



UNIVERSITI MALAYSIA PAHANG
AL-SULTAN ABDULLAH

SISTEM PENYIMPANAN TENAGA MAMPAN

SUPERKAPASITOR



Profesor ChM Dr. Chong Kwok Feng

MAJLIS SYARAHAN UMUM PROFESOR

**SISTEM
PENYIMPANAN
TENAGA
MAMPAN**

SUPERKAPASITOR

MAJLIS SYARAHAN UMUM PROFESOR

**SISTEM
PENYIMPANAN
TENAGA
MAMPAN
SUPERKAPASITOR**

Profesor Chm. Dr. Chong Kwok Feng

Penerbit
Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah,
Kuantan
2024



UNIVERSITI MALAYSIA PAHANG
AL-SULTAN ABDULLAH

Penerbit
Publisher

**Hakcipta © Universiti Malaysia Pahang,
Al-Sultan Abdullah, 2024**

Cetakan Pertama, November 2024

Hakcipta adalah terpelihara
Setiap bahagian daripada terbitan ini tidak boleh
diterbitkan semula, disimpan untuk pengeluaran atau
dipindahkan kepada bentuk lain, sama ada dengan cara
elektronik, mekanikal, gambar, rakaman dan sebagainya
tanpa mendapat izin daripada Penerbit Universiti
Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah, Lebu Persiaran
Tun Khalil Yaakob, 26300 Gambang, Kuantan, Pahang
Darul Makmur.



Data Pengkatalogan-dalam-Penerbitan

Perpustakaan Negara Malaysia

Rekod katalog untuk buku ini boleh didapati
dari Perpustakaan Negara Malaysia

ISBN 978-629-7641-00-0

Pengarah Penerbit : Dr. Mel
Ketua Editor : M. Azli
Editor : M. Azli
Pembaca Pruf : A. Humaira
Reka Letak & Reka Kulit: R. W. Chamie
Pentadbiran : Zue & F. W. Riann
Jualan & Pemasaran : N. H.

Share | Like | Tag
Online Shop: <https://msha.ke/penerbitump>
Official Page (FB) : Penerbit UMPSA
Official IG : Penerbitumpsa

Diterbitkan Oleh
Penerbit
Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah
Lebu Persiaran Tun Khalil Yaakob,
26300 Gambang, Kuantan,
Pahang Darul Makmur.
Tel: 09-431 5034

Urus Cetak
PNC Printing
No.2, Tingkat Bawah, Taman Damai Indah,
Peramu, 26600, Pekan, Pahang Darul Makmur
Tel: 09-425 2010

KANDUNGAN

KANDUNGAN		v
SENARAI RAJAH		vii
PRAKATA		ix
Bab Satu	PENGENALAN	1
Bab Dua	SISTEM PENYIMPANAN TENAGA	3
	2.1 Sel Bahan Api	7
	2.2 Bateri	8
	2.3 Kapasitor	12
	2.4 Superkapasitor	15
Bab Tiga	KAPASITOR LAPISAN BERGANDA ELEKTRIK (EDLC)	17
	3.1 Bahan Elektrod EDLC	18
	3.1.1 Karbon Aktif	19
	3.1.2 Nanotub Karbon (CNT)	20
	3.1.3 Grafena	22
Bab Empat	PSEUDOKAPASITOR	25
	4.1 Deposisi Di Bawah Potensi	26
	4.2 Pseudokapasitans Redoks	26
	4.3 Pseudokapasitans Interkalasi	27
	4.4 Oksida Logam	27
	4.4.1 Ruthenium dioksida (RuO ₂)	28
	4.4.2 Mangan Dioksida (MnO ₂)	28
	4.4.3 Kobalt Oksida (Co ₃ O ₄)	29
	4.5 Polimer Konduktor	30
	4.5.1 Polianilin (PANI)	31

Bab Lima	APLIKASI SUPERKAPASITOR	33
	5.1 Superkapasitor untuk Tenaga Solar	33
	5.2 Superkapasitor untuk Kendaraan Elektrik	34
	5.3 Superkapasitor untuk Kecerdasan Buatan	35
	RUJUKAN	37
	BIODATA PENULIS	41

SENARAI RAJAH

- Rajah 1:** Klasifikasi sistem penyimpanan tenaga utama
- Rajah 2:** Mekanisme kerja sel bahan api
- Rajah 3:** Kandungan bateri alkali
- Rajah 4:** Prinsip kerja bateri ion litium
- Rajah 5:** (kiri) Proses pengecasan kapasitor; (kanan) Proses discas kapasitor.
- Rajah 6:** Perbandingan kepadatan tenaga dan kuasa di dalam Ragone plot
- Rajah 7:** Ilustrasi perkembangan superkapasitor untuk tempoh lebih dari 280 tahun
- Rajah 8:** Proses penyimpanan tenaga pada kapasitor (kiri) dan superkapasitor (kanan).
- Rajah 9:** Imej mikroskop elektron sampel karbon aktif daripada sekam padi yang diaktifkan pada suhu berbeza
- Rajah 10:** Skematik (a) SWCNT (b) MWCNT; Imej mikroskop elektron transmisi (TEM) untuk (c) SWCNT (d) MWCNT
- Rajah 11:** Imej mikroskop elektron transmisi untuk sampel grafena.
- Rajah 12:** Perbezaan penyimpanan cas untuk (a) EDLC, pseudokapasitor jenis (b) deposisi bawah potensi, (c) pseudokapasitans redoks dan (d) pseudokapasitans interkalasi.
- Rajah 13:** Pengaktifan semula katod bateri alkali kepada bunga nano MnO_2 .
- Rajah 14:** Skematik menunjukkan elektrodeposisi Co_3O_4 di bawah medan magnet dan hasil Co_3O_4 dalam morfologi hirarkikal nano
- Rajah 15:** Hasil voltametri kitaran elektrod PANI yang menunjukkan tindak balas redoks 2 elektron.
- Rajah 16:** Sumber tenaga untuk superkapasitor dan pelbagai aplikasinya.

PRAKATA

Buku ini merupakan kompilasi pengetahuan dalam bidang sistem penyimpanan tenaga yang sebahagian daripadanya adalah hasil penyelidikan saya bersama dengan kolaborator. Kolaborator di sini bermaksud ahli saintis kerjasama, pasca doktoral, pelajar pascasiswazah, pelajar projek tahun akhir dan mana mana pihak yang menyumbang secara terus atau tidak terus ke arah hasil penyelidikan. Saya ingin mengambil kesempatan ini untuk memberi penghargaan kepada semua kolaborator dan juga mana-mana pihak yang menolong saya untuk menyiapkan penerbitan buku ini.

Penghargaan juga diberi kepada alma mater saya Universiti Teknologi Malaysia, National University of Singapore, bekas penyelia saya yang mendidik saya dalam perjalanan penyelidikan. Tidak lupa juga institusi yang saya bermula kerjaya saintifik saya, iaitu Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah yang sentiasa menyokong saya untuk mengembangkan penyelidikan. Terima kasih saya ucapkan kepada semua penyumbang dana (Kementerian Pendidikan Tinggi, Kementerian Sains, Teknologi dan Inovasi, dan penyumbang dana yang saya tidak sempat senaraikan satu per satu ini) yang memberi kepercayaan kepada saya.

Selain itu, penghargaan yang tidak terhingga juga saya tujukan kepada pihak penerbit UMPSA yang telah memberi peluang dan kepercayaan kepada saya untuk menerbitkan karya asli ini. Perisian chatgpt.com digunakan untuk tugas penterjemahan terma saintifik ke Bahasa Malaysia.

Akhirnya, saya berharap buku ini dapat memanfaatkan para pembaca dan ia boleh dijadikan sebagai bahan rujukan untuk komuniti yang berminat dalam sistem penyimpanan tenaga.

CHONG KWOK FENG

BAB SATU

PENGENALAN

Penggunaan tenaga global telah meningkat dengan pesat akibat daripada industrialisasi, kemajuan teknologi, dan pertumbuhan ekonomi, terutamanya di negara-negara membangun. Agensi Tenaga Antarabangsa (IEA) melaporkan kenaikan permintaan tenaga global sebanyak 4.5% pada tahun 2021, yang bersamaan dengan lebih daripada 1,000 TWh. Ini juga menyumbang kepada kenaikan lebih daripada 5% dalam pelepasan CO₂ pada tahun yang sama.

Sebagai tindak balas kepada krisis alam sekitar yang semakin meningkat, sistem tenaga boleh diperbaharui sedang diterapkan dengan pantas kerana ia tidak menghasilkan gas rumah hijau semasa operasi. IEA mencatatkan bahawa pengeluaran elektrik daripada sumber boleh diperbaharui dijangka mencapai tahap rekod, dengan peningkatan lebih daripada 8%, mencecah sekitar 8,300 TWh pada tahun 2021. Agensi Tenaga Boleh Diperbaharui Antarabangsa (IRENA) meramalkan bahawa untuk memenuhi sasaran Perjanjian Paris—mengekalkan peningkatan suhu global di bawah 2 °C—sumber tenaga boleh diperbaharui mesti menyumbang 57% daripada pengeluaran global menjelang tahun 2030.

Pada tahun 2021, sumber tenaga boleh diperbaharui mencapai bahagian tertinggi dalam campuran pengeluaran tenaga global sebanyak 30%. Tenaga solar fotovoltaik dan angin telah menyumbang lebih kurang dua pertiga daripada pertumbuhan ini, dengan peningkatan pengeluaran elektrik masing-masing sekitar 18% dan 17% (Laura Cozzi, 2021). Peralihan kepada sumber tenaga boleh diperbaharui adalah penting untuk mencapai matlamat tenaga yang mampan dan mengurangkan impak perubahan iklim. Namun, sumber tenaga boleh diperbaharui mempunyai sifat tidak konsisten; contohnya, panel solar mungkin

tidak berfungsi dengan baik dalam cuaca mendung, turbin angin mungkin kurang berkesan dalam cuaca tenang, dan ada kalanya sumber ini menghasilkan tenaga yang berlebihan, menyebabkan sistem terlampau beban pada waktu-waktu tertentu. Oleh itu, untuk menangani ketidakkonsistenan ini dan memastikan keseimbangan yang tepat antara pengeluaran tenaga dan permintaan, sistem penyimpanan tenaga dianggap sebagai penyelesaian yang paling realistik dan berkesan. Sistem ini berpotensi besar dalam mengoptimumkan pengurusan tenaga dan pengurangan pembaziran. Sistem penyimpanan tenaga direka terutamanya untuk mengumpul tenaga daripada pelbagai sumber, mengubah dan menyimpannya mengikut keperluan untuk pelbagai kegunaan.

BAB DUA

SISTEM PENYIMPANAN TENAGA

Dengan kemajuan terkini dalam sektor Kenderaan Elektrik dan peralihan ekonomi ke arah tenaga yang lebih hijau, permintaan untuk sistem penyimpanan tenaga telah melonjak. Keperluan untuk penyimpanan tenaga dijangka meningkat tiga kali ganda daripada nilai semasa menjelang tahun 2030 (Pablo Ralon et al., 2017). Permintaan ini mendorong penyelidik untuk membangunkan kaedah penyimpanan tenaga yang baharu, yang lebih cekap dan mampu memberikan kuasa yang konsisten serta terkawal mengikut keperluan. Rajah 1 menunjukkan klasifikasi sistem penyimpanan tenaga utama. Evolusi sistem penyimpanan tenaga telah menjadi ketara sejak permulaan penggunaan mereka pada abad ke-19, dengan kronologi berikut:

Abad ke-19: Bentuk pertama penyimpanan tenaga muncul, terutamanya melalui kaedah mekanikal seperti penyimpanan hidroelektrik terpampar dan teknologi bateri awal, termasuk bateri asid plumbum.

Awal Abad ke-20: Kemajuan dalam teknologi bateri berterusan, dengan bateri nikel-kadmium (NiCd) menjadi popular. Tempoh ini juga menyaksikan perkembangan roda tenaga (flywheel) dan penyimpanan udara termampat.

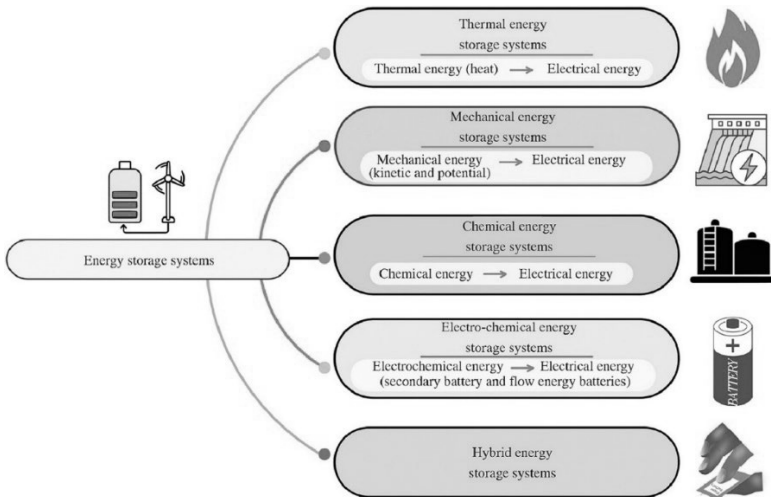
Pertengahan Abad ke-20: Pengenalan bateri kimia yang lebih maju, seperti bateri nikel-logam hidrida (NiMH), meningkatkan ketumpatan tenaga dan kecekapan. Era ini juga menandakan peningkatan penyimpanan hidroelektrik berskala besar.

Akhir Abad ke-20: Pembangunan bateri ion litium merevolusikan penyimpanan tenaga kerana ketumpatan tenaga

dan kecekapan yang tinggi, membuka jalan bagi elektronik mudah alih dan kenderaan elektrik.

Abad ke-21: Fokus beralih kepada integrasi tenaga boleh diperbaharui, yang menyebabkan minat yang meningkat terhadap teknologi ESS seperti bateri keadaan pepejal, sistem hidro terpampar yang maju, dan penyimpanan tenaga termal. Selain itu, inovasi dalam penyelesaian penyimpanan skala grid telah muncul untuk menyokong sumber tenaga boleh diperbaharui.

Klasifikasi sistem penyimpanan tenaga boleh dirumuskan seperti dalam Jadual 2, mengikut jenis tenaga yang disimpan. Secara umumnya, tenaga boleh disimpan dalam bentuk haba, mekanikal, kimia, elektrokimia, elektrik, dan medan magnet. Antara topik yang akan dibincangkan dalam buku ini adalah sistem penyimpanan tenaga dalam bentuk elektrokimia.



Rajah 1: Klasifikasi sistem penyimpanan tenaga utama.
(Mitali et al., 2022)

Sistem Penyimpanan Tenaga

Jadual 1: Sejarah sistem penyimpanan tenaga utama. (Mitali et al., 2022)

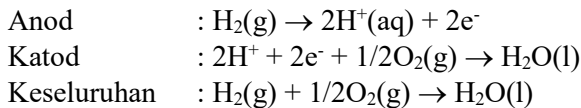
Year	Energy storage system	Description
1839	Fuel cell	In 1839, Sir William Robert Grove invented the first simple fuel cell. He mixed hydrogen and oxygen in the presence of an electrolyte and produced electricity and water.
1859	Lead acid battery	French physicist Gaston Planté invented the first practical version of a rechargeable battery based on lead-acid chemistry.
1883	Flywheel energy storage	The first FES was developed by John A. Howell in 1883 for military applications.
1899	Nickel-cadmium battery	Waldemar Jungner, a Swedish scientist, invented the nickel-cadmium battery, a rechargeable battery that has nickel and cadmium electrodes in a potassium hydroxide solution.
1907	Pumped hydro energy storage	The first use of pumped storage was in 1907 at the Engewelther pumped storage facility near Schaffhausen, Switzerland.
1960	Sodium sulphur battery	The first Sodium sulphur battery was originally developed by the Ford Motor Company in the 1960s.
1969	Superconducting magnetic energy storage	In 1969, Ferrer originally introduced the superconducting magnetic energy storage system as a source of energy to accommodate the diurnal variations of power demands.
1977	Borehole thermal energy storage	In 1977, a 42 borehole thermal energy storage was constructed in Sigtuna, Sweden.
1978	Compressed air energy storage	The world's first utility-scale CAES plant with a capacity of 290 MW was installed in Germany in 1978.
1982	Supercapacitor	The Pinnacle Research Institute (PRI) developed the first supercapacitor with low internal resistance in 1982 for military applications.
1983	Vanadium redox flow battery	The vanadium redox flow battery was pioneered mainly by M. Skyllas-Kazacos and coworkers in 1983 at the University of New South Wales, Australia.
1983	Polysulfide Bromide flow battery	A bromine-polysulfide flow battery was first reported by Remick et al. in 1983.
1991	Li-ion battery	In 1991, Sony released the first commercial lithium-ion battery.
2007	Paper Battery	Dr. Robert Linhardt, Dr. Onkaram Nalamasu and Dr. Pulickel Ajayan from Rensselaer Polytechnic Institute, New York first invented the concept of paper batteries.

Jadual 2: Klasifikasi sistem penyimpanan tenaga utama mengikut jenis tenaga. (Mitali et al., 2022)

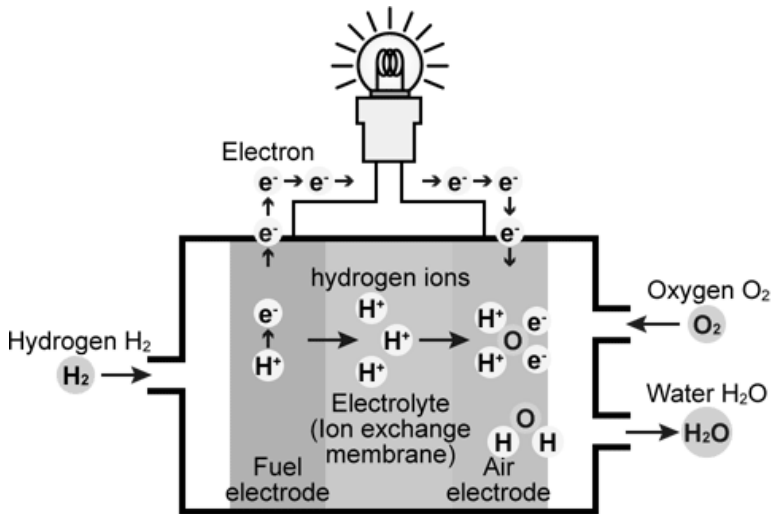
Classification	Criteria
Thermal energy storage (TES)	Sensible heat storage (SHS) <ul style="list-style-type: none"> • Liquid • Solid Latent heat storage (LHS) or phase change materials (PCM) Thermochemical energy storage (TCES) Pumped thermal energy storage (PTES)
Mechanical energy storage (MES)	Pumped hydro energy storage (PHES) Gravity energy storage (GES) Compressed air energy storage (CAES) Flywheel energy storage (FES)
Chemical energy storage (CES)	Hydrogen energy storage Synthetic natural gas (SNG) Storage Solar fuel
Electrochemical energy storage (EcES)	Battery energy storage (BES) <ul style="list-style-type: none"> • Lead-acid • Lithium-ion • Nickel-Cadmium • Sodium-sulphur • Sodium ion • Metal air • Solid-state batteries Flow battery energy storage (FBES) <ul style="list-style-type: none"> • Vanadium redox battery (VRB) • Polysulfide bromide battery (PSB) • Zinc-bromine (ZnBr) battery Paper battery Flexible battery
Electrical energy storage (ESS)	Electrostatic energy storage <ul style="list-style-type: none"> • Capacitors • Supercapacitors Magnetic energy storage <ul style="list-style-type: none"> • Superconducting magnetic energy storage (SMES)
Others	Hybrid energy storage

2.1 SEL BAHAN API

Sel bahan api (fuel cell) pertama ditemui pada tahun 1932, di mana ia digunakan sebagai peranti berkecekapan tinggi yang menukarkan tenaga kimia secara langsung kepada tenaga elektrik. Sel bahan api terdiri daripada katod, anod, pemisah dan elektrolit, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2. Sel bahan api menjana elektrik melalui tindak balas elektrokimia yang dikenali sebagai elektrolisis songsang. Ia menghasilkan elektrik secara langsung daripada tindak balas kimia antara hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Gas H_2 dihantar ke elektrolit di bahagian anod, di mana molekul hidrogen dipecahkan menjadi ion hidrogen dan elektron. Ion hidrogen menuju ke katod melalui membran elektrolit berliang, manakala elektron dipaksa melalui litar, menjana arus elektrik. Di katod, gas O_2 menerima elektron daripada litar untuk menghasilkan ion oksigen (O^{2-}). Ion hidrogen dan oksigen dalam elektrolit kemudian bergabung untuk menghasilkan air. Persamaan kimia sel bahan api boleh dirumuskan seperti di bawah:



Sel bahan api dikenali sebagai mesra alam kerana ia hanya menghasilkan air sebagai produk sampingan dalam proses pertukaran tenaga kimia kepada tenaga elektrik. Selain gas hidrogen, bahan api seperti propana, gas asli dan diesel juga boleh dibekalkan kepada sel bahan api (Corbo et al., 2009).

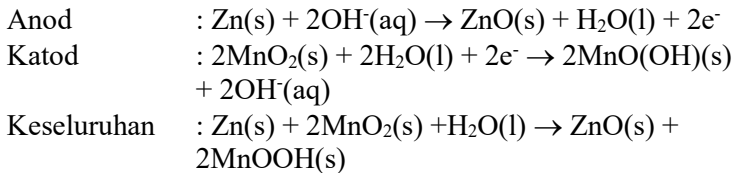


Rajah 2: Mekanisme kerja sel bahan api.
(Sumber: https://www.matsusada.com/column/words-fuel_cell.html)

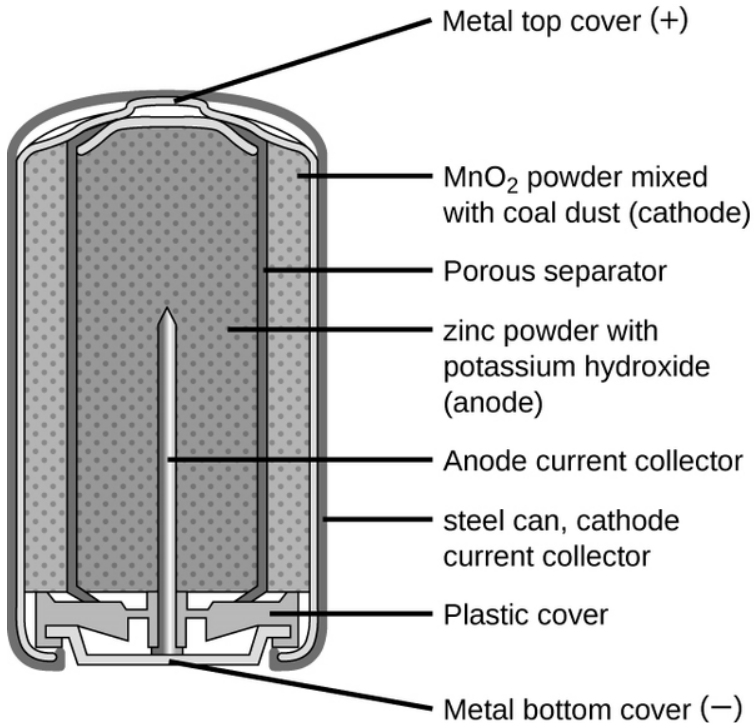
2.2 BATERI

Bateri terdiri daripada dua atau lebih sel elektrokimia yang menukar tenaga kimia kepada tenaga elektrik, berfungsi sebagai peranti penukaran dan penyimpanan tenaga. Walau bagaimanapun, ia mempunyai bekalan bahan pengoksida yang terhad, yang menghadkan tempoh penggunaannya. Komponen utama bateri terdiri daripada 1) elektrod yang berfungsi sebagai pelantar untuk tindak balas kimia berlaku, biasanya diperbuat daripada bahan konduktor elektrik seperti zink atau karbon; 2) elektrolit dalam bentuk cecair atau pepejal, yang berfungsi memudahkan pergerakan ion antara elektrod; 3) pemisah atau membran untuk mencegah liar pintas serta membenarkan aliran ion berlaku. Bateri boleh dikelaskan kepada bateri primer dan bateri sekunder. Perbezaan utama antara kedua-duanya adalah keupayaan untuk dicas semula; dimana bateri primer tidak boleh dicas semula manakala bateri sekunder boleh dicas semula. Kehidupan harian kita dipenuhi dengan kedua-dua jenis bateri ini, seperti bateri

primer (contohnya bateri alkali) yang dipakai untuk jam dinding atau alat pengawal jauh. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3, bahagian anod (terminal positif) terdiri daripada serbuk zink (Zn) yang dibasahkan dengan elektrolit kalium oksida (KOH). Tindak balas kimia pada anod adalah pengoksidaan di mana zink dioksidakan kepada zink oksida (ZnO) dengan pelepasan 2 elektron. Elektron yang dilepaskan akan mengalir melalui litar elektrik ke arah katod. Pada bahagian katod (terminal negatif), ia terdiri daripada serbuk manganese oksida (MnO₂) yang dicampurkan dengan serbuk karbon/arang untuk meningkatkan arus elektrik. Tindak balas penurunan berlaku pada katod, di mana elektron yang diterima bertindak dengan mangan dioksida untuk menghasilkan mangan oksid-hidroksida (MnO(OH)). Tindak balas kimia keseluruhan dalam bateri alkali boleh dirumuskan seperti berikut:



Tindak balas kimia dalam bateri alkali adalah tidak boleh berbalik, dan inilah sebabnya bateri ini tidak boleh dicas semula.

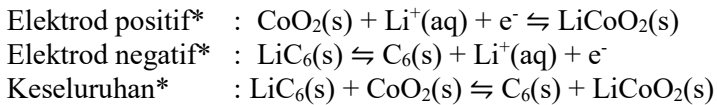


Rajah 3: Kandungan bateri alkali.

(Sumber: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CNX_Chem_17_05_AlkalineBat.png)

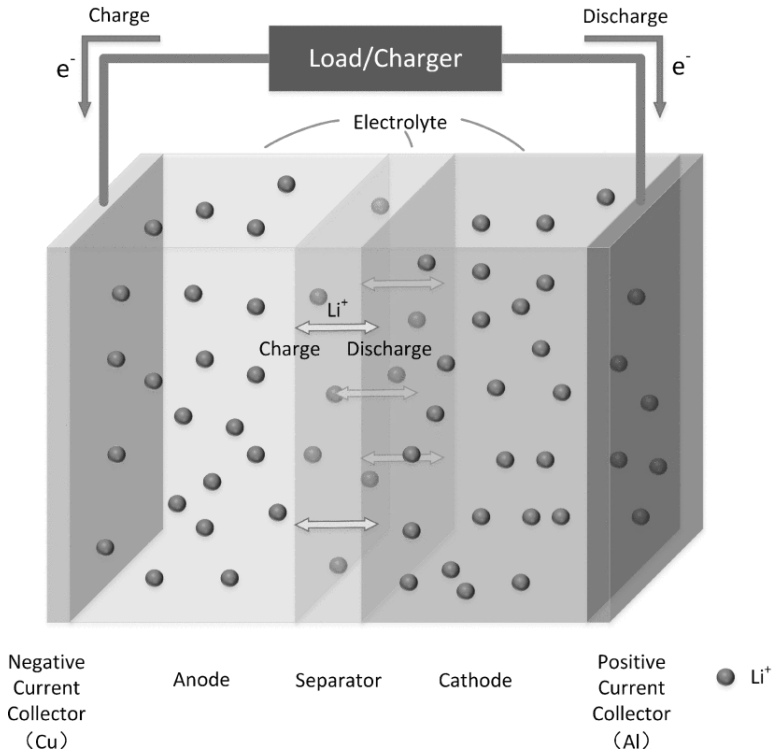
Bateri sekunder seperti bateri ion litium sering digunakan dalam peranti berteknologi tinggi seperti telefon pintar, komputer riba dan juga kenderaan elektrik. Bateri ion litium terdiri daripada elektrod positif dan elektrod negatif yang dipisahkan oleh membran. Litium kobalt oksida (LiCoO₂) biasanya digunakan sebagai elektrod positif, manakala grafit (C₆) digunakan sebagai elektrod negatif. Semasa penggunaan bateri ion litium untuk membekalkan elektrik, elektrod negatif bertindak sebagai anod di mana tindak balas kimia pengoksidaan berlaku. Ion litium yang dilepaskan dari anod akan bergerak ke elektrod positif (katod) melalui elektrolit. Pada masa yang sama, elektron yang dilepaskan dari anod akan bergerak melalui litar elektrik menuju ke arah

elektrod positif (katod). Di elektrod positif (katod), kobalt oksida menerima ion litium dan elektron, lalu diturunkan menjadi litium kobalt oksida (LiCoO_2). Proses kritikal dalam bateri ion litium adalah keupayaan ion litium untuk berinterkalasi ke dalam LiCoO_2 dan C_6 . Interkalasi ini membolehkan ion litium dipisahkan dari elektrod semasa proses pengecasan. Ketika bateri dicas, bekalan elektrik luaran digunakan untuk memaksa tindak balas kimia terbalik berlaku. Elektrod positif bertindak sebagai anod di mana ion litium dan elektron akan dikeluarkan dari LiCoO_2 . Ion litium kemudian bergerak dalam arah yang bertentangan sewaktu penggunaan bateri, menuju ke elektrod negatif di mana ion litium akan berinterkalasi ke C_6 untuk menghasilkan LiC_6 . Prinsip kerja bateri ion litium boleh digambarkan seperti dalam Rajah 4, dan persamaan kimia bagi tindak balasnya boleh dirumuskan seperti bawah:



(Persamaan dari kiri ke kanan = proses discas ; dari kanan ke kiri = proses cas)

Selain daripada LiCoO_2 dan C_6 , pelbagai jenis bahan termaju juga dikaji sebagai elektrod demi meningkatkan kapasiti bateri ion litium. Untuk anod, tin oksida/grafin (SnO_2/rGO) (Li et al., 2024), silikon-karbon ($\text{Si}@C$) (Ji et al., 2024) dan kobalt disulfida (CoS_2) (Yan et al., 2005) pernah dicadangkan sebagai bahan gantian untuk grafit. Manakala pada katod, $\text{Li}[\text{Ni}_{0.91}\text{Co}_{0.09}]\text{O}_2$ (Sun, 2021) dan rangkaian organik kovalen (Manman Wu, 2020) menunjukkan potensi yang tinggi untuk meningkatkan pencapaian bateri ion litium.

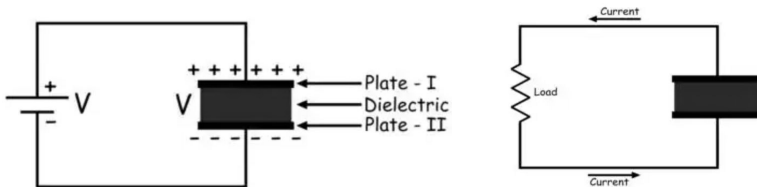


Rajah 4: Prinsip kerja bateri ion litium (Zhang et al., 2018).

2.3 KAPASITOR

Kapasitor terdiri daripada dua plat logam yang dipisahkan oleh lapisan dielektrik yang tidak mengalirkan arus elektrik. Ia menyimpan tenaga elektrik dengan menggunakan medan elektrostatik. Semasa operasi, apabila sumber voltan dikenakan pada plat logam, satu plat akan dicas dengan elektrik manakala cas bertentangan akan diinduksi pada plat yang satu lagi. Dengan ini, plat logam yang disambungkan kepada terminal positif akan mengumpulkan positif cas, manakala plat logam yang disambungkan kepada terminal negatif akan mengumpulkan negatif cas dari sumber voltan. Kapasitor mengumpul kuantiti cas yang maksimum, bergantung kepada luas permukaan plat logam

dan sumber voltan. Apabila sumber voltan dikeluarkan dan kapasitor bertindak sebagai sumber tenaga, arus akan mengalir dari plat logam (dari positif ke negatif) sehingga kehabisan cas (Rajah 5).



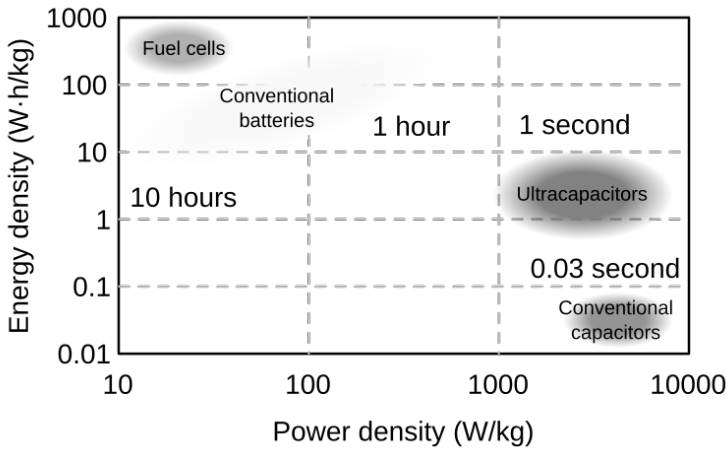
Rajah 5: (kiri) Proses pengecasan kapasitor; (kanan) Proses discas kapasitor. (Sumber: <https://www.electrical4u.com/working-principle-of-a-capacitor/>)

Penggunaan kapasitor bermula pada tahun 1876, apabila kertas lilin digunakan untuk memisahkan kepingan aluminum, dan ia digunakan pada radio. Sejak itu, pelbagai jenis bahan dielektrik digunakan dan penggunaannya adalah pada kamera, komponen litar, komputer dan banyak lagi aplikasi di mana kuasa tinggi diperlukan. Penggunaan kapasitor dan komponennya telah dirumuskan dalam Jadual 3. Kekuatan kapasitor berbanding dengan sistem penyimpanan tenaga seperti bateri dan sel bahan api adalah kepadatan kuasa yang tinggi, yang membolehkan tenaga dibekalkan dengan pantas dari kapasitor. Namun, kelemahan kapasitor ialah ia mempunyai kepadatan tenaga yang rendah dan hanya mampu membekalkan kuantiti tenaga yang sedikit. Perbandingan antara sistem penyimpanan tenaga konvensional sel bahan api, bateri dan kapasitor boleh dilihat pada Ragone plot (Rajah 6). Kepadatan tenaga merujuk kepada jumlah tenaga yang disimpan dalam sistem tertentu atau kawasan ruang per unit isi padu (Wh/m^3) atau jisim (W/kg). Ini adalah ukuran tentang berapa banyak tenaga yang dapat diekstrak daripada kuantiti bahan tertentu. Kepadatan tenaga yang lebih tinggi bermakna lebih banyak tenaga dapat disimpan dalam ruang yang lebih kecil atau lebih ringan. Sebaliknya, kepadatan kuasa merujuk kepada jumlah kuasa (kadar pemindahan tenaga) yang dihasilkan atau digunakan per unit isi padu (W/m^3) atau jisim (W/kg). Ia adalah ukuran tentang berapa banyak kuasa yang dapat

dihantar atau diekstrak daripada sistem berhubung dengan saiz atau beratnya. Kepadatan kuasa yang lebih tinggi menunjukkan bahawa sistem dapat menghantar lebih banyak kuasa atau membekalkan tenaga pada kadar yang tinggi dalam ruang yang lebih kecil atau lebih ringan. Jelas dilihat bahawa sistem sel bahan api dan bateri mempunyai kepadatan tenaga yang tinggi, yang bermaksud mereka berupaya menyimpan jumlah tenaga yang tinggi dengan jisim yang rendah. Ini amat penting untuk aplikasi yang memerlukan mobiliti seperti kenderaan elektrik dan komputer riba. Namun, sistem sel bahan api dan bateri mempunyai kepadatan kuasa yang rendah, bermaksud mereka hanya dapat membekalkan tenaga pada kadar yang rendah. Ini merupakan kelemahan untuk aplikasi elektronik yang memerlukan bekalan tenaga tinggi untuk tempoh yang singkat, seperti penjana jentera dan enjin. Dalam konteks ini, dapat dilihat bahawa kapasitor berada di kedudukan dengan kepadatan kuasa yang tinggi tetapi kepadatan tenaga yang rendah dalam Ragone plot. Ini bermaksud kapasitor berupaya membekalkan tenaga pada kadar yang tinggi, tetapi dalam kuantiti yang rendah. Oleh itu, komuniti sains telah berusaha untuk menghasilkan sistem penyimpanan yang mampu memenuhi keperluan ruang tengah di Ragone plot, yakni dengan kepadatan tenaga serta kepadatan kuasa yang tinggi. Superkapasitor, juga dikenali sebagai ultrakapasitor, merupakan sistem penyimpanan tenaga yang berupaya memenuhi kriteria tersebut.

Jadual 3: Penggunaan kapasitor dan komponennya
(Nishino, 1996)

Type	Dielectric material	Electrode material	Voltage (kV)	Capacitance (μF)	Applications
Paper capacitor (1876)	Wax-impregnated paper	Aluminium sheet	0.100-1.000	0.001 to 2.000	Radio receivers
Silver mica capacitor (1909)	Mica	Silver	0.100-1.000	4.7×10^{-3}	In high frequency tuned circuits, such as filters and oscillators
Ceramic capacitor	Ceramic	Metal	0.016-15.000	1×10^{-5} -100	Transmitter stations, induction furnaces, power circuit breakers, printed circuit boards
Aluminium electrolytic capacitors (1892)	Aluminium oxide	Pure aluminium foil	0.004-0.630	$0.1-2.7 \times 10^6$	Flash capacitor for camera flashes, motor start capacitors for ac motors, energy storage for airbags, photoflash devices
Film capacitors (1944)	Thin plastic film	Pure aluminium foil	0.050-2.000	0.001-30.000	Power electronics devices, phase shifters, X-ray flashes, decoupling capacitors and filters
Glass capacitors	Glass	Aluminium	0.025-0.050	2.7×10^{-4} -0.1	Critical military and space programs
Tantalum capacitors (1930)	Tantalum oxide	Tantalum metal	0.002-0.500	0.001-72.000	Power supply filtering on computer motherboards and cell phones

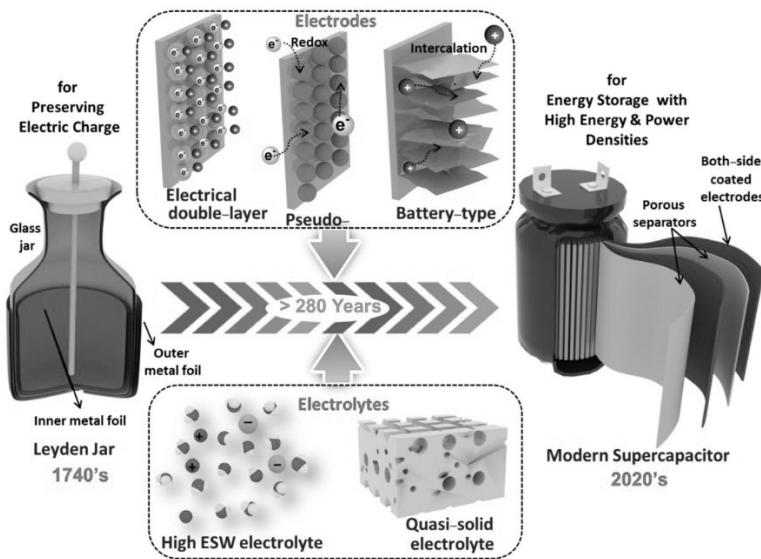


Rajah 6: Perbandingan kepadatan tenaga dan kuasa di dalam Ragone plot
 (Sumber: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Supercapacitors_chart.svg)

2.4 SUPERKAPASITOR

Sejarah superkapasitor bermula pada pertengahan abad ke-18 di mana konsep struktur lapisan berganda elektrik (EDL) dan pembentukan potensi elektrik di antara permukaan pepejal–elektrolit telah dicadangkan oleh H. von Helmholtz. Ini menjadi asas bagi mekanisme penyimpanan cas dan kapasitans lapisan berganda elektrik (EDLC). Hampir satu abad kemudian, EDLC dan proses cas–lepas ditunjukkan dalam sel elektrokimia eksperimen yang dibina oleh H. I. Becker untuk 'General Electrical Company' (Becker, n.d.). Penemuan ini membawa kepada superkapasitor komersial pertama yang berdasarkan EDLC, yang dihasilkan oleh Standard Oil Company di Ohio, yang kemudiannya diluluskan kepada Nippon Electrical Corporation (NEC) pada tahun 1971 untuk aplikasi teknologi komputer. Istilah 'Superkapasitor' pertama kali diperkenalkan oleh NEC, dan syarikat itu juga memasarkan peranti tersebut dengan nama tersebut. Selepas itu, istilah 'Superkapasitor' menjadi terkenal di Asia. Tidak lama kemudian, pada tahun 1982, 'Pinnacle Research Institute' (PRI) membangunkan sel elektrokimia berkuasa

tinggi berdasarkan oksida rutenium dan mengkomersialkannya dengan nama ‘PRI ultracapacitor’ yang dikenali dengan istilah alternatif ‘ultracapacitor’ di Amerika Utara (Bullard et al., 1989). Dalam beberapa dekad yang lalu, sistem penyimpanan tenaga elektrokimia telah berkembang dengan pesat melalui pengenalan konsep baru seperti pseudokapasitans (Choi et al., 2020), tingkah laku jenis bateri (Yu et al., 2019), dan arkitektur peranti asimetri dan hibrid (Dubal et al., 2015). Semua ini menuju kepada peranti penyimpanan tenaga generasi seterusnya yang berprestasi tinggi (Rajah 7). Secara amnya, superkapasitor boleh dibahagikan kepada 3 jenis (kapasitor lapisan berganda elektrik, pseudokapasitor dan kapasitor hibrid), mengikut mekanisme penyimpanan tenaga. Kesemuanya akan dibincangkan dengan lebih lanjut dalam buku ini.

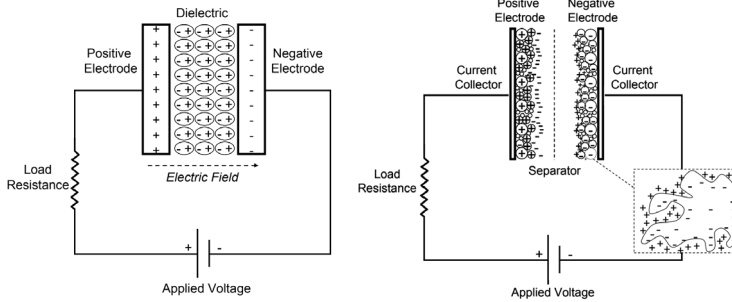


Rajah 7: Ilustrasi perkembangan superkapasitor untuk tempoh lebih dari 280 tahun (Lakshmi & Vedhanarayanan, 2023).

BAB TIGA

KAPASITOR LAPISAN BERGANDA ELEKTRIK (EDLC)

Proses penyimpanan tenaga di EDLC adalah mirip kepada kapasitor. Di EDLC, bahan berpermukaan tinggi digunakan sebagai elektrod demi mengatasi masalah plat logam yang berpermukaan rendah pada kapasitor. Selain itu, tiada dielektrik digunakan pada EDLC, malah ia digantikan dengan lapisan berganda elektrik yang terbentuk antara elektrod dan elektrolit (Rajah 8). EDLC terdiri daripada elektrolit, dua bahan penghantar elektrik yang berfungsi sebagai elektrod, serta pemisah. EDLC mampu menyimpan cas secara elektrostatik atau melalui proses bukan Faradik yang tidak memerlukan pemindahan cas antara elektrolit dan elektrod. Lapisan berganda elektrokimia adalah konsep penyimpanan tenaga yang digunakan oleh EDLC. Apabila voltan dikenakan, ion dalam elektrolit akan mengalir dan berkumpul di atas elektrod yang bercas bertentangan. Lapisan berganda cas telah dicipta untuk mencegah rekombinasi ion di elektrod. Bahan yang mempunyai permukaan spesifik yang tinggi biasanya digunakan pada EDLC, yang membolehkan pengumpulan kuantiti ion yang banyak pada permukaan elektrod, dan secara langsungnya meningkatkan kepadatan tenaga. Semasa proses discas, ion yang terkumpul di elektrod akan bergerak ke arah bertentangan dan arus akan bergerak mengikut litar luar. Proses penyimpanan tenaga di EDLC adalah proses bukan Faradik dan tidak melibatkan tindak balas kimia yang dapat mengubah fasa kimia elektrod. Justeru itu, EDLC mempunyai keupayaan untuk menahan jutaan kitaran berbanding bateri yang hanya mampu bertahan maksimum beberapa ribu kitaran.



Rajah 8: Proses penyimpanan tenaga pada kapasitor (kiri) dan superkapasitor (kanan).

3.1 BAHAN ELEKTROD EDLC

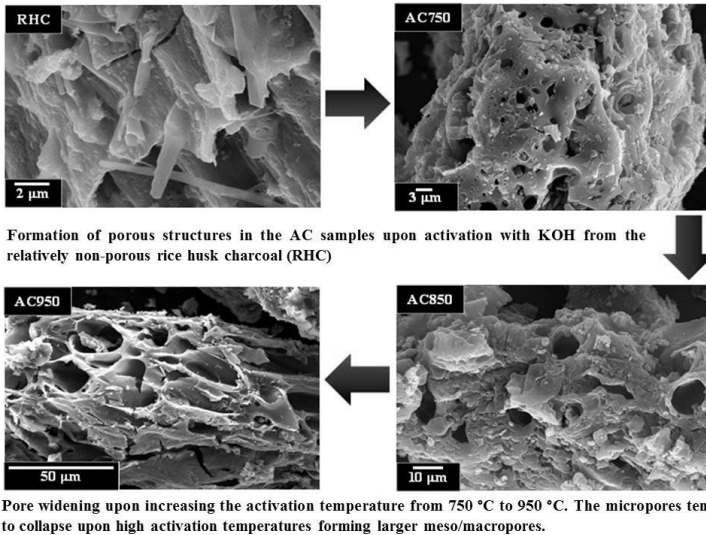
Penemuan bahan elektrod untuk EDLC bermula dengan General Electric yang menggunakan elektrod karbon berliang, berikutan penemuan tenaga terkandung dalam liang karbon. Penemuan penting bagi bahan elektrod untuk EDLC dilakukan secara tidak sengaja oleh Standard Oil Company di Ohio semasa menjalankan eksperimen pada sel bahan api. Arang aktif dijadikan sebagai bahan elektrod dan teknologi ini kemudiannya dikomersialkan oleh Nippon Electrical Corporation (NEC). Sejak itu, pelbagai jenis karbon digunakan sebagai bahan elektrod EDLC kerana karbon mempunyai ciri-ciri istimewa, termasuk: (i) luas permukaan yang tinggi (ii) kos yang rendah (iii) ketersediaan (iv) teknologi pengeluaran elektrod yang sudah mantap. Mekanisme penyimpanan yang digunakan oleh bahan karbon adalah lapisan berganda elektrokimia yang terbentuk antara permukaan elektrod dan elektrolit. Oleh itu, kapasitans bergantung kepada luas permukaan yang dapat diakses oleh ion elektrolit. Faktor penting yang mempengaruhi prestasi elektrokimia termasuk luas permukaan spesifik, bentuk dan struktur liang, pengagihan saiz liang, fungsi permukaan, dan kekonduksian elektrik (Bo et al., 2012). Luas permukaan spesifik yang tinggi dalam bahan karbon menghasilkan keupayaan tinggi untuk pengumpulan cas di antara elektrod dan elektrolit. Selain saiz liang dan luas permukaan spesifik yang tinggi, pembentukan struktur nano bahan karbon

juga dipertimbangkan untuk meningkatkan prestasi EDLC. Contoh bahan karbon yang digunakan sebagai bahan elektrod termasuk karbon aktif, aerogel karbon, nanotube karbon, graphene, dan lain-lain.

3.1.1 Karbon Aktif

Bahan elektrod yang paling banyak digunakan adalah karbon aktif (AC) dan ini disebabkan oleh luas permukaan yang besar, sifat elektrik yang baik, dan kos yang sederhana. AC boleh dihasilkan melalui pengaktifan fizikal atau kimia dari pelbagai jenis bahan karbon (contohnya, kayu, arang, cengkerang, dan lain-lain). Pengaktifan fizikal melibatkan rawatan prekursor karbon pada suhu tinggi (700-1200 °C) dalam kehadiran gas pengoksidaan seperti wap, CO₂, dan udara. Dalam kes pengaktifan kimia, ia dilakukan pada suhu yang lebih rendah (400-700 °C) dengan menggunakan agen pengaktifan seperti natrium hidroksida, kalium hidroksida, zink klorida, dan asid fosforik. Bergantung pada kaedah pengaktifan dan prekursor karbon yang digunakan, AC mempunyai pelbagai sifat fiziko-kimia dengan luas permukaan yang sangat baik, mencapai sehingga 3000 m²/g. Rajah 9 menunjukkan imej mikroskop elektron sampel karbon aktif daripada sekam padi yang diaktifkan pada suhu yang berbeza untuk menghasilkan saiz liang yang luas yang terdiri daripada mikropori (<2 nm), mesopori (2–50 nm), dan makropori (>50 nm). Walaupun luas permukaan memainkan peranan penting dalam penyimpanan cas di EDLC, kajian telah menunjukkan bahawa ketiadaan hubungan linear antara kapasitans dan luas permukaan. AC yang mempunyai luas permukaan tinggi sekitar 3000 m²/g hanya membekalkan kapasitans yang rendah. Ini menunjukkan bahawa tidak semua liang berkesan semasa pengumpulan cas. Oleh itu, walaupun luas permukaan dalam EDLC adalah parameter penting untuk prestasi, beberapa aspek lain juga perlu dipertimbangkan dalam bahan karbon yang mempengaruhi prestasi elektrokimia dengan ketara, seperti pengagihan saiz liang (Iro et al., 2016). Selain itu, pengaktifan yang berlebihan boleh menghasilkan isipadu liang yang besar, yang seterusnya membawa kepada kelemahan seperti kekonduksian yang rendah

dan ketumpatan bahan yang rendah, yang akan mengakibatkan kepadatan tenaga yang rendah dan kehilangan keupayaan kuasa.

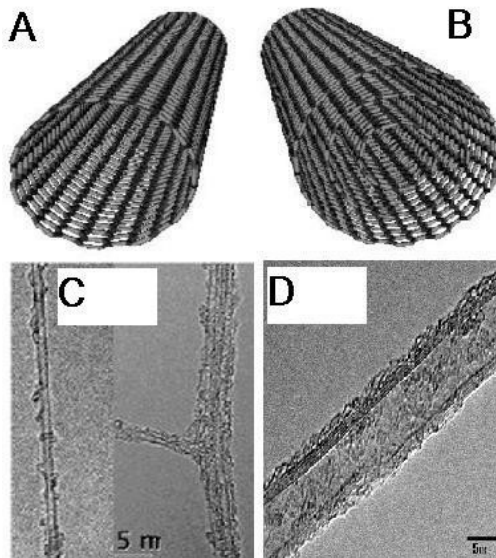


Rajah 9: Imej mikroskop elektron sampel karbon aktif daripada sekam padi yang diaktifkan pada suhu berbeza. (Teo et al., 2016)

3.1.2 Nanotub Karbon (CNT)

Dengan penemuan nanotube karbon (CNT), terdapat kemajuan yang signifikan dalam sains dan kejuruteraan bahan karbon. Salah satu faktor yang menentukan kepadatan kuasa dalam superkapasitor adalah rintangan keseluruhan komponen. Banyak perhatian diberikan kepada CNT sebagai bahan elektrod superkapasitor kerana struktur liangnya yang unik, kestabilan mekanikal dan termal yang baik, serta sifat elektrik yang unggul. Nanotube karbon dihasilkan melalui penguraian pemangkinan beberapa hidrokarbon. Dengan memanipulasi pelbagai parameter, adalah mungkin untuk menghasilkan nano struktur dalam pelbagai bentuk dan juga mengawal struktur kristal mereka. Berbeza dengan elektrod berasaskan karbon yang lain, nanotube karbon mempunyai mesopori yang saling bersambung, membolehkan pengalihan cas yang berterusan yang

memanfaatkan hampir semua luas permukaan yang boleh diakses. CNT mempunyai rintangan elektrik yang lebih rendah berbanding karbon aktif kerana ion elektrolit dapat meresap ke dalam rangkaian mesopori. CNT boleh dikategorikan sebagai nanotube karbon dinding tunggal (SWCNT) atau nanotube karbon dinding berganda (MWCNT), dan kedua-duanya biasanya diterokai sebagai bahan elektrod superkapasitor (Rajah 10). CNT dianggap baik untuk EDLC kerana kekonduksian elektriknya yang baik dan luas permukaan yang mudah diakses. Selain itu, mereka memberikan sokongan yang baik untuk bahan aktif kerana ketahanan mekanikal yang tinggi dan rangkaian tubular terbuka. Secara amnya, CNT mempunyai luar permukaan kecil ($<500 \text{ m}^2/\text{g}$) yang membawa kepada kepadatan tenaga yang rendah berbanding dengan karbon aktif. CNT boleh diaktifkan secara kimia dengan natrium hidroksida untuk meningkatkan kapasitans spesifiknya. Kaedah ini boleh membawa kepada peningkatan yang ketara dalam luas permukaan CNT (dari dua hingga tiga kali ganda) sambil mengekalkan morfologi nanotubularnya.

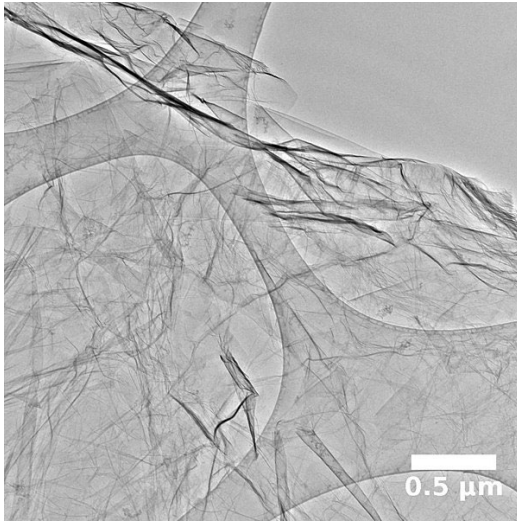


Rajah 10: Skematik (a) SWCNT (b) MWCNT; Imej mikroskop elektron transmisi (TEM) untuk (c) SWCNT (d) MWCNT. (Eatemadi et al., 2014)

3.1.3 Grafena

Grafena, yang merupakan lapisan karbon setebal satu atom dengan struktur 2D (Rajah 11), telah muncul sebagai bahan karbon unik dengan potensi besar untuk aplikasi dalam peranti penyimpanan tenaga kerana ciri-cirinya yang luar biasa seperti kekonduksian elektrik yang tinggi, kestabilan kimia, dan luas permukaan yang besar. Grafena dicadangkan sebagai bahan untuk aplikasi superkapasitor, kerana apabila ia digunakan sebagai bahan elektrod superkapasitor, ia tidak bergantung kepada pengagihan liang dalam keadaan pepejal, berbeza dengan bahan karbon lain seperti karbon aktif, nanotube karbon, dan sebagainya. Di antara semua bahan karbon yang digunakan sebagai bahan elektrod untuk EDLC, grafena yang baru dikembangkan mempunyai luas permukaan spesifik yang lebih tinggi sekitar $2630 \text{ m}^2/\text{g}$. Jika keseluruhan permukaan grafena dimanfaatkan sepenuhnya, ia mampu mencapai kapasitans sehingga 550 F/g . Satu lagi kelebihan menggunakan grafena sebagai bahan elektrod adalah kedua-dua permukaan utama lembaran grafena adalah luar dan mudah diakses oleh elektrolit. Terdapat banyak kaedah berbeza yang sedang diteliti untuk penghasilan pelbagai jenis grafena, seperti pemendapan wap kimia, eksfoliasi mikromekanikal, kaedah pelepasan lengkung, penguraian nanotube karbon, pertumbuhan epitaxial, kaedah elektrokimia dan kimia, serta kaedah interkalasi dalam grafit.

Kapasitor Lapisan Berganda Elektrik (EDLC)

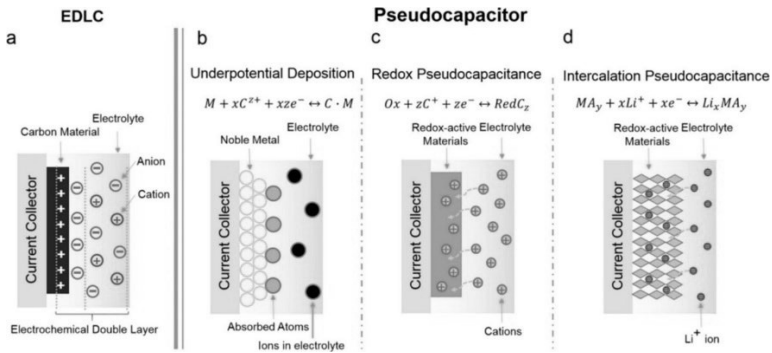


Rajah 11: Imej mikroskop elektron transmisi untuk sampel grafena.
(Sumber: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Graphene_HRTEM.jpg)

BAB EMPAT

PSEUDOKAPASITOR

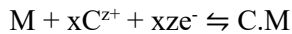
Berlainan dengan EDLC yang menyimpan cas secara elektrostatik dan bukan Faradik, pseudokapasitor menyimpan cas secara Faradik dengan melibatkan pemindahan cas di antara elektrolit dan elektrod. Oleh kerana pemindahan cas berlaku, kepadatan tenaga pada pseudokapasitor lebih tinggi berbanding dengan EDLC. Ini juga mengurangkan kestabilan jangka panjangnya kerana pemindahan elektron mengubah keadaan valens pada bahan elektrod. Pemindahan cas pada pseudokapasitor boleh dibahagikan kepada tiga jenis, iaitu deposisi di bawah potensi, pseudokapasitans redoks dan pseudokapasitans interkalasi (Rajah 12).



Rajah 12: Perbezaan penyimpanan cas untuk (a) EDLC, pseudokapasitor jenis (b) deposisi bawah potensi, (c) pseudokapasitans redoks dan (d) pseudokapasitans interkalasi. (Shao et al., 2018)

4.1 DEPOSISI DI BAWAH POTENSI

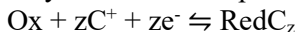
Mekanisme deposisi di bawah potensi melibatkan penyerapan/pelepasan Faradaic pada logam, yang berasal dari permukaan yang boleh diterbalikkan. Ion logam biasanya membentuk ion di bawah potensi apabila mereka mencipta lapisan mono pada permukaan dengan potensi redoks yang lebih tinggi. Kinetik elektron yang cepat dalam proses elektrokimia, dipermudahkan oleh spesies yang terserap di permukaan, menyebabkan deposisi di bawah potensi. Ini mengakibatkan penyepuhan logam pada bahan serta elektrod logam yang mendasari, yang membawa kepada pemindahan elektron separa. Contohnya, pseudokapasitans deposisi di bawah potensi ditunjukkan oleh deposisi Pb^{2+} pada permukaan emas (Au). Mekanisme di bawah potensi bagi logam berharga boleh dijelaskan melalui persamaan kimia berikut:



Di mana M mewakili atom logam, z mewakili valensi adsorben, x mewakili bilang adsorben, C mewakili adsorben dan xze^{-} mewakili bilangan elektron yang ditukar. Pemindahan elektron ini menyumbang kepada pseudokapasitans dan seterusnya meningkatkan kepadatan tenaga.

4.2 PSEUDOKAPASITANS REDOKS

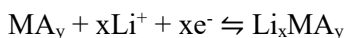
Pseudokapasitans redoks dihasilkan melalui reaksi redoks yang melibatkan kinetik pemindahan elektron Faradik di antara permukaan elektrod–elektrolit. Pseudokapasitans ini telah diperhatikan dalam bahan yang merangkumi beberapa keadaan pengoksidaan seperti +2, +3, dan +4. Dalam mekanisme pseudokapasitans redoks, pemindahan elektron berlaku antara spesies yang dioksidakan dan yang diturunkan. Kation di elektrolit akan diserap ke spesies teroksida semasa reaksi redoks yang cepat dan boleh diterbalikkan ini, dan proses kimia ini boleh dinyatakan melalui persamaan berikut:



Di mana C mewakili kation di elektrolit, ze^- mewakili bilangan electron terlibat dalam redoks. Pseudokapasitans redoks adalah biasa ditunjukkan oleh bahan elektrod yang bersifat logam oksida di mana ion dalam elektrolit terserap ke permukaan logam oksida dan menjalani proses pemindahan cas Faradik.

4.3 PSEUDOKAPASITANS INTERKALASI

Pseudokapasitans interkalasi disebabkan oleh kation yang berinterkalasi pada lapisan atau terowong elektrod, dan membawa kepada pemindahan cas Faradaic tanpa perubahan fasa kristalografi. Berbeza dengan reaksi redoks permukaan, pseudokapasitans interkalasi lebih banyak muncul dari elektrod yang lebih tebal. Proses pseudokapasitans interkalasi boleh dijelaskan melalui persamaan kimia berikut:



Di mana xe^- mewakili kuantiti cas yang dipindah, MA_y mewakili lapisan pada bahan elektrod. Selain itu, lapisan kristal di dalam bahan elektrod membolehkan ion logam alkali berinterkalasi dengan kekangan tenaga yang minimum dan seterusnya membawa kepada pengubahsuaian yang sedikit pada bahan elektrod.

4.4 OKSIDA LOGAM

Oksida logam menawarkan alternatif lain sebagai bahan dalam pembuatan elektrod untuk superkapasitor kerana ia menunjukkan kapasitans spesifik yang tinggi melalui pseudokapasitans dan rintangan yang rendah. Ini menjadikannya lebih mudah untuk membina superkapasitor dengan tenaga dan kuasa yang tinggi. Oksida logam yang biasa digunakan termasuk nikel oksida (NiO), rutenium dioksida (RuO₂), mangan dioksida (MnO₂), dan kobalt oksida (IrO₂). Kos pengeluaran yang lebih rendah serta penggunaan elektrolit yang lebih lembut menjadikannya alternatif yang praktikal.

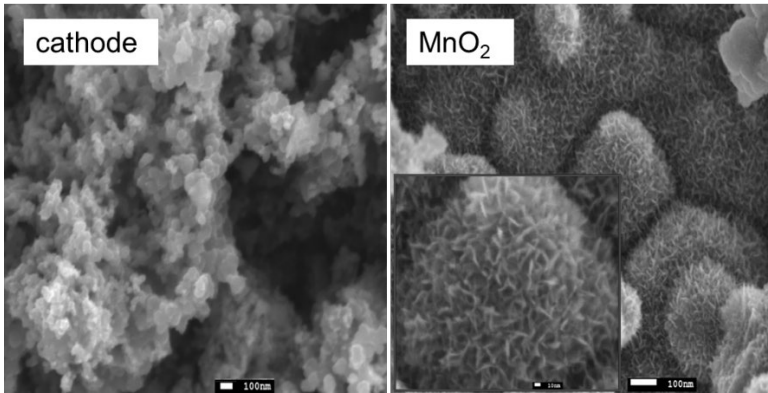
4.4.1 Ruthenium dioksida (RuO_2)

RuO_2 , dalam kedua-dua bentuk amorfus dan kristalin, mempunyai gabungan ciri unik seperti aktiviti pemangkin, kekonduksian logam, sifat pengurangan-oksidasi elektrokimia, kestabilan kimia dan terma yang tinggi, serta tingkah laku pengeluaran medan. Dengan sifat-sifat ini, RuO_2 digunakan dalam pelbagai aplikasi seperti elektronik, resistor, filem ferroelektrik, dan pembangunan litar terintegrasi. Aplikasi terbaru RuO_2 adalah sebagai bahan elektrod dalam superkapasitor. Di antara banyak oksida logam yang digunakan sebagai bahan elektrod, RuO_2 telah mencapai kejayaan tertinggi kerana kelebihan seperti hayat kitaran yang panjang, julat potensi yang luas dengan kapasitans spesifik yang tinggi, reaksi pengurangan-oksidasi yang sangat boleh dibalikkan, dan kekonduksian tinggi. Untuk aplikasi superkapasitor, RuO_2 dihasilkan secara elektrokimia menggunakan kaedah elektrodposisi. Elektrod yang dihasilkan stabil untuk sejumlah besar kitaran dan menghasilkan kapasitans spesifik sebanyak 498 F/g pada kadar imbasan 5 mV/s.

4.4.2 Mangan Dioksida (MnO_2)

MnO_2 telah menarik banyak minat penyelidikan kerana sifat fizikal dan kimianya yang unik, dengan pelbagai aplikasi dalam pertukaran ion, pemangkin, biosensor, penyimpanan tenaga, dan penyerapan molekul. Minat khusus diberikan kepada MnO_2 sebagai bahan elektrod untuk superkapasitor disebabkan oleh kosnya yang rendah, prestasi kapasitif yang cemerlang dalam elektrolit akueus, dan sifatnya yang mesra alam. MnO_2 mempunyai pelbagai valensi yang menyumbang kepada pseudokapasitans. Dalam era di mana ekonomi kitaran (*Circular Economy*) semakin ditekankan, bahan yang boleh dikitar semula sering dikaji sebagai bahan elektrod superkapasitor. Dalam satu kajian, elektrod mangan daripada bateri zink-karbon terpakai diaktifkan semula ke fasa MnO_2 . Proses pengaktifan kimia ini berjaya menukarkan morfologi asal bahan mangan terpakai daripada keadaan aglomerat kepada MnO dalam struktur bunga nano (Rajah 13). Morfologi MnO_2 selepas pengaktifan menunjukkan luas permukaan yang lebih besar dan membekalkan

penyimpanan cas 12 kali ganda lebih tinggi berbanding bahan mangan dalam bateri primer terpakai. Penemuan ini penting dalam mewujudkan ekonomi kitaran untuk bahan bateri primer, di mana ia dapat diproses dan digunakan semula.



Rajah 13: Pengaktifan semula katod bateri alkali kepada bunga nano MnO_2 . (Ali et al., 2014)

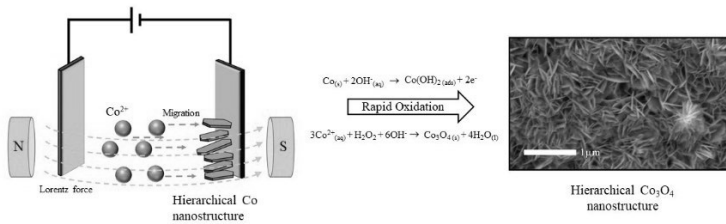
4.4.3 Kobalt Oksida (Co_3O_4)

Kobalt oksida (Co_3O_4) telah menetapkan dirinya sebagai pilihan yang menonjol di antara bahan elektrod kerana beberapa sifat yang menguntungkan. Kawasan permukaan yang tinggi, kemudahan dalam penghasilan, kestabilan kimia, dan ciri morfologi yang baik menjadikannya sesuai untuk pelbagai aplikasi, terutamanya dalam superkapasitor. Selain penyimpanan tenaga, Co_3O_4 juga berfungsi dengan baik sebagai elektrod kerja dalam sensor, pemangkin heterogen, peranti elektrokrom, dan bahan magnetik.

Pengaruh morfologi terhadap prestasi elektrod berasaskan Co_3O_4 adalah signifikan. Bentuk yang berbeza—seperti mesopori, nanokub, nanosfera, dan nanorod—boleh menghasilkan tingkah laku elektrokimia yang berbeza. Selain itu, faktor seperti saiz kristal, nisbah aspek, orientasi, dan ketumpatan kristal adalah penting untuk mengoptimumkan prestasi elektrokimia. Memahami dan mengawal parameter ini dapat meningkatkan

kecekapan dan keberkesanan Co_3O_4 dalam pelbagai aplikasi teknologi.

Dalam pengembangan kobalt oksida sebagai bahan elektrod mampam, pelbagai sumber telah dikaji untuk penghasilan Co_3O_4 . Antaranya, bahan elektrod dari bateri ion litium terpakai telah dikaji sebagai salah satu sumber berpotensi untuk menghasilkan Co_3O_4 bagi kegunaan superkapasitor. Di bawah pengaruh medan magnet, ion kobalt boleh dielektrodeposisi ke atas elektrod dalam bentuk Co_3O_4 yang bermorfologi hirarkikal nano (Rajah 14). Morfologi ini dihasilkan kerana sifat kobalt yang ferromagnetik di bawah pengaruh medan magnet. Hasil kajian ini menunjukkan penambahbaikan penyimpanan cas sebanyak 4 kali ganda pada Co_3O_4 yang dikitar semula di bawah medan magnet, berbanding dengan yang dikitar semula tanpa medan magnet. Penemuan ini secara langsung menyumbang kepada ekonomi kitaran bateri ion litium yang boleh diguna semula sebagai sistem penyimpanan tenaga.



Rajah 14: Skematik menunjukkan elektrodeposisi Co_3O_4 di bawah medan magnet dan hasil Co_3O_4 dalam morfologi hirarkikal nano (Aboelazm et al., 2018).

4.5 POLIMER KONDUKTOR

Polimer konduktor telah mendapat perhatian yang besar sebagai bahan elektrod superkapasitor kerana penghasilannya yang mudah dan kos yang rendah. Berbanding dengan elektrod berasaskan karbon, ia menunjukkan ketahanan elektrik, kapasitans yang agak tinggi, dan rintangan siri setara yang lebih rendah. Superkapasitor yang menggunakan polimer sebagai bahan elektrod biasanya

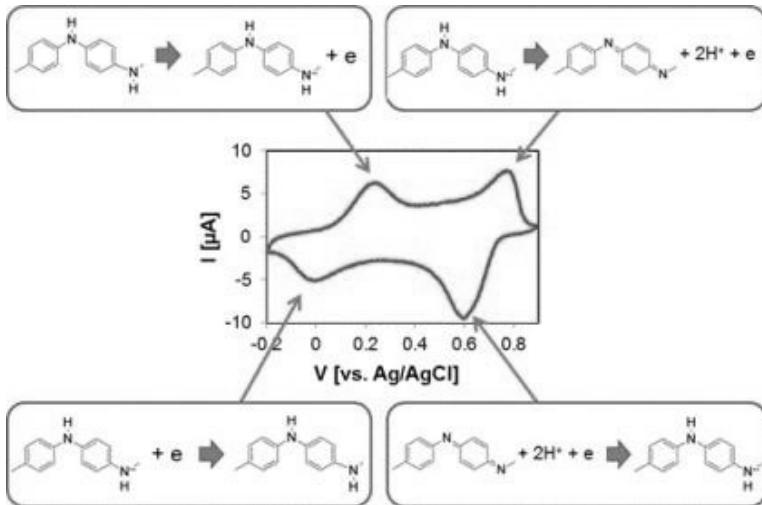
dibentuk dalam konfigurasi elektrod jenis n/p—di mana satu elektrod adalah n (bercas negatif) dan yang lain adalah p (bercas positif), dan ini boleh mencapai kepadatan tenaga yang tinggi.

Dalam polimer konduktor, penyimpanan dan pelepasan cas berlaku melalui proses redoks. Pengoksidaan, melibatkan pemindahan ion ke rangka polimer, manakala penurunan melepaskan ion kembali ke dalam elektrolit. Pergerakan ion dan tindak balas redoks ini mungkin mengubah struktur polimer dan boleh mempengaruhi kestabilan selepas beberapa kitaran cas-pelepasan. Interaksi antara pergerakan ion dan integriti mekanikal elektrod adalah penting untuk meningkatkan jangka hayat dan kecekapan superkapasitor berasaskan polimer konduktor.

4.5.1 Polianilin (PANI)

PANI dianggap sebagai bahan elektrod superkapasitor yang paling menjanjikan kerana konduktiviti tinggi, sintesis yang mudah, kapasiti penyimpanan tenaga yang cemerlang, serta kos yang rendah. PANI menyimpan cas melalui proses redoks 2 elektron dan boleh jelas dilihat melalui ujian voltametri kitaran (Rajah 15). Walau bagaimanapun, disebabkan oleh kitaran berulang (proses cas/pelepasan) yang menyebabkan pembengkakan dan pengecutan, PANI mudah mengalami penurunan prestasi dengan cepat. Untuk mengatasi keterbatasan ini, penggabungan PANI dengan bahan karbon terbukti dapat meningkatkan kestabilan PANI serta memaksimumkan nilai kapasitansnya.

Sistem Penyimpanan Tenaga Mampan: Superkapasitor

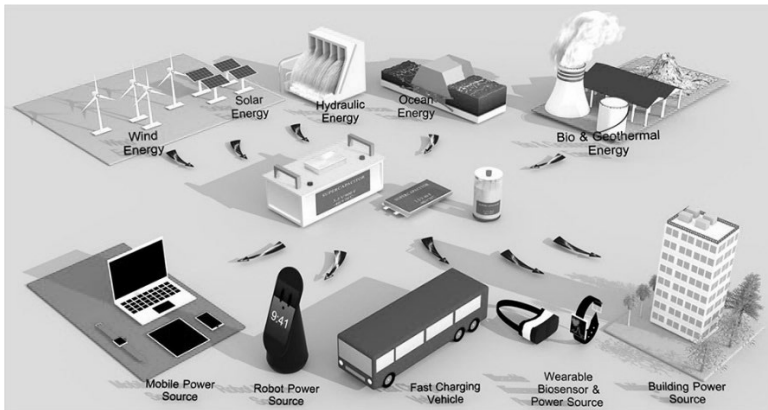


Rajah 15: Hasil voltametri kitaran elektrod PANI yang menunjukkan tindak balas redoks 2 elektron. (Song & Choi, 2013)

BAB LIMA

APLIKASI SUPERKAPASITOR

Superkapasitor digunakan dalam pelbagai bidang seperti peranti elektronik mudah alih, robot, kenderaan, dan juga dalam pengurusan tenaga di bangunan. Dalam sistem penyimpanan tenaga mampan, tenaga boleh diperbaharui seperti tenaga angin, solar, ombak digunakan sebagai sumber tenaga untuk superkapasitor (Rajah 16).



Rajah 16: Sumber tenaga untuk superkapasitor dan pelbagai aplikasinya. (Zhang et al., 2023)

5.1 SUPERKAPASITOR UNTUK TENAGA SOLAR

Tenaga solar adalah sumber tenaga hijau dan lestari yang dicirikan oleh bekalan kuasa yang berkala atau berfluktuasi, bergantung kepada keadaan persekitaran dan iklim. Bateri sering digunakan untuk menyimpan jumlah kuasa elektrik yang signifikan yang dihasilkan daripada sel fotovoltaik (PV) solar. Namun, jangka hayat bateri yang terhad, disebabkan oleh bekalan kuasa yang

berfluktuasi dan penggunaan kuasa yang tidak tetap, boleh merosakkan kapasitans sistem penyimpanan tenaga. Superkapasitor telah diperkenalkan sebagai pengganti penyimpanan tenaga bateri dalam sistem PV bagi mengatasi keterbatasan yang berkaitan dengan bateri. Selain itu, superkapasitor menawarkan penyelesaian berpotensi kepada pelbagai cabaran yang mungkin tidak dapat diatasi dengan cekap oleh bateri, seperti kestabilan jangka hayat yang panjang, kitaran cas-pelepasan yang cepat, dan kepadatan kuasa yang tinggi.

Sistem penyimpanan tenaga hibrid PV menggabungkan superkapasitor dan bateri untuk meningkatkan ketahanan dan mengatasi ketidakseimbangan dalam penukaran dan penyimpanan kuasa. Sistem hibrid ini sangat berguna di kawasan di mana liputan grid tidak mencukupi. Dalam sistem hibrid ini, superkapasitor digunakan untuk mengurangkan fluktuasi kuasa dengan frekuensi tinggi dalam jangka masa pendek, sementara bateri dapat mengekalkan nilai voltan yang telah ditetapkan untuk sistem kerana ciri elektrikanya yang lebih stabil berbanding superkapasitor. Superkapasitor boleh dicas dengan cepat selepas pelepasan, sementara bateri menyediakan kuasa stabil dengan fluktuasi beban yang minimum kerana kepadatan tenaga yang lebih tinggi. Selain itu, penggunaan superkapasitor dalam sistem dapat mengurangkan kos bateri dan penyelenggaraan. Jangka hayat bateri juga dapat dilanjutkan kerana superkapasitor dapat menjalani kitaran cas dan pelepasan pada kitaran yang tinggi.

5.2 SUPERKAPASITOR UNTUK KENDERAAN ELEKTRIK

Penggunaan bateri pertama dalam kenderaan elektrik hibrid adalah bateri asid plumbum. Namun, dengan berlalunya waktu, bateri ini telah digantikan oleh bateri yang mempunyai kepadatan tenaga yang lebih tinggi, seperti NiMH dan bateri ion litium. Kini, bateri ion litium digunakan secara meluas dalam pelbagai peranti mudah alih, termasuk komputer riba, telefon bimbit, kenderaan elektrik, robot, dron, kamera, dan banyak lagi. Seperti yang ditunjukkan sebelum ini, sistem penyimpanan tenaga hibrid dapat

meningkatkan kuasa output dengan ketara berbanding dengan bateri ion litium tunggal. Dalam konteks ini, superkapasitor telah digunakan dalam kenderaan elektrik untuk mengatasi masalah kepadatan kuasa yang rendah, tempoh pengecasan yang panjang, serta had kitaran cas/pelepasan yang terhad.

Sistem penyimpanan tenaga yang menggunakan superkapasitor dalam penyerap kejutan regeneratif dapat menangkap tenaga mekanikal yang biasanya hilang sebagai geseran dan haba. Tenaga ini ditukar menjadi tenaga elektrik dan disimpan dalam superkapasitor, yang dapat meningkatkan jarak pemanduan kenderaan elektrik. Walau bagaimanapun, usaha berterusan untuk meningkatkan kepadatan tenaga, mengoptimumkan saiz, serta pengurusan system hibrid yang lebih maju perlu diteruskan untuk memastikan penerimaan meluas pada masa hadapan.

Dalam beberapa dekad kebelakangan ini, banyak kajian telah dijalankan untuk meningkatkan kawalan sistem penyimpanan tenaga dalam kenderaan elektrik. Satu kajian perbandingan antara sistem penyimpanan tenaga bateri dan hibrid menunjukkan potensi pengurangan kos hingga 25.9% untuk sistem penyimpanan tenaga hibrid dalam jangka masa 10 tahun untuk kenderaan elektrik. Beberapa model system hibrid juga menggabungkan sel bahan api sebagai sumber kuasa, menjadikan pengurusan tenaga untuk sistem tersebut lebih kompleks. Strategi pengurangan penggunaan setara telah dibangunkan dan disahkan sebagai strategi kawalan yang paling sesuai untuk kenderaan elektrik hibrid berkuasa tinggi.

5.3 SUPERKAPASITOR UNTUK KECERDASAN BUATAN

Dengan kemajuan pesat teknologi dan perkembangan ekonomi global, terdapat permintaan yang semakin meningkat untuk peralatan kecerdasan buatan dalam pelbagai industri, seperti robot pintar, sensor pintar, dan sistem penyimpanan tenaga inovatif. Contohnya, robot digunakan dalam bidang perubatan, industri,

ketenteraan, dan penerokaan angkasa. Oleh itu, adalah penting untuk membangunkan sistem kawalan kuasa pintar yang dapat mengendalikan beban kerja yang pelbagai bagi robot secara efisien dan boleh dipercayai dalam jangka masa yang panjang. Robot yang dicipta menunjukkan kawalan yang tepat dan membolehkannya mengendalikan objek kecil dengan berkesan. Sistem kawalan kuasa membolehkan robot beroperasi dengan mudah di bawah beban kerja yang berbeza, berkat keupayaan unit kuasa. Pengurangan penggunaan tenaga elektrik dalam robot industri dalam mikrogrid DC yang menggunakan penyimpanan superkapasitor telah dibuktikan melalui kajian. Saintis mencadangkan bahawa kehilangan tenaga dapat dipulihkan sepenuhnya melalui pemecah brek, yang meningkatkan kecekapan tenaga hingga 4.07% berbanding dengan infrastruktur pengedaran elektrik tradisional.

Satu lagi penemuan penting adalah robot kapsul yang dikuasakan oleh rangkaian superkapasitor dan melaksanakan sistem pengurusan penghantaran kuasa tanpa wayar yang inovatif untuk menangani keperluan kuasa sementara yang signifikan. Pendekatan pengurusan kuasa ini meminimumkan penurunan voltan semasa tindakan beban kerja yang intensif dan menanggukkan peningkatan suhu untuk memastikan isu keselamatan. Reka bentuk pintar robot kapsul ini mewakili kemajuan signifikan ke arah aplikasi klinikal.

Secara khusus, penggerak robot lembut biomimetik seperti cacing ini dihasilkan menggunakan polimer elektroaktif ionik, berfungsi secara efektif sebagai superkapasitor. Robot berasaskan superkapasitor ini dapat mengangkut muatan yang sama seperti robot yang dilengkapi dengan sumber kuasa dan IC kawalan, mencapai kelajuan tertinggi...

RUJUKAN

- Aboelazm, E. A. A., Ali, G. A. M., Algarni, H., Yin, H., Zhong, Y. L., & Chong, K. F. (2018). Magnetic Electrodeposition of the Hierarchical Cobalt Oxide Nanostructure from Spent Lithium-Ion Batteries: Its Application as a Supercapacitor Electrode. *The Journal of Physical Chemistry C*, *122*(23), 12200–12206. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b03306>
- Ali, G. A. M., Tan, L. L., Jose, R., Yusoff, M. M., & Chong, K. F. (2014). Electrochemical performance studies of MnO₂ nanoflowers recovered from spent battery. *Materials Research Bulletin*, *60*, 5–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.08.008>
- Becker, H. J. (n.d.). *United States Patent Office Low voltage ELECTROLYTIC CAPACTOR*.
- Bo, Z., Wen, Z., Kim, H., Lu, G., Yu, K., & Chen, J. (2012). One-step fabrication and capacitive behavior of electrochemical double layer capacitor electrodes using vertically-oriented graphene directly grown on metal. *Carbon*, *50*(12), 4379–4387. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.05.014>
- Bullard, G. L., Sierra-Alcazar, H. B., Lee, H. L., & Morris, J. L. (1989). Operating principles of the ultracapacitor. *IEEE Transactions on Magnetics*, *25*(1), 102–106. <https://doi.org/10.1109/20.22515>
- Choi, C., Ashby, D. S., Butts, D. M., DeBlock, R. H., Wei, Q., Lau, J., & Dunn, B. (2020). Achieving high energy density and high power density with pseudocapacitive materials. *Nature Reviews Materials*, *5*(1), 5–19. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0142-z>
- Corbo, P., Migliardini, F., & Veneri, O. (2009). Dynamic behaviour of hydrogen fuel cells for automotive application. *Renewable Energy*, *34*(8), 1955–1961. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.021>

- Dubal, D. P., Ayyad, O., Ruiz, V., & Gómez-Romero, P. (2015). Hybrid energy storage: the merging of battery and supercapacitor chemistries. *Chemical Society Reviews*, 44(7), 1777–1790. <https://doi.org/10.1039/C4CS00266K>
- Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N., Akbarzadeh, A., Abasi, M., Hanifehpour, Y., & Joo, S. W. (2014). Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 393. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-393>
- Iro, Z. S., Subramani, C., & Dash, S. S. (2016). A brief review on electrode materials for supercapacitor. In *International Journal of Electrochemical Science* (Vol. 11, Issue 12, pp. 10628–10643). Electrochemical Science Group. <https://doi.org/10.20964/2016.12.50>
- Ji, H., Xu, X., Li, X., Li, K., Yuan, L., Han, Z., & Tang, K. (2024). A low-cost Si@C composite for lithium-ion batteries anode materials synthesized via freeze-drying process using kerf loss Si waste. *Ionics*, 30(5), 2585–2599. <https://doi.org/10.1007/s11581-024-05485-6>
- Lakshmi, K. C. S., & Vedhanarayanan, B. (2023). High-Performance Supercapacitors: A Comprehensive Review on Paradigm Shift of Conventional Energy Storage Devices. In *Batteries* (Vol. 9, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/batteries9040202>
- Laura Cozzi. (2021). *Global Energy Review 2021*.
- Li, X., Zhao, Z., Deng, Y., Ouyang, D., Yang, X., Chen, S., & Liu, P. (2024). Interfacial engineering in SnO₂-embedded graphene anode materials for high performance lithium-ion batteries. *Scientific Reports*, 14(1), 16751. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67647-w>
- Mitali, J., Dhinakaran, S., & Mohamad, A. A. (2022). Energy storage systems: a review. *Energy Storage and Saving*, 1(3), 166–216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>
- Nishino, A. (1996). Capacitors: operating principles, current market and technical trends. *Journal of Power Sources*, 60(2), 137–147. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(96\)80003-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753(96)80003-6)

- Pablo Ralon, Michael Taylor, Andrei Ilas, Harald Diaz-Bone, & Kai-Philipp Kairies. (2017). *ELECTRICITY STORAGE AND RENEWABLES: COSTS AND MARKETS TO 2030*.
- Shao, Y., El-Kady, M. F., Sun, J., Li, Y., Zhang, Q., Zhu, M., Wang, H., Dunn, B., & Kaner, R. B. (2018). Design and Mechanisms of Asymmetric Supercapacitors. *Chemical Reviews*, *118*(18), 9233–9280. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00252>
- Song, E., & Choi, J.-W. (2013). Conducting Polyaniline Nanowire and Its Applications in Chemiresistive Sensing. *Nanomaterials*, *3*(3), 498–523. <https://doi.org/10.3390/nano3030498>
- Teo, E. Y. L., Muniandy, L., Ng, E.-P., Adam, F., Mohamed, A. R., Jose, R., & Chong, K. F. (2016). High surface area activated carbon from rice husk as a high performance supercapacitor electrode. *Electrochimica Acta*, *192*. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.140>
- Yan, J. M., Huang, H. Z., Zhang, J., Liu, Z. J., & Yang, Y. (2005). A study of novel anode material CoS₂ for lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, *146*(1), 264–269. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.144>
- Yu, F., Huang, T., Zhang, P., Tao, Y., Cui, F.-Z., Xie, Q., Yao, S., & Wang, F. (2019). Design and synthesis of electrode materials with both battery-type and capacitive charge storage. *Energy Storage Materials*, *22*, 235–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.07.023>
- Zhang, J., Gu, M., & Chen, X. (2023). Supercapacitors for renewable energy applications: A review. *Micro and Nano Engineering*, *21*, 100229. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mne.2023.100229>
- Zhang, J., Zhang, L., Sun, F., & Wang, Z. (2018). An Overview on Thermal Safety Issues of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Application. *IEEE Access*, *6*, 23848–23863. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2824838>

BIODATA PENULIS



Professor ChM Dr. Chong Kwok Feng dilahirkan pada 18 Disember 1982 dan beliau menerima pendidikan awal di Sekolah Rendah Jenis Kebangsaan Chung Ching (1990-1994) dan Sekolah Menengah Kebangsaan St. Thomas (1995-1999). Beliau melanjutkan pelajaran ke peringkat Ijazah Sarjana Muda (Kimia Industri) di Universiti Teknologi Malaysia (2000-2004). Dr. Chong menerima tawaran pengajian ke peringkat Doktor Falsafah (Kimia) di National University of Singapore (NUS) dengan tajaan biasiswa *NUS Nanoscience & Nanotechnology Initiative* (2005-2010). Beliau bermula kerjaya akademik di Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah (UMPSA) pada tahun 2010 sehingga kini. Sepanjang perkhidmatan di UMPSA, Dr. Chong pernah memegang jawatan pentadbiran seperti Ketua Program (Kimia Industri), Timbalan Dekan (Penyelidikan & Pascasiswazah), dan juga Timbalan Pengarah (Penarafan), Pengarah (Pusat Hal Ehwal Korporat & Kualiti), dan kini bertugas sebagai Pengarah Kanan (Pusat Pengurusan Pusat Kecemerlangan).

Kepakaran Dr. Chong adalah dalam bidang elektrokimia dan beliau telah menerbitkan lebih 100 artikel penyelidikan *Web of Science* dengan sitasi menghampiri 5000. Kerjasama penyelidikan beliau merangkumi peringkat antarabangsa seperti Timur Tengah, India, China, Australia dan lain-lain. Hasil inovasi Dr. Chong bernama “Superkapasitor Penyimpanan Tenaga Hijau dari Biowaste (UMPacitor)”, memenangi Anugerah Ciptaan Dunia Obelisk dari British Invention Show (United Kingdom) pada tahun 2015, anugerah yang paling berprestij dalam acara tersebut. Kepakaran beliau juga diiktiraf di peringkat antarabangsa apabila dilantik sebagai Profesor Pelawat di Prince of Songkla University (2017 – 2024). Sumbangan beliau dalam penyelidikan dan inovasi diiktiraf melalui penerimaan Anugerah Saintis Penyelidik Terbaik

Malaysia 2023 dari Akademik Sains Malaysia. Dr. Chong aktif dalam badan profesional Institut Kimia Malaysia (IKM) dan beliau merupakan salah seorang pengasas IKM Cawangan Pahang pada tahun 2019. Beliau juga diundi sebagai Anggota Bersekutu dalam Bahagian I IUPAC (Kimia Fizikal dan Biokimia) dari tahun 2022 hingga 2025.



**UNIVERSITI MALAYSIA PAHANG
AL-SULTAN ABDULLAH**

ISBN 978-629-7641-00-0



9 786297 641000

Penerbit UMPSA