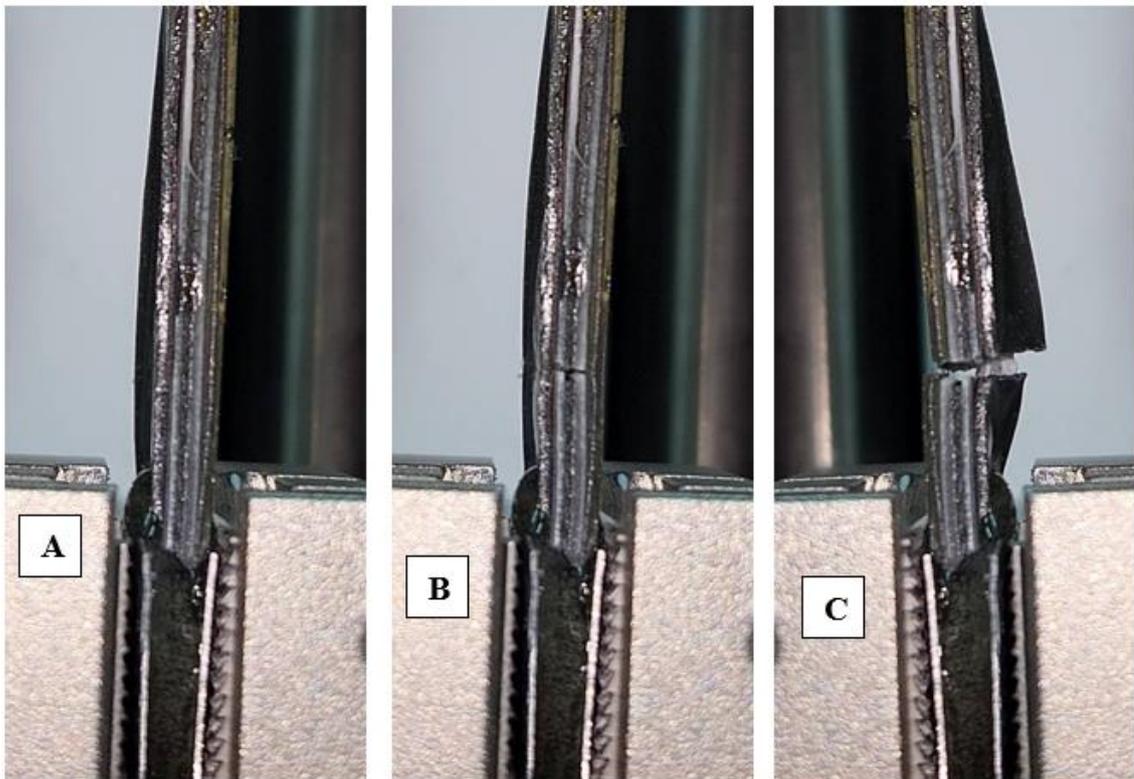
Gambar 5.30 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* Whatman Spesimen 1 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) *Crack Initiation* pada *Separator* (b) *Crack Propagation* menuju Bagian Terluar Spesimen (c) *Final Fracture*.



Gambar 5.29 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* Whatman Spesimen 1 saat *Tensile test*

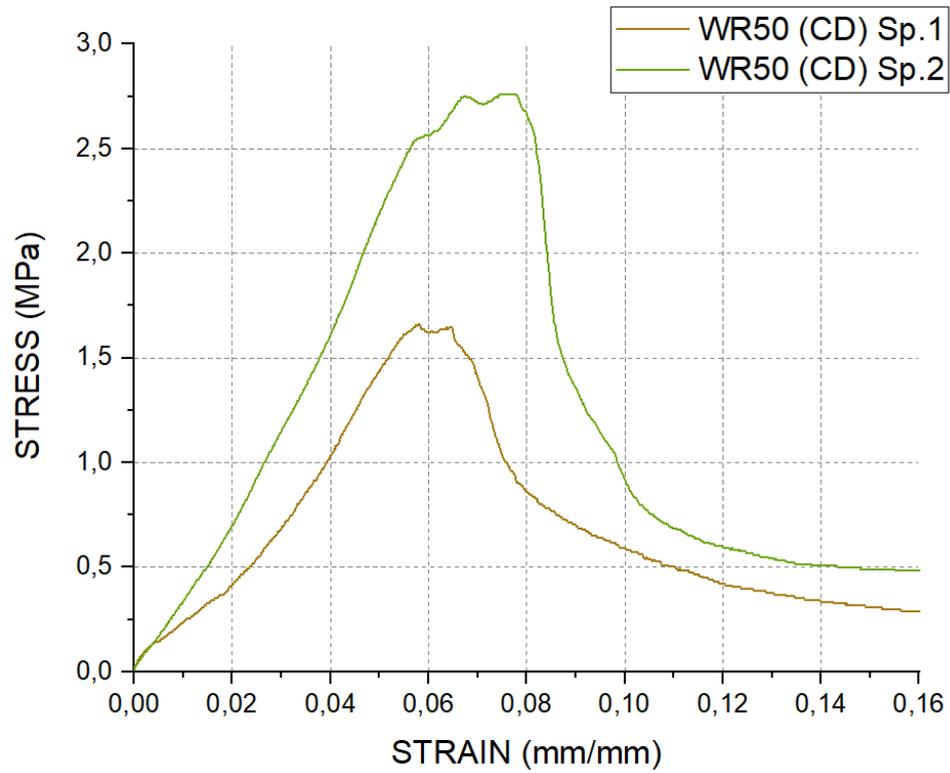


Gambar 5.31 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* Whatman Spesimen 2 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) *Crack Initiation* pada *Separator* (b) *Crack Propagation* menuju Bagian Terluar Spesimen (c) *Final Fracture*.

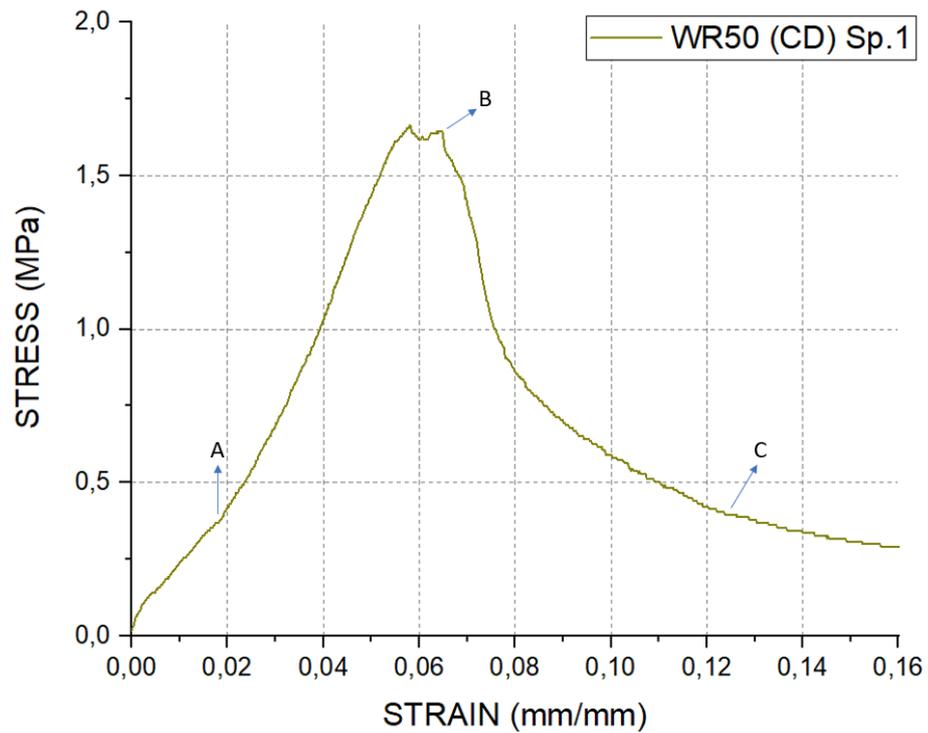


Gambar 5.32 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* Whatman Spesimen 2 saat *Tensile test*

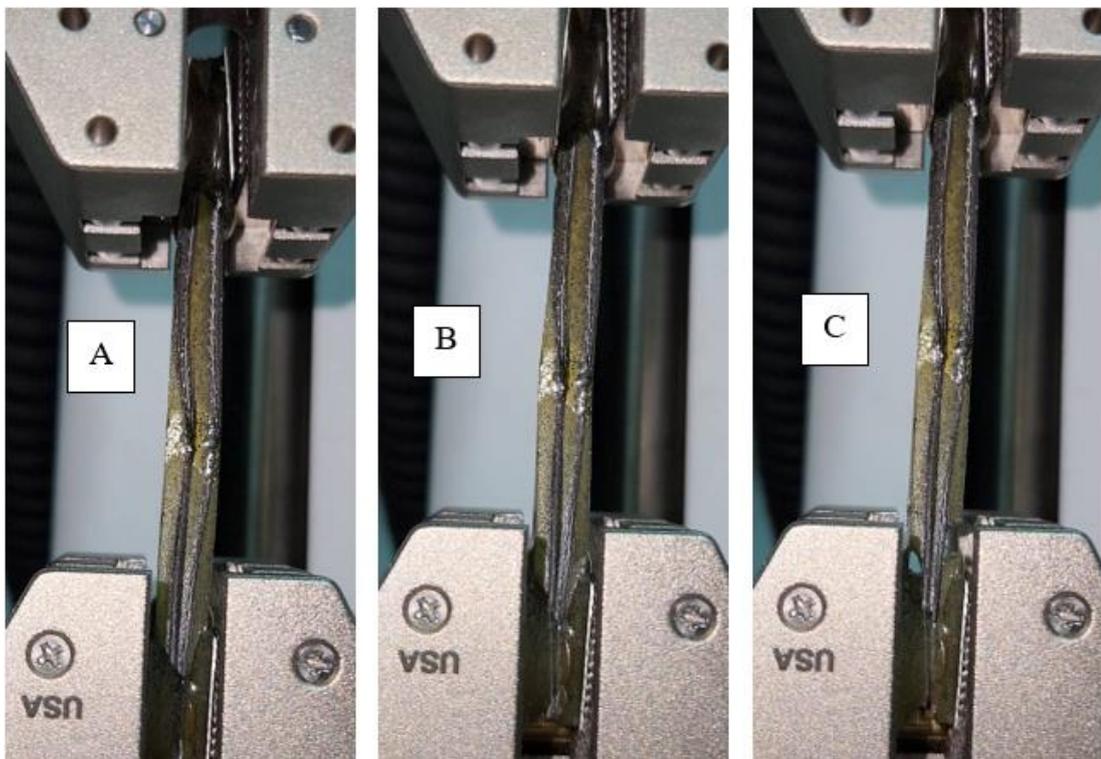
Berikut adalah grafik *stress-strain* baterai struktural komposit dengan *separator* WR50 yang melewati pengujian elektrokimia pada setiap spesimennya beserta fenomena yang terjadi selama pengujian.



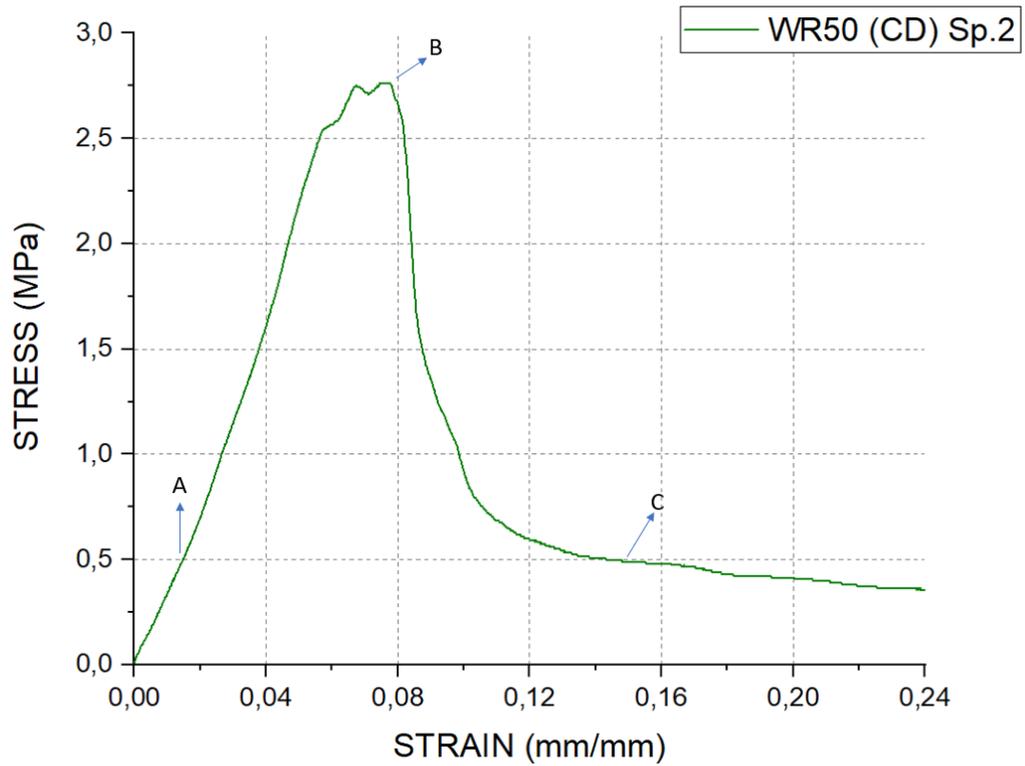
Gambar 5.33 Grafik *Stress-Strain Separator* WR50 setelah Pengujian Elektrokimia



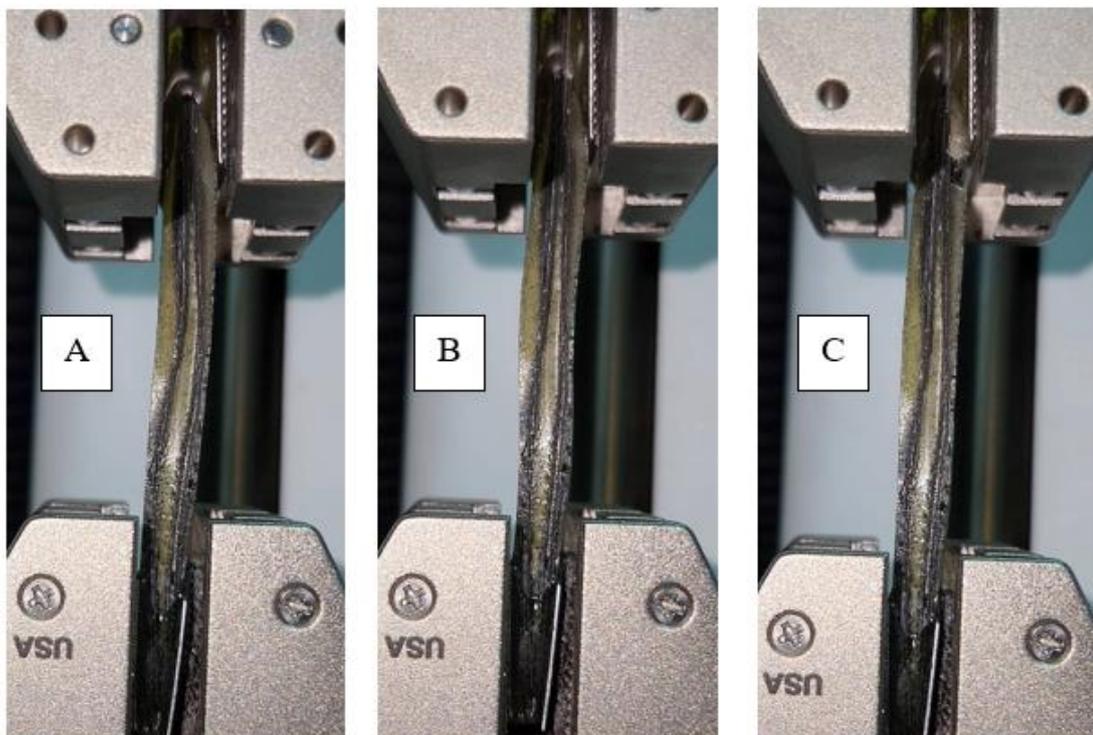
Gambar 5.34 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR50 Spesimen 1 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya *Failure* pada *Matrix*. (b) *Delaminasi* dan *Debonding* (c) *Final Failure*.



Gambar 5.35 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* WR50 Spesimen 1 saat *Tensile test*

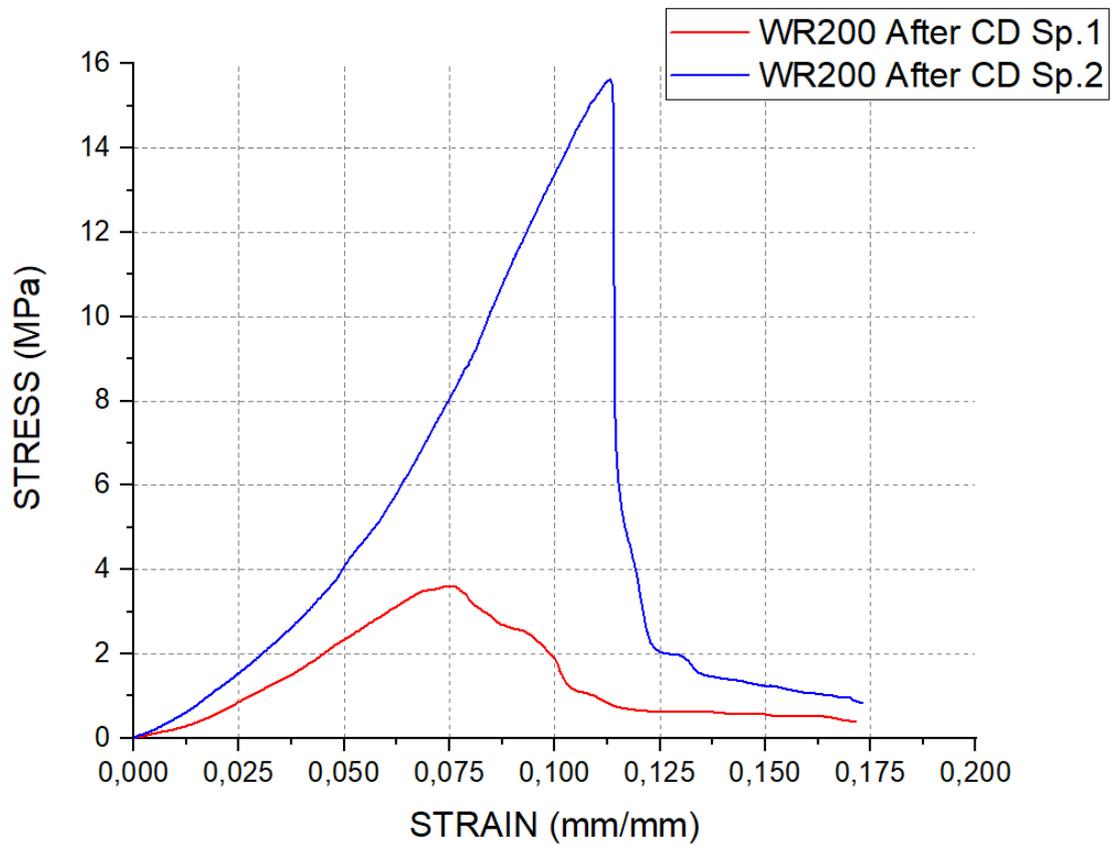


Gambar 5.37 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR50 Spesimen 1 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya *Failure* pada *Matrix*. (b) *Delaminasi* dan *Debonding*. (c) *Final Failure*.

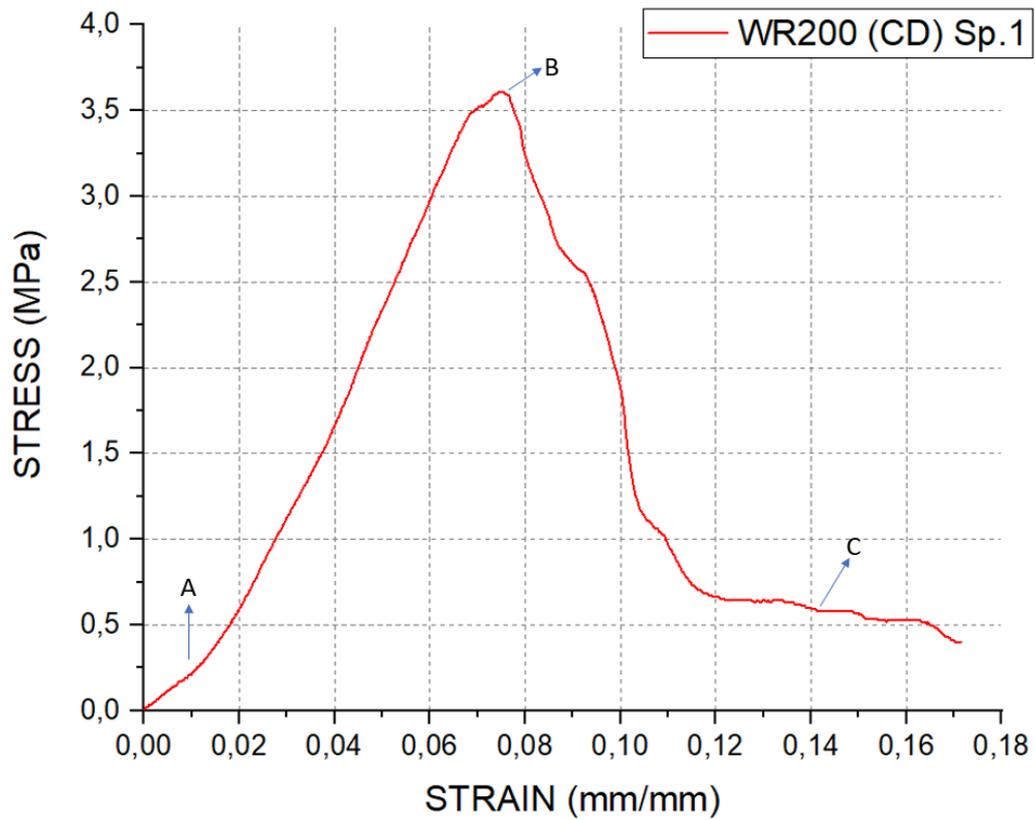


Gambar 5.36 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* WR50 Spesimen 1 saat *Tensile test*.

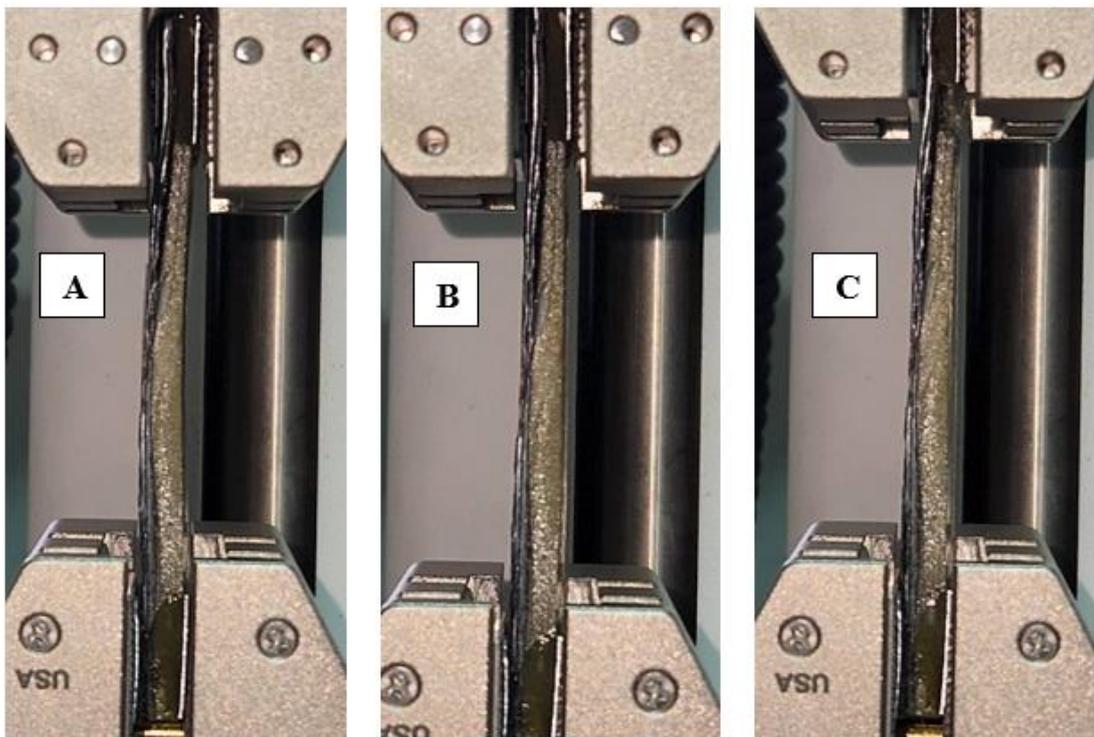
Berikut adalah grafik *stress-strain* baterai struktural komposit dengan *separator* WR200 yang melewati pengujian elektrokimia pada setiap spesimennya beserta fenomena yang terjadi selama pengujian.



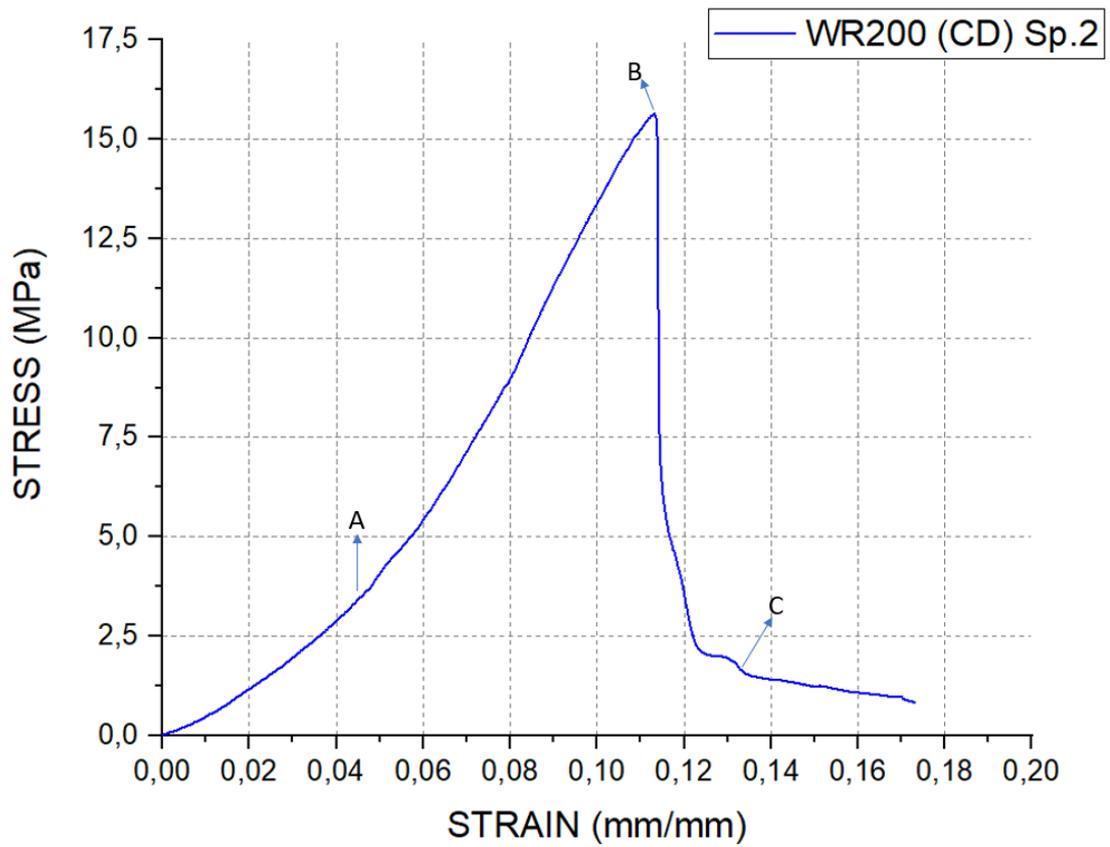
Gambar 5.38 Grafik *Stress-Strain Separator* WR200 setelah Pengujian Elektrokimia



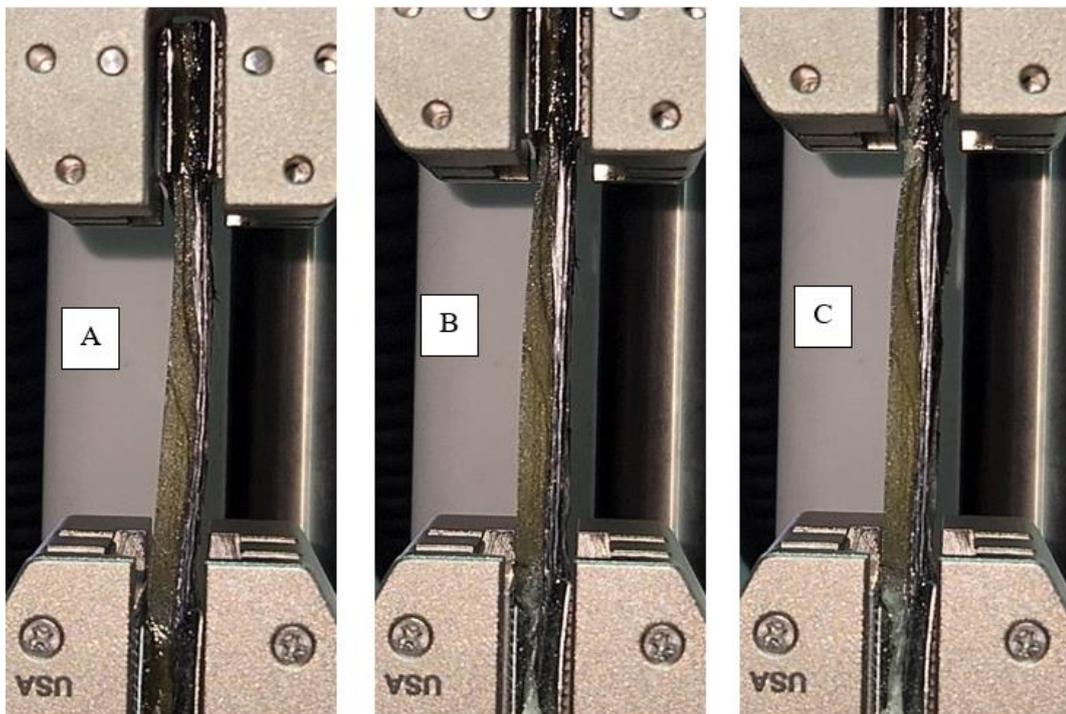
Gambar 5.39 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR50 Spesimen 1 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya *Failure* pada *Matrix*. (b) *Delaminasi* dan *Debonding* (c) *Final Failure*.



Gambar 5.40 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* WR200 Spesimen 1 saat *Tensile test*



Gambar 5.42 Grafik *Stress-Strain* pada *Separator* WR200 Spesimen 2 setelah Pengujian Elektrokimia. (a) Sesaat sebelum terjadinya *Failure* pada *Matrix*. (b) *Delaminasi* dan *Debonding* (c) *Final Failure*.



Gambar 5.41 Fenomena pada Baterai dengan *Separator* WR200 Spesimen 1 saat *Tensile test*

Tabel 5.1 Data hasil *flexural test* pada baterai dengan *separator* Whatman

Load	Time	Displacement	Voltage	Radius	Curvature
0,5	15	2,5	0,89	0	#DIV/0!
26	30,001	5,000166667	0,89	0	#DIV/0!
33,5	35,001	5,8335	0,99	1.155	0,000865801
35,5	45	7,5	2,08	254	0,003937008
42	55	9,166666667	2,08	169,62	0,005895531
45,5	65,001	10,8335	2,08	125,13	0,007991689
47,5	75	12,5	2,1	96,49	0,010363768
44	85	14,16666667	2,09	74,98	0,01333689
45	95	15,83333333	2,09	65,9	0,015174507
41,5	105,001	17,50016667	2,09	65,9	0,015174507
36,5	115	19,16666667	2,09	59,27	0,016871942

Tabel 5.2 Data hasil *flexural test* pada baterai dengan *separator* WR50

Load	Time	Voltage	Radius	Curvature	Displacement
0,5	0		1,95	0	0
10	10,002	1,95	1486,26	0,00067283	1,667
17,5	20	1,95	599,3	0,001668613	3,333333333
22,5	30,001	1,95	320,33	0,003121781	5,000166667
25	40	1,94	217,3	0,004601933	6,666666667
26,5	50,001	1,94	154,57	0,006469561	8,3335
28	60	1,94	124,23	0,008049585	10
28,5	70	1,94	100,06	0,009994004	11,66666667
26,5	80,001	1,94	91,7	0,010905125	13,3335
22,5	90	1,94	84,84	0,011786893	15
19,5	100,001	1,94	74,84	0,013361839	16,66683333
17	110,001	1,93	72,41	0,013810247	18,3335
15,5	120	1,93	67,51	0,01481262	20
13,5	130	1,93	65,23	0,015330369	21,66666667
11	140	1,93	62,65	0,015961692	23,33333333

Tabel 5.3 Data hasil *flexural test* pada baterai dengan *separator* WR200

Load	Time	Voltage	Radius	Curvature	Displacement
0,5	0	2,11	0	0	0
25,5	10,001	1,93	2740,08	0,000364953	1,666833333
42,5	20	1,8	700,01	0,001428551	3,333333333
51	30	2,09	374,2	0,002672368	5
55,5	40	2,1	244,64	0,004087639	6,666666667
59	50,001	2,1	170,4	0,005868545	8,3335
62	60,001	2,11	132,21	0,007563724	10,00016667
61,5	70,001	2,08	119	0,008403361	11,66683333
60,5	80,001	2,08	98,78	0,010123507	13,3335
58,5	90	2,07	89	0,011235955	15
55	100	2,09	80,92	0,012357884	16,66666667
49	110,001	2,1	71,01	0,014082524	18,3335
43,5	120	2,09	68,95	0,014503263	20
38,5	130	2,09	68,31	0,014639145	21,66666667
34	140	2,09	66,39	0,015062509	23,33333333

BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Daffa Satryo dilahirkan di Jakarta, 26 November 1999. Penulis lahir dari orang tua yang penyayang bernama Widio Budi Rahmulyo dan Alda Indriyani sebagai anak pertama dari dua bersaudara dengan adik laki-laki bernama Reza Abrar. Penulis menempuh pendidikan formal dimulai dari SD Al-Zahra Indonesia, kemudian dilanjutkan ke SMP dan SMA yang sama yaitu Al-Azhar BSD. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Selain belajar dan menempuh 144 sks selama masa perkuliahan, penulis juga berusaha mengembangkan *softskill* dan *hardskill* yang dimiliki dengan mengikuti organisasi dan tim. Pada kedua perkuliahan, penulis aktif sebagai anggota Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) ITS sebagai Staf Divisi Roda Dua. Tahun kedua, penulis mengamban amanah sebagai Kepala Divisi *Research and Development* pada LBMM ITS dan *Technical Manager* pada Mesin Karting Club (MKC) ITS. Tahun keempat. Penulis aktif sebagai anggota ITS Team Sapuangin sebagai Staf Divisi *Engine and Drivetrain* dan aktif sebagai Asisten Praktikum Laboratorium Metalurgi.

Dengan ketekunan dan semangat belajar yang tinggi, penulis telah berhasil menyelesaikan tugas akhir. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini dapat berkontribusi pada ilmu pengetahuan terutama pada bidang baterai dan dapat disempurnakan dengan penelitian selanjutnya. Akhir kata, penulis mengucapkan rasa syukur atas terselesaikannya tugas akhir yang berjudul “**Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Jenis Separator Terhadap Sifat Mekanik Dan Ketahanan Baterai Struktural Komposit**”. Untuk informasi lebih lanjut terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email daffasatriyo26@gmail.com