

Skripsi

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR KARBONISASI TERHADAP
SIFAT FISIS DAN ELEKTROKIMIA ELEKTRODA KARBON DARI
DAUN ALPUKAT (*Persea Americana*) SEBAGAI
SEL SUPERKAPASITOR**

**DEWI NAIRANTI
H021181013**



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR KARBONISASI TERHADAP
SIFAT FISIS DAN ELEKTROKIMIA ELEKTRODA KARBON DARI
DAUN ALPUKAT (*Persea Americana*) SEBAGAI
SEL SUPERKAPASITOR**

SKRIPSI



*Diajukan Sebagai Salah Satu
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
Pada Program Studi Fisika Departemen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin*

**DEWI NAIRANTI
H021181013**

**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

HALAMAN PENGESAHAN

PENGARUH VARIASI TEMPERATUR KARBONISASI TERHADAP
SIFAT FISIS DAN ELEKTROKIMIA ELEKTRODA KARBON DARI
DAUN ALPUKAT (*Persea Americana*) SEBAGAI
SEL SUPERKAPASITOR

Disusun dan diajukan oleh:

DEWI NAJRANTI

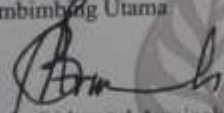
H021181013

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin
Pada 14 Juni 2023

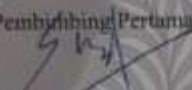
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,


Pembimbing Utama


Dr. Ir. Bidayatul Arminah, M.T
NIP. 19630830 198903 2 001

Pembimbing Pertama


Prof. Dr. Erman Taer, M.Si
NIP. 19710923 199512 1 002

Ketua Program Studi,


Prof. Dr. Arifin, M.T
NIP. 19670520 199403 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : DEWI NAIRANTI

NIM : H021181013

Program Studi : Fisika

Jenjang : S1

Meryatakan dengan sebenarnya bahwa karya tulisan saya yang berjudul:

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR KARBONISASI TERHADAP
SIFAT FISIS DAN ELEKTROKIMIA ELEKTRODA KARBON DARI
DAUN ALPUKAT (*Persea Americana*) SEBAGAI
SEL SUPERKAPASITOR**

Adalah karya tulis berdasarkan hasil pemikiran dan penelitian saya, bukan merupakan hasil pengambil alihan tulisan maupun pemikiran orang lain. Jika terdapat karya orang lain dalam skripsi ini, maka akan dicantumkan sumber yang benar dan jelas. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, jika dikemudian hari terdapat ketidakbenaran dan penyimpangan dalam pernyataan ini, maka saya berhak menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 14 Juni 2023

Menyatakan

Dewi Nairanti
H021181013

ABSTRAK

Penelitian ini menggunakan limbah biomassa daun alpukat (*Persea Americana*) sebagai bahan elektroda karbon untuk sel superkapasitor. Daun alpukat dipra-karbonisasi pada suhu 210°C serta menggunakan KOH 0,3 M untuk aktivasi kimia. Karbonisasi dilakukan menggunakan beberapa temperatur diantaranya 500°C, 600°C, dan 700°C dalam lingkungan gas N₂ dan diikuti dengan tahap aktivasi fisika menggunakan gas CO₂ pada suhu 850°C. Karakterisasi yang dilakukan diantaranya analisis massa jenis, *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR), *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Cyclic Voltammetry* (CV). Hasil analisis massa jenis menunjukkan bahwa kerapatan dari elektroda karbon semakin menurun seiring dengan kenaikan temperatur karbonisasi. Gugus fungsi pada spektrum FTIR menunjukkan ada banyak ikatan C yang terbentuk sedangkan untuk hasil analisis menggunakan XRD diperoleh bahwa struktur yang dihasilkan bersifat amorf baik sebelum dan sesudah pirolisis. Sifat elektrokimia dari elektroda karbon menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur karbonisasi maka proses difusi yang berlangsung akan semakin baik. Nilai kapasitansi spesifik tertinggi yang diperoleh sebesar 135,31 F/gr pada temperatur 700°C. Berdasarkan hasil ini, elektroda karbon dari daun alpukat merupakan salah satu material yang menjanjikan dan potensial untuk dijadikan sebagai sel superkapasitor.

Kata Kunci: Daun Alpukat, Superkapasitor, Elektroda, Kapasitansi.

ABSTRACT

This research uses the waste of avocado (*Persea Americana*) leaf biomass as a carbon electrode material for supercapacitor cells. Avocado leaves were pre-carbonized at 210°C and used 0.3 M KOH for chemical activation. Carbonization is carried out using several temperatures including 500°C, 600°C, and 700°C in an N₂ gas environment and followed by a physical activation step using CO₂ gas at a temperature of 850°C. The characterization carried out includes density analysis, Fourier Transform Infra-Red (FTIR), X-Ray Diffraction (XRD) and Cyclic Voltammetry (CV). The results of the density analysis show that the density of the carbon electrode decreases as the carbonization temperature increases. The functional groups in the FTIR spectrum show that there are many C bonds formed, while the results of the analysis using XRD show that the resulting structure is amorphous both before and after pyrolysis. The electrochemical properties of the carbon electrode show that the higher the carbonization temperature, the better the diffusion process will take place. The highest specific capacitance value obtained was 135.31 F/g at a temperature of 700°C. Based on these results, the carbon electrode from avocado leaves is one of the most promising materials and has the potential to be used as a supercapacitor cell.

Keywords: *Avocado Leaf, Supercapacitor, Electrode, Capacitance.*

KATA PENGANTAR

Salam Sejahtera,

Puji Syukur kehadiran Tuhan Yesus Kristus atas segala berkat, kasih setia dan penyertaanNya yang tiada berkesudahan. Puji Tuhan, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“Pengaruh Variasi Temperatur Karbonisasi terhadap Sifat Fisis dan Elektrokimia Elektroda Karbon dari Daun Alpukat (*Persea Americana*) sebagai Sel Superkapasitor”**, sebagai salah satu syarat dalam menyelesaikan studi dan mendapatkan gelar sarjana sains pada Departemen Fisika Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Dalam penyelesaian skripsi ini, begitu banyak rintangan yang didapatkan oleh penulis dari awal penelitian hingga tahap penyusunan skripsi, namun dengan penyertaan dan pertolongan Tuhan Yesus Kristus, keluarga, sahabat, dan pihak lain yang ikut membantu penulis, maka penulis dapat melewati segala rintangan dan dapat menyelesaikannya hingga akhir. Oleh karena itu, penulis mengungkapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua penulis, **Mama** dan **Papa** yang selalu memberikan kasih sayang serta dukungan, baik secara moral maupun materi. Terima kasih atas didikan serta motivasi yang selalu diberikan untuk menyemangati penulis dalam menjalani masa kuliah.
2. **Dr. Ir. Bidayatul Arminah, M.T**, sebagai pembimbing utama, dan **Prof. Dr. Erman Taer, M.Si**, selaku pembimbing pertama yang senantiasa memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis. Terima kasih telah meluangkan pikiran, tenaga dan waktunya untuk penulis serta memberikan nasehat-nasehat dalam menyelesaikan masa studi.
3. **Prof. Dr. Bualkar Abdullah, M. Eng. Sc.** dan **Prof. Dr. Sri Suryani, DEA.** selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktunya dalam memberikan saran dan masukan yang membangun untuk menjadikan skripsi ini lebih baik.

4. **Prof. Dr. Arifin, M. T.**, selaku Ketua Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu dan nasehat bagi penulis dalam menyelesaikan masa studi pendidikan.
5. Seluruh Bapak/Ibu **Dosen** Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam dan terkhusus kepada seluruh **Dosen** Departemen Fisika yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan yang sangat bermanfaat dan menjadi bekal bagi penulis untuk terus berproses.
6. Seluruh **Pegawai dan Jajaran Staff** Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, terkhusus kepada **Pegawai dan Staff Departemen Fisika (Kak Rana, Ibu Evi, Pak Syukur, dan Pak Ahmad)** yang telah membantu penulis dalam mengurus administrasi perkuliahan.
7. **Kak Apriwandi** selaku asisten di Laboratorium Material dan Energi, Universitas Riau, yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian dan senantiasa memberikan saran serta ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
8. **Suci Indah Sari** selaku teman seperjuangan penelitian superkapasitor yang selalu sabar dalam membantu penulis dan terima kasih telah menjadi teman curhat, teman suka duka penelitian, teman nginap di Laboratorium juga seluruh motivasi dan bantuan yang diberikan untuk menyelesaikan skripsi ini.
9. **Alfian, Iis** dan **Nunu** yang selalu memberikan bantuan dan meluangkan waktunya untuk menemani penulis.
10. **Wibu, Yessi, Ilmi, Maya, Azlan, Syahrul, Cunni, Yuni, Gebi, Milen, Afni, dan semua teman-teman FISIKA 2018 yang belum sempat tertulis namanya**, yang telah menemani penulis selama masa perkuliahan hingga menyelesaikan tugas akhir, selalu memberi semangat, motivasi serta dukungan kepada penulis. Teman-teman **ELINS'18 (Suci, Cunni, Angela, Maya, Anti, Firda, Syahrul dan Fatimah)** yang selalu memotivasi dan menemani penulis selama berada di Laboratorium elektronika dan instrumentasi.

11. **Teman-teman HIMAFI 2018** yang telah menjadi keluarga kedua untuk penulis dalam berproses di Himafi dari maba hingga sekarang, terima kasih untuk semua cerita dan suka duka yang telah diukir bersama.
12. **Semua Pihak** yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah memberikan semangat, dukungan serta doa kepada penulis hingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Semoga Tuhan selalu menyertai seluruh rencana dan masa depan semua pihak yang terkait dan kiranya hasil pada penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi penulis maupun pembaca.

Makassar, 14 Juni 2023

Dewi Nairanti

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii-ix
DAFTAR ISI	x-xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
I. PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1-3
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Tujuan Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
II.1 Superkapasitor	4
II.2 Karbon Aktif	6
II.3 Biomassa Daun Alpukat (<i>Persea Americana</i>)	6
II.4 Kapasitansi	7
III. METODE PENELITIAN	9
III.1 Waktu dan Tempat	9
III.2 Alat dan Bahan	9
II.2.1 Alat	9
II.2.2 Bahan	9
III.3 Prosedur Penelitian	10
II.3.1 Pembuatan sampel karbon aktif	10
II.3.1.1 Persiapan Sampel dan Pra-Karbonisasi	10
II.3.1.2 Penggilingan Sampel	10

II.3.1.3 Aktivasi Kimia	10
II.3.1.4 Pencetakan Pelet.....	11
II.3.1.5 Karbonisasi dan Aktivasi Fisika (Pirolisis).....	11
II.3.2 Pembuatan Separator Superkapasitor.....	11
II.3.3 Pembuatan Sel Superkapasitor	12
II.3.4 Karakterisasi Sampel.....	12
III.4 Diagram Prosedur Penelitian	13
III.5 Bagan Alir Penelitian	14
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	15
IV.1 Penyusutan Massa Daun Alpukat setelah Pra-Karbonisasi	15
IV.2 <i>Thermogravimetric</i> dan <i>Differential Thermogravimetry</i>	15
IV.3 Analisis Massa Jenis	17
IV.4 Analisis <i>Fourier Transform Infrared</i>	19
IV.5 Analisis <i>X-Ray diffraction</i>	20
IV.6 Analisis <i>Cyclic Voltametry</i>	21
V. KESIMPULAN.....	25
DAFTAR PUSTAKA	26
LAMPIRAN	32

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Plot Ragone pada perangkat penyimpanan energi elektrokimia.....	4
Gambar 2.2	Komponen Superkapasitor	5
Gambar 2.3	Prinsip kerja dari sel superkapasitor (a) kondisi awal saat tegangan masih bernilai 0, (b) tegangan diberikan sehingga ion-ion bergerak, (c) ion-ion menempel pada elektroda sel superkapasitor	5
Gambar 2.4	Struktur Kristal dan amorf.....	6
Gambar 2.5	Struktur Daun Alpukat	7
Gambar 2.6	Dua keping sejajar pada kapasitor.....	8
Gambar 3.1	Susunan komponen Sel Superkapasitor	12
Gambar 3.2	Diagram Prosedur Penelitian	13
Gambar 3.3	Bagan alir penelitian.....	14
Gambar 4.1	Kurva TG dan DTG sampel daun alpukat terhadap temperatur	16
Gambar 4.2	Massa jenis elektroda sebelum dan sesudah pirolisis	18
Gambar 4.3	Spektrum FTIR bubuk daun alpukat sebelum dan sesudah pirolisis	19
Gambar 4.4	Spektrum XRD pada daun alpukat sebelum dan sesudah pirolisis ..	20
Gambar 4.5	Grafik hubungan nilai kapasitansi spesifik terhadap variasi laju pemindaian	23
Gambar 4.6	Kurva Cyclic Voltammetry elektroda sel superkapasitor dengan scanrate 1 mV/s	29

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Persentase penyusutan massa daun alpukat	15
Tabel 4.2 Hasil pengukuran massa, tebal dan diameter pelet.....	17
Tabel 4.3 Perbandingan massa jenis sebelum dan sesudah pirolisis.....	19
Tabel 4.4 Gugus fungsi karbon daun alpukat	20
Tabel 4.5 Perbandingan nilai kapasitansi spesifik terhadap laju pemindaian	22
Tabel 4.6 Nilai kapasitansi spesifik sel superkapasitor dari daun alpukat	23

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Penelitian	32
Lampiran 2. Perhitungan Densitas Elektroda Sel Supercapacitor	33
Lampiran 3. Perhitungan Kapasitansi Spesifik.....	35
Lampiran 4. Data TG-DTG	36
Lampiran 5. Data FTIR	37
Lampiran 6. Data XRD	38
Lampiran 7. Data CV	39

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan populasi dunia mengakibatkan kebutuhan energi di masyarakat juga meningkat, hal ini tentunya menimbulkan kekhawatiran tentang krisis energi. Secara umum, sumber energi yang digunakan hingga saat ini berasal dari bahan bakar fosil. Penggunaan sumber daya yang meningkat secara terus menerus menyebabkan pencemaran lingkungan yang serius [1, 2]. Energi yang berasal dari sumber terbarukan, seperti hidrogen, matahari, dan angin, sifatnya *intermittent*. Untuk memaksimalkan potensi energi tersebut, sangat dibutuhkan perangkat penyimpanan energi yang memiliki kinerja tinggi, seperti superkapasitor dan baterai [3]. Dalam pengembangannya, pembuatan perangkat penyimpanan energi membutuhkan biaya yang cukup besar sehingga diperlukan pengembangan teknologi dengan biaya yang lebih rendah [2].

Superkapasitor merupakan perangkat penyimpanan energi dengan daya dan kepadatan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan perangkat kapasitor konvensional. Hal ini telah menarik minat penelitian, terutama untuk aplikasi pada elektronik bergerak, kendaraan listrik, dan manajemen daya industri [3]. Kelebihan tersebut karena prinsip kerja superkapasitor yang unik serta dipengaruhi oleh bahan yang digunakan untuk elektroda superkapasitor. Porositas bahan merupakan kriteria penting untuk pemilihan bahan elektroda karena luas permukaan efektif mempengaruhi kinerja superkapasitor. Beberapa bahan yang umum digunakan untuk superkapasitor adalah karbon aktif, *nanotube* karbon, *graphene*, polimer konduktor, oksida logam, dll [4].

Superkapasitor menyediakan kemampuan kecepatan pengisian dan pengosongan yang tinggi serta siklus hidup yang lama. Superkapasitor memiliki kapasitansi dan daya spesifik yang lebih tinggi dibandingkan dengan kapasitor konvensional, meskipun energi spesifiknya lebih rendah [3]. Superkapasitor dengan daya yang tinggi dan stabilitas material paling baik diperoleh dari *electrochemical double-layer capacitors* (EDLC), hal ini disebabkan karena superkapasitor menyimpan muatan antar permukaan elektroda/elektrolit melalui

lapisan kapasitor ganda. Bahan karbon dengan luas permukaan yang tinggi umumnya menunjukkan perilaku EDLC [3, 5]. Untuk meminimalisir biaya pembuatan karbon aktif, preparasi elektroda dapat dibuat dari limbah biomassa. Biomassa yang digunakan dapat berasal dari tanaman, pepohonan, rumput, ubi dan limbah pertanian yang mengandung unsur karbon [4, 6].

Hasil panen alpukat di Indonesia untuk tahun 2021 mencapai 669.260 ton yang tersebar di beberapa kabupaten [7]. Secara umum, buah alpukat menjadi bagian yang paling banyak dimanfaatkan karena alpukat mengandung kalium yang tinggi. Alpukat sudah dimanfaatkan sebagai elektroda sel superkapasitor khususnya di bagian biji, hal ini dikarenakan biji alpukat mengandung selulosa 16,36%, hemiselulosa 34,15% dan lignin 15,25% [8]. Akan tetapi, beberapa bagian dari alpukat belum dimanfaatkan secara maksimal [9]. Daun alpukat memiliki kadar abu 1,42% sedangkan kadar air yang dimiliki mencapai 6,75% [10]. Daun alpukat mengandung *mannoheptulose* dan *perseitol* yang lebih dikenal dengan istilah *seven-carbon (C7)*. Kandungan C7 yang ada di dalam daun tua mencapai 67,5% sedangkan pada daun muda 57,4% [11]. Berdasarkan data tersebut, daun alpukat berpotensi untuk dijadikan sebagai bahan karbon aktif pada sel superkapasitor.

Sebelumnya, para peneliti telah melakukan penelitian superkapasitor dari biomassa daun tumbuhan. Pada penelitian yang dilakukan oleh B. Armynah, dkk (2019) daun bambu digunakan sebagai bahan karbon aktif untuk pembuatan superkapasitor dengan aktivasi fisika pada temperatur 750°C, 800°C, 850°C, dan 900°C dan kapasitansi spesifik maksimum yang diperoleh yaitu 60 F/g [5]. Pada tahun 2022, T. Kongthong, dkk meneliti serat daun nanas yang diaktivasi menggunakan KOH dengan doping nitrogen serta menggunakan temperatur karbonisasi 500°C sehingga didapatkan kapasitansi spesifik maksimum yaitu 195 F/g [3]. E. Taer, dkk (2021) menggunakan daun kopi sebagai bahan karbon aktif yang di aktivasi dengan KOH dan dikarbonisasi pada temperatur 600°C sehingga diperoleh nilai kapasitansi spesifik maksimum sebesar 210 F/g [12]. V. Thirumal, dkk (2022) memanfaatkan limbah daun teh untuk pembuatan karbon aktif dengan menggunakan dua aktivator yaitu KOH dan H₃PO₄ dengan temperatur karbonisasi

700°C dan kapasitansi spesifik maksimum yang diperoleh yaitu 131,95 F/g [13]. R. Farma, dkk pada tahun 2021 meneliti biji alpukat sebagai bahan karbon aktif elektroda dengan karbonisasi pada temperatur 600°C, untuk nilai kapasitansi spesifik maksimum yang diperoleh sebesar 203,12 F/g [14].

Berdasarkan beberapa referensi tersebut, elektroda sel superkapasitor dari daun alpukat memiliki kualifikasi untuk dikembangkan sebagai karbon aktif. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan biomassa daun alpukat sebagai bahan karbon aktif untuk pembuatan elektroda sel superkapasitor dengan variasi temperatur karbonisasi. Sampel akan dianalisis menggunakan analisis massa jenis, *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Fourier Transform Infra Red (FTIR)* serta *Cyclic Voltammetry (CV)*. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan solusi permasalahan dalam biaya pembuatan superkapasitor yang menghabiskan banyak biaya karena penggunaan bahan dengan harga yang mahal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur karbonisasi terhadap sifat fisis dan sifat elektrokimia dari elektroda sel superkapasitor daun alpukat?
2. Bagaimana pengaruh temperatur karbonisasi terhadap kapasitansi spesifik dari elektroda sel superkapasitor daun alpukat?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan di atas, maka didapatkan tujuan sebagai berikut:

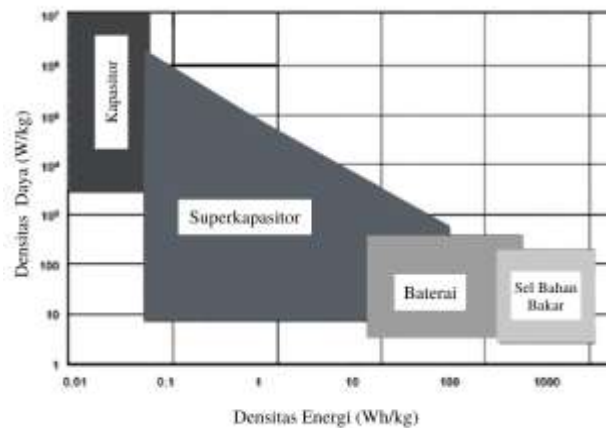
1. Menganalisis pengaruh variasi temperatur karbonisasi terhadap sifat fisis dan sifat elektrokimia dari elektroda sel superkapasitor daun alpukat.
2. Menganalisis pengaruh variasi temperatur karbonisasi terhadap nilai kapasitansi spesifik dari elektroda sel superkapasitor daun alpukat.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Superkapasitor

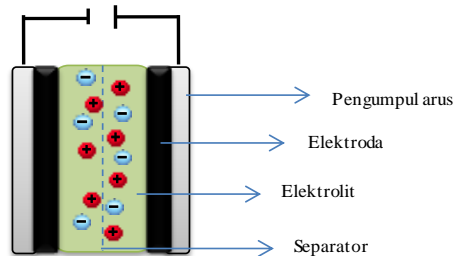
Superkapasitor merupakan perangkat penyimpanan energi yang mampu menyimpan energi dalam jumlah besar, dengan kerapatan daya dan kepadatan energi yang tinggi. Penggunaan superkapasitor dapat diaplikasikan sebagai sumber listrik pada kendaraan listrik *hybrid*, listrik untuk industri, elektronik, perangkat militer, dan lain sebagainya [15]. Superkapasitor mampu menyimpan energi lebih lama jika dibandingkan dengan baterai. Kinerja superkapasitor didasarkan pada teknologi karbon yang akan menghasilkan luas permukaan yang sangat besar dengan jarak pemisah yang sangat kecil [16, 17]. Jumlah siklus pada superkapasitor relatif lebih banyak (>100.000 siklus) serta massa jenis energi yang tinggi. Salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas penyimpanan energi pada superkapasitor adalah luas permukaan material yang besar. Energi yang tersimpan berbanding lurus dengan luas permukaan material yang digunakan, semakin luas permukaan maka superkapasitor akan menyimpan sejumlah energi yang besar [18].



Gambar 2.1 Plot Ragone pada perangkat penyimpanan energi elektrokimia [17].

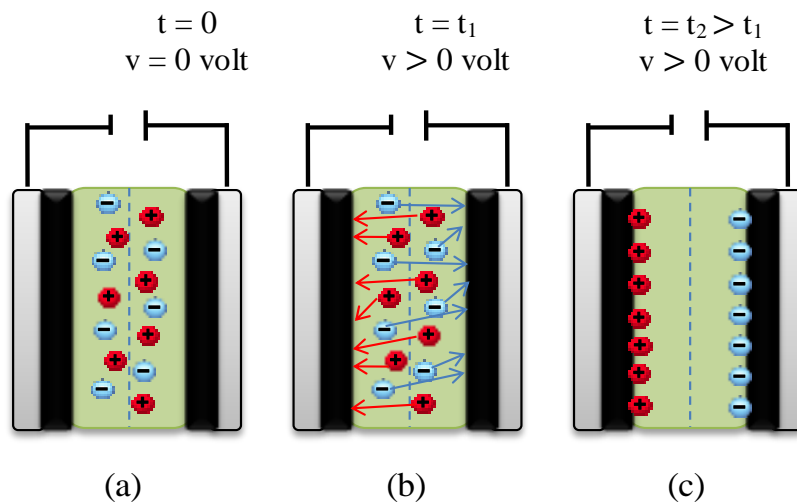
Plot ragone pada gambar 2.1 menunjukkan perbandingan performa dari superkapasitor dan beberapa perangkat penyimpanan energi lainnya. Gambar 2.1 membandingkan rapat daya dan rapat energi pada kapasitor, superkapasitor, baterai, dan sel bahan bakar. Kepadatan daya yang dimiliki superkapasitor lebih

rendah dari kapasitor tetapi lebih besar dibandingkan dengan baterai. Sedangkan untuk kepadatan energi, superkapasitor lebih besar dari kapasitor tetapi lebih rendah dari baterai [17].



Gambar 2.2 Komponen Superkapasitor [19].

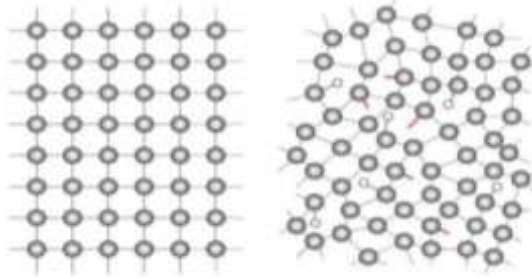
Gambar 2.2 menunjukkan komponen superkapasitor terdiri dari elektroda, pemisah ion (dielektrik), elektrolit dan pengumpul arus. Prinsip kerja dari sel superkapasitor ditentukan oleh sifat dari kedua elektroda yang digunakan serta bergantung pada ion yang berada di antara kedua elektroda tersebut [19, 20]. Ketika tegangan diberikan pada elektroda yang saling berhadapan maka ion akan tertarik ke permukaan kedua elektroda tersebut sehingga terjadi proses pengisian (*charging*). Begitupun sebaliknya, saat ion bergerak menjauh dari elektroda maka proses yang terjadi adalah pengosongan (*discharging*) [20].



Gambar 2.3 Prinsip kerja dari sel superkapasitor (a) kondisi awal saat tegangan masih bernilai 0, (b) tegangan diberikan sehingga ion-ion bergerak, (c) ion-ion menempel pada elektroda sel superkapasitor [20].

II.2 Karbon Aktif

Karbon aktif adalah senyawa amorf yang dapat diperoleh dari material atau bahan yang mengandung banyak karbon [21]. Amorf memiliki atom-atom yang pola susunannya tidak teratur atau acak, sehingga karbon aktif dapat diartikan sebagai karbon dengan susunan molekul yang tidak teratur [22].



Gambar 2.4 Struktur Kristal dan amorf [22].

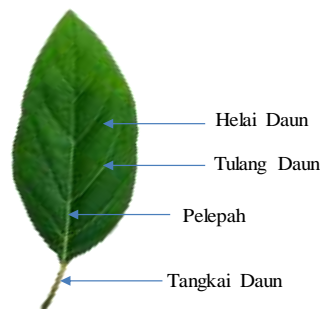
Karbon aktif memiliki luas permukaan yang besar sehingga dapat menyerap gas dan senyawa-senyawa kimia tertentu tergantung pada besar atau volume pori-pori [21]. Luas permukaan yang dimiliki oleh superkapasitor cukup tinggi yakni berkisar antara 300-3500 m²/g. Salah satu proses yang sangat penting dalam pembuatan karbon aktif yaitu proses aktivasi. Proses ini bertujuan untuk memperbesar pori-pori dan menghilangkan pengotor yang ada pada karbon. Aktivasi dapat dilakukan melalui dua metode yaitu aktivasi fisika dan aktivasi kimia [19].

II.3 Biomassa Daun Alpukat (*Persea Americana*)

Biomassa merupakan bahan organik yang diperoleh dari hasil fotosintesis [23]. Biomassa adalah bahan yang berlimpah dan berkelanjutan yang mengandung selulosa, hemiselulosa dan lignin sehingga dapat digunakan sebagai sumber karbon yang menjanjikan [24]. Pembuatan karbon aktif dapat menggunakan limbah pertanian seperti kulit kayu, cangkang kelapa sawit, sekam padi, biji dan kulit buah, tempurung, akar, batang, bunga, dan daun tanaman. Beberapa kriteria material atau bahan yang dapat dijadikan sebagai bahan baku untuk pembuatan karbon aktif yaitu memiliki kandungan karbon yang tinggi, kandungan zat anorganik rendah agar hasil abu rendah, berlimpah di alam sehingga mudah didapatkan dan mengurangi biaya pembuatan, serta tingkat degradasi rendah pada penyimpanan [25].

Alpukat merupakan tumbuhan dikotil dari ordo Ranales dan famili Lauraceae dengan nama latin *Persea Americana* [26]. Secara umum tanaman alpukat dapat tumbuh di dataran rendah hingga dataran tinggi, yaitu 5-1500 m di atas permukaan laut. Untuk mendapatkan hasil yang maksimal tanaman ini sangat cocok ditanam pada ketinggian 200-1000 mdpl. Curah hujan minimum untuk pertumbuhan alpukat adalah 750-1000 mm/tahun, dengan suhu optimal berkisar antara 12,8-28,3°C [27]. Berdasarkan data badan pusat statistik Sulawesi Selatan, hasil panen alpukat yang dihasilkan pada tahun 2021 mencapai 8.972 ton [11].

Daun alpukat mengandung *mannoheptulose* dan *perseitol* yang memiliki 7 ikatan karbon atau lebih dikenal dengan istilah *seven-carbon* (C7). Kandungan C7 yang ada di dalam daun tua mencapai 67,5% sedangkan pada daun muda 57,4% [11]. Hal ini menunjukkan bahwa daun alpukat berpotensi untuk dijadikan sebagai bahan karbon aktif, selain itu daun alpukat mudah didapatkan dan penggunaannya yang belum dimanfaatkan secara maksimal.



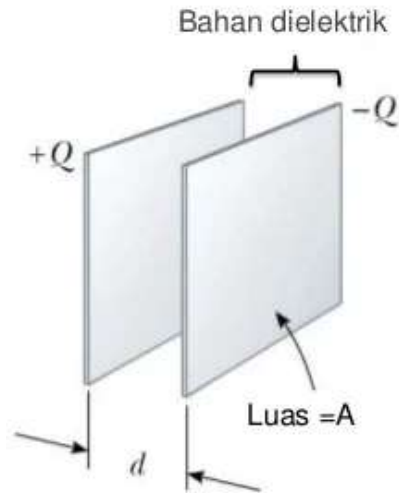
Gambar 2.5 Struktur Daun Alpukat.

II.4 Kapasitansi

Kapasitansi merupakan kemampuan suatu perangkat penyimpanan (kapasitor, superkapasitor, baterai, dll) untuk mengumpulkan atau menyimpan muatan listrik. Pengukuran kapasitansi dapat dihitung berdasarkan jumlah muatan yang dapat disimpan pada suatu kenaikan tegangan menggunakan persamaan berikut ini [19]:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.2)$$



Gambar 2.6 Dua keping sejajar pada kapasitor [19].

dengan C menyatakan nilai kapasitansi (F), Q nilai muatan listrik (coulomb), V besar tegangan yang diberikan (volt), ϵ_0 permivitas ruang hampa (F/m), ϵ_r permivitas dielektrik, A luas penampang (m^2), d jarak antar keping (m) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 [19]. Untuk menghitung kapasitansi spesifik (C_{sp}) pada elektroda sel superkapasitor dapat menggunakan persamaan berikut [18]:

$$C_{sp} = \frac{I_c - I_d}{S \cdot m} \quad (2.3)$$

C_{sp} = Kapasitansi spesifik (F/g)

I_c = arus pada saat *charge* (A)

I_d = arus pada saat *discharge* (A)

S = Laju *scan* (mV/s)

m = Massa elektroda (g)