



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



INOVASI MATERIAL NANO UNTUK APLIKASI KONVERSI ENERGI

Profesor Ferry Iskandar

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
18 November 2023**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

INOVASI MATERIAL NANO UNTUK APLIKASI KONVERSI ENERGI

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

INOVASI MATERIAL NANO UNTUK APLIKASI KONVERSI ENERGI

Prof. Ferry Iskandar

18 November 2023
Aula Barat ITB

Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

Inovasi Material Nano untuk Aplikasi Konversi Energi

Penulis : Prof. Ferry Iskandar

Reviewer : Prof. Mikrajuddin Abdullah

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2023

ISBN : 978-623-297-346-6



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132

☎ +62 22 20469057

🌐 www.itbpress.id

✉ office@itbpress.id

Anggota Ikapi No. 043/JBA/92

APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillah robbil ‘alamin, segala puji hanyalah bagi Allah Swt., Tuhan semesta alam. Penulis bersyukur atas rahmat, karunia, dan izin-Nya yang memungkinkan penyelesaian buku orasi ilmiah ini. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Forum Guru Besar – Institut Teknologi Bandung yang memberi kesempatan untuk menyusun buku orasi ini. Selain itu, ucapan terima kasih dan penghargaan juga kami sampaikan kepada seluruh pihak yang membantu dan mendukung penyelesaian karya ini.

Buku ini mencatat hasil penelitian dalam pengembangan dan peran teknologi material nano dalam aplikasi konversi energi, yang telah dilakukan dalam beberapa tahun terakhir oleh penulis bersama rekan-rekan kolega peneliti dan juga mahasiswa bimbingan. Namun, buku ini tak hanya menyajikan hasil-hasil penelitian, buku ini diharapkan dapat menjadi tambahan wawasan tentang berbagai potensi aplikasi teknologi material nano dalam berbagai bidang. Buku ini membahas berbagai jenis nanomaterial, mulai dari kuantum dot hingga graphene oxide, dan beberapa sifat uniknya serta penerapannya dalam berbagai contoh aplikasi, seperti fotovoltaik, fototermal, biolabeling, dan biomedis. Semua ini diharapkan dapat menjadi sebuah informasi yang berharga bagi para peneliti, praktisi, dan pengambil keputusan dalam memajukan teknologi material menuju masa depan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Semoga tulisan ini mampu membangkitkan semangat dan membuka wawasan baru dalam menghadapi tantangan penelitian di masa depan. Kami yakin bahwa setiap peneliti memiliki potensi besar untuk menciptakan terobosan-terobosan baru yang akan membawa manfaat besar bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Demikian, besar harapan kami, semoga apa yang telah kami peroleh dan tuliskan ini dapat bermanfaat bagi masyarakat dan pengembangan keilmuan serta teknologi di Indonesia.

Bandung, 18 November 2023

Penulis

SINOPSIS

Dalam buku orasi ilmiah ini dipaparkan sejumlah hasil penelitian yang dilakukan oleh penulis dan tim dalam usaha mengembangkan dan memanfaatkan material nano konversi energi pada aplikasi pemanen energi, penyimpanan energi serta bidang bioteknologi dan kesehatan. Dengan menguraikan berbagai aspek penting dari sifat unik material nano terutama pada kemampuannya untuk mengonversi energi, nano material menunjukkan potensi luar biasa untuk diaplikasikan di berbagai bidang, seperti sel surya, baterai, superkapasitor, bioteknologi, dan kesehatan.

Pada bagian pendahuluan akan dipaparkan konsep dan sifat material nano serta menguraikan latar belakang tentang pentingnya penelitian ini. Bab ini memberikan gambaran secara umum terkait sifat unik dari material nano serta potensi aplikasi yang sangat besar dan menantang.

Dalam bab-bab berikutnya dibahas beberapa contoh penelitian yang dilakukan oleh penulis dan tim terkait pengembangan material nano yang berhubungan dengan kemampuannya mengonversi energi. Pertama adalah penelitian tentang sifat fotoluminesensi dari material nano. Di sini akan dibahas wawasan yang mendalam tentang sifat unik pendaran (luminesensi) dari material nano seperti material perovskite dan karbon kuantum dot (*carbon quantum dots*, CQDs), yang dapat diaplikasikan sebagai komponen LED dan devais konsentrator surya. Selain itu juga diperkenalkan aplikasi sifat luminensi material nano sebagai penanda biologis (*biolabeling*) yang berguna di bidang bioteknologi.

Selanjutnya, bab berikutnya mengulas penggunaan kemampuan fotothermal material nano. Di sini dikenalkan penelitian dan pengembangan material CQDs untuk meningkatkan efisiensi evaporator tenaga surya (*solar evaporator*). Salah satu aplikasinya adalah pengembangan perangkat penyedia air bersih. Selain itu, dalam bab ini juga dibahas potensi penggunaan CDs sebagai agen terapi kanker, yang merupakan dimensi baru aplikasi fotothermal ini di bidang kesehatan dan obat-obatan.

Kemudian, bab berikutnya memaparkan penggunaan material nano pada aplikasi penyimpanan energi, seperti baterai dan superkapasitor. Fokus

bahasan diberikan pada pemanfaatan grafena dan oksida grafena tereduksi (*reduced graphene oxide*; rGO) dan material kuantum dot (*quantum dots*, QDs), bersama dengan eksplorasi material logam transisi sulfida untuk aplikasi superkapasitor sebagai alternatif yang menarik. Selain itu juga dibahas bagaimana material nano dapat meningkatkan performa material katode pada baterai ion litium. Bab ini memberikan perspektif tentang bagaimana teknologi nano dapat memainkan peran penting dalam menyimpan dan memanfaatkan energi secara efisien.

Dalam penutup, buku ini menyajikan pandangan penulis dan kesimpulan dari penelitian yang disajikan. Buku ini membangun kasus yang kuat untuk penerapan lebih lanjut dari material nano dalam upaya meningkatkan efisiensi dan memanfaatkan sifat konversi energi di masa depan. Harapan kami, karya ini dapat menambah wawasan dan memotivasi para peneliti, mahasiswa, teknolog, pelaku industri, dan para pembaca.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Sifat dan Aplikasi Material Nano	3
1.3 Material Nano dalam Aplikasi Konversi Energi	4
2. PENERAPAN SIFAT FOTOLUMINESENSI MATERIAL NANO	7
2.1 Sifat Fotoluminensi	7
2.2 Perovskite Nanoplatelet untuk LED dan Luminesensi Konsentrator Surya	10
2.3 Karbon Dot untuk Agen Penanda Biologis	13
3. PENERAPAN SIFAT FOTOTERMAL MATERIAL NANO	24
3.1 Karbon Dots untuk Aplikasi Evaporator Tenaga Surya	24
3.2 Karbon Dot sebagai Agen Terapi Kanker.....	31
4. MATERIAL NANO UNTUK APLIKASI PENYIMPANAN ENERGI	35
4.1 Material Nano untuk Aplikasi Superkapasitor	36
4.2 Material Nano untuk Aplikasi Baterai.....	44
5. PROSPEK MASA DEPAN DAN KESIMPULAN	48
6. UCAPAN TERIMA KASIH	51
DAFTAR PUSTAKA.....	54
CURRICULUM VITAE	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Ilustrasi perubahan rapat keadaan pada material nano berbagai dimensi karena adanya efek kurungan kuantum	5
Gambar 1.2	Beberapa jenis material nano yang dikembangkan oleh penulis dan tim.....	6
Gambar 2.1	(a) Ilustrasi fenomena fotoluminesensi dan spektrum eksitasi dan emisinya, (b) interaksi elektron dan foton pada keadaan energi material nano pada saat terjadinya fotoluminesensi	7
Gambar 2.2	(a) Ilustrasi fenomena kuantisasi tingkatan energi pada material kuantum dot karena efek kurungan kuantum. (b) Ilustrasi efek kurungan kuantum yang memodulasi energi celah pita sehingga menghasilkan warna emisi yang multiwarna pada material kuantum dot	9
Gambar 2.3	(a) Skema dari down converter LED hijau yang difabrikasi oleh perovskite MAPbBr ₃ dalam matriks PMMA. Gambar diproduksi ulang atas seizin Elsevier (Mahen dkk., 2022)	11
Gambar 2.4	(a) Spektrum fotoluminesensi (PL) dari lapisan komposit MAPbBr ₃ /PMMA 1,2 wt.% yang dipakai dalam LED biru dan (b) LED UV, inset: foto LED UV dan LED biru sebelum dan setelah diberi lapisan komposit MAPbBr ₃ /PMMA, (c) Koordinat warna CIE sampel lapisan MAPbBr ₃ /PMMA down-converted LED hijau. Gambar diproduksi ulang atas seizin Elsevier (Mahen dkk., 2022)	12
Gambar 2.5	Gambar Aplikasi lapisan komposit perovskite MAPbBr ₃ /PMMA dalam <i>luminescent solar concentrators</i> desain <i>sandwich</i> . Gambar diproduksi ulang atas seizin Elsevier (Mahen dkk., 2023)	13
Gambar 2.6	(a) Ilustrasi struktur CDs dengan kehadiran 3 jenis konfigurasi C-N. (b) Spektrum XPS N1s. (c) Kurva korelasi konsentrasi konfigurasi C-N terhadap intensitas fotoluminesensinya (PL). Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry dan Springer Nature (Ogi dkk., 2014; Permatasari dkk., 2016)	15
Gambar 2.7	(a) Gambar TEM dan kurva distribusi ukuran partikel CDs. (b) Foto digital sampel CDs pada cahaya tampak dan di bawah sinar UV. (c) Spektrum emisi PL dari material CDs dan nilai PLQY yang diukur selama 300 menit sintesis. Gambar	

	diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry dan Springer Nature (Ogi dkk., 2014; Permatasari dkk., 2016).....	16
Gambar 2.8	Ilustrasi metode sintesis sederhana material CDs melalui pemanasan gelombang mikro. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Permatasari, Nakul, dkk., 2021)	17
Gambar 2.9	(a) Foto digital sampel serbuk CDs yang memiliki pendaran multiwarna, diperoleh dari optimasi temperatur akhir reaksi. (b) Diagram CIE dari warna emisi dan nilai PLQY material CDs yang disintesis. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Permatasari, Nakul, dkk., 2021)	18
Gambar 2.10	Gambar mikroskop fluoresensi sel MiaPaCa-2. Fluoresensi biru berasal dari CDs, sementara fluoresensi merah berasal dari DOX. Fluoresensi hijau berasal dari siRNA yang berlabel FAM. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemical Society (Yang dkk., 2019)	19
Gambar 2.11	Skema prinsip kerja kit rapid test virus SARS-CoV-2 (COVID-19) menggunakan (a) material nano Au dan (b) rancangan kit rapid tes berbasis CDs yang sedang dikembangkan	20
Gambar 2.12	Diagram kerja <i>Machine Learning</i> pada penelitian pengembangan material fotoluminesensi berbasis kuantum dot. Gambar diadaptasi dari (Muyassiroh dkk., 2022)	22
Gambar 2.13	Gambaran prospek pemanfaatan pendekatan <i>machine learning</i> untuk pengembangan material kuantum dot dengan berbagai sifat yang unggul sehingga dapat dimanfaatkan pada berbagai aplikasi (Muyassiroh dkk., 2022)	23
Gambar 3.1	Skema proses konversi fototermal pada sistem evaporator tenaga surya dan potensi aplikasinya. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Indriyati dkk., 2021)	25
Gambar 3.2	Sifat optik karbon dot yang disintesis dari asam sitrat dan urea dengan berbagai konsentrasi menggunakan pemanasan gelombang mikro. (a) Spektra absorbansi, (b) Spektra photoluminesensi pada panjang gelombang eksitasi 365 nm (inset: foto CDs menggunakan sinar cahaya tampak (atas) dan sinar UV pada 365 nm (bawah)). Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Rahmawati dkk., 2023) ...	27
Gambar 3.3	(a) Morfologi partikel CDs dengan rasio molar asam sitrat dan urea 1:3 (inset: distribusi ukuran partikel). (b) Gambar HR-TEM dari CDs dengan rasio molar asam sitrat dan urea 1:3. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Rahmawati dkk., 2023)	28

Gambar 3.4	(a) Hasil <i>X-ray photoelectron spectroscopy</i> (XPS), (b) Persentase kandungan atom-atom penyusun partikel CDs, (c) dekonvolusi spektrum pyrrolic N dan graphitic N, dan d) persentase kandungan pyrrolic, graphitic, dan pyridinic dari sampel CDs dengan rasio molar asam sitrat dan urea 1:3. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Rahmawati dkk., 2023) 28
Gambar 3.5	(a) Skema evaporator tenaga surya sistem volumetrik berbasis material karbon dot, (b) Kinerja evaporator tenaga surya menggunakan karbon dot yang dibuat dengan berbagai variasi rasio molar asam sitrat:urea, (c) Mekanisme konversi fototermal pada karbon dot, (d) Stabilitas kinerja karbon dot pada evaporator tenaga surya yang disimpan selama 10 hari, dan (e) Performa karbon dot pada evaporator tenaga surya menggunakan berbagai <i>input</i> air (air deionisasi, air laut, dan air sungai). Gambar diproduksi atas seizin American Chemistry Society (Rahmawati dkk., 2023)..... 30
Gambar 3.6	(a) Desain struktur Pyrrolic-N rich CDs. (b) Perubahan temperatur air yang disinari oleh laser NIR 655 nm 1,2 W/cm ² dengan kehadiran CDs sebanyak 0,22 g/mL selama 10 menit saat disinari dan setelah disinari. (c) Gambar AFM dari material CDs dan profil ketinggian partikelnya. Gambar diproduksi ulang atas seizin Springer Nature (Permatasari dkk., 2023). 32
Gambar 3.7	Ilustrasi peran Pyrrolic-N-rich pada sifat fototermal material CDs yang diperoleh dari hasil studi DFT. Gambar diproduksi ulang atas seizin Springer Nature (Permatasari dkk., 2023) 33
Gambar 3.8	Teknologi terapi kanker yang terintegrasi melibatkan terapi fototermal, terapi fotodinamik, kemoterapi, terapi gen, dan terpi hipertermia magnetik yang memanfaatkan material CDs sebagai agen terapi multifungsi 34
Gambar 4.1	Grafik Densitas Daya dan Densitas Energi (Plot Ragone) dari berbagai perangkat penyimpan energi. Gambar diproduksi ulang atas seizin MDPI (Fitri Aulia Permatasari, Irham, dkk., 2021) 35
Gambar 4.2	Berbagai aplikasi dari superkapasitor (a) pesawat, (b) bis, dan (c) pembangkit listrik. Gambar didesain oleh Freepik 36
Gambar 4.3	(a) Skema reduksi GO menggunakan gelombang mikro pada atmosfer gas N ₂ , (b) citra SEM dan TEM RGO yang diperoleh melalui reduksi dengan bantuan gelombang mikro. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Iskandar dkk., 2017) 38

Gambar 4.4	Skema pengembangan pengelupasan elektrokimia dengan menambahkan proses ultrasonikasi. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Abdillah dkk., 2022)	39
Gambar 4.5	Ilustrasi dan citra SEM grafena yang dihasilkan (a) tanpa ultrasonikasi dan (b) dengan ultrasonikasi. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Abdillah dkk., 2022)	40
Gambar 4.6	(a) Ilustrasi superkapasitor yang menggunakan grafena sebagai material aktif elektrode (Abdillah dkk., 2023). Gambar diproduksi ulang atas seizin Elsevier. dan (b) kurva <i>charging-discharging</i> sel koin dengan elektrode grafena dengan dan tanpa perlakuan ultrasonikasi. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Abdillah dkk., 2022)	40
Gambar 4.7	Ilustrasi skematik peningkatan performa FeS ₂ . Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Irham, Abdillah, dkk., 2023)	42
Gambar 4.8	(a) konfigurasi superkapasitornya. (b) Plot Ragone material FeS ₂ /PVP dibandingkan dengan material lain. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Irham, Abdillah, dkk., 2023)	42
Gambar 4.9	(a) Ilustrasi skematik penambahan <i>mid-gap states</i> pada h-FeS. (b-c) Nilai kapasitansi kuantum pada h-FeS sebagai katoda dan anoda. Gambar diproduksi ulang atas seizin Elsevier (Irham, Muttaqien, dkk., 2023)	43
Gambar 4.10	(a) Skema baterai ion litium, dan (b) diagram radar berbagai jenis material katode. Gambar diproduksi ulang atas seizin Elsevier (Suryadi dkk., 2023)	45
Gambar 4.11	Skema degradasi permukaan material katode (Manthiram, 2020)	46
Gambar 4.12	Skematik keunggulan material nano sebagai material pelapis pada baterai ion litium, (b) Perbandingan performa material katode LiNi _{0,5} Mn _{1,5} O ₄ pada tegangan 3,5 – 4,8 V di densitas arus 0,5 C tanpa dan dengan material nano Al ₂ O ₃ /LiAlO ₂ pada temperatur tinggi	47

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa dekade terakhir, *nanomaterial*, atau juga sering disebut material nano, telah menjadi material penting yang dapat dimanfaatkan pada berbagai bidang aplikasi, salah satunya untuk konversi energi yang unik. Ukuran satu nanometer setara dengan seperseribu milimeter atau 10^{-9} meter, suatu ukuran yang sangat kecil namun memberikan dampak luar biasa. Istilah material nano mengacu pada material yang memiliki komponen penyusun berukuran antara 1 hingga 100 nm. Perkembangan material nano sejalan dengan prediksi Prof. Richard Feynmann, seorang ahli fisika terkemuka, pada tahun 1959 melalui pidato terkenal berjudul "Plenty of Room at the Bottom". Prof. Feynmann mengantisipasi bahwa skala yang sangat kecil ini akan memberikan sifat dan karakteristik unik pada material nano dibandingkan dengan material konvensional (Brown, 2005).

Material nano dapat memiliki berbagai bentuk dan struktur yang dapat memengaruhi sifat material secara signifikan. Salah satu kategori utama material nano adalah nanopartikel, yang memiliki ukuran nanometer, dan biasanya disebut material berdimensi nol (0D) atau kuantum dot (*quantum dot*, QD). Selain nanopartikel, terdapat juga material nano berbentuk tabung atau fiber yang bisa disebut material berdimensi satu (1D), plat atau lembaran tipis yang dikategorikan sebagai material berdimensi dua (2D), atau bahkan berbentuk lebih besar, baik secara beraturan maupun tidak beraturan dalam orde tiga dimensi (3D). Jenis material nano dapat bervariasi, termasuk logam, oksida, sulfida, atau jenis polimer. Keberagaman bentuk dan struktur ini menyebabkan material nano mempunyai kemampuan adaptasi dan aplikasi yang sangat luas, seperti pada bidang katalisis, elektronik, hingga biomedis atau obat-obatan.

Dari perspektif fisika, salah satu sifat khas dari material nano adalah kuantisasi energi material semikonduktor, yang memungkinkannya digunakan di berbagai aplikasi dalam bidang elektronik dan fotonik yang unik. Baru-baru ini, Moungi Bawendi, Louis Brus, dan Alexey Ekimov dianugerahi Penghargaan Nobel 2023 atas penemuan dan pengembangan material kuantum dot (*quantum dots*, QDs). Penemuan dan pengembangan QD

membuka kemungkinan baru untuk pengembangan teknologi yang baru, lebih efisien dan hemat biaya di berbagai bidang.

Penggunaan material nano dalam bidang konversi energi juga telah membuka babak baru dalam kemajuan teknologi material. Sebagai contoh, material nano seperti kuantum dot telah menunjukkan potensi luar biasa dalam mengubah energi surya menjadi listrik melalui efek fotovoltaiik. Kemampuan menangkap dan mentransfer energi secara efisien menyebabkan material tersebut menjadi kandidat yang menjanjikan untuk sel surya berkinerja tinggi. Selain menghasilkan energi listrik, material QDs juga mampu mengonversi energi surya menjadi panas (sifat fototermal) yang salah satunya dapat digunakan untuk perangkat evaporator tenaga surya (*solar evaporator*). Evaporator tenaga surya ini berpotensi besar menghasilkan air bersih, mengolah air limbah dan air garam, bahkan juga berpotensi menonaktifkan patogen pada peralatan medis dan bahan lain dalam proses sterilisasi. Material nano juga dapat diaplikasikan dalam perangkat penyimpanan energi. Sebagai contoh, oksida grafena dan transisi metal sulfida telah membuka pintu untuk pengembangan superkapasitor yang lebih efisien dan tahan lama. Selain itu, pengembangan material nano pada permukaan material katode juga dapat meningkatkan performa pada aplikasi baterai ion litium. Morfologi dan sifat unik material nano memungkinkan peningkatan signifikan dalam efisiensi konversi energi, membawa kita lebih dekat pada masa depan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Dengan memahami potensi dan aplikasi material nano ini, kita dapat memacu inovasi di bidang konversi energi menuju solusi yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Dalam buku ini, penulis akan mengenalkan beragam contoh material nano yang memanfaatkan konversi energi seperti pada aplikasi pengumpul surya, penyimpanan energi dan pada bidang kesehatan dan bioteknologi. Beberapa di antaranya adalah material kuantum dot yang mempunyai sifat fotoluminesensi unik untuk aplikasi fotoelektronik dan sel surya. Selain itu, sifat fototermal dari material karbon nano dot juga akan dibahas untuk aplikasi evaporasi air dengan tenaga surya guna pengadaan air bersih, atau sebagai agen penanda biologis (*biolabelling*) dan agen terapeutik untuk aplikasi obat medis. Selain itu, kami juga akan membahas berbagai jenis material karbon, seperti oksida grafena, dan juga material transisi logam sulfida, seperti FeS nanopartikel yang telah kami kembangkan untuk aplikasi penyimpan energi seperti superkapasitor dan baterai.

1.2 Sifat dan Aplikasi Material Nano

Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, material nano menampilkan sifat-sifat unik yang memberikan mereka keunggulan komparatif dibandingkan dengan material konvensional yang berukuran jauh lebih besar. Di bawah ini, diuraikan beberapa contoh sifat dan aplikasi dari material nano yang menarik.

Sifat kekuatan dan ketahanan yang luar biasa: Material nano secara konsisten menunjukkan kekuatan yang luar biasa meskipun memiliki ukuran yang sangat tipis. Karakteristik ini membuat material tersebut sangat ideal untuk aplikasi di bidang konstruksi, seperti penggunaan dalam komposit struktural. Sebagai contoh, serat nano (fiber) yang diperkuat memiliki potensi besar untuk digunakan dalam pembuatan bahan bangunan yang tidak hanya ringan, tetapi juga memiliki kekuatan yang jauh lebih tinggi, membawa inovasi signifikan dalam industri konstruksi.

Sifat termal dan konduktivitas yang efisien: Material nano memiliki kemampuan untuk menghantarkan panas dengan efisiensi tinggi, menjadikan material tersebut sangat diinginkan dalam berbagai aplikasi termal. Dalam dunia industri elektronik, penggunaan material nano untuk pendingin termal dalam bentuk kompositnya dapat meningkatkan efisiensi perangkat elektronik, khususnya yang rentan terhadap kelebihan panas seperti misalnya pada lapisan penutup (*molding*) sebuah unit pemrosesan pusat (CPU) komputer.

Sifat optik dan elektronik yang unik: Sifat optik dari material nano memungkinkan pemanfaatan mereka dalam berbagai aplikasi fotovoltaiik, yaitu kemampuan merubah energi cahaya menjadi energi listrik. Kemampuan material nano untuk menangkap dan mengubah energi cahaya menjadi listrik memainkan peran penting dalam perkembangan teknologi konversi energi. Sebagai contoh, material *quantum dots* menawarkan potensi luar biasa dalam pengembangan sel surya yang tidak hanya lebih efisien, tetapi juga memiliki kinerja yang lebih tinggi.

Sifat kimia dan reaktivitas yang tinggi: Material nano memiliki luas permukaan spesifik (*specific surface area*) yang sangat besar, sehingga sering menunjukkan tingkat reaktivitas kimia yang lebih tinggi dibandingkan dengan material konvensional (material dengan ukuran besar, atau *bulk*). Hal

ini membuka peluang aplikasi di bidang penyimpanan energi dan katalisis. Dalam bidang penyimpanan energi, material nano dapat digunakan untuk meningkatkan kapasitas, efisiensi dan performa yang unggul.

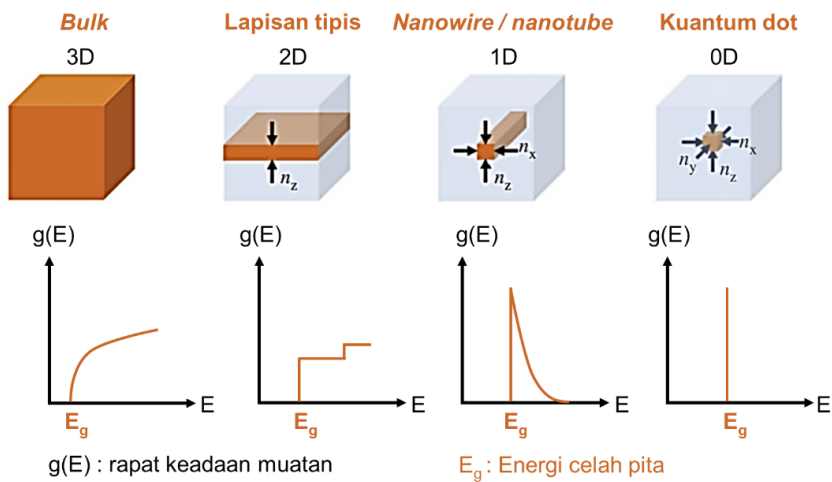
Sifat biologis dan penerapan pada kesehatan: Kemampuan material nano untuk berinteraksi dengan sistem biologis membuka peluang baru untuk aplikasi medis yang inovatif. Material tersebut dapat digunakan dalam bidang penanda biologis (*biolabeling*), memungkinkan para ilmuwan untuk melacak dan memahami proses biologis dengan lebih mendalam. Selain itu, material nano juga dapat diterapkan dalam pengembangan terapi dan diagnostik yang lebih efektif.

Dengan memahami sifat-sifat ini, kita dapat mengeksplorasi berbagai aplikasi material nano yang revolusioner di berbagai bidang, mencakup bidang teknologi energi, kesehatan, dan bidang-bidang penting lainnya. Inilah yang membuka potensi besar untuk inovasi yang akan membentuk masa depan teknologi dan ilmu pengetahuan.

1.3 Material Nano dalam Aplikasi Konversi Energi

Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, salah satu kelas material nano yang menarik untuk penelitian dan pengembangan adalah kuantum dot. Kuantum dot merupakan material nano yang memperlihatkan sifat kuantum, dengan ukuran partikel biasanya sekitar 1 hingga 20 nanometer. Gambar 1.1 adalah ilustrasi yang menggambarkan bagaimana morfologi material nano memengaruhi rapat keadaan elektron. Perubahan ini terjadi seiring menyusutnya dimensi struktur dari tiga dimensi hingga nol dimensi (QD). Pada kuantum dot ideal, rapat keadaan bersifat diskrit, menyerupai yang terjadi dalam atom terisolasi. Fenomena ini dikenal sebagai "kurungan kuantum", yang memungkinkan material yang awalnya mungkin tidak mempunyai sifat fotoluminesensi menjadi bersifat fotoluminesensi. Sifat fotoluminesensi di sini adalah kemampuan untuk mengubah cahaya (foton) yang mempunyai energi lebih tinggi (misal sinar *ultraviolet* (UV)) menjadi cahaya dengan panjang gelombang yang energinya lebih rendah (misal cahaya tampak). Terdapat satu hal menarik dari sifat ini, yaitu satu jenis kuantum dot dapat memancarkan cahaya dengan panjang gelombang yang berbeda tergantung pada ukurannya. Dari perspektif fisika, sifat unik ini tidak dapat terjadi pada material dengan ukuran besar (*bulk*). Keterkaitan sifat

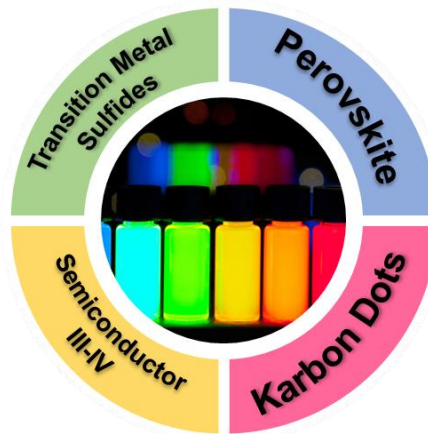
fotoluminesensi dengan ukuran partikel ini disebabkan oleh perubahan energi celah pita pada material tersebut seiring perubahan ukuran partikelnya. Saat ini, kuantum dot telah menjadi bahan yang menjanjikan dalam aplikasi fotoluminesensi, seperti dalam pengembangan teknologi layar televisi monitor (*display*), serta sel surya berbasis kuantum dot.



Gambar 1.1 Ilustrasi perubahan rapat keadaan pada material nano berbagai dimensi karena adanya efek kurungan kuantum.

Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa jenis material nano telah banyak dikembangkan, termasuk karbon dot, transisi logam sulfida, semikonduktor III-IV, dan perovskite (Gambar 1.2). Karbon dot (*Carbon dots*; CDs), telah menjadi salah satu fokus penelitian tim kami di Laboratorium Material Energi dan Lingkungan (Energy and Environmental Material Lab, E2M Lab), Kelompok Keahlian Fisika Material Elektronik, FMIPA ITB. Material ini terdiri atas unsur karbon sebagai unsur utama, namun juga terdapat dengan sedikit kandungan unsur nitrogen, dan oksigen. Ukuran dari material CDs antara 1 s.d. 20 nm memiliki absorpsi yang lebar dan tinggi, memungkinkan penggunaannya dalam berbagai aplikasi, termasuk sebagai agen fototermal, yaitu material yang dapat mengonversi energi cahaya (foton) menjadi energi panas (termal). Energi foton yang diserap oleh material ini kemudian diubah menjadi panas, yang dapat dimanfaatkan dalam berbagai konteks, termasuk dalam proses solar-thermal evaporator. Karbon dot juga memiliki keunggulan berupa ukuran yang kecil, kelarutan dalam air, tidak beracun, dan tingkat biokompatibilitas yang tinggi. Hal ini memungkinkan penerapannya dalam berbagai bidang biomedis, termasuk dalam *biosensing*

dan *bioimaging* (sifat fotoluminesensi), serta sebagai penghantar obat dan sebagai agen antitumor dengan memanfaatkan sifat fototermal. Material perovskite, dengan struktur ABX_3 memiliki sifat fotoluminesensi yang sangat baik. Material ini memiliki absorpsi cahaya yang tinggi dan menghasilkan sifat pendaran tunggal yang sangat baik.



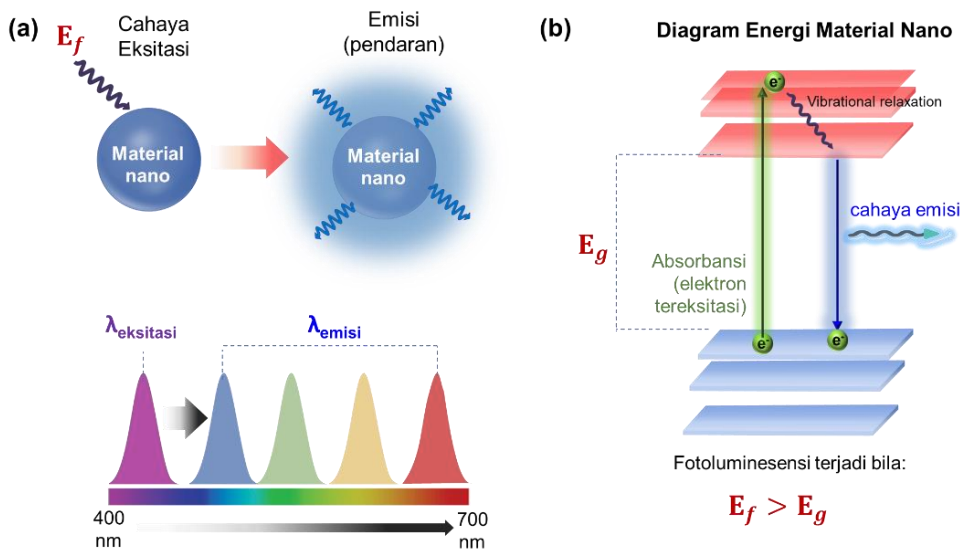
Gambar 1.2 Beberapa jenis material nano yang dikembangkan oleh penulis dan tim.

Material transisi logam sulfida dan perovskite juga telah dikaji di laboratorium kami. Material transisi logam sulfida menawarkan berbagai reaksi redoks menarik yang dapat diaplikasikan pada aplikasi superkapasitor, yang dapat menyimpan energi muatan listrik pada material katoda. Komposisi kaya logam transisi dan sulfida memberikan banyak pilihan aplikasi. Kuantum dot dari material ini menjanjikan berbagai aplikasi, baik di bidang biomedis, penyimpanan energi, maupun optoelektronik. Rincian dan detail dari pengembangan masing-masing material tersebut akan dibahas pada bab-bab berikut.

2. PENERAPAN SIFAT FOTOLUMINESSENSI MATERIAL NANO

2.1 Sifat Fotoluminensi

Fotoluminesensi merupakan salah satu jenis fenomena konversi energi di mana cahaya yang memiliki berenergi tinggi diubah menjadi cahaya yang memiliki energi lebih rendah seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.1. Pada umumnya, fenomena fotoluminesensi ini menghasilkan (mengemisikan) foton dengan panjang gelombang yang berada pada daerah cahaya tampak (Gambar 2.1(a)). Fenomena fotoluminesensi pada material melibatkan interaksi yang kompleks antara elektron dan foton (Gambar 2.1(b)). Elektron yang mendapat energi melalui rangsangan cahaya (diradiasi oleh cahaya dengan energi tertentu) dapat tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi. Ketika kembali ke tingkat energi awal, energi ekstra berupa radiasi akan dilepaskan dalam bentuk foton, menghasilkan cahaya yang dapat diamati. Fenomena ini hanya akan terjadi bila energi dari cahaya yang diberikan (E_f) lebih dari besar energi celah pita (E_g) dari material tersebut.



Gambar 2.1 (a) Ilustrasi fenomena fotoluminesensi dan spektrum eksitasi dan emisinya, (b) interaksi elektron dan foton pada keadaan energi material nano pada saat terjadinya fotoluminesensi.

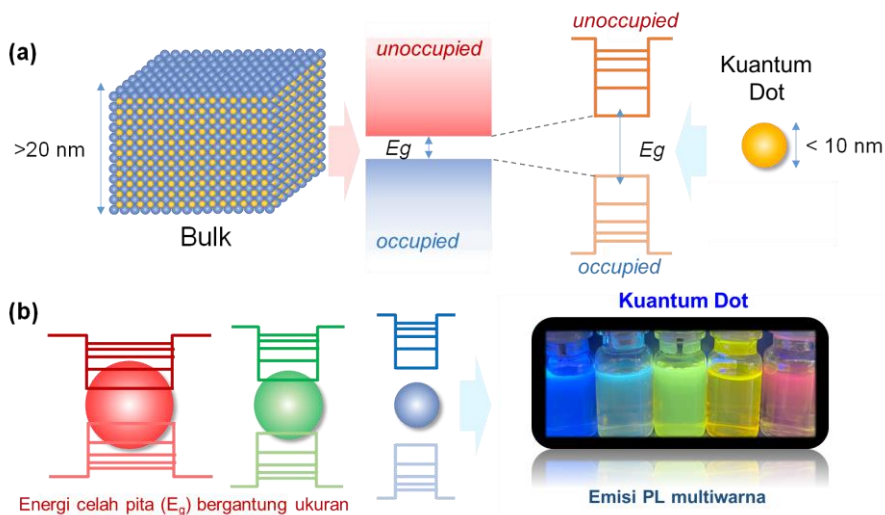
Fenomena fotoluminesensi ini banyak dimanfaatkan di dalam bidang optoelektronik seperti pengembangan *Light Emitting Diode* (LED), *electronic display*, *Luminescent Solar concentrator* (LSC), dan pada bidang biomedis sebagai agen penanda biologis (*biolabeling*). Beberapa material yang menunjukkan sifat fotoluminesensi tersebut umumnya merupakan material semikonduktor seperti Indium Gallium Nitride (InGaN), Aluminium Indium Gallium Phosphide (AlInGaP), Yttrium Aluminum Garnet (YAG), Gallium Nitride (GaN). Material-material tersebut telah dimanfaatkan sebagai material fosfor di LED atau lapisan tipis pada lampu penerangan yang biasanya dikenal dengan sebutan «lampu neon» oleh masyarakat Indonesia. Material ukuran besar (*bulk*) hanya menghasilkan satu warna cahaya pendaran sehingga, untuk membuat sebuah lampu yang berpendar/berwarna putih, maka biasanya digunakan tiga jenis material berpendar, yaitu material penghasil pendaran merah (*red*), material penghasil pendaran hijau (*green*), dan material penghasil pendaran biru (*blue*), atau biasa disebut material berpendar RGB. Termasuk juga material berpendar RGB juga telah digunakan pada permukaan panel *display* monitor tabung atau TV tabung atau plasma *display* yang saat ini telah ditinggalkan.

Fenomena fotoluminesensi pada material nano, khususnya material kuantum dot menunjukkan fenomena ilmiah yang unik dan menarik karena melibatkan tingkatan energi yang terkuantisasi (diskrit) yang bergantung pada ukuran partikelnya. Fenomena kebergantungan celah pita energi dengan ukuran partikel kuantum dot berhasil diekspresikan secara teoritis oleh Louis Bruss (Brus, 1986), ke dalam persamaan :

$$E_{gap}(QDs) = E_g(bulk) + \left(\frac{3\hbar^2\pi}{2m^*d^2} \right) - \frac{1.78e^2}{2\pi\epsilon_0\epsilon_R d} \quad (2.1)$$

di mana E_{gap} adalah celah pita energi material kuantum dot, $\hbar$ adalah konstanta Plank tereduksi, d adalah dimater partikel kuantum dot, m^* adalah massa efektif dari elektron, e adalah muatan elektron, ϵ_0 dan ϵ_R adalah permitivitas ruang hampa dan permitivitas relatif. Model teoritis tersebut dikenal sebagai model *Effective Mass Approximation* (EMA), atau model Bruss yang memiliki dampak signifikan dalam memprediksi atau mengevaluasi korelasi antara ukuran partikel dan energi celah pitanya di berbagai kasus material kuantum dot (Chen dkk., 2023; Permatasari, Masitoh, dkk., 2021; Romero-Pérez dkk., 2023).

Korelasi antara efek kurungan kuantum dengan sifat fotoluminesensi pada material kuantum dot dijelaskan oleh Gambar 2.2. Efek kurungan kuantum dalam tiga dimensi menyebabkan rapat keadaan energi partikel kuantum dot menjadi diskrit (Gambar 2.2a). Tingkatan energi ini, yang mengendalikan besarnya energi celah pita, dapat diselaraskan dengan presisi melalui modulasi dimensi, memungkinkan perolehan kuantum dot dengan variasi warna emisi fotoluminesensi (PL) (Gambar 2.2b). Dengan demikian, sifat fotoluminesensi dari material kuantum dot dapat diatur secara efektif dan efisien melalui modulasi ukuran partikelnya.



Gambar 2.2 (a) Ilustrasi fenomena kuantisasi tingkatan energi pada material kuantum dot karena efek kurungan kuantum. (b) Ilustrasi efek kurungan kuantum yang memodulasi energi celah pita sehingga menghasilkan warna emisi yang multiwarna pada material kuantum dot.

Baru-baru ini, banyak peneliti yang mendedikasikan penelitiannya untuk pengembangan material kuantum dot, karena sifat fotoluminesensinya yang mudah diatur melalui berbagai teknik, sehingga berpotensi besar digunakan sebagai alternatif material berpendar semikonduktor yang telah komersil digunakan saat ini. Sejak tahun 2008, penulis dan tim juga telah mulai mengembangkan material nano dengan sifat fotoluminesensi yang dapat diatur melalui modulasi dimensi atau ukuran, fungsionalisasi permukaan, atau teknik atom doping (Mahen dkk., 2022; Ogi dkk., 2008, 2014, 2016; Permatasari dkk., 2018; Permatasari dkk., 2016, 2023; Permatasari, Masitoh, dkk., 2021; Santika dkk., 2022; Umami, Permatasari, Sundari, dkk., 2022; Umami, Permatasari, Muyassiroh, dkk., 2022). Pada saat ini, penelitian di laboratorium kami berfokus pada pengembangan material fotoluminesensi

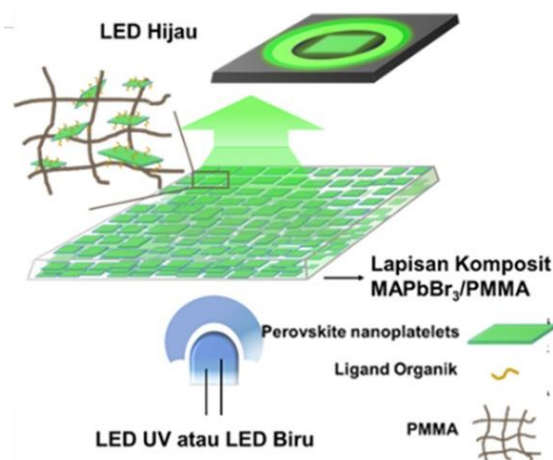
berbasis karbon dan perovskite halida. Kedua material ini diekspetasikan akan menjadi material nano cerdas yang mudah diatur sifat optik dan elektroniknya, serta dapat dimanfaatkan pada berbagai bidang, seperti aplikasi LED, LSC, dan agen penanda biologis (*biolabeling*). Penelitian dilakukan melalui tiga pendekatan yaitu eksperimen, studi komputasi, dan *machine learning*.

2.2 Perovskite Nanoplatelet untuk LED dan Luminesensi Konsentrator Surya

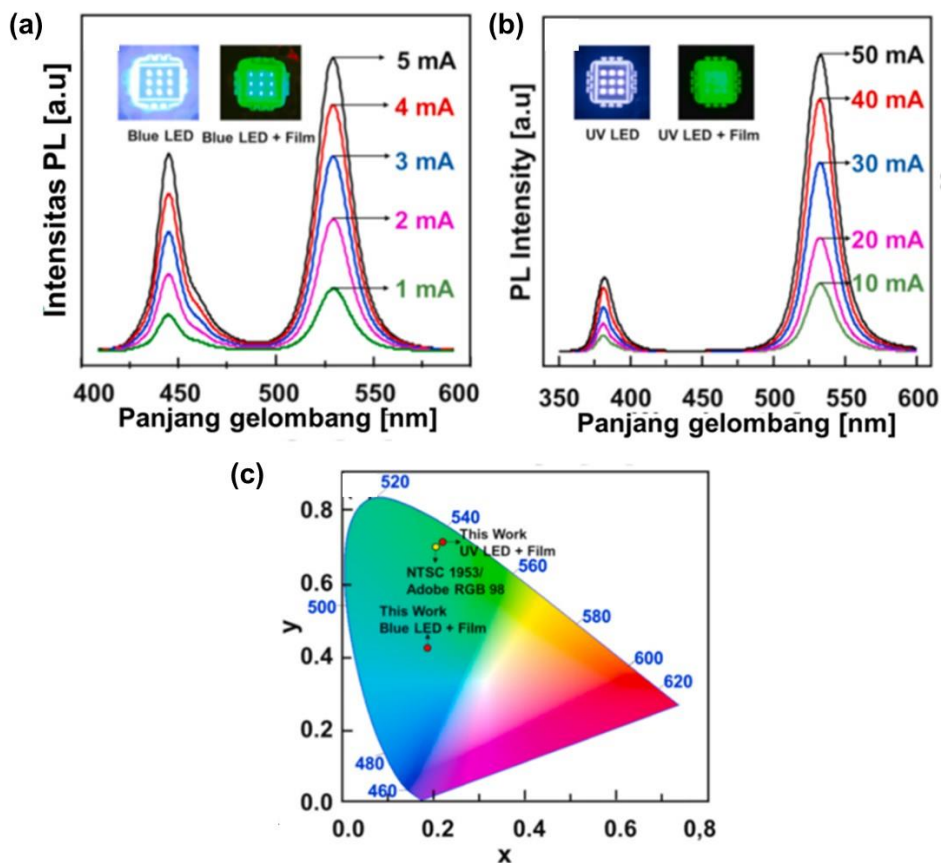
Salah satu jenis material nano yang dikembangkan pada laboratorium kami adalah jenis perovskite. Pada awalnya, perovskite adalah jenis struktur kristal yang ditemukan pada mineral kalsium titanium oksida dengan rumus kimia ABX_3 , di mana A dan B menyatakan dua kation yang memiliki ukuran serupa. Dalam beberapa tahun terakhir material perovskite ini juga digunakan dalam aplikasi optoelektronik. Contoh dari material ini adalah perovskit jenis organohalida, seperti perovskite metilammonium timah trihalida ($MAPbX_3$), di mana MA adalah kation organik, dan X adalah anion halida seperti klorida, bromida, atau iodida adalah yang paling banyak dikembangkan akhir-akhir ini, material perovskite organohalida $CH_3NH_3PbBr_3$ ($MAPbBr_3$) banyak diteliti karena memiliki efisiensi fotoluminesensi tinggi, kemampuan menyerap cahaya matahari yang baik, dan spektrum emisi yang dapat diatur dari rentang warna biru sampai hijau. Dengan demikian, material tersebut memiliki potensi yang besar untuk diaplikasikan pada bidang optoelektronika, seperti perangkat LED, sel surya, atau perangkat pembantu sel surya seperti luminesensi pengumpul surya (*Luminescent Solar Concentrator*; LSC).

Kami mengembangkan metode sintesis material perovskite $MAPbBr_3$ dan potensi aplikasinya sebagai material utama dalam aplikasi LED hijau dan LSC. Melalui strategi desain dan sintesis yang tepat material perovskite $MAPbBr_3$ yang memiliki struktur kuantum dot dan nanoplatelet telah berhasil disintesis melalui metode presipitasi. Lapisan tipis perovskite $MAPbBr_3$ dan polimer polymethylmethacrylate (PMMA) juga telah difabrikasi dan telah menunjukkan potensi yang tinggi sebagai *down converter* LED hijau dan perangkat LSC. Melalui optimasi desain konfigurasi perangkat LSC, perangkat LSC berbasis lapisan tipis perovskite $MAPbBr_3$ /PMMA ini juga menunjukkan efisiensi konversi yang cukup baik.

Perovskite MAPbBr_3 yang dikompositkan dengan PMMA dan membentuk lapisan komposit $\text{MAPbBr}_3/\text{PMMA}$ telah menunjukkan potensi yang besar sebagai *down-converter* LED hijau (Mahren dkk., 2022). Lapisan komposit tersebut dideposisikan di atas LED biru dan UV untuk menghasilkan LED berwarna hijau seperti skema yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Gambar 2.4 (a) dan (b) menunjukkan spektrum emisi LED berwarna hijau yang difabrikasi dengan mendeposisikan lapisan komposit $\text{MAPbBr}_3/\text{PMMA}$ pada *chip* LED biru dan UV. Puncak emisi sebelah kiri yang berpusat pada panjang gelombang 440 nm dan 380 nm yang bersumber dari chip LED biru dan UV, sedangkan puncak emisi pada panjang gelombang 530 nm bersumber dari lapisan komposit $\text{MAPbBr}_3/\text{PMMA}$. Gambar 2.4 (c) menunjukkan koordinat kromatisitas CIE dari LED hijau. Koordinat warna CIE untuk LED hijau yang dibuat dengan mendeposisikan lapisan komposit $\text{MAPbBr}_3/\text{PMMA}$ pada chip LED biru terletak di daerah cahaya hijau kebiruan (sian) (0,18; 0,40) pada arus 5 mA. Koordinat warna CIE untuk LED hijau, dibuat dengan menyimpan lapisan komposit $\text{MAPbBr}_3/\text{PMMA}$ pada chip LED UV yang diukur pada arus 50 mA adalah (0,22, 0,72), terletak di daerah lampu hijau. Lapisan komposit $\text{MAPbBr}_3/\text{PMMA}$ yang dideposisikan pada LED UV menghasilkan warna dengan koordinat mendekati dua warna hijau standar pada (0,21; 0,71), yaitu NTSC 1953 dan Adobe RGB 98. Hasil ini mengungkapkan potensi tinggi lapisan komposit $\text{MAPbBr}_3/\text{PMMA}$ untuk diterapkan sebagai konverter hijau pada perangkat LED.



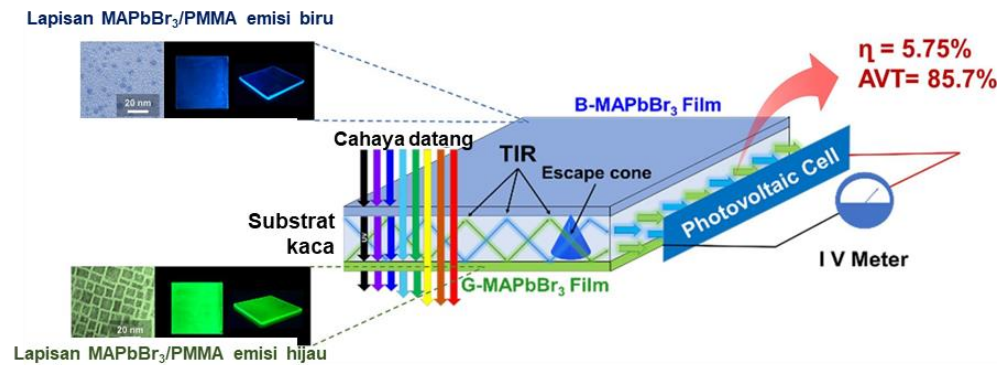
Gambar 2.3 (a) Skema dari down converter LED hijau yang difabrikasi oleh perovskite MAPbBr_3 dalam matriks PMMA. Gambar diproduksi ulang atas izin Elsevier (Mahren dkk., 2022).



Gambar 2.4 (a) Spektrum fotoluminesensi (PL) dari lapisan komposit MAPbBr₃/PMMA 1,2 wt.% yang dipakai dalam LED biru dan (b) LED UV, inset: foto LED UV dan LED biru sebelum dan setelah diberi lapisan komposit MAPbBr₃/PMMA, (c) Koordinat warna CIE sampel lapisan MAPbBr₃/PMMA down-converted LED hijau. Gambar diproduksi ulang atas seizin Elsevier (Mahen dkk., 2022).

Potensi lainnya yang dipelajari dari lapisan komposit perovskite/PMMA adalah dalam aplikasi *luminescent solar concentrators*. Lapisan *luminescent solar concentrator* (LSC) transparan dengan desain *sandwich* (SD-TLSC) dibuat menggunakan perovskite MAPbBr₃ beremisi biru dan hijau yang dikompositkan dengan PMMA dan dilapiskan pada bagian atas dan bawah substrat kaca seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 (Mahen dkk., 2023). SD-TLSC tersebut memiliki performa yang baik dengan efisiensi optik yang mengesankan sebesar 5,75% dan *average visual transmission* (AVT) yang tinggi sebesar 85,7%. Kinerja tinggi SD-TLSC diinduksi oleh penyerapan radiasi matahari yang efektif pada rentang panjang gelombang yang lebih lebar, yang dikaitkan dengan morfologi uniknya yang menunjukkan emisi PL yang

berbeda. Hasil terobosan ini membuka jalan bagi potensi penggunaan praktis SD-TLSC berbasis perovskite sebagai jendela surya, menandai kemajuan besar di bidang fotovoltaik yang terintegrasi pada jendela dan bangunan.



Gambar 2.5 Gambar Aplikasi lapisan komposit perovskite MAPbBr₃/PMMA dalam *luminescent solar concentrators* desain *sandwich*. Gambar diproduksi ulang atas seizin Elsevier (Mahren dkk., 2023).

2.3 Karbon Dot untuk Agen Penanda Biologis

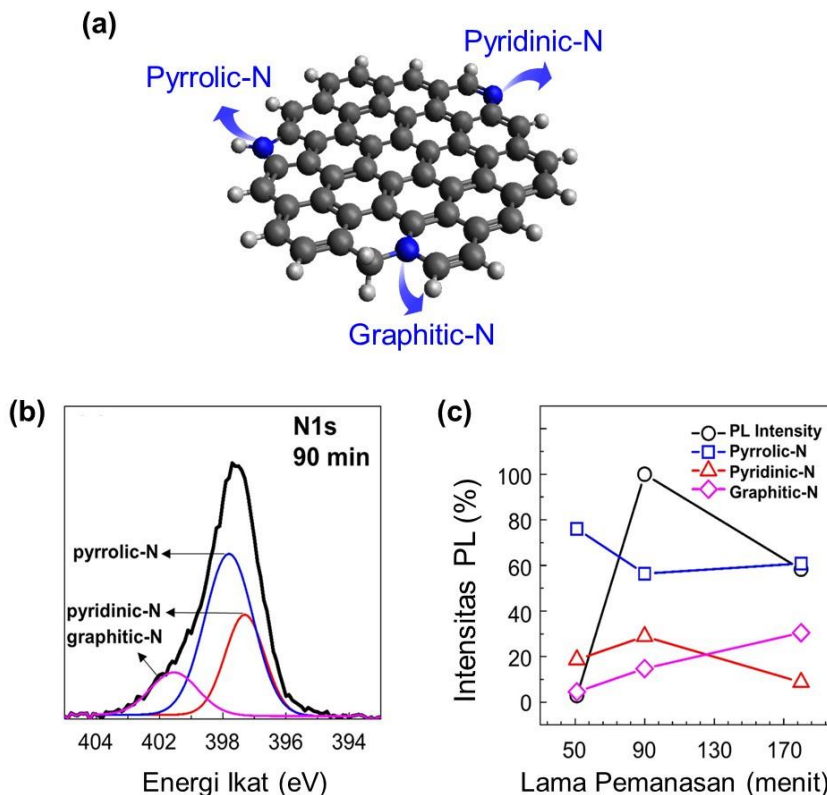
Agen penanda biologis (*biolabeling*) merupakan material atau zat yang digunakan untuk memberikan penanda atau label pada struktur biologis, dengan memanfaatkan fenomena fotoluminesensi. Agen penanda biologis telah menjadi instrumen kritis dalam dunia biologi dan kedokteran karena memungkinkan observasi dan pemahaman lebih lanjut terhadap proses biologis, terutama dalam hal diagnostik. Sejauh ini, agen penanda biologis yang biasa digunakan adalah material organik *fluorophore*, seperti DAPI (4',6-diamidino-2-phenylindole) sebagai agen penanda biologis warna biru, FITC (*Fluorescein Isothiocyanate*), dan Rhodamine dan Alexa Fluor 594 sebagai agen penanda biologi warna merah. Namun, agen penanda biologis tersebut memiliki banyak keterbatasan, seperti toksik terhadap sel hidup, sehingga hanya dapat digunakan untuk pencitraan sel secara *in vitro* atau sel mati, fotostabilitas yang rendah, dan harga yang relatif mahal. Oleh karena itu, pengembangan material nano sebagai agen penanda biologi masih sangat diperlukan, terutama di Indonesia.

Penelitian untuk mengembangkan agen penanda biologis yang lebih efisien, selektif, ramah lingkungan, dan murah terus dilakukan oleh peneliti. Penelitian terakhir masih berfokus pada pemanfaatan material nano (NPs)

atau kuantum dot (QDs) berbasis inorganik (Au, Ag, CdSe, CdS NPs) sebagai agen penanda biologis. Meskipun, Au NP atau QDs menunjukkan efisiensi dan selektivitas yang baik, metode sintesis yang kompleks masih menjadi tantangan untuk diterapkan di tahap komersil. Selain itu, nilai toksisitas yang masih tinggi juga menjadi tantangan untuk diaplikasikan di dunia biomedis dan kedokteran.

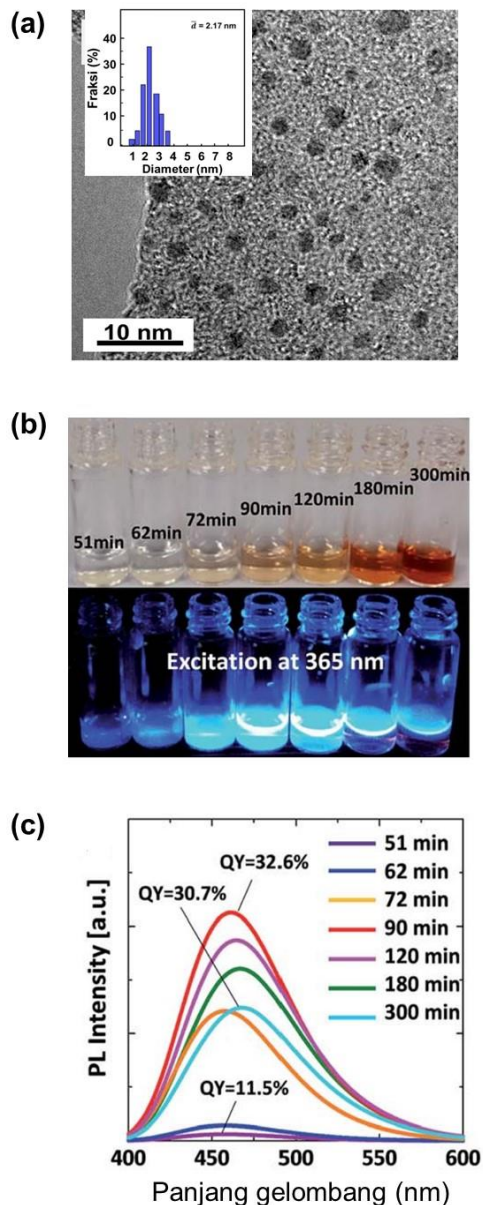
Sebagai salah satu material nano fotoluminesensi, karbon dot (*carbon dots*; CDs) menunjukkan potensinya yang besar sebagai agen penanda biologis karena sifat unggulnya, seperti spektrum emisi yang mudah diatur dari biru hingga merah, biokompatibilitas yang baik, metode sintesis yang sederhana, dan mudah difungsionalisasi dengan berbagai biomolekuler seperti protein, DNA, atau antibodi. Bahkan, lebih jauhnya material ini diharapkan dapat menjadi agen cerdas multifungsi dalam dunia biomedis.

Dalam beberapa tahun terakhir, kami telah berfokus pada pengembangan material karbon dot (CDs) sebagai agen penanda biologis melalui pendekatan studi eksperimen, komputasi, dan *machine learning* (Iskandar dkk., 2019; Nuryadin dkk., 2017; Ogi dkk., 2014; Permatasari dkk., 2016; Permatasari dkk., 2018; Wang dkk., 2011). Pada tahap awal, penelitian berfokus untuk mempelajari mekanisme yang berperan dalam perbaikan sifat fotoluminesensinya seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6. Berdasarkan hasil studi dari berbagai karakterisasi lanjut seperti *X-Ray Photoemission Spectroscopy* (XPS), dan *Energy Electron Loss Spectroscopy* (EELS) mengindikasikan bahwa karakteristik perubahan struktur material CDs selama reaksi memiliki dampak yang signifikan terhadap sifat fotoluminesensinya. Secara spesifik, spektrum N1s XPS mengindikasikan bahwa terdapat 3 konfigurasi ikatan C-N yang mungkin terbentuk pada struktur CDs berupa *pyridinic-N*, *pyrrolic-N*, dan *graphitic-N* (Gambar 2.6 (a) dan (b))(Permatasari dkk., 2016). Peningkatan intensitas PL dikaitkan dengan persentase *pyridinic-N* yang maksimal yang disertai dengan persentase *pyrrolic-N* yang minimal (Gambar 2.6 (c)). Penemuan ini mengindikasikan bahwa konfigurasi C-N pada struktur CDs berevolusi selama proses sintesis, dan memegang peranan penting dalam efisiensi fotoluminesensinya.



Gambar 2.6 (a) Ilustrasi struktur CDs dengan kehadiran 3 jenis konfigurasi C-N. (b) Spektrum XPS N1s. (c) Kurva korelasi konsentrasi konfigurasi C-N terhadap intensitas fotoluminesensinya (PL). Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry dan Springer Nature (Ogi dkk., 2014; Permatasari dkk., 2016).

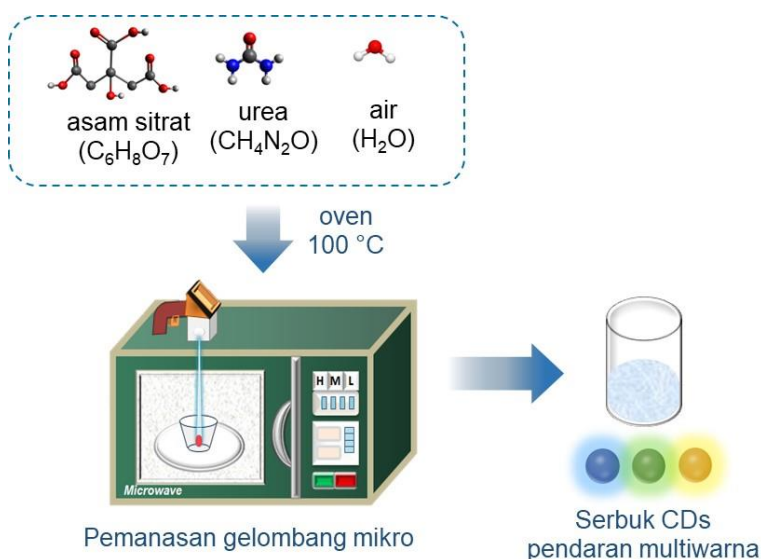
Penelitian lanjutan berbasis eksperimen juga mengindikasikan bahwa waktu reaksi dan jenis prekursor yang efektif diperlukan untuk mencapai sifat fotoluminesensi yang (Ogi dkk., 2014, 2016; Permatasari dkk., 2018). Misalnya, penggunaan asam sitrat dan urea dengan konsentrasi optimum, yang dipanaskan melalui metode hidrotermal dapat menghasilkan material CDs yang berukuran diameter rata-rata 2,17 nm (Gambar 2.7 (a)). Selama 300 menit reaksi, komposisi struktur CDs berevolusi sehingga menyebabkan intensitas PL yang berubah-berpindah biru (Gambar 2.7 (b)). Intensitas PL mencapai maksimum dengan nilai efisiensi atau *Photoluminescence Quantum Yield* (PLQY) sebesar 32,6% pada saat reaksi berlangsung 90 menit (Gambar 2.7 (c)) (Ogi dkk., 2014).



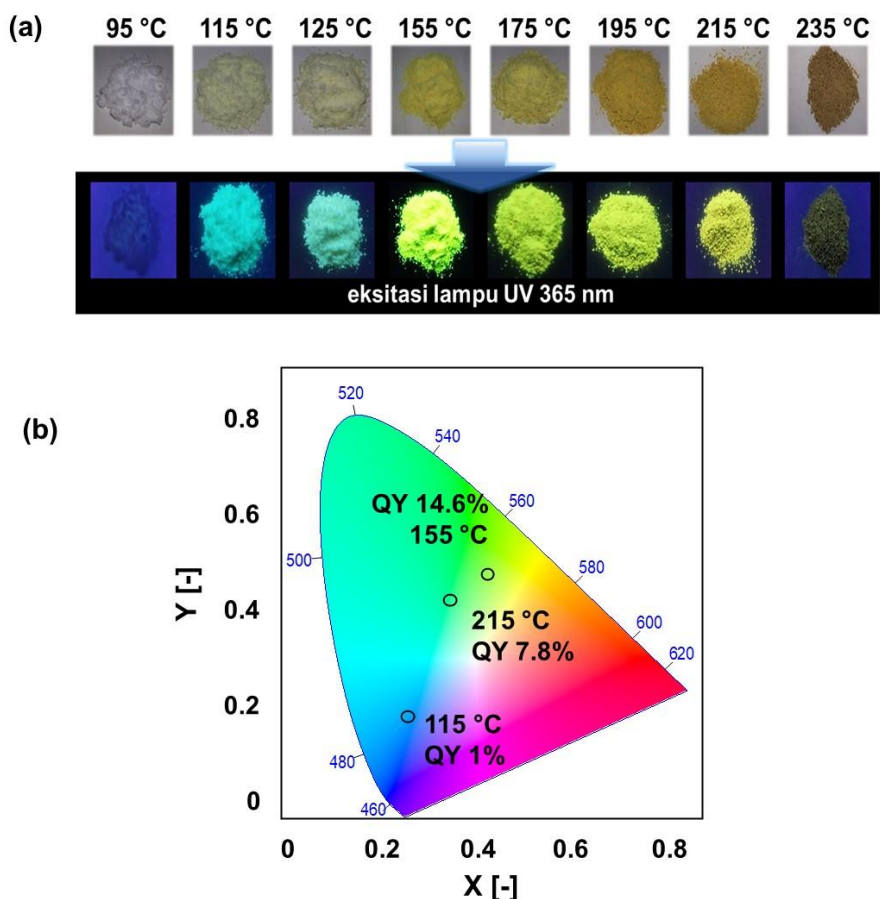
Gambar 2.7 (a) Gambar TEM dan kurva distribusi ukuran partikel CDs. (b) Foto digital sampel CDs pada cahaya tampak dan di bawah sinar UV. (c) Spektrum emisi PL dari material CDs dan nilai PLQY yang diukur selama 300 menit sintesis. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry dan Springer Nature (Ogi dkk., 2014; Permatasari dkk., 2016).

Dalam rangka memenuhi kebutuhan agen penanda biologis yang dapat menghasilkan pendaran multiwarna dan dapat diproduksi dalam skala besar, pengembangan metode sintesis yang sederhana dan ramah lingkungan telah kami lakukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 (Permatasari dkk.,

2018; Permatasari dkk., 2016). Integrasi studi eksperimen dan komputasi *Density Functional Theory* (DFT) menunjukkan bahwa melalui pengaturan rasio konsentrasi atom nitrogen terhadap karbon dan jenis konfigurasi ikatan C-N nya, energi celah pita dari material akan bergeser. Pergeseran atau perubahan energi celah pita ini dapat mengubah sifat fotoluminesensi material CDs. Secara eksperimen, pendaran multiwarna dari CDs dapat diatur secara tidak langsung melalui pengaturan suhu akhir pada reaksi sintesis. Dengan mengatur suhu akhir pemanasan dari 95-215 °C, sifat fotoluminesensi material ini dapat menghasilkan dari pendaran warna biru hingga kuning (Gambar 2.9 (a)). Material CDs dengan efisiensi atau nilai efisiensi kuantum (PLQY) tertinggi sebesar 14,6% dapat diperoleh ketika suhu sampel mencapai 155 °C, dengan emisi cahaya berwarna hijau-kuning (Gambar 2.9 (b)). Temuan ini merupakan sebuah inovasi yang signifikan dalam pengembangan metode sintesis material CDs yang mudah dan ramah lingkungan.

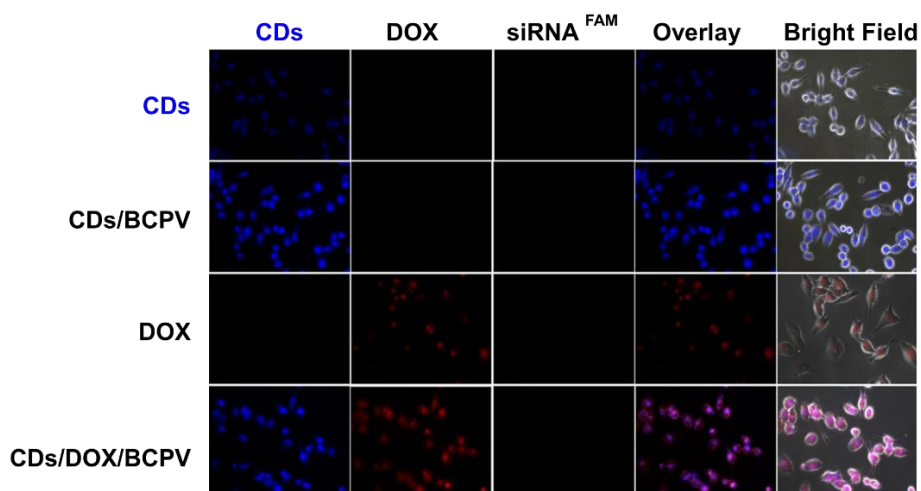


Gambar 2.8 Ilustrasi metode sintesis sederhana material CDs melalui pemanasan gelombang mikro. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Permatasari, Nakul, dkk., 2021).



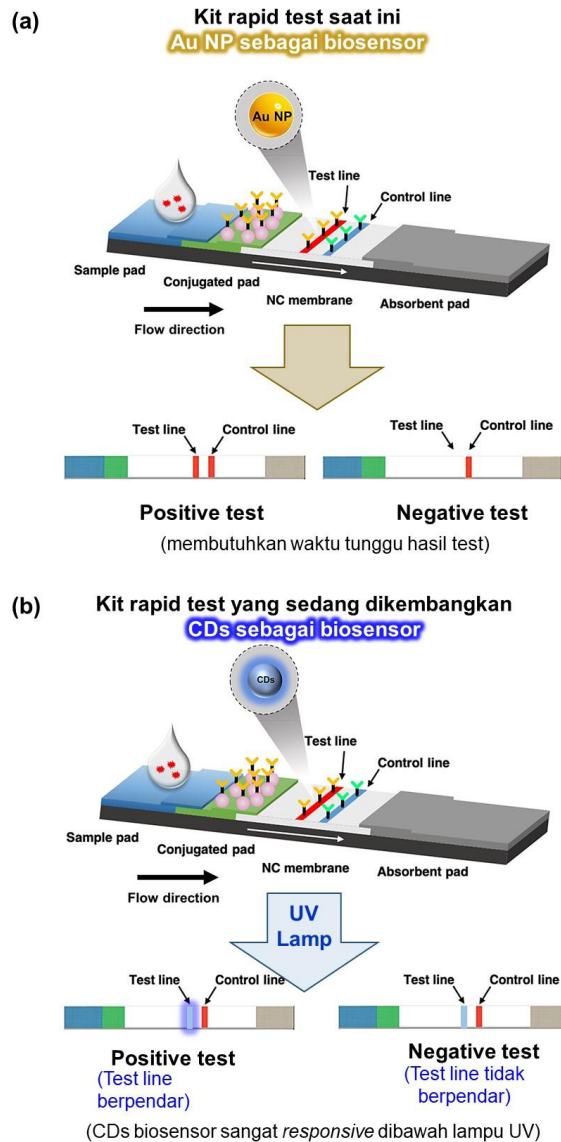
Gambar 2.9 (a) Foto digital sampel serbuk CDs yang memiliki pendaran multiwarna, diperoleh dari optimasi temperatur akhir reaksi. (b) Diagram CIE dari warna emisi dan nilai PLQY material CDs yang disintesis. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Permatasari, Nakul, dkk., 2021).

Material CDs yang kami kembangkan kemudian diuji potensi aplikasinya sebagai agen penanda biologis pada sel kanker pankreas manusia (MiaPaCa-2). Hasil mikroskopi flouresensi menunjukkan bahwa material CDs berpendar biru dan berpotensi sebagai agen penanda biologis pada sel kanker pankreas manusia (MiaPaCa-2), seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Gambar mikroskop fluoresensi sel MiaPaCa-2. Fluoresensi biru berasal dari CDs, sementara fluoresensi merah berasal dari DOX. Fluoresensi hijau berasal dari siRNA yang berlabel FAM. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemical Society (Yang dkk., 2019).

Selain itu, baru-baru ini, hasil kerja sama kami dan peneliti di bidang biologi, farmasi dan komputasi telah berhasil mengeksplor potensi CDs sebagai obat antiviral pada virus SARS-CoV-2 (COVID-19) dan juga kemampuan memodulasi yang cukup responsif pada ACE2 di beberapa sel reseptor virus SARS-CoV-2 (COVID-19) (Fibriani dkk., 2023). Hal ini mengindikasikan bahwa struktur CDs yang dikembangkan di laboratorium kami cukup responsif atau memiliki *binding affinity* yang cukup baik dengan biomolekular baik reseptor ataupun virus SARS-CoV-2 itu sendiri. Berdasarkan temuan tersebut, saat ini pengembangan *kit rapid test* virus SARS-CoV-2 berbasis CDs sedang dilakukan dengan kerjasama bersama tim peneliti di Program Studi Biologi, SITH- ITB. Pada kit rapid tes tersebut, material CDs digunakan sebagai agen penanda biologis menggantikan material nano emas (Au) yang kini telah komersil dipakai di kit rapid tes. Material nano Au sendiri memiliki harga yang cukup mahal, karena bahan baku dan metode sintesis yang cukup kompleks, disertai dengan barang produksi dalam negeri. Gambar 2.11 menunjukkan skema kit rapid test yang sedang dikembangkan, di mana material CDs akan berpendar di bawah sinar lampu UV bila menangkap antibodi dari virus SARS-CoV-2. Dengan demikian, diharapkan waktu diagnostik akan menjadi lebih singkat dibandingkan dengan kit rapid tes berbasis *immunofluorometric assay* menggunakan material nano Au yang saat ini digunakan.



Gambar 2.11 Skema prinsip kerja kit rapid test virus SARS-CoV-2 (COVID-19) menggunakan (a) material nano Au dan (b) rancangan kit rapid tes berbasis CDs yang sedang dikembangkan.

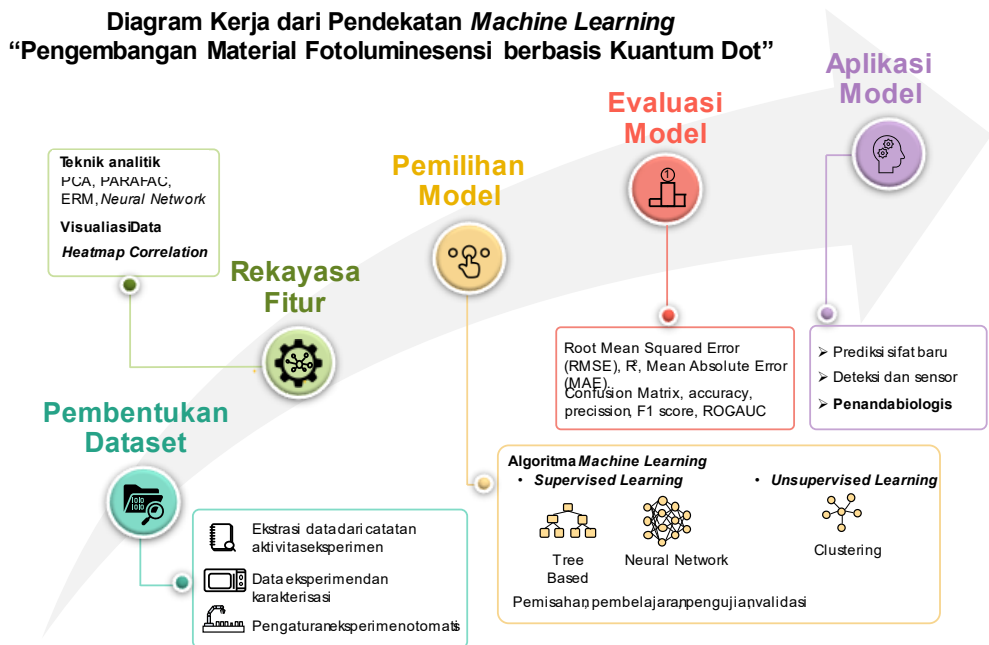
Temuan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif terhadap pengembangan sumber daya bioteknologi di Indonesia, berupa mendukung kemandirian negara Indonesia dalam penyediaan agen penanda biologis berkualitas tinggi, tetapi terjangkau secara ekonomis. Dengan demikian, diharapkan bahwa hasil riset ini tidak hanya membuka peluang baru dalam penelitian ilmiah, tetapi juga mendukung upaya penyediaan agen penanda biologis yang berkualitas baik dan murah bagi masyarakat Indonesia.

Dalam usaha sistematis untuk meningkatkan sensitivitas dalam proses penanda biologis, fokus penelitian kami saat ini terletak pada pengembangan material karbon dot yang menggabungkan sifat fluoresensi dan fosforesensi. Pada tahap fluoresensi, material ini merespons dengan mengemisikan foton hanya saat terpapar oleh sumber foton tambahan, seperti sinar UV dari lampu. Secara menarik, sifat fosforesensinya memungkinkan material untuk tetap mengemisikan foton beberapa saat setelah sumber eksitasi dihilangkan. Keberlanjutan emisi cahaya ini memiliki peran sentral dalam peningkatan kualitas dan sensitivitas pada aplikasi sebagai agen penanda biologis, membuka potensi baru dalam pemetaan dan pemahaman proses biologis yang kompleks secara saintifik.

Untuk meningkatkan efisiensi proses penelitian, selain menerapkan pendekatan eksperimen dan studi komputasi seperti yang telah menjadi langkah rutin, kami juga mengadopsi pendekatan melalui studi *Machine Learning*. Baru-baru ini, pendekatan *machine learning* mulai banyak digunakan dalam pengembangan nanomaterial karena kemampuannya untuk mengefisienkan proses optimasi sifat nanomaterial atau mengeksplor jenis atau struktur nanomaterial baru (Hong dkk., 2022; Senanayake dkk., 2022; Thonghlueng dkk., 2023; X. Wang dkk., 2021; Xing dkk., 2023). Dalam tahap ini, *machine learning* berfungsi sebagai alat yang memainkan peran krusial dalam memproses data besar dan kompleks. Secara umum, diagram kerja *Machine Learning* yang kami rancang ditunjukkan oleh Gambar 2.12.

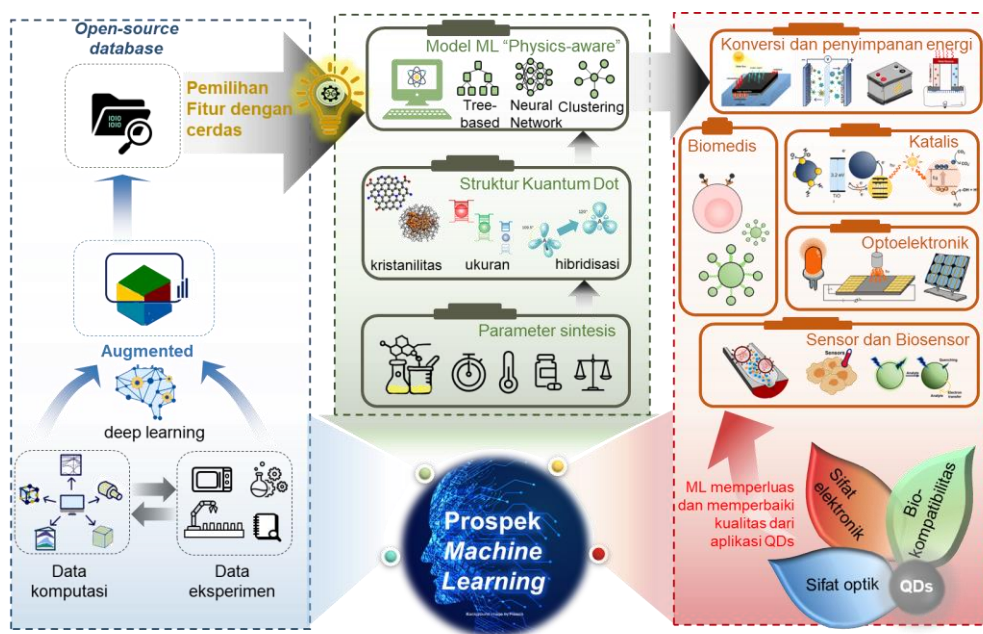
Pertama, kami memulai dengan Pembentukan Dataset, di mana data fosforesensi dan parameter kualitas sifat fosforesensi, misalnya panjang gelombang atau *lifetime* dikumpulkan dari hasil eksperimen dan simulasi komputasi. Langkah berikutnya adalah Rekayasa Fitur, di mana kami mengidentifikasi dan memilih fitur-fitur (parameter) yang paling relevan untuk model *machine learning*, serta melakukan normalisasi untuk memastikan keseragaman data. Setelah itu, kami memasuki tahap Pemilihan Model, di mana kami memilih model *machine learning* yang paling sesuai dengan karakteristik data dan tujuan penelitian. Proses pelatihan model dilakukan menggunakan subset pelatihan untuk memahami pola-pola dalam data dan menyesuaikan parameter model. Tahap krusial berikutnya adalah Evaluasi Model, di mana model diuji pada dataset pengujian yang belum pernah dilihat sebelumnya untuk mengukur kinerja dan generalisasi model. Metrik evaluasi seperti akurasi dan F1 score digunakan untuk menilai

performa model. Akhirnya, hasil dari model yang telah dilatih diterapkan pada Aplikasi Model untuk implementasi dalam situasi dunia nyata, dalam hal ini adalah sebagai agen penanda biologis. Melalui pemantauan dan pemeliharaan yang berkelanjutan, kami memastikan kinerja model *machine learning* tetap optimal.



Gambar 2.12 Diagram kerja *Machine Learning* pada penelitian pengembangan material fotoluminesensi berbasis kuantum dot. Gambar diadaptasi dari (Muyassiroh dkk., 2022).

Dengan pendekatan ini, kami tidak hanya mempercepat identifikasi dan pemahaman sifat-sifat material, tetapi juga menambah dimensi saintifik yang mendalam pada eksplorasi kami dalam mengembangkan agen penanda biologis yang canggih. Lebih jauhnya, pendekatan *Machine Learning* ini dapat dimanfaatkan secara luas dalam pengembangan material kuantum dot dengan berbagai sifat yang unggul, sehingga dapat diaplikasikan di berbagai bidang, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Gambaran prospek pemanfaatan pendekatan *machine learning* untuk pengembangan material kuantum dot dengan berbagai sifat yang unggul sehingga dapat dimanfaatkan pada berbagai aplikasi (Muyassiroh dkk., 2022).

3. PENERAPAN SIFAT FOTOTERMAL MATERIAL NANO

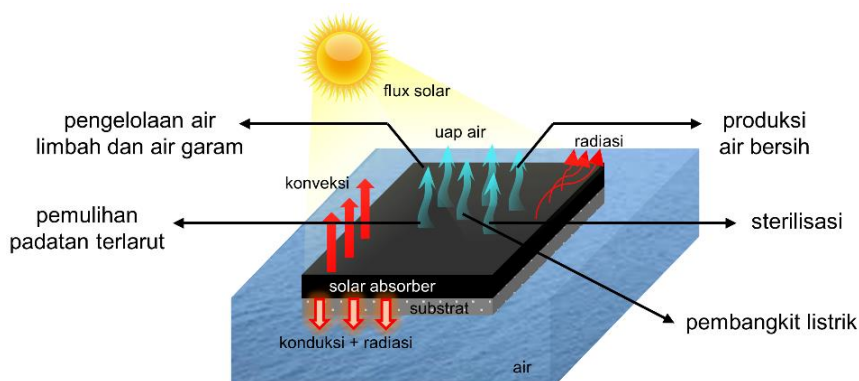
Fenomena fototermal merupakan fenomena konversi energi secara langsung dari energi cahaya menjadi energi termal atau panas yang dihasilkan dari fotoeksitasi elektron. Salah satu keunggulan sifat fototermal dari material nano adalah ketepatan modulasi panas pada area tertentu sampai ke skala nano. Selain itu, dengan struktur elektronik dan sifat optik yang unik, material nano menunjukkan resonansi plasmonik permukaan yang terlokalisasi, efek kurungan kuantum, dan fenomena menarik lainnya. Semua atribut ini dan digabungkan dengan luas permukaan yang besar, sifat permukaan yang dapat diatur, serta struktur yang dapat dikontrol, sehingga cocok untuk fungsi fototermal. Secara umum, berdasarkan perbedaan interaksi antara gelombang elektromagnetik dan material, mekanisme fototermal dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu 1) pemanasan plasmonik terlokalisasi pada material logam, 2) relaksasi non-radiatif pada material semikonduktor, dan 3) vibrasi termal pada material karbon.

Selain sifat fotoluminesensi seperti yang sudah dibahas di bab sebelumnya, karbon dot (CDs) juga memiliki sifat fototermal yang telah kami coba untuk dimanfaatkan dalam aplikasi evaporator tenaga surya dan sebagai agen terapi kanker. Seperti yang disampaikan pada bahasan sebelumnya, karakteristik CDs mudah diatur dan dikontrol melalui proses sintesis dan fungsionalisasi. Sebagai contoh, kami telah mengembangkan metode sintesis CDs menggunakan pemanasan gelombang mikro (*microwave*) dari prekursor asam sitrat dan urea, menghasilkan CDs dengan kemampuan absorbansi lebar sampai daerah cahaya tampak yang berpotensi untuk diaplikasikan sebagai *solar absorber* pada aplikasi evaporator tenaga surya (Rahmawati dkk., 2023). Kami juga sudah mendesain CDs melalui pemanasan hidrotermal sehingga memiliki kemampuan absorbansi pada daerah *First NIR window* (650-900 nm) dan menunjukkan potensi yang baik sebagai agen terapi kanker (Permatasari dkk., 2018; Permatasari dkk., 2023; Yang dkk., 2019).

3.1 Karbon Dots untuk Aplikasi Evaporator Tenaga Surya

Evaporator tenaga surya atau *solar evaporator* merupakan teknologi ramah lingkungan yang memanfaatkan tenaga surya sebagai sumber energi yang kemudian dikonversi menjadi energi panas. Panas yang dihasilkan tersebut

dapat digunakan di berbagai aplikasi termasuk dapat digunakan untuk proses evaporasi air sebagai penghasil air bersih. Pemanasan air secara langsung menggunakan tenaga surya seperti yang terjadi pada evaporator konvensional menghasilkan efisiensi yang rendah. Hal ini terjadi karena kemampuan absorbansi air yang rendah dan kehilangan panas melalui proses konveksi, konduksi, dan radiasi yang dapat menurunkan kinerja evaporator tenaga surya. Penggunaan material fototermal berukuran nano sebagai *solar absorber* telah dilaporkan mampu meningkatkan kinerja evaporator tenaga surya (Gao dkk., 2018). Produksi air bersih menggunakan teknologi evaporator tenaga surya dari berbagai sumber air (seperti air laut, air payau, atau air limbah industri) dianggap sebagai salah satu aplikasi paling menjanjikan di masa depan dengan kualitas air melebihi kualitas standar WHO berdasarkan konsentrasi ion untuk air minum. Tidak hanya menghasilkan air bersih, evaporator tenaga surya juga berpotensi diaplikasikan dalam pengelolaan air limbah dan air garam, sterilisasi, pemulihan sumber daya, bahkan untuk pembangkit listrik (Gambar 3.1) (Xu dkk., 2023).



Gambar 3.1 Skema proses konversi fototermal pada sistem evaporator tenaga surya dan potensi aplikasinya. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Indriyati dkk., 2021).

Evaluasi kinerja evaporator tenaga surya dapat ditinjau dari dua parameter penting, yaitu besar laju evaporasi dan nilai efisiensi evaporasinya. Laju evaporasi ($\dot{m}$) didefinisikan sebagai perubahan massa (Δm) selama waktu iradiasi tertentu (Δt) melalui luas permukaan area tertentu (A), seperti pada persamaan berikut (Liu dkk., 2017):

$$\dot{m} = \Delta m / (A \Delta t) \quad (3.1)$$

Nilai efisiensi evaporasi (η) didefinisikan sebagai rasio energi panas yang tersimpan dalam uap air terhadap total energi cahaya yang menyinari, yang diformulasikan berdasarkan persamaan (2), di mana h_{LV} adalah perubahan entalpi total dan merupakan gabungan dari *sensible heat* dan entalpi vaporisasi, C_{opt} adalah konsentrator optik, dan q_i adalah daya penyinaran dari *solar simulator* (Liu dkk., 2017).

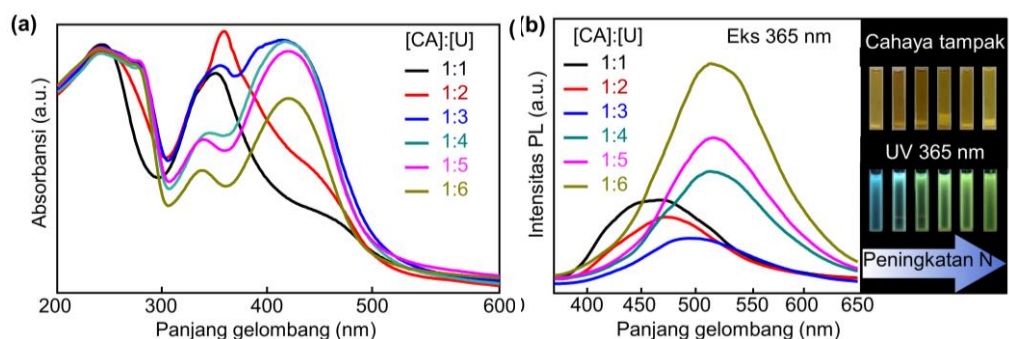
$$\eta = \frac{\dot{m}h_{LV}}{C_{opt}q_i} \quad (3.2)$$

Selain nilai efisiensi dan laju evaporasi, kinerja evaporator tenaga surya juga ditinjau dari beberapa parameter penting lainnya, bergantung pada jenis aplikasi uap air yang dihasilkan. Sebagai contoh pemanfaatan evaporator tenaga surya untuk produksi air bersih, laju produksi air bersih menjadi parameter utama dalam mengevaluasi kinerja evaporator dan hal ini sangat berkaitan dengan proses kondensasi uap air yang dihasilkan. Sementara untuk pengolahan air limbah dan air garam, laju evaporasi yang mampu bersaing dengan teknologi komersil saat ini (seperti membran *reverse osmosis*) menjadi tantangan tersendiri dalam memanfaatkan keunggulan material nano. Padatan terlarut yang terkandung dalam air limbah atau air garam berpotensi sebagai pengotor yang dapat menurunkan kinerja evaporator, namun di sisi lain sistem evaporator tenaga surya dimodifikasi sedemikian rupa agar padatan terlarut ini dapat dikumpulkan dan dimanfaatkan kembali setelah proses evaporasi. Kemurnian padatan (ϕ) serta perbandingan jumlah padatan yang dapat dikumpulkan terhadap jumlah padatan di cairan umpan awal (ε) menjadi penentu keberhasilan pemanfaatan evaporator tenaga surya dalam pengolahan air limbah dan air garam. Pemanfaatan evaporator tenaga surya untuk proses sterilisasi melibatkan parameter suhu, tekanan, serta waktu kontak untuk dapat menonaktifkan patogen pada peralatan medis atau material lain. Saat pembangkit listrik tenaga surya terkonsentrasi membutuhkan infrastruktur fasilitas yang besar dan kompleks, evaporator tenaga surya menawarkan teknologi yang murah karena juga bisa menghasilkan listrik melalui nanogenerator triboelektrik atau termoelektrik (Gao dkk., 2018; Li dkk., 2018).

Pada aplikasi evaporator tenaga surya, sumber energi berupa cahaya matahari yang memiliki spektrum lebar dengan panjang gelombang dari 300 nm sampai 2500 nm. Karbon dot memiliki spektrum absorpsi yang lebar dan bersifat fototermal. Pemanfaatan karbon dot untuk evaporator tenaga

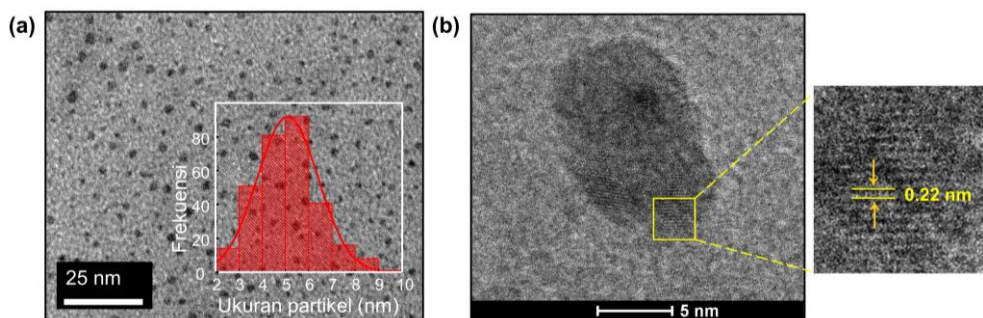
surya baru diteliti dan diinvestigasi pada beberapa tahun terakhir (Indriyati dkk., 2021; Pal dkk., 2018; Z. Wang dkk., 2020; Zheng dkk., 2020). Dibandingkan material grafit, grafena, *carbon nanotube* (CNT), atau polimer terkarbonisasi, karbon dot memiliki konduktivitas termal yang relatif lebih rendah, sehingga dapat menekan atau mengurangi kehilangan panas pada sistem evaporator tenaga surya (Z. Wang dkk., 2020).

Tim kami telah berhasil memodifikasi sifat fototermal CDs melalui variasi rasio prekursor antara asam sitrat dan urea dalam proses sintesis CDs menggunakan teknik pemanasan gelombang mikro (Rahmawati dkk., 2023). CDs yang dihasilkan memiliki absorbansi yang lebar sampai ke daerah cahaya tampak (Gambar 3.2 (a)) dan memiliki pendaran dari warna biru sampai hijau (Gambar 3.2 (b)) untuk rasio molar asam sitrat: urea sebesar 1:1 sampai 1:6. Berdasarkan gambar TEM, partikel CDs terdeteksi memiliki bentuk *quasi-spherical* yang cukup seragam dengan distribusi ukuran dari 2-9 nm dan ukuran rata-rata sebesar $5,0 \pm 1,2$ nm (Gambar 3.3 (a)). Gambar HR-TEM (Gambar 3.3 (b)) menunjukkan jarak kisi 0,22 nm.

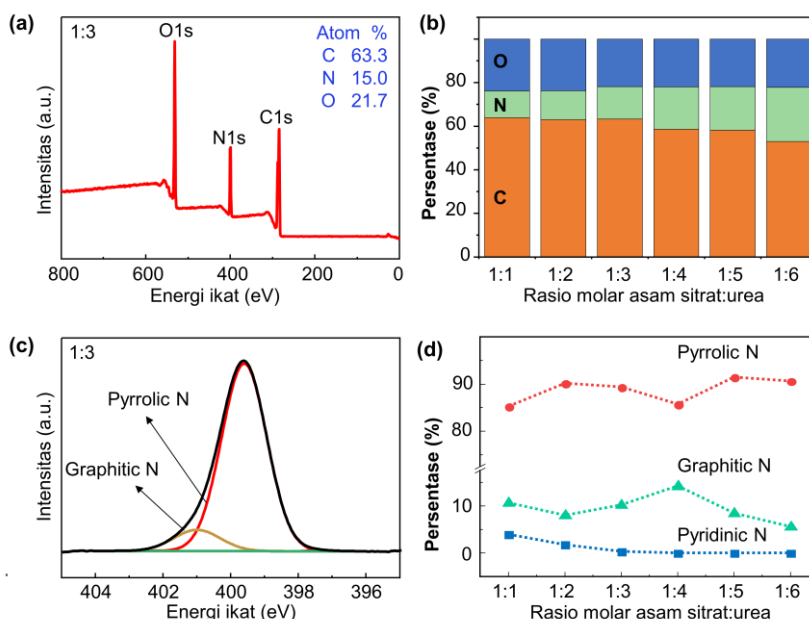


Gambar 3.2 Sifat optik karbon dot yang disintesis dari asam sitrat dan urea dengan berbagai konsentrasi menggunakan pemanasan gelombang mikro. (a) Spektra absorbansi, (b) Spektra photoluminesensi pada panjang gelombang eksitasi 365 nm (inset: foto CDs menggunakan sinar cahaya tampak (atas) dan sinar UV pada 365 nm (bawah)). Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Rahmawati dkk., 2023).

Analisis lebih lanjut menggunakan XPS membuktikan CDs hanya mengandung elemen karbon (C), nitrogen (N), dan oksigen (O) tanpa ada kontaminasi elemen lain (Gambar 3.4 (a)). Penambahan konsentrasi urea pada asam sitrat sejalan dengan penambahan persentase elemen nitrogen yang terdeteksi (Gambar 3.4 (b)). Dekonvolusi spektrum N 1s untuk rasio molar asam sitrat dan urea 1:3 menunjukkan atom C dan N berikatan dalam konfigurasi *pyrrolic* dan *graphitic* (Gambar 3.4 (c)), sedangkan untuk rasio molar lainnya, terdeteksi ada yang mengandung konfigurasi *pyridinic* dengan persentase seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.4 (d).



Gambar 3.3 (a) Morfologi partikel CDs dengan rasio molar asam sitrat dan urea 1:3 (inset: distribusi ukuran partikel). (b) Gambar HR-TEM dari CDs dengan rasio molar asam sitrat dan urea 1:3. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Rahmawati dkk., 2023).



Gambar 3.4 (a) Hasil X-ray *photoelectron spectroscopy* (XPS), (b) Persentase kandungan atom-atom penyusun partikel CDs, (c) dekonvolusi spektrum pyrrolic N dan graphitic N, dan d) persentase kandungan pyrrolic, graphitic, dan pyridinic dari sampel CDs dengan rasio molar asam sitrat dan urea 1:3. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Rahmawati dkk., 2023).

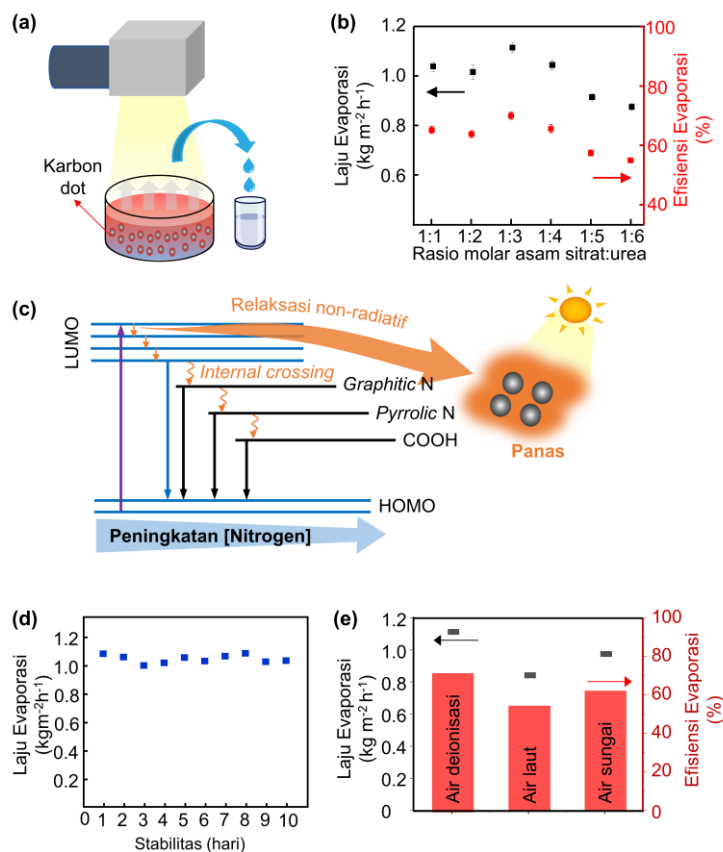
Dengan kemampuan absorptansi yang lebar, CDs berpotensi diaplikasikan sebagai *solar absorber* sekaligus sebagai material fototermal dalam sistem evaporator tenaga surya. Pada sistem volumetrik, CDs didispersikan di dalam air (Gambar 3.5 (a)). Dengan sistem seperti ini, evaporator mampu menghasilkan laju evaporasi maksimum sebesar $1,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ dan efisiensi evaporasi

sebesar 70% (Gambar 3.5 (b)). Mekanisme fototermal yang terjadi pada material CDs dapat dijelaskan sebagai berikut. Saat energi matahari mengenai CDs, energi tersebut diserap dan elektron akan tereksitasi dari level HOMO ke LUMO. Kemudian elektron yang tereksitasi akan mengalami relaksasi radiatif berupa emisi dan relaksasi non-radiatif berupa panas (Gambar 3.5 (c)). Semakin banyak level energi baru di antara HOMO dan LUMO, yang mungkin karena berbagai gugus fungsi dan konfigurasi C-N di permukaan CDs, maka semakin banyak relaksasi non-radiatif (panas) yang dihasilkan. Efek sinergi konfigurasi *pyrrolic* dan *graphitic* (Gambar 3.4 (c)) berperan besar dalam konversi cahaya ke panas secara efektif melalui vibrasi termal dan relaksasi non-radiatif, sehingga mampu menghasilkan kinerja evaporator yang optimum (Rahmawati dkk., 2023). Dengan nilai zeta potensial CDs yang tinggi (-40,6 mV), CDs mampu mempertahankan dispersinya dalam air dengan sangat baik, tanpa terjadi presipitasi, sehingga kinerja evaporator tenaga surya relatif stabil sampai 10 hari (Gambar 3.5 (d)).

Dalam rangka penerapan teknologi evaporator pada kondisi sebenarnya di lapangan, kinerja evaporator diuji tidak hanya menggunakan *input* air deionisasi, tetapi juga menggunakan jenis air lain seperti air laut atau air sungai. Kami mengevaluasi kinerja evaporator tenaga surya menggunakan air laut dari Pantai Pamengpeuk, Jawa Barat, dan air sungai Cikapundung di Kota Bandung. Walaupun kinerjanya sedikit lebih rendah dibandingkan menggunakan air deionisasi, tetapi laju evaporasi dan efisiensi evaporasi yang diperlihatkan pada Gambar 3.5 (e) menunjukkan potensi besar material CDs sebagai *solar absorber* sekaligus material fototermal untuk aplikasi evaporator tenaga surya sistem volumetrik.

Perlu dipahami juga bahwa proses pembuatan CD dapat dikelompokkan dalam dua metode besar, yaitu metode *top-down* dan metode *bottom-up*. Metode *top-down* melibatkan pemecahan struktur bahan berbasis karbon yang berdimensi lebih tinggi menjadi partikel berskala nano melalui proses fisika maupun kimia, di antaranya ablasi laser, elektrokimia, atau oksidasi kimia (Iravani dan Varma, 2020; Kaczmarek dkk., 2021; Wang dkk., 2014). Di sisi lain, metode *bottom-up* merupakan metode yang melibatkan sumber karbon berdimensi rendah, seperti asam sitrat, glukosa, dan polimer, yang kemudian dikonversi menjadi partikel karbon berukuran nano melalui proses karbonisasi dan polimerisasi. Di antara berbagai macam metode *bottom-up* seperti solvotermal, ultrasonik, dan dekomposisi termal, proses pembuatan

karbon dot dengan metode hidrotermal dan pemanasan gelombang mikro (*microwave*) yang paling banyak dipakai, khususnya untuk aplikasi fototermal. Metode hidrotermal melibatkan pemanasan larutan yang mengandung prekursor karbon dalam kondisi tekanan dan suhu yang tinggi. Di lain sisi, pada proses sintesis menggunakan metode pemanasan gelombang mikro, energi yang dihasilkan oleh gelombang mikro diserap oleh molekul polar dan dikonversi menjadi panas melalui gesekan dielektrik antarmolekul (De Medeiros dkk., 2019), sehingga panas terbentuk dari dalam material yang dapat mempercepat laju reaksi. Setelah proses sintesis selesai, karbon dot yang dihasilkan dapat dipurifikasi menggunakan teknik filtrasi, sentrifugasi, atau membran dialisis.



Gambar 3.5 (a) Skema evaporator tenaga surya sistem volumetrik berbasis material karbon dot, (b) Kinerja evaporator tenaga surya menggunakan karbon dot yang dibuat dengan berbagai variasi rasio molar asam sitrat:urea, (c) Mekanisme konversi fototermal pada karbon dot, (d) Stabilitas kinerja karbon dot pada evaporator tenaga surya yang disimpan selama 10 hari, dan (e) Performa karbon dot pada evaporator tenaga surya menggunakan berbagai *input* air (air deionisasi, air laut, dan air sungai). Gambar diproduksi atas seizin American Chemistry Society (Rahmawati dkk., 2023).

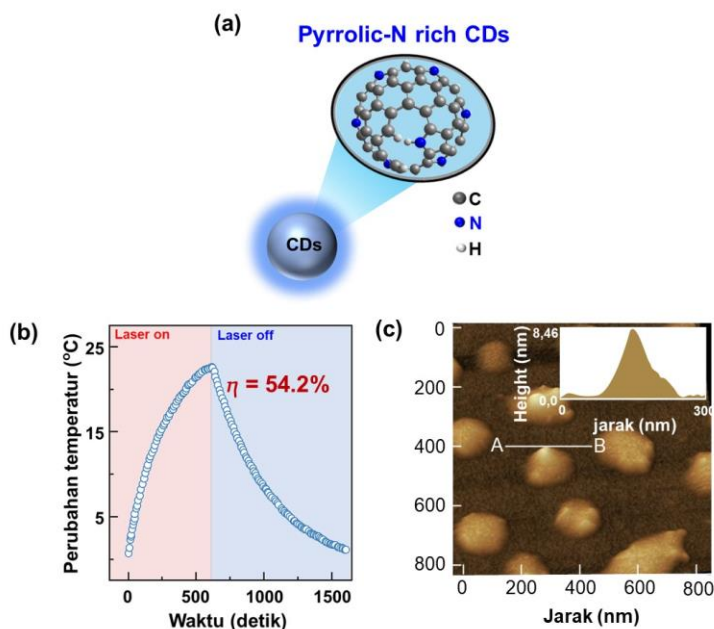
3.2 Karbon Dot sebagai Agen Terapi Kanker

Fenomena fototermal juga biasanya digunakan pada proses terapi kanker berbasis fototermal. Pada proses terapi kanker berbasis fototermal, dibutuhkan agen fototermal yang mampu menyerap cahaya dengan panjang gelombang pada *First Near Infra Red (NIR) Window* (650-900 nm) dan mengonversinya menjadi panas. Energi panas yang dihasilkan kemudian akan digunakan untuk membunuh sel kanker, di mana sel kanker akan mati bila mencapai suhu 42 °C selama 3 menit. Meskipun terapi kanker fototermal ini masih dalam tahap uji klinis, tetapi metode terapi ini dipercaya memiliki potensi besar untuk menjadi salah satu alat penting dalam pengobatan kanker di masa depan.

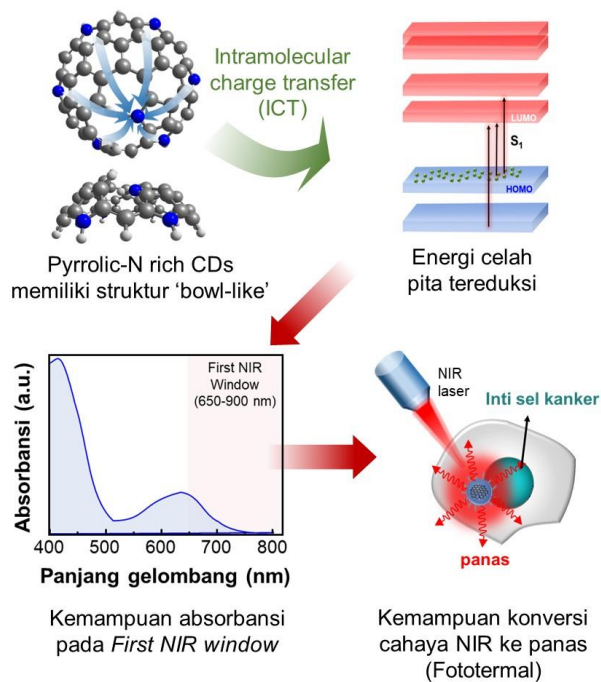
Hingga saat ini beberapa agen fototermal telah dikembangkan seperti nanopartikel emas, nanoroda emas, dan oksida grafena (GO). Meskipun material tersebut menunjukkan efisiensi konversi fototermal yang cukup tinggi, tetapi biokompatibilitas yang rendah dan toksisitas yang cukup tinggi masih menjadi hambatan besar. Selain itu, proses produksi skala besar yang ramah lingkungan dengan biaya efektif masih menjadi tantangan untuk memperluas penggunaan klinis. Lebih jauhnya, terapi kanker fototermal yang terintegrasi dengan kemoterapi, *direct biolabeling*, dan terapi kanker fotodinamik menjadi fokus penelitian juga untuk meningkatkan efektivitas dan presisi dalam pengobatan kanker.

Berdasarkan studi kami sebelumnya mengenai sifat fotoluminesensi material CDs, tim kami juga berhasil mendesain CDs dengan kemampuan fototermal pada daerah *First NIR window* (650-900 nm) dan menunjukkan potensi yang baik sebagai agen terapi kanker fototermal, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.6 (Permatasari dkk., 2018). Material ini memiliki permukaan yang kaya akan *pyrrolic-N* sehingga memiliki kemampuan absorbansi cahaya pada daerah *First NIR window* (Gambar 3.6 (a)). Material ini kemudian menunjukkan kemampuan fototermal dengan nilai efisiensi fototermal sebesar 54,2%, di mana dapat memanaskan air hingga mencapai suhu 52 °C selama 10 menit (Gambar 3.6 (b)). Ukuran material CDs ini yang cukup kecil, diameter rata-rata 8,46 nm (Gambar 3.6 (c)), akan bermanfaat untuk menaikkan selektivitas terapi, karena kemampuan memanaskan secara lokal hanya disekitar sel kanker.

Kemampuan fototermal yang dimiliki oleh CDs tersebut berkaitan dengan adanya puncak absorbansi baru di daerah *First NIR window*. Studi komputasi, *Density Functional Theory* (DFT) yang kami lakukan, mengindikasikan bahwa puncak absorbansi tersebut berkaitan erat dengan konsentrasi dan posisi dari konfigurasi *pyrrolic-N* dapat memunculkan puncak absorbansi tambahan pada daerah *First NIR window* (Gambar 3.7) (Permatasari dkk., 2023). Selain itu, kombinasi berbagai gugus fungsi nitrogen dan oksigen pada permukaan CDs berperan penting dalam pengaturan sifat optik material CDs, terutama sifat absorbansi (Permatasari dkk., 2023; Santika dkk., 2022; Umami dkk., 2022). Hal ini dimungkinkan karena kombinasi berbagai gugus fungsi dapat menyebabkan terjadinya hibridisasi orbital, sehingga mereduksi energi celah pita (Santika dkk., 2022; Umami, Permatasari, Muyassiroh, dkk., 2022). Dengan demikian, kemampuan fototermal dari material CDs dapat didesain melalui desain fungsionalisasi permukaannya dengan atom nitrogen dan oksigen.



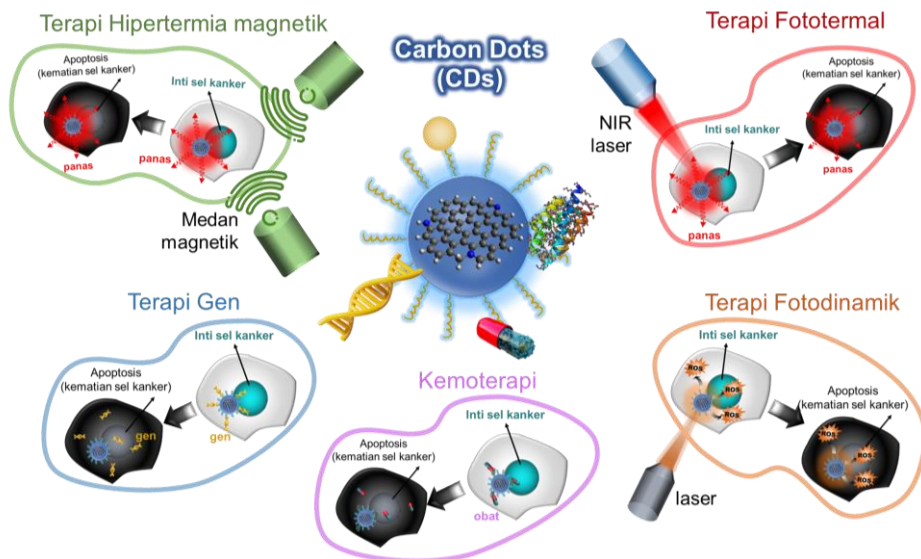
Gambar 3.6 (a) Desain struktur Pyrrolic-N rich CDs. (b) Perubahan temperatur air yang disinari oleh laser NIR 655 nm 1,2 W/cm² dengan kehadiran CDs sebanyak 0,22 g/mL selama 10 menit saat disinari dan setelah disinari. (c) Gambar AFM dari material CDs dan profil ketinggian partikelnya. Gambar diproduksi ulang atas seizin Springer Nature (Permatasari dkk., 2023).



Gambar 3.7 Ilustrasi peran Pyrrolic-N-rich pada sifat fotothermal material CDs yang diperoleh dari hasil studi DFT. Gambar diproduksi ulang atas seizin Springer Nature (Permatasari dkk., 2023).

Dikarenakan material CDs ini juga memiliki sifat fotoluminesensi yang baik, dengan pendaran warna biru, material ini sehingga secara bersamaan berfungsi juga sebagai agen penanda biologis. Selain itu, muatan permukaan yang bernilai negatif juga bermanfaat digunakan sebagai agen penghantar obat, terutama obat kanker *Doxuribin* yang bermuatan permukaan positif (Yang dkk., 2019). Ke depannya, tim kami bekerja sama dengan tim ahli dari farmasi dan biologi akan berfokus untuk mendesain material CDs yang juga memiliki kemampuan menghasilkan *Reactive Oxygen Species* (ROS) sehingga dapat diaplikasikan sebagai agen terapi kanker fotodinamik. Dengan demikian, material CDs yang kami kembangkan ini diharapkan dapat berfungsi sebagai agen multifungsi (agen terapi, penanda biologis, dan penghantar obat) pada terapi kanker terintegrasi yang melibatkan terapi fotothermal, terapi fotodinamik, kemoterapi, terapi gen, dan terapi hipertermia magnetik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.8. Dengan demikian, pengembangan material CDs ini diharapkan menjadi akselerasi dalam pengembangan teknologi terapi kanker yang terintegrasi, sehingga meningkatkan efektivitas dan presisi dalam pengobatan kanker. Lebih jauhnya, material CDs yang dikembangkan ini juga dapat menjadi tonggak

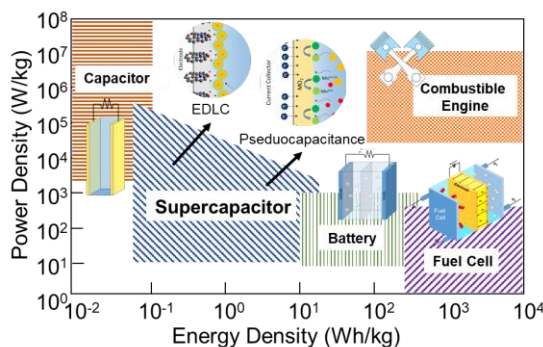
kemandirian Indonesia dalam produksi agen terapi kanker, agen penanda biologis, dan agen penghantar obat sendiri, sehingga bisa mendukung biaya terapi kanker yang efektif, presisi, dan harganya terjangkau.



Gambar 3.8 Teknologi terapi kanker yang terintegrasi melibatkan terapi fototermal, terapi fotodinamik, kemoterapi, terapi gen, dan terpi hipertermia magentik yang memanfaatkan material CDs sebagai agen terapi multifungsi.

4. MATERIAL NANO UNTUK APLIKASI PENYIMPANAN ENERGI

Perangkat penyimpan energi telah mendapatkan sangat banyak perhatian pada satu dekade terakhir ini untuk mendukung penerapan energi terbarukan. Hingga saat ini, perangkat penyimpan energi telah dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi, di antaranya yaitu kendaraan listrik, perangkat elektronik portabel, maupun penyimpanan energi stasioner. Beberapa jenis perangkat penyimpan energi yang banyak dikembangkan, yaitu baterai, kapasitor, superkapasitor, dan sel bahan bakar (*fuel cell*). Dalam penerapan perangkat penyimpan energi, densitas energi dan densitas daya merupakan aspek penting karena menentukan pemilihan jenis perangkat yang digunakan dalam suatu aplikasi. Hubungan antara densitas energi dan densitas daya dari berbagai perangkat penyimpan energi tersebut digambarkan pada plot Ragone (Gambar 4.1). Baterai, khususnya baterai ion litium banyak diaplikasikan sebagai perangkat penyimpan energi utama pada kendaraan listrik karena memiliki densitas energi tinggi. Sementara itu, superkapasitor yang memiliki kelebihan berupa densitas daya tinggi berperan besar dalam akselerasi maupun pengereman regeneratif pada kendaraan listrik (Partridge dan Abouelamaimen, 2019). Kami hingga saat ini telah mengembangkan dan menerapkan material nano untuk diaplikasikan sebagai elektrode superkapasitor maupun baterai ion litium. Berkat ukurannya yang kecil, material nano berperan untuk menghasilkan perangkat penyimpan energi yang memiliki performa tinggi. Beberapa hasil penelitian kami yang memanfaatkan material nano untuk perangkat penyimpan energi akan dijelaskan pada uraian di bawah ini.



Gambar 4.1 Grafik Densitas Daya dan Densitas Energi (Plot Ragone) dari berbagai perangkat penyimpan energi. Gambar diproduksi ulang atas seizin MDPI (Fitri Aulia Permatasari, Irham, dkk., 2021).

4.1 Material Nano untuk Aplikasi Superkapasitor

Superkapasitor merupakan salah satu perangkat penyimpan energi yang banyak diteliti oleh ilmuwan karena memiliki kelebihan berupa densitas daya yang tinggi, mudah dioperasikan, siklus hidup yang panjang, dan keamanan yang tinggi (Zhang dan Zhao, 2009). Berdasarkan mekanisme kerjanya, superkapasitor dibagi menjadi dua jenis, yaitu superkapasitor lapis rangkap listrik dan pseudokapasitor. Superkapasitor lapis rangkap listrik bekerja melalui adsorpsi ion pada antarmuka elektrolit dan elektrode akibat adanya medan listrik (Lokhande dkk., 2019). Sementara itu, pada pseudokapasitor, selain terjadi peristiwa adsorpsi ion juga terjadi reaksi reduksi-oksidasi (redoks) secara cepat di permukaan material aktif yang berkontribusi terhadap peningkatan kapasitansi (H. Gao dkk., 2017). Penggunaan material nano pada superkapasitor dapat meningkatkan luas permukaan yang aktif dalam proses adsorpsi ion sehingga berdampak pada peningkatan kapasitansi spesifik elektrode superkapasitor. Oleh karena kelebihan yang ditawarkan oleh material nano tersebut, kami telah melakukan sejumlah penelitian dengan mengaplikasikan material nano sebagai elektrode superkapasitor. Dengan kelebihan tersebut, superkapasitor berbasis material nano dapat diterapkan pada berbagai perangkat lain seperti kendaraan berat (Gambar 4.2). Adapun material nano yang telah kami kembangkan untuk aplikasi sebagai superkapasitor dibagi menjadi dua jenis yaitu material nano berbasis karbon dan logam transisi sulfida.

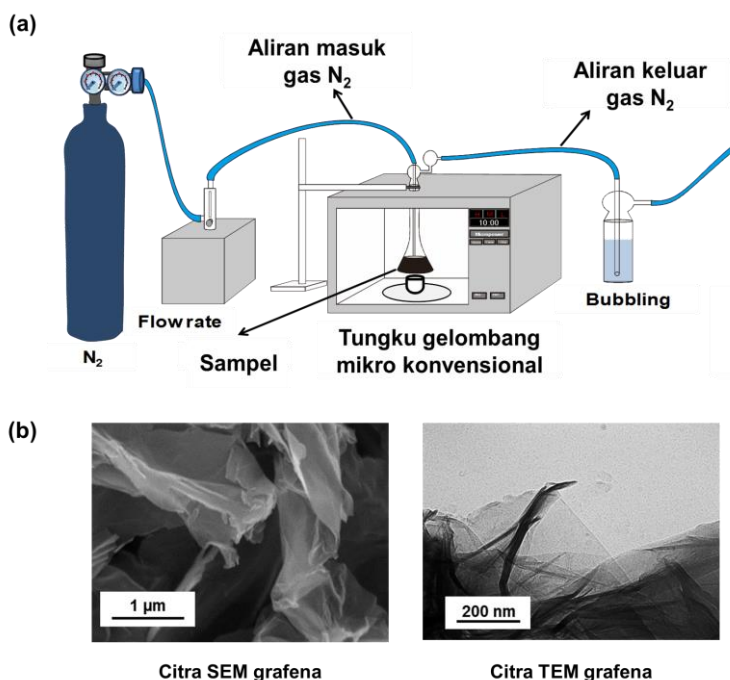


Gambar 4.2 Berbagai aplikasi dari superkapasitor (a) pesawat, (b) bis, dan (c) pembangkit listrik. Gambar didesain oleh Freepik.

Superkapasitor yang tersusun atas material berbasis karbon bekerja dengan mekanisme lapis rangkap listrik yang mengandalkan adsorpsi ion pada antarmuka elektrolit dan elektrode. Oleh karena itu, nanostrukturisasi pada material jenis ini sangat penting untuk menghasilkan performa perangkat superkapasitor yang tinggi. Keunggulan dari elektrode superkapasitor yang tersusun dari material karbon, yaitu siklus hidup yang panjang karena material ini memiliki kestabilan kimia dan elektrokimia yang baik (Lokhande dkk., 2019). Kami telah mengembangkan material grafena yang merupakan salah satu jenis material nano berbasis karbon sebagai material aktif elektrode superkapasitor. Grafena adalah material karbon berstruktur nano dua dimensi berupa lembaran datar yang tersusun atas satu lapis atom-atom karbon (Novoselov dkk., 2004). Material ini memiliki beberapa sifat menarik seperti luas permukaan per satuan massa yang besar ($2,63 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), konduktivitas elektronik tinggi ($2 \times 10^3 \text{ S cm}^{-1}$), serta mobilitas transfer muatan tinggi ($2,5 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ pada suhu ruang) (Novoselov dkk., 2012). Oleh karena sifat-sifat menarik itulah potensi aplikasi grafena dalam perangkat penyimpan energi cukup luas yang di antaranya adalah sebagai material aktif elektrode superkapasitor. Grafena dimanfaatkan sebagai material aktif elektrode superkapasitor, khususnya yang menggunakan mekanisme lapis rangkap listrik (*electric double layer*) (Tan dan Lee, 2013), serta material aditif untuk meningkatkan performa superkapasitor yang bekerja menggunakan mekanisme pseudokapasitansi (W. Liu dkk., 2018).

Metode pengelupasan kimia merupakan salah satu metode yang populer digunakan untuk mensintesis grafena dari prekursor grafit karena dapat menghasilkan produk dalam skala besar. Secara garis besar, proses pengelupasan kimia terdiri atas tahapan oksidasi grafit yang memerlukan asam kuat, pengelupasan dengan bantuan sonikasi untuk menghasilkan oksida grafena (GO), dan reduksi kandungan gugus fungsi yang mengandung oksigen pada GO untuk mendapatkan produk akhir grafena yang disebut oksida grafena tereduksi (RGO). Kami telah mengembangkan suatu metode baru dalam tahapan reduksi GO menjadi RGO berupa proses reduksi menggunakan gelombang mikro dalam suasana gas inert N_2 untuk mengurangi re-oksidasi selama terjadinya reduksi GO. Skema proses reduksi tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.3(a). Hasil karakterisasi TEM menunjukkan bahwa sampel RGO atau grafena yang dihasilkan berbentuk lembaran tipis dan terlihat adanya lapisan tunggal grafena (Gambar 4.3 (b)).

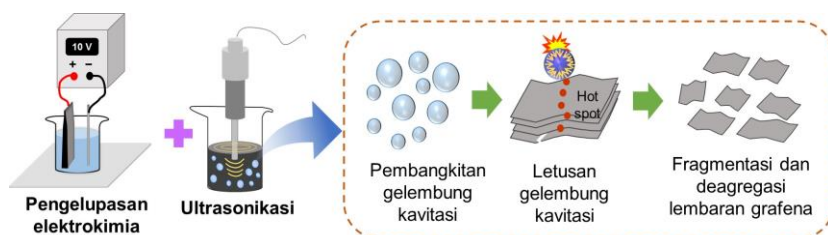
Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa proses reduksi yang dibantu oleh gelombang mikro pada atmosfer N_2 dapat meningkatkan konduktivitas listrik grafena daripada proses reduksi yang dilakukan tanpa atmosfer N_2 (Iskandar dkk., 2017). Dengan demikian, peningkatan konduktivitas listrik yang dihasilkan melalui reduksi GO pada atmosfer N_2 berpotensi untuk menghasilkan elektrode superkapasitor berperforma tinggi.



Gambar 4.3 (a) Skema reduksi GO menggunakan gelombang mikro pada atmosfer gas N_2 , (b) citra SEM dan TEM RGO yang diperoleh melalui reduksi dengan bantuan gelombang mikro. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Iskandar dkk., 2017).

Selain metode pengelupasan kimia yang disebutkan sebelumnya, kami juga telah mengembangkan metode pengelupasan elektrokimia untuk mensintesis material grafena. Kelebihan dari metode ini, yaitu lebih ramah lingkungan karena dapat meminimalisasi penggunaan asam kuat, murah, dan mudah dalam mengontrol sifat grafena yang dihasilkan. Kami telah melakukan modifikasi metode tersebut dengan melakukan pemrosesan awal (*pre-treatment*) prekursor grafit berupa pencelupan pada campuran asam H_2SO_4/H_2O_2 sebelum dilakukan pengelupasan elektrokimia. Hasilnya menunjukkan bahwa pemrosesan awal tersebut menghasilkan lapisan grafena yang lebih tipis sehingga kapasitansi spesifik elektrode super-

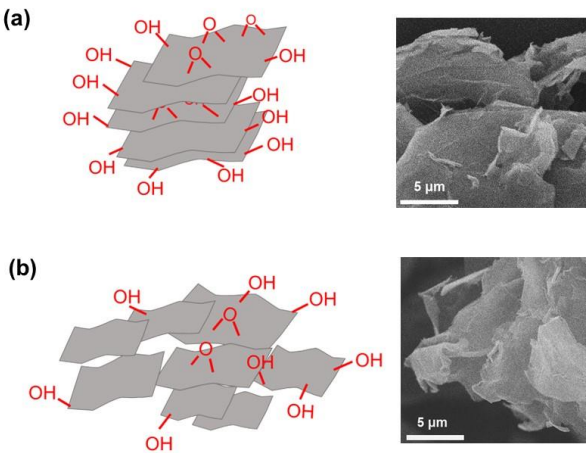
kapasitor dapat meningkat. Selain itu, konduktivitas listrik material grafena yang dihasilkan melalui metode ini lebih tinggi daripada grafena menggunakan metode pengelupasan kimia yang dihasilkan sebelumnya (Abdillah dkk., 2021). Pengembangan lainnya yang telah kami lakukan, yaitu penambahan perlakuan ultrasonikasi pada grafena hasil pengelupasan menggunakan metode elektrokimia seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4 untuk mengatasi masalah agregasi lapisan grafena yang dapat menurunkan kapasitansi spesifik elektrode superkapasitor. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan ultrasonikasi dapat meningkatkan derajat pengelupasan grafena sehingga berakibat pada peningkatan luas permukaan material (Gambar 4.5). Kemudian grafena yang diperoleh digunakan sebagai material aktif elektrode superkapasitor yang diilustrasikan pada Gambar 4.6(a). Pengujian *charging-discharging* superkapasitor dalam bentuk sel koin mengindikasikan bahwa sampel grafena yang diperoleh dengan penambahan proses ultrasonikasi memiliki kapasitansi spesifik lebih tinggi daripada tanpa diberi perlakuan ultrasonikasi (Gambar 4.6 (b)) (Abdillah dkk., 2022).



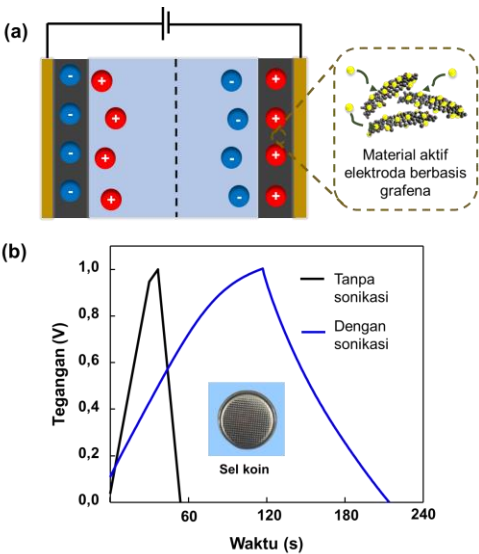
Gambar 4.4 Skema pengembangan pengelupasan elektrokimia dengan menambahkan proses ultrasonikasi. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Abdillah dkk., 2022).

Riset mengenai pemanfaatan material grafena untuk superkapasitor sangat mendukung optimalisasi sumber daya alam Indonesia mengingat negara ini memiliki ketersediaan karbon yang melimpah. Diharapkan pengembangan superkapasitor berbasis grafena juga dapat berperan untuk menunjang penerapan energi terbarukan di Indonesia dengan mengintegrasikannya pada kendaraan listrik maupun perangkat pemanen energi. Penelitian mengenai superkapasitor berbasis grafena ke depannya perlu diarahkan pada peningkatan kapasitansi spesifik dan densitas energi. Untuk mencapai hal tersebut, beberapa strategi dapat dilakukan di antaranya, yaitu modifikasi grafena menjadi arsitektur baru, pencampuran dengan material lain yang memiliki kapasitansi spesifik lebih tinggi, serta pengembangan

grafena untuk elektrode superkapasitor hibrida, yaitu suatu jenis penyimpan energi yang menggabungkan dua elektrode yang memiliki mekanisme penyimpanan muatan superkapasitif (adsorpsi ion) pada satu sisi dan mekanisme penyimpanan baterai (interkalasi ion) pada sisi lainnya.



Gambar 4.5 Ilustrasi dan citra SEM grafena yang dihasilkan (a) tanpa ultrasonikasi dan (b) dengan ultrasonikasi. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Abdillah dkk., 2022).



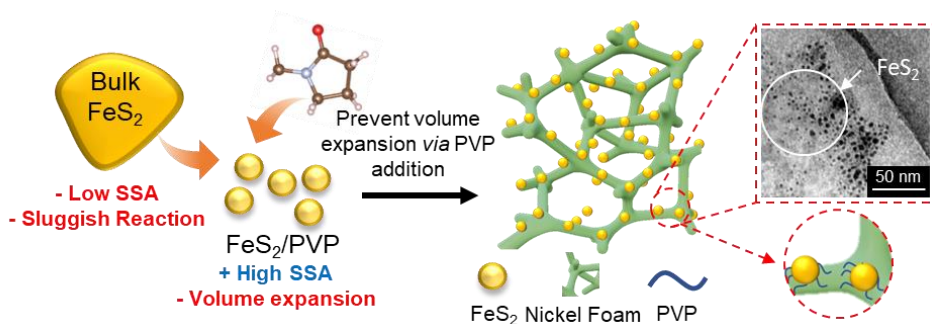
Gambar 4.6 (a) Ilustrasi superkapasitor yang menggunakan grafena sebagai material aktif elektrode (Abdillah dkk., 2023). Gambar diproduksi ulang atas seizin Elsevier. dan (b) kurva *charging-discharging* sel koin dengan elektrode grafena dengan dan tanpa perlakuan ultrasonikasi. Gambar diproduksi ulang atas seizin American Chemistry Society (Abdillah dkk., 2022).

Selain material nano berbasis karbon, kami juga telah melakukan penelitian mengenai material nano berbasis logam transisi sulfida untuk aplikasi sebagai elektrode superkapasitor. Material logam transisi sulfida tersebut telah menarik perhatian banyak peneliti akhir-akhir ini karena kekayaan reaksi redoksnya dan ketersediaannya di alam yang melimpah. Adanya reaksi redoks pada permukaan, atau yang dikenal juga dengan pseudokapasitansi pada material ini menghasilkan sebuah perangkat superkapasitor dengan kerapatan energi yang tinggi. Dengan nilai energi tersebut, superkapasitor memasuki sebuah tahap baru dalam pengembangannya yang memungkinkannya dikembangkan pada berbagai aplikasi baru. Berbagai jenis material logam transisi sulfida yang dapat dikembangkan untuk aplikasi superkapasitor di antaranya adalah FeS_2 , CuS , NiS , dan berbagai kombinasi lainnya.

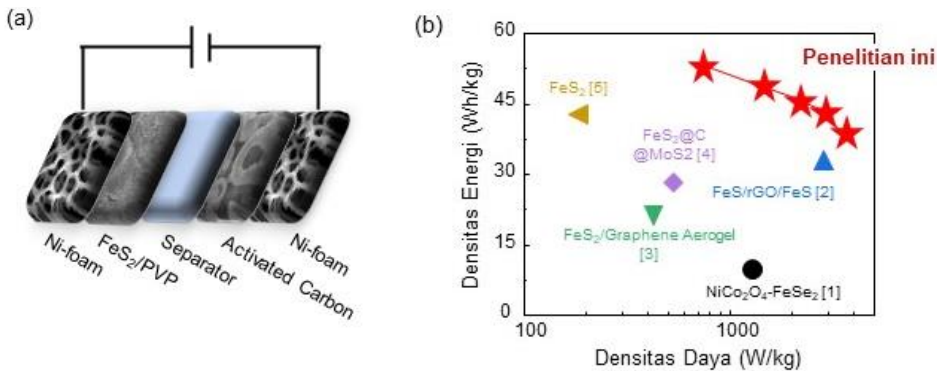
Luas area yang tinggi juga tetap menjadi faktor penting dalam menghasilkan superkapasitor dengan kapasitansi tinggi pada mekanisme pseudokapasitor. Oleh sebab itu, proses nanostrukturisasi juga menjadi hal yang penting dalam meningkatkan performa superkapasitor. Struktur nano juga memungkinkan proses difusi ion yang lebih cepat untuk menunjang kapasitansi yang besar dari sistem (Permatasari dkk., 2021). Pada penelitian ini, material logam transisi sulfida yaitu besi disulfida (FeS_2) juga telah dikembangkan (Irham, Abdillah, dkk., 2023). FeS_2 telah dikembangkan baik sebagai anode untuk baterai litium sulfur ataupun sebagai elektrode superkapasitor. Untuk dapat meningkatkan performa dari superkapasitor FeS_2 lebih jauh lagi, pengecilan ukuran hingga ukuran nano dapat dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan ini. Reaksi yang cepat dan tinggi menjadi salah satu permasalahan yang akan muncul dengan pengecilan ukuran ini, sebagaimana dijelaskan pada Gambar 4.7. Pemberian ligan, yaitu PVP diharapkan dapat mencegah degradasi material yang terlalu cepat akibat reaksi tersebut.

Di sini material PVP digunakan sebagai ligan dalam proses sintesis FeS_2 dengan menggunakan metode *hot-injection*. Sifat PVP yang dapat berperan sebagai perekat memungkinkan material FeS_2 untuk ditumbuhkan secara langsung pada substrat *nickel foam*. Kombinasi antara karakterisasi sampel dan simulasi berbasis *density functional theory* menunjukkan bahwa material PVP dapat meningkatkan *wettability* dan difusivitas ion dari sistem. Dengan metode penumbuhan langsung, material FeS_2 dapat menghasilkan

superkapasitor dengan performa yang sangat baik sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 4.8 (b).



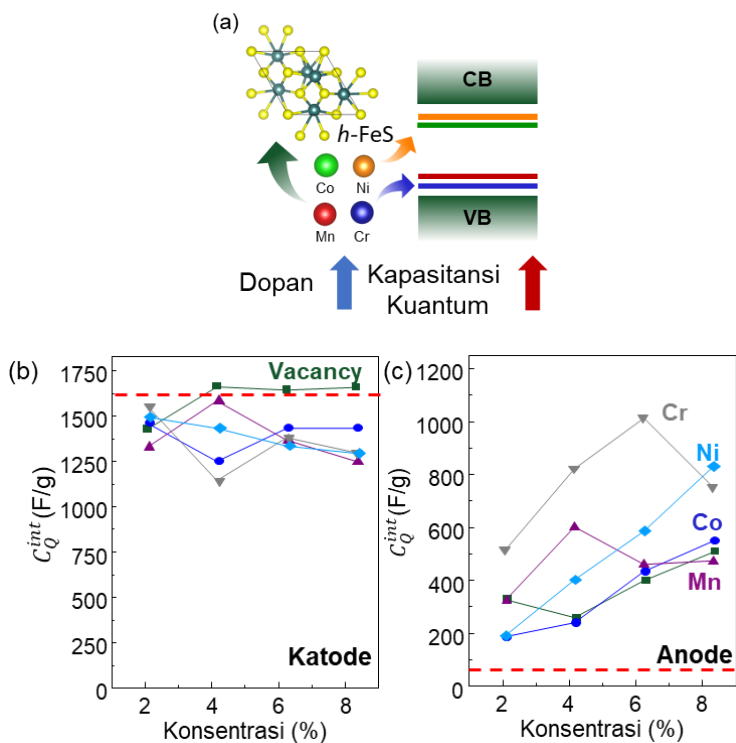
Gambar 4.7 Ilustrasi skematik peningkatan performa FeS₂. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Irham, Abdillah, dkk., 2023).



Gambar 4.8 (a) konfigurasi superkapasitornya. (b) Plot Ragone material FeS₂/PVP dibandingkan dengan material lain. Gambar diproduksi ulang atas seizin Royal Society of Chemistry (Irham, Abdillah, dkk., 2023).

Untuk dapat meningkatkan performa superkapasitor lebih jauh lagi, sebuah terobosan baru diperlukan. Mekanisme-mekanisme baru terus dikembangkan untuk memberikan gambaran baru dalam meningkatkan performa superkapasitor. Salah satu mekanisme baru yang mendapatkan banyak perhatian lebih pada saat ini adalah kapasitansi kuantum. Kapasitansi kuantum adalah sebuah kapasitansi yang bergantung terhadap rapat keadaan dari sistem (DOS) (Bisri dkk., 2017). Besar dari kapasitansi ini memengaruhi jumlah maksimal muatan yang dapat disimpan oleh sebuah material. Namun demikian, mekanisme ini belum banyak dipahami dan perkembangannya saat ini masih dalam tahap simulasi.

Mekanisme kapasitansi kuantum kemudian dikembangkan lebih lanjut untuk material transisi metal sulfida. Dengan menggunakan studi prinsip pertama, kapasitansi kuantum dihitung. Material besi sulfida, sebagai salah satu *emerging material*, dipilih sebagai salah satu contoh untuk memodelkan kapasitansi kuantum pada material-material transisi metal sulfida. Pada penelitian ini, perhitungan kapasitansi kuantum digunakan untuk memodelkan dampak dari dopan terhadap kapasitansi dari suatu elektrode superkapasitor.



Gambar 4.9 (a) Ilustrasi skematik penambahan *mid-gap states* pada h-FeS. (b-c) Nilai kapasitansi kuantum pada h-FeS sebagai katoda dan anoda. Gambar diproduksi ulang atas seizin Elsevier (Irham, Muttaqien, dkk., 2023).

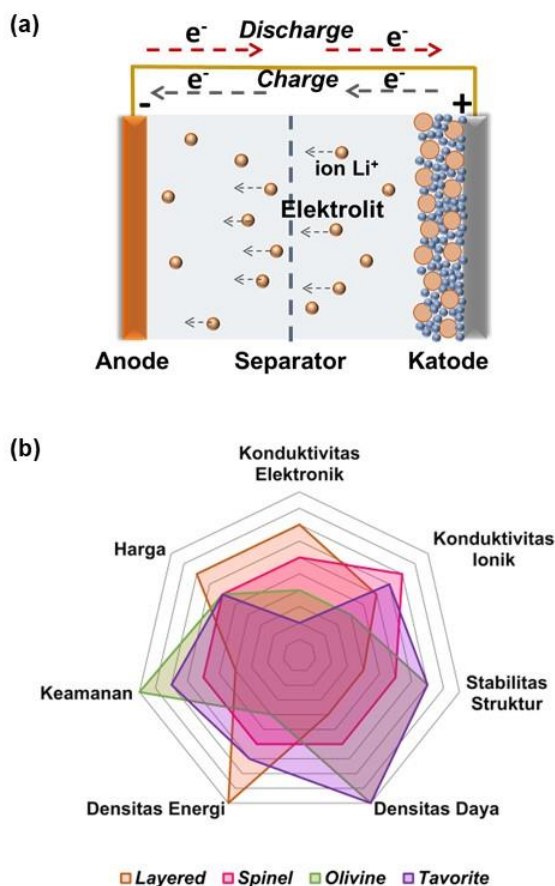
Material Cr, Mn, Co, dan Ni, digunakan pada penelitian kapasitansi kuantum sebagai dopan untuk material h-FeS. Dopan Cr menunjukkan nilai kapasitansi kuantum tertinggi sebesar 3076 F/g pada 0,6 V. Hal ini dimungkinkan karena material tersebut berhasil menciptakan keadaan *mid-gap* yang dapat digunakan untuk menyimpan muatan lebih banyak. Pada Gambar 4.9 menunjukkan secara skematik letak dari keadaan *mid-gap* pada masing-masing struktur h-FeS terdopan. Hasil kapasitansi kuantum

terintegrasi (C_Q^{int}) menunjukkan bahwa material dengan tipe dopan p dapat meningkatkan performa superkapasitor lebih baik lagi dibandingkan dengan tipe n . Penelitian ini memberikan gambaran kepada baru untuk meningkatkan performa dari superkapasitor secara lebih baik lagi ke depannya.

4.2 Material Nano untuk Aplikasi Baterai

Baterai ion litium saat ini menjadi kandidat utama sebagai perangkat penyimpan energi pada kendaraan listrik dan berbagai perangkat elektronik portabel. Berkat penggunaan baterai ion litium yang sangat masif ini, penemu teknologi baterai litium, yaitu John B Goodenough, Stanley Whittingham, dan Akira Yoshino mendapatkan nobel pada tahun 2019. Baterai ion litium memanfaatkan reaksi redoks untuk menggerakkan ion Li^+ dan elektron. Secara rinci, bagian-bagian baterai ion litium ditunjukkan pada Gambar 4.10(a). Suatu baterai ion litium terdiri atas katode (elektrode positif) sebagai sumber ion Li^+ , anode sebagai elektrode *counter*, elektrolit untuk menghantarkan ion-ion Li^+ , dan separator sebagai pemisah elektron antarkedua elektrode. Pada saat *charging*, ion Li^+ berpindah dari katode ke anode melalui elektrolit dan separator sedangkan elektron melewati rangkaian, lalu sebaliknya pada saat *discharging*.

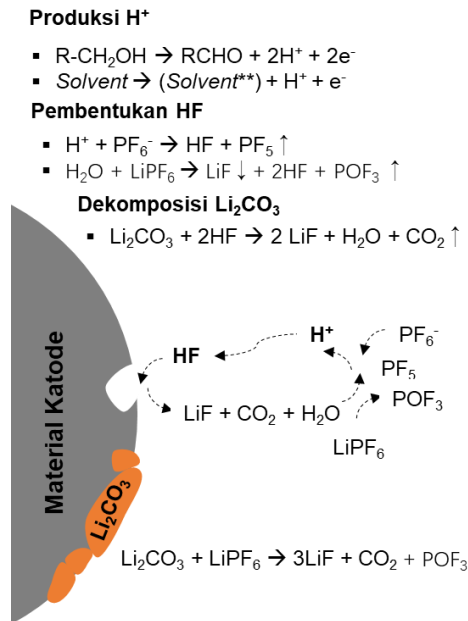
Pengembangan baterai ion litium terus berfokus untuk mengembangkan material yang memiliki kapasitas dan densitas energi tinggi, serta mampu bertahan pada siklus jangka panjang. Sebagai sumber ion Li^+ yang berperan signifikan dalam menentukan performa baterai, material katode (elektrode positif) menjadi bagian yang paling banyak diteliti dan dikembangkan. Tidak hanya berfokus dalam mengembangkan jenis material baru, berbagai penelitian juga berfokus untuk mengatasi berbagai permasalahan pada material katode untuk meningkatkan performanya. Berdasarkan jenis struktur, material katode dibedakan menjadi empat jenis, yaitu *layered*, *spinel*, *olivine*, dan *tavorite*. Setiap jenis struktur material katode memiliki kelebihan dan kelemahan masing-masing sehingga memerlukan penanganan masalah yang beragam (Gambar 4.10 (b)) (Suryadi dkk., 2023).



Gambar 4.10 (a) Skema baterai ion litium, dan (b) diagram radar berbagai jenis material katode. Gambar diproduksi ulang atas seizin Elsevier (Suryadi dkk., 2023).

Material-material katode yang menghasilkan densitas energi besar, tegangan kerja tinggi atau kapasitas tinggi sering kali mengalami permasalahan baik pada struktur maupun permukaan akibat reaksi samping antara elektrode-elektrolit. Permasalahan pada struktur merupakan permasalahan sifat intrinsik dari material katode tersebut. Sedangkan permasalahan-permasalahan di permukaan sering kali muncul akibat lebarnya tegangan kerja, elektrolit yang digunakan, serta adanya pengotor yang mengakibatkan pembentukan lapisan resistif berupa *solid-electrolyte interphase* (SEI), pembentukan spesies asam HF, dan pelarutan logam transisi, Gambar 4.11 (Manthiram, 2020). Berbagai permasalahan di permukaan ini dapat secara signifikan mengurangi performa dan masa hidup suatu baterai ion litium. Permasalahan permukaan inilah yang menimbulkan limitasi

penggunaan material katode densitas energi tinggi untuk aplikasi baterai yang lebih baik (*next generation battery*) dimasa yang akan datang.



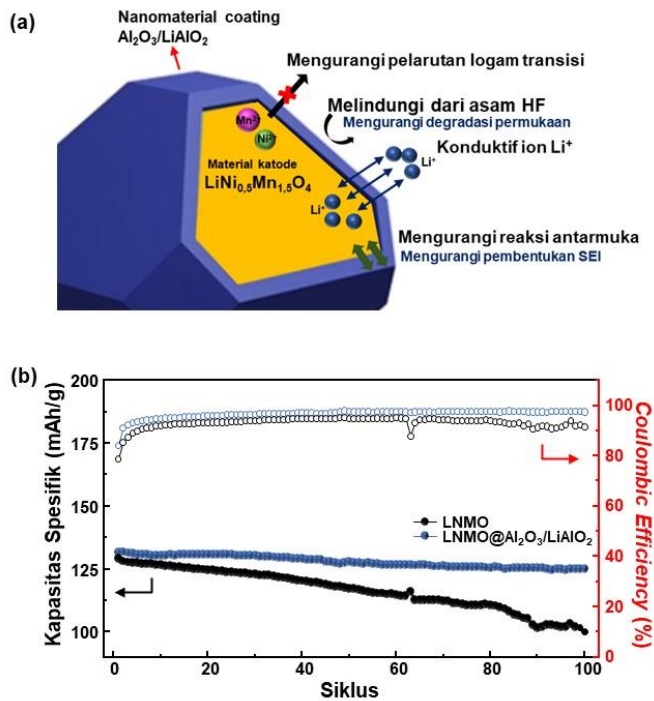
Gambar 4.11 Skema degradasi permukaan material katode (Manthiram, 2020).

Kami telah merintis penelitian untuk mengembangkan beberapa jenis material katode dengan densitas energi tinggi yang berpotensi untuk aplikasi *next generation battery*, seperti material katode dengan tegangan kerja tinggi $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$, material katode kapasitas tinggi kaya litium $Li_{1.2}Ni_{0.13}Co_{0.13}Mn_{0.54}O_2$, dan material katode kaya nikel $LiNi_{0.9}Mn_{0.05}Al_{0.05}O_2$. Jenis-jenis material katode tersebut saat ini masih belum dapat dikomersialisasikan karena memiliki beberapa kendala terutama degradasi di bagian permukaan. Oleh karena itu, kami juga menerapkan material nano untuk mengatasi berbagai permasalahan di material katode yang dikembangkan.

Teknologi mengaplikasikan material nano pada permukaan material katode sering disebut juga sebagai teknologi pelapisan nano (*nanocoating*). Material nano untuk aplikasi pelapis dipilih karena memiliki sifat unggul antara lain, ukuran kecil sehingga tidak menambah jarak difusi ion Li^+ secara signifikan, mampu mengurangi reaksi samping dengan elektrolit dan dapat melingkupi material katode secara lebih homogen. Sebagai contoh, kami dapat menyimpulkan bahwa material nano berbasis oksida (Al_2O_3 , $LiAlO_2$ dan

SiO₂) mampu meningkatkan performa material katode LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ dan Li_{1.2}Ni_{0.13}Co_{0.13}Mn_{0.54}O₂. Gambar 4.12(a) menunjukkan skematik keunggulan material nano dalam mengatasi berbagai permasalahan di permukaan material katode pada baterai ion litium. Kerusakan permukaan yang minim karena pengaplikasian material nano, material katode tegangan tinggi LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ mampu menunjukkan kestabilan siklus yang baik walaupun diuji pada temperatur tinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12(b).

Hasil-hasil positif dari penerapan material nano pada baterai ion litium menjadi salah satu alternatif solusi untuk mengatasi berbagai permasalahan dan meningkatkan performanya. Eksplorasi material nano secara lebih luas, baik pada katode, anode, atau elektrolit memberikan kesempatan dan harapan menghasilkan performa baterai yang lebih baik, aman, dan memiliki waktu hidup yang lebih lama. Namun, seperti pengaplikasian nano pada berbagai bidang yang lain, material nano pada baterai ion litium memerlukan berbagai perangkat karakterisasi canggih (*advanced characterization*) yang memberikan tantangan bagi para peneliti di Indonesia.



Gambar 4.12 Skematik keunggulan material nano sebagai material pelapis pada baterai ion litium, (b) Perbandingan performa material katode LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ pada tegangan 3,5 – 4,8 V di densitas arus 0,5 C tanpa dan dengan material nano Al₂O₃/LiAlO₂ pada temperatur tinggi.

5. PROSPEK MASA DEPAN DAN KESIMPULAN

Hasil penelitian yang telah diuraikan di atas memberikan gambaran yang sangat positif tentang potensi luar biasa inovasi material nano dalam pemanfaatan kemampuan konversi energi. Penggunaan material nano tidak hanya relevan dalam aplikasi pemanenan dan penyimpanan energi, tetapi juga dapat memberikan manfaat besar di bidang bioteknologi dan kesehatan. Penelitian yang telah dilakukan saat ini masih memiliki potensi yang besar untuk terus berkembang, baik melalui penemuan sifat dan fenomena baru yang unik lainnya maupun optimalisasi kinerja material yang sudah ada.

Dalam penelitian kuantum dot, terutama setelah pengumuman pemenang Nobel tahun ini, kita dapat mengantisipasi pertumbuhan pesat dalam penelitian lanjutan dan pengembangannya di berbagai aplikasi di masa depan. Material kuantum dot di masa depan diharapkan akan memegang peranan penting dalam era *quantum computing*, di mana perangkat komputer kuantum akan menggantikan komputer biner saat ini karena mempunyai kecepatan pemrosesan data yang sangat fantastis. Di samping itu, aplikasi material kuantum dot diharapkan akan menjadi kunci dalam pengembangan perangkat termoelektrik, yaitu material yang dapat mengonversi energi panas menjadi listrik. Perangkat fototermal ini memiliki signifikansi besar dalam efisiensi penggunaan energi sehari-hari, menghasilkan penghematan energi. Tidak hanya itu, perangkat fototermal juga berpotensi mendukung pengembangan sensor pada perangkat berbasis IoT (*Internet of Things*) yang di masa depan akan semakin banyak digunakan.

Dalam aplikasi bidang kesehatan, karbon dot yang kami kembangkan tengah diuji sebagai alat deteksi virus COVID-19 yang lebih terjangkau. Saat ini, alat deteksi cepat di pasaran menggunakan logam mulia, membuatnya mahal. Karbon dot menjanjikan pendekatan yang lebih ekonomis dan jika dikembangkan lebih lanjut kemungkinan dapat memberikan informasi kondisi kesehatan bahkan secara *real-time*. Beberapa saat lalu, tim peneliti dari MIT bahkan telah berhasil menciptakan *chip* berisi kuantum dot yang dapat ditempel pada kulit untuk memverifikasi status vaksinasi seseorang terhadap COVID-19. Selain itu, studi kami menunjukkan bahwa karbon dot dari bahan kunyit memiliki kinerja luar biasa dalam membasmi sel virus. Potensinya bukan hanya pada COVID-19, melainkan juga pada virus-virus lain. Namun, pengembangan ini masih di tahap awal, dan membutuhkan

penelitian lanjutan sebelum dapat diaplikasikan pada manusia. Indonesia, dengan kekayaan tumbuhan obat tradisional, memiliki potensi besar dalam menciptakan material karbon dot tipe lainnya dengan khasiat lebih unik dan unggul.

Di bidang penyimpanan energi, misalnya pada baterai litium, Indonesia memiliki sumber daya alam berlimpah untuk material katoda seperti nikel, kobalt, mangan, dan aluminium. Hal ini menempatkan Indonesia pada posisi yang menguntungkan. Oleh karena itu, langkah yang tepat adalah membangun industri baterai di Indonesia. Namun, perlu diingat bahwa teknologi baterai sebagaimana teknologi elektronik lainnya, akan berkembang dengan pesat, sehingga penting bagi kita untuk menguasai teknologi material baterai ini. Ini akan memastikan bahwa industri baterai ke depannya harus dikuasai oleh generasi muda bangsa sendiri, sehingga dapat meningkatkan daya saing dan kesejahteraan masyarakat Indonesia.

Masih terdapat banyak potensi pengembangan material untuk meningkatkan kinerjanya. Salah satunya tentu saja adalah pengembangan teknologi material nano, yang menghadirkan tantangan besar dan peluang yang lebih besar dalam meningkatkan efisiensi devais atau aplikasi di atas. Dengan memahami sifat unik struktur nano, peneliti dapat meningkatkan efisiensinya dan menemukan sifat baru atau unik yang belum pernah ada sebelumnya. Ini membuka jalan bagi pemanfaatan sumber daya alam di Indonesia secara lebih baik dan berkelanjutan. Tantangan kompleks ini membutuhkan pendekatan multidisiplin, melibatkan ahli ilmu dasar seperti ilmu fisika, kimia, material, dan juga ilmu terapan pada teknik kimia, teknik fisika, dan banyak lainnya. Kolaborasi antara para ilmuwan, peneliti, dan praktisi industri dari berbagai latar belakang akan menjadi kunci untuk mengatasi hambatan teknis yang mungkin muncul. Di samping itu, kolaborasi ini memungkinkan pertukaran pengetahuan yang lebih cepat dan aplikasi praktis dari penemuan penelitian.

Untuk memajukan teknologi material nano ini, diperlukan investasi besar dalam infrastruktur penelitian dan fasilitas produksi. Laboratorium dengan peralatan canggih dan fasilitas produksi berskala besar akan mempercepat pengembangan prototipe dan produksi massal dari material nano. Selain itu, melatih sumber daya manusia dengan pengetahuan dan keterampilan yang diperlukan di bidang material nano akan menjadi prioritas. Program

pendidikan dan pelatihan yang komprehensif akan memastikan bahwa generasi mendatang dapat memajukan teknologi ini lebih jauh lagi. Sebagai contoh, di ITB, sudah terdapat program studi nano magister dan doktor dan juga program multidisiplin teknologi baterai sebagai langkah untuk menambah dan meningkatkan kemampuan sumber daya manusia Indonesia.

Dalam rangka mengakhiri penjelasan ini, diharapkan informasi yang disajikan dapat memberikan wawasan mendalam mengenai potensi luar biasa dari material nano terutama dalam berbagai aplikasi yang memanfaatkan kemampuan konversi energi pada material nano. Melalui beberapa contoh aplikasinya, semoga tulisan ini dapat menjadi sumber inspirasi bagi pengembangan industri terkait. Dengan tekad dan kerja keras, semoga kita dapat bersama-sama membangun masa depan yang lebih cerah dengan akses energi yang terjangkau, bersih, dan berkelanjutan. Ini adalah langkah awal penting menuju Indonesia yang lebih maju dan mandiri dalam ranah teknologi dan energi dan juga pemanfaatan sumber daya alam yang melimpah. Dengan semangat yang tinggi, kita dapat berharap bahwa penerapan teknologi material dan aplikasinya ini dapat membawa manfaat besar bagi masyarakat Indonesia dan dunia pada umumnya.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Allah Swt. atas segala nikmat dan rahmat-Nya yang telah dikaruniakan kepada saya untuk memperoleh amanah Guru Besar Institut Teknologi Bandung di Bidang Fisika Material Energi.

Ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya disampaikan kepada Pimpinan ITB, Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar, Senat Akademik dan Civitas Akademika Institut Teknologi Bandung yang atas kesempatan, kepercayaan dan dukungan yang diberikan dalam melaksanakan tugas di ITB sejak tahun 2009.

Ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan pula kepada Dekanat, Senat dan kolega dosen, dan tenaga kependidikan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, ITB, yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam proses pengajuan jabatan Guru Besar dari awal hingga akhir, dan juga kerjasama dan kekeluargaannya selama ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan pula kepada guru-guru kami sejak pendidikan dasar, sekolah menengah dan atas, yang telah mendidik dan mengajarkan ilmu kepada saya, juga pembimbing penelitian saya selama studi sarjana dan magister, yaitu Prof. Hitoshi Emi dari Universitas Kanazawa, serta selama studi doktor, Prof. Kikuo Okuyama dari Universitas Hiroshima, yang telah memberikan bimbingan dan motivasi yang sangat berharga dalam perjalanan penelitian saya.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tak terhingga disampaikan pula kepada ketua prodi, rekan sejawat dosen dan tendik di lingkungan Prodi Fisika atas bantuan, kebersamaan, dukungan, kekeluargaan dan suasana yang sangat menyenangkan selama ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tak terhingga saya sampaikan pula kepada Prof. Khairurrijal, Prof. Mikrajuddin, dan seluruh rekan sejawat Kelompok Keahlian Fisika Material Elektronik, yang telah memberikan ruang berkarya, memberikan semangat, dukungan dan menciptakan suasana kerja yang menyenangkan.

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh kolega, rekan sejawat dan peneliti di Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi, ITB,

yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian bersama dan menggunakan fasilitasnya.

Ucapan terima kasih kepada Prof. Hermawan K. Dipojono (FTI, ITB); Prof. Mikrajuddin (FMIPA, ITB); Prof. Terry Mart (FMIPA, Universitas Indonesia); Prof. Brian Yulianto (FTI, ITB), Prof. Yoshihiro Iwasa (Tokyo University); Prof. Takashi Ogi (Hiroshima University) yang telah memberikan rekomendasi untuk pengusulan guru besar saya.

Ucapan terima kasih dan penghargaan kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) ITB, Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP), Dana Ilmu Pengetahuan Indonesia (DIPI), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), dan The World Academy of Science (TWAS), SHERA, yang telah mendukung kami dalam melakukan penelitian ini.

Ucapan terima kasih kepada rekan-rekan peneliti, Dr. Sigit Puji Santosa, Dr. Satria Zulkarnaen Bisri, Afriyanti Sumboja, Ph.D., Prof. Heni Rachmawati, Dr. Azzania Fibriani, Dr.rer.nat. Akfany Hasdi Aimon, Prof. Muhammad Miftahul Munir, Prof. Yogi Wibisono Budhi, Prof. I Gede Wenten, Arie Wibowo, Ph.D., Prof. Hendri Widiyandari, Prof. Agus Purwanto dan rekan peneliti lain yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu atas ide penelitian, diskusi dan kerja samanya selama ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan kepada Prof. Mikrajuddin, atas bantuan dalam menelaah dan memberikan masukan terhadap buku orasi ini. Juga ucapan terima kasih kepada Dr. Fitri Aulia Permatasari, Dr. M. Alief Irham, Dr. Jotti Karunawan dan seluruh mahasiswa S3 di Laboratorium Material Energi dan Lingkungan (E2M Lab) yang telah membantu dalam penyusunan buku ini.

Juga, ucapan terima kasih kepada seluruh anggota dan alumni di Laboratorium Material Energi dan Lingkungan (E2M Lab) yang telah berdedikasi dan bekerja keras dalam membantu melakukan penelitian dan pengelolaan laboratorium selama ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan pula kepada kedua orang tua tercinta Ibu Hj. Murti Pahala (alm), Bapak Drs. H. Slamet Sudarga, dan mertua Ibu Hj. Nurharvin dan Bapak Drs. H. Mahfudh Makmun (alm.),

dan juga kepada kakak-kakak, adik-adik, serta seluruh keluarga besar yang selalu memberikan dukungan, semangat dan doa untuk kami.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada istri tercinta, Zakiyatul Fitri, S.T., serta anak-anak terkasih, Hana Nadia Iskandar dan Muhammad Taqi Iskandar, yang selalu setia menemani dan memberikan dukungan penuh selama ini, sehingga menjadi sumber kekuatan dan inspirasi bagi saya.

Ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu namun telah memberikan kontribusi berarti dalam perjalanan ini.

Semoga Allah Swt. membalas berlipat ganda atas kebaikan yang telah diberikan. Aamin ya robbal'alamiin.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, O. B., Floweri, O., Irham, M. A., Aimon, A. H., Ogi, T., dan Iskandar, F. (2022): Structural Modulation of Exfoliated Graphene via a Facile Postultrasonication Treatment toward Enhanced Electrochemical Properties of Supercapacitor Electrode, *Energy and Fuels*, **36**(23), 14453–14463. https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.2C02809/SUPPL_FILE/EF2C02809_SI_001.PDF
- Abdillah, O. B., Floweri, O., Mayangsari, T. R., Santosa, S. P., Ogi, T., dan Iskandar, F. (2021): Effect of H₂SO₄/H₂O₂ pre-treatment on electrochemical properties of exfoliated graphite prepared by an electro-exfoliation method, *RSC Advances*, **11**(18), 10881–10890. <https://doi.org/10.1039/D0RA10115J>
- Abdillah, O. B., Rus, Y. Bin, Ulfa, M., Dedi, dan Iskandar, F. (2023): Recent progress on reduced graphene oxide and polypyrrole composites for high performance supercapacitors: A review, *Journal of Energy Storage*, **74**, 109300. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.109300>
- Bisri, S. Z., Shimizu, S., Nakano, M., dan Iwasa, Y. (2017): Endeavor of Iontronics: From Fundamentals to Applications of Ion-Controlled Electronics, *Advanced Materials*, **29**(25), 1607054. <https://doi.org/10.1002/ADMA.201607054>
- Brown, L. M. (2005): Feynman's thesis: A new approach to quantum theory, *Feynman's Thesis: A New Approach to Quantum Theory*, 1–119. <https://doi.org/10.1142/5852>
- Brus, L. (1986): Electronic wave functions in semiconductor clusters: Experiment and theory, *Journal of Physical Chemistry*, **90**(12), 2555–2560. https://doi.org/10.1021/J100403A003/ASSET/J100403A003.FP.PNG_V03
- Chen, Z., Ashokan, A., Russo, S. P., dan Mulvaney, P. (2023): Temperature Dependence of the CdS Bandgap in the Extreme Confinement Regime, *Nano Letters*. <https://doi.org/10.1021/ACS.NANOLETT.3C02368>
- De Medeiros, T. V., Manioudakis, J., Noun, F., Macairan, J. R., Victoria, F., dan Naccache, R. (2019): Microwave-assisted synthesis of carbon dots and their applications, *Journal of Materials Chemistry C*, **7**(24), 7175–7195. <https://doi.org/10.1039/C9TC01640F>
- Fibriani, A., Taharuddin, A. A. P., Stephanie, R., Yamahoki, N., Laurelia, J., Wisnuwardhani, P. H., Agustiyanti, D. F., Angelina, M., Rubiyana, Y., Ningrum, R. A., Wardiana, A., Iskandar, F., Permatasari, F. A., dan Giri-Rachman, E. A. (2023): Curcumin-derived carbon-dots as a potential COVID-19 antiviral drug, *Heliyon*, **9**(9), e20089. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20089>

- Gao, H., Xin, S., dan Goodenough, J. B. (2017): The Origin of Superior Performance of Co(OH)₂ in Hybrid Supercapacitors, *Chem*, **3**(1), 26–28. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMPR.2017.06.008>
- Gao, M., Peh, C. K., Phan, H. T., Zhu, L., dan Ho, G. W. (2018): Solar Absorber Gel: Localized Macro-Nano Heat Channeling for Efficient Plasmonic Au Nanoflowers Photothermic Vaporization and Triboelectric Generation, *Advanced Energy Materials*, **8**(25), 1800711. <https://doi.org/10.1002/AENM.201800711>
- Hong, Q., Wang, X. Y., Gao, Y. T., Lv, J., Chen, B. Bin, Li, D. W., dan Qian, R. C. (2022): Customized Carbon Dots with Predictable Optical Properties Synthesized at Room Temperature Guided by Machine Learning, *Chemistry of Materials*, **34**(3), 998–1009. https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMMATER.1C03220/SUPPL_FILE/CM1C03220_SI_002.XLSX
- Indriyati, Primadona, I., Permatasari, F. A., Irham, M. A., Nasir, M., dan Iskandar, F. (2021): Recent advances and rational design strategies of carbon dots towards highly efficient solar evaporation, *Nanoscale*, **13**(16), 7523–7532. <https://doi.org/10.1039/D1NR00023C>
- Iravani, S., dan Varma, R. S. (2020): Green synthesis, biomedical and biotechnological applications of carbon and graphene quantum dots. A review, *Environmental Chemistry Letters* 2020 18:3, **18**(3), 703–727. <https://doi.org/10.1007/S10311-020-00984-0>
- Irham, M. A., Abdillah, O. B., Rodiansyah, D. R., Baskoro, F. H. T., Fahmi, H., Ogi, T., dan Iskandar, F. (2023): Novel strategy for high-performance supercapacitors through the polyvinylpyrrolidone (PVP)-assisted in situ growth of FeS₂, *Dalton Transactions*, **52**(25), 8685–8694. <https://doi.org/10.1039/D3DT01031G>
- Irham, M. A., Muttaqien, F., Bisri, S. Z., dan Iskandar, F. (2023): Enhancing quantum capacitance of iron sulfide supercapacitor through defect-engineering: A first-principles calculation, *Electrochimica Acta*, **449**, 142235. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2023.142235>
- Iskandar, F., Fauziah, A., Permatasari, F. A., Mayangsari, T. R., dan Aimon, A. H. (2019): Physicochemical study of multicolor BCNO phosphors using a urea combustion method, *Materials Research Express*, **6**(2). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaf29b>
- Iskandar, Ferry, Hikmah, U., Stavila, E., dan Aimon, A. H. (2017): Microwave-assisted reduction method under nitrogen atmosphere for synthesis and electrical conductivity improvement of reduced graphene oxide (rGO), *RSC Advances*, **7**(83), 52391–52397. <https://doi.org/10.1039/C7RA10013B>
- Kaczmarek, A., Hoffman, J., Morgiel, J., Mościcki, T., Stobiński, L., Szymański, Z., dan Małolepszy, A. (2021): Luminescent Carbon Dots Synthesized by the Laser Ablation

- of Graphite in Polyethylenimine and Ethylenediamine, *Materials* 2021, Vol. 14, Page 729, **14**(4), 729. <https://doi.org/10.3390/MA14040729>
- Li, X., Min, X., Li, J., Xu, N., Zhu, P., Zhu, B., Zhu, S., dan Zhu, J. (2018): Storage and Recycling of Interfacial Solar Steam Enthalpy, *Joule*, **2**(11), 2477–2484. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.08.008>
- Liu, W., Niu, H., Yang, J., Cheng, K., Ye, K., Zhu, K., Wang, G., Cao, D., dan Yan, J. (2018): Ternary Transition Metal Sulfides Embedded in Graphene Nanosheets as Both the Anode and Cathode for High-Performance Asymmetric Supercapacitors, *Chemistry of Materials*, **30**(3), 1055–1068. https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMMATER.7B04976/SUPPL_FILE/CM7B04976_SI_001.PDF
- Liu, Z., Song, H., Ji, D., Li, C., Cheney, A., Liu, Y., Zhang, N., Zeng, X., Chen, B., Gao, J., Li, Y., Liu, X., Aga, D., Jiang, S., Yu, Z., Gan, Q., Liu, Z., Song, H., Ji, D., Li, C., Cheney, A., Liu, Y., Zhang, N., Zeng, X., Chen, B., Gan, Q., Gao, J., Li, Y., Jiang, S., Liu, X., Aga, D., dan Yu, Z. (2017): Extremely Cost-Effective and Efficient Solar Vapor Generation under Nonconcentrated Illumination Using Thermally Isolated Black Paper, *Global Challenges*, **1**(2), 1600003. <https://doi.org/10.1002/GCH2.201600003>
- Lokhande, P. E., Chavan, U. S., dan Pandey, A. (2019): Materials and Fabrication Methods for Electrochemical Supercapacitors: Overview, *Electrochemical Energy Reviews* 2019 3:1, **3**(1), 155–186. <https://doi.org/10.1007/S41918-019-00057-Z>
- Mahen, E. C. S., Permatasari, F. A., Floweri, O., Nuryadin, B. W., Irham, M. A., Bisri, S. Z., Suprijadi, Aimon, A. H., dan Iskandar, F. (2022): Evolutions of the optical properties in green-emitting MAPbBr₃ perovskite nanoplatelets/polymethyl methacrylate (PMMA) composite films for light-emitting diode applications, *Journal of Luminescence*, **248**, 118954. <https://doi.org/10.1016/J.JLUMIN.2022.118954>
- Mahen, E. C. S., Ummah, A. R., Permatasari, F. A., Suprijadi, Aimon, A. H., dan Iskandar, F. (2023): Highly efficient sandwich design thin film luminescent solar concentrators based on blue and green emissive MAPbBr₃ perovskites nanostructures, *Materials Letters*, **337**, 134008. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2023.134008>
- Manthiram, A. (2020): A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry, *Nature Communications* 2020 11:1, **11**(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15355-0>
- Muyassiroh, D. A. M., Permatasari, F. A., dan Iskandar, F. (2022): Machine learning-driven advanced development of carbon-based luminescent nanomaterials, *Journal of Materials Chemistry C*, **10**(46), 17431–17450. <https://doi.org/10.1039/D2TC03789K>
- Novoselov, K. S., Fal'Ko, V. I., Colombo, L., Gellert, P. R., Schwab, M. G., dan Kim, K. (2012): A roadmap for graphene, *Nature* 2012 490:7419, **490**(7419), 192–200. <https://doi.org/10.1038/nature11458>

- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., dan Firsov, A. A. (2004): Electric field in atomically thin carbon films, *Science*, **306**(5696), 666–669. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1102896/SUPPL_FILE/NOVOSELOV.SOM.PDF
- Nuryadin, B. W., Permatasari, F. A., Nuryantini, A. Y., Faryuni, I. D., Abdullah, M., dan Iskandar, F. (2017): A red emitting of manganese-doped boron carbon oxynitride (BCNO) phosphor materials: facile approach and photoluminescence properties, *RSC Advances*, **7**(7), 4161–4166. <https://doi.org/10.1039/C6RA27018B>
- Ogi, T., Aishima, K., Permatasari, F. A., Iskandar, F., Tanabe, E., dan Okuyama, K. (2016): Kinetics of nitrogen-doped carbon dot formation via hydrothermal synthesis, *New Journal of Chemistry*, **40**(6), 5555–5561. <https://doi.org/10.1039/C6NJ00009F>
- Ogi, T., Iwasaki, H., Aishima, K., Iskandar, F., Wang, W. N., Takimiya, K., dan Okuyama, K. (2014): Transient nature of graphene quantum dot formation via a hydrothermal reaction, *RSC Advances*, **4**(99), 55709–55715. <https://doi.org/10.1039/C4RA09159K>
- Ogi, T., Kaihatsu, Y., Iskandar, F., Wang, W. N., dan Okuyama, K. (2008): Facile Synthesis of New Full-Color-Emitting BCNO Phosphors with High Quantum Efficiency, *Advanced Materials*, **20**(17), 3235–3238. <https://doi.org/10.1002/ADMA.200702551>
- Pal, A., Natu, G., Ahmad, K., dan Chattopadhyay, A. (2018): Phosphorus induced crystallinity in carbon dots for solar light assisted seawater desalination, *Journal of Materials Chemistry A*, **6**(9), 4111–4118. <https://doi.org/10.1039/C7TA10224K>
- Partridge, J., dan Abouelamaimen, D. I. (2019): The Role of Supercapacitors in Regenerative Braking Systems, *Energies 2019*, Vol. 12, Page 2683, **12**(14), 2683. <https://doi.org/10.3390/EN12142683>
- Permatasari, F.A., Aimon, A. H., Iskandar, F., Ogi, T., dan Okuyama, K. (2016): Role of C-N Configurations in the Photoluminescence of Graphene Quantum Dots Synthesized by a Hydrothermal Route, *Scientific Reports*, **6**(1), 1–8.
- Permatasari, Fitri A., Fukazawa, H., Ogi, T., Iskandar, F., dan Okuyama, K. (2018): Design of Pyrrolic-N-Rich Carbon Dots with Absorption in the First Near-Infrared Window for Photothermal Therapy, *ACS Applied Nano Materials*, **1**(5), 2368–2375. https://doi.org/10.1021/ACSANM.8B00497/SUPPL_FILE/AN8B00497_SI_001.PDF
- Permatasari, Fitri A., Fukazawa, H., Ogi, T., Iskandar, F., dan Okuyama, K. (2018): Design of pyrrolic-N-rich carbon dots with absorption in the first near-infrared window for photothermal therapy, *ACS Applied Nano Materials*, **1**(5), 2368–2375.
- Permatasari, Fitri Aulia, Aimon, A. H., Iskandar, F., Ogi, T., dan Okuyama, K. (2016): Role of C-N Configurations in the Photoluminescence of Graphene Quantum Dots Synthesized by a Hydrothermal Route, *Scientific Reports 2016* 6:1, **6**(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep21042>

- Permatasari, Fitri Aulia, Irham, M. A., Bisri, S. Z., dan Iskandar, F. (2021): Carbon-Based Quantum Dots for Supercapacitors: Recent Advances and Future Challenges, *Nanomaterials* 2021, Vol. 11, Page 91, **11**(1), 91. <https://doi.org/10.3390/NANO11010091>
- Permatasari, Fitri Aulia, Masitoh, H. E., Mahen, E. C. S., Nuryadin, B. W., Aimon, A. H., Syah, Y. M., dan Iskandar, F. (2021): Synergetic effect of the surface ligand and SiO₂ driven photoluminescence stabilization of the CH₃NH₃PbBr₃ perovskite magic-sized clusters, *Scientific Reports* 2021 11:1, **11**(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01560-4>
- Permatasari, Fitri Aulia, Nakul, F., Mayangsari, T. R., Aimon, A. H., Nuryadin, B. W., Bisri, S. Z., Ogi, T., dan Iskandar, F. (2021): Solid-state nitrogen-doped carbon nanoparticles with tunable emission prepared by a microwave-assisted method, *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/d1ra07290k>
- Permatasari, Fitri Aulia, Umami, R., Sundari, C. D. D., Mayangsari, T. R., Ivansyah, A. L., Muttaqien, F., Ogi, T., dan Iskandar, F. (2023): New insight into pyrrolic-N site effect towards the first NIR window absorption of pyrrolic-N-rich carbon dots, *Nano Research*, **16**(4), 6001–6009. <https://doi.org/10.1007/S12274-022-5131-7/METRICS>
- Rahmawati, I., Indriyati, N., Permatasari, F. A., Irham, M. A., Nugraha, M. I., Anthopoulos, T. D., dan Iskandar, F. (2023): Modulating Photothermal Properties of Carbon Dots through Nitrogen Incorporation Enables Efficient Solar Water Evaporation, *ACS Applied Nano Materials*. https://doi.org/10.1021/ACSANM.2C04893/SUPPL_FILE/AN2C04893_SI_001.PDF
- Romero-Pérez, C., Delgado, N. F., Herrera-Collado, M., Calvo, M. E., dan Míguez, H. (2023): Ultrapure Green High Photoluminescence Quantum Yield from FAPbBr₃ Nanocrystals Embedded in Transparent Porous Films, *Chemistry of Materials*, **35**(14), 5541–5549. https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMMATER.3C00934/ASSET/IMAGES/LARGE/CM3C00934_0006.JPEG
- Santika, A. S., Permatasari, F. A., Umami, R., Muyassiroh, D. A. M., Irham, M. A., Fitriani, P., dan Iskandar, F. (2022): Revealing the synergetic interaction between amino and carbonyl functional groups and their effect on the electronic and optical properties of carbon dots, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **24**(44), 27163–27172. <https://doi.org/10.1039/D2CP03401H>
- Senanayake, R. D., Yao, X., Froehlich, C. E., Cahill, M. S., Sheldon, T. R., McIntire, M., Haynes, C. L., dan Hernandez, R. (2022): Machine Learning-Assisted Carbon Dot Synthesis: Prediction of Emission Color and Wavelength, *Journal of Chemical Information and Modeling*, **62**(23), 5918–5928. https://doi.org/10.1021/ACS.JCIM.2C01007/SUPPL_FILE/CI2C01007_SI_001.PDF

- Suryadi, P. N., Karunawan, J., Floweri, O., dan Iskandar, F. (2023): Toward high-rate capability of intercalation cathodes Li-ion batteries, potency for fast-charging application: A materials perspective, *Journal of Energy Storage*, **68**, 107634. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.107634>
- Tan, Y. Bin, dan Lee, J. M. (2013): Graphene for supercapacitor applications, *Journal of Materials Chemistry A*, **1**(47), 14814–14843. <https://doi.org/10.1039/C3TA12193C>
- Thonghlueng, J., Ngermpimai, S., Chuaephon, A., Phanchai, W., Wiwasuku, T., Wanna, Y., Wiratchawa, K., Intharah, T., Thanan, R., Sakonsinsiri, C., dan Puangmali, T. (2023): Dual-Responsive Carbon Quantum Dots for the Simultaneous Detection of Cytosine and 5-Methylcytosine Interpreted by a Machine Learning-Assisted Smartphone, *ACS Applied Materials and Interfaces*. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.3C00785/SUPPL_FILE/AM3C00785_SI_001.PDF
- Umami, R., Permatasari, F. A., Muyassiroh, D. A. M., Santika, A. S., Sundari, C. D. D., Ivansyah, A. L., Ogi, T., dan Iskandar, F. (2022): A rational design of carbon dots via the combination of nitrogen and oxygen functional groups towards the first NIR window absorption, *Journal of Materials Chemistry C*, **10**(4), 1394–1402. <https://doi.org/10.1039/D1TC04951H>
- Umami, R., Permatasari, F. A., Sundari, C. D. D., Muttaqien, F., dan Iskandar, F. (2022): Surface Functional Groups Effect on the Absorption Spectrum of Carbon Dots: Initial TD-DFT Study, *Journal of Physics: Conference Series*, **2243**(1), 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012043>
- Wang, C. I., Wu, W. C., Periasamy, A. P., dan Chang, H. T. (2014): Electrochemical synthesis of photoluminescent carbon nanodots from glycine for highly sensitive detection of hemoglobin, *Green Chemistry*, **16**(5), 2509–2514. <https://doi.org/10.1039/C3GC42325E>
- Wang, W. N., Ogi, T., Kaihatsu, Y., Iskandar, F., dan Okuyama, K. (2011): Novel rare-earth-free tunable-color-emitting BCNO phosphors, *Journal of Materials Chemistry*, **21**(14), 5183–5189. <https://doi.org/10.1039/C0JM02215B>
- Wang, X., Wang, B., Wang, H., Zhang, T., Qi, H., Wu, Z., Ma, Y., Huang, H., Shao, M., Liu, Y., Li, Y., dan Kang, Z. (2021): Carbon-Dot-Based White-Light-Emitting Diodes with Adjustable Correlated Color Temperature Guided by Machine Learning, *Angewandte Chemie*, **133**(22), 12693–12698. <https://doi.org/10.1002/ANGE.202103086>
- Wang, Z., Tu, W., Zhao, Y., Wang, H., Huang, H., Liu, Y., Shao, M., Yao, B., dan Kang, Z. (2020): Robust carbon-dot-based evaporator with an enlarged evaporation area for efficient solar steam generation, *Journal of Materials Chemistry A*, **8**(29), 14566–14573. <https://doi.org/10.1039/D0TA05179A>

- Xing, C., Chen, G., Zhu, X., An, J., Bao, J., Wang, X., Zhou, X., Du, X., dan Xu, X. (2023): Synthesis of carbon dots with predictable photoluminescence by the aid of machine learning, *Nano Research*, 1–6. <https://doi.org/10.1007/S12274-023-5893-6/METRICS>
- Xu, N., Li, J., Finnerty, C., Song, Y., Zhou, L., Zhu, B., Wang, P., Mi, B., dan Zhu, J. (2023): Going beyond efficiency for solar evaporation, *Nature Water* 2023 1:6, **1**(6), 494–501. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00086-5>
- Yang, C., Chan, K. K., Xu, G., Yin, M., Lin, G., Wang, X., Lin, W. J., Birowosuto, M. D., Zeng, S., Ogi, T., Okuyama, K., Permatasari, F. A., Iskandar, F., Chen, C. K., dan Yong, K. T. (2019): Biodegradable Polymer-Coated Multifunctional Graphene Quantum Dots for Light-Triggered Synergetic Therapy of Pancreatic Cancer, *ACS Applied Materials and Interfaces*, **11**(3), 2768–2781. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.8B16168/SUPPL_FILE/AM8B16168_SI_001.PDF
- Zhang, L., dan Zhao, X. S. (2009): Carbon-based materials as supercapacitor electrodes, *Chemical Society Reviews*, **38**(9), 2520–2531. <https://doi.org/10.1039/B813846J>
- Zheng, Z., Li, H., Zhang, X., Jiang, H., Geng, X., Li, S., Tu, H., Cheng, X., Yang, P., dan Wan, Y. (2020): High-absorption solar steam device comprising Au@Bi₂MoO₆-CDs: Extraordinary desalination and electricity generation, *Nano Energy*, **68**, 104298. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2019.104298>

CURRICULUM VITAE



Nama	: Prof. Dr. Eng. Ferry Iskandar
Tempat/tgl lahir	: Jakarta, 17 Februari 1974
Kel. Keahlian	: Fisika Material Elektronik
Alamat Kantor	: Jl. Ganesha 10 Bandung
Nama Istri	: Zakiyatul Fitri, S.T.
Nama Anak	: 1. Hana Nadia Iskandar 2. Muhammad Taqi Iskandar

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. Bachelor of Engineering (B. Eng), Kanazawa University, 1993 - 1997
2. Master of Engineering (M. Eng), Kanazawa University, 1997 - 1999
3. Doctor of Engineering (Dr. Eng), Hiroshima University, 1999 - 2002

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1. Tim Akreditasi Nasional dan Internasional Program Studi di Lingkungan FMIPA, ITB, 2012 – 2014.
2. Tim Akreditasi Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi Program Studi Magister Fisika, FMIPA, ITB, 2014
3. Kepala Laboratorium Termodinamika dan Elektromagnetik, Prodi Fisika, FMIPA ITB, 2013 – 2015.
4. Tim Pengembangan Center for Advanced Sciences (CAS), Proyek Pengembangan Institut Teknologi Bandung (ITB), 2014
5. Kordinator Keamanan, Keselamatan Kerja, dan Keterandalan Gedung Non- Fakultas/Sekolah (Lab Nanoscience and Nanotechnology, CAS), 2017.
6. Anggota Komisi Kekayaan Intelektual ITB, 2018 – 2019.
7. Tim Penilai Angka Kredit FMIPA ITB, 2021 – 2023.
8. Dewan Redaksi Journal of Mathematics and Fundamental Sciences, 2013 – Sekarang.
9. Peneliti Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi ITB, 2014 – Sekarang.
10. Asesor BKD FMIPA ITB, 2021 – Sekarang.

11. Dewan Penasihat Prodi Fisika, ITB, 2022 – Sekarang.
12. Anggota Majelis Keilmuwan FMIPA ITB, 2023 – Sekarang.
13. Tim evaluasi kurikulum S2, S2P dan S3 Prodi Fisika, 2023 – Sekarang.

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. Penata IIIC, 1 Desember 2009
2. Penata Tk 1, IIID, 1 April 2019
3. Pembina IVA, 1 April 2021

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Lektor, 1 Agustus 2012
2. Lektor Kepala, 1 Oktober 2018
3. Guru Besar, 1 Desember 2022

V. KEGIATAN PENELITIAN

- Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (PPMI) – FMIPA ITB 2023, “Studi dan Analisa Dampak Sinergi dari Doping Heteroatom dan Ukuran Partikel pada Sifat Optik dan Elektronik Material Graphene Quantum Dot”, Ketua Peneliti.
- ITB-NTUST Joint Research Program 2023, “Development of High-Voltage Spinel $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ through Morphological Engineering and Electrolyte Modification for High Energy Density and Low-Cost Li-Ion Battery development of High-Voltage Spinel $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ through Morphological Engineering and Ele”, Ketua Peneliti.
- Penelitian Kompetitif Nasional (PPS-PDD) 2023, “Pengembangan katalis berbasis logam non-mulia pada karbon terdoping nitrogen untuk aplikasi piranti energi elektrokimia”, Peneliti Anggota.
- Penelitian Kompetitif Nasional (PKDN) 2023, “Potensi Carbon-nanodots (CDs) sebagai komponen bahan lokal untuk mensubstitusi koloid emas pada tes diagnostik SARS-COV-2”, Peneliti Anggota.
- Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (PPMI) – FMIPA ITB 2022, “Machine Learning Carbon Dots by Microwave”, Ketua Peneliti.
- Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi Kemenristek Dikti 2022, “Pengembangan Material Elektroda dan Elektrolit untuk Baterai Ion Litium Generasi Baru”, Ketua Peneliti.

- PDD Kemenristek Dikti 2022, “Pengembangan Material Katoda Kaya Litium Menggunakan Metode Pelapisan Nano”, Ketua Peneliti.
- PMDSU 2022, Kemenristek Dikti “Pengembangan Quantum-dot dan Aplikasi pada Devais Penyimpan dan Pemanen Energi”, Ketua Peneliti.
- RISPRO Kolaborasi Internasional 2021-2024 “Development of Quantum Dot (QD) Materials for Nano-energy, Nano-sensing, and Nano-medicine Application”, Ketua Peneliti.
- Riset Unggulan ITB 2021, “Studi DFT Efek Nitrogen Pada Sifat Optik Material Kuantum Dot Berbasis Karbon”, Ketua Peneliti.
- Program Pengabdian kepada Masyarakat ITB 2020, “Pemanfaatan Sensor pada Smartphone dalam Proses Pembelajaran Fisika”, Ketua Peneliti.
- Program Riset ITB 2020, “Pengembangan Elektrolit Fasa Padat Berbasis Polimer Untuk Aplikasi Baterai Ion Litium Fasa Padat”, Ketua Peneliti.
- USAID Shera - RESS (Reserved Energy Storage System) 2019, “Battery Characterization and Technology Development”, Ketua Peneliti.
- World Class Research – RistekDikti 2019-2020, “Pengembangan Material Maju Kuantum Dot dengan Metode Fasa Likuid dan Aplikasinya”, Ketua Peneliti.
- Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi – RistekDikti 2018-2020, “Fabrikasi dan optimasi material fotoluminesence multi warna berbahan dasar karbon”, Ketua Peneliti.
- Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi RistekDikti 2018-2020, “Pengembangan Nanomedicine berbasiskan Senyawa Aktif Alami dan Graphene Quantum Dots (GQD) untuk Terapi Anti Kanker” Ketua Peneliti.
- Insinas Riset Pratama Individu – Ristekdikti 2018, “Pengembangan Baterai Portabel Berumur Panjang Berbasis Radiasi Nuklir (Betavoltaik)”, Peneliti Anggota.
- Penelitian Kompetitif Nasional (PPS-PMDSU) 2018-2020, “Pengembangan Katalis $\text{CuO-MnO}_2\text{-NiO/Ce(1-x)Zr(x)O}_2$ untuk Oksidasi Benzene Menggunakan Reaktor Dinamik”, Peneliti Anggota.
- Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi 2017-2018, “Pembuatan Transparent Conductive Films (TCF) Berbasiskan Material Reduced Graphene Oxide (rGO) dengan pendekatan Motoda Langmuir-Schaefer”, Peneliti Anggota.

- Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi 2017-2019, “Sistem Instrumentasi Aerosol untuk Monitoring Tingkat Polusi Udara Akibat Kebakaran Hutan dan Emisi Kendaraan Bermotor”, Peneliti Anggota.
- Penelitian Kerja Sama Luar Negeri 2017, “Morphological Structure Engineered Photocatalyst Materials and Its Applications on Energy and Environmental Field”, Peneliti Anggota.
- Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi 2016-2017, “Pembuatan dan Mekanisme Pendaran Lapisan Tipis C-Dots”, Ketua Peneliti.
- Penelitian Unggulan Strategis Nasional 2016-2018, “Aplikasi Katalis Platina Berstruktur Mikro untuk Mengolah Emisi Gas Buang di Pabrik PTA Menggunakan Reaktor Ototermal” Peneliti Anggota.
- Penelitian Strategis Nasional Institusi 2016, “Fabrikasi Transparant Conducting Film Berbahan Dasar Grafit Pada Substrat Plastik dengan Proses Mekanik”, Peneliti Anggota.
- Penelitian Pendidikan Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul 2016, “Desain dan Fabrikasi Baterai Nuklir Betavoltaik Berbasis Semikonduktor”, Peneliti Anggota.
- Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi 2015-2017, “Pengembangan Sintesis Grafena dan Komposit Grafena/Ni dan Aplikasinya Sebagai Material Aktif Anoda”, Ketua Peneliti.
- Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi 2015 “Pengembangan Sistem Fabrikasi dan Uji Membran Berbasis Nanoserat untuk Media Filter Udara Berkinerja Tinggi”, Peneliti Anggota.
- Program Riset dan Inovasi ITB 2015 “Sintesis, Fungsionalisasi, dan Aplikasi Nanopartikel Magnetik Berbasis Sumber Daya Alam Lokal”, Peneliti Anggota
- TWAS Research Grant Program for Individual Scientist 2015, “Development of Nano Material Oxides for Application of Enhanced Oil Recovery“, Ketua Peneliti.
- Program Riset dan Inovasi ITB 2014 “Sintesis Metal-Oksida/Zeorit-Buatan Nanokomposit dan Uji Katalitiknya untuk Aplikasi Enhanced Oil Recovery”, Ketua Peneliti.
- Program Hibah Penelitian Proyek Pengembangan ITB (III) 2014, “Studi Pengembangan Katoda Lithium-Ion Baterai Sebagai Penyimpan Energi Melalui Sintesis dan Pemodelan”, Ketua Peneliti.

- Lembaga Pengelola Dana Penelitian (LPDP) "Riset Mobil Listrik Nasional" 2014, Ketua Peneliti.
- Hibah Osaka Gas Foundation 2014, "Synthesis and photoluminescence of carbon nanoparticle phosphor material", Ketua Peneliti.
- The Industrial Technology R&D Program International Cooperative Research ITB-KITECH 2013-2014 "Preparation of Porous Desulfurizing Agents via Spraying Methods", Ketua Peneliti.
- Program Riset dan Inovasi KK ITB 2013, "Pembuatan Lapisan Bcno-Komposit untuk Aplikasi Led Putih", Ketua Peneliti.
- Program Desentralisasi DIKTI 2013, "Sintesis Katalis Nanokomposit untuk Aplikasi Enhanced Oil Recovery", Ketua Peneliti.
- Program Desentralisasi DIKTI 2013, "Fabrikasi nanofiber komposit untuk mendekomposisi polutan organik di dalam air", Peneliti Anggota
- Lembaga Pengelola Dana Penelitian (LPDP) 2013, Pengembangan Sistem Energi Listrik untuk Mobil Listrik Nasional, Ketua Peneliti.
- TWAS Research Grant Program for Individual Scientist, Italy, 2012, "Development of Nanomaterials for Application of Enhanced Oil Recovery", Ketua Peneliti.
- Riset Kelompok Keahlian (KK) ITB 2012, "Fabrikasi BCNO-SiO₂ Nanokomposit Phosphor untuk Aplikasi Lampu LED Putih", Ketua Peneliti.
- Hibah Pascasarjana Dikti-Mendiknas 2011, "Fabrikasi BCNO Phosphor Material Untuk Aplikasi Lampu LED Putih", Peneliti Anggota.
- Asahi Glass Foundation 2011, "Pemodelan Arus Bocor dalam Kapasitor Nano Metal-Oksida-Semikonduktor (MOS) berkonstanta Dielektrik Tinggi untuk Menghasilkan Divais Kecepatan Tinggi", Peneliti Anggota.
- Riset dan Inovasi KK ITB 2011, "Fabrikasi Sensor Kelembaban Udara Berbasis Serat Nano", Peneliti Anggota.

VI. PUBLIKASI

1. M. Ulfa, F.A. Permatasari, Y.B. Rus, N. Idayanti, **F. Iskandar**, Rational design and recent advancements of additives engineering in ASnI₃ tin-based perovskite solar cells: insights from experiments and computational, Sustainable Energy & Fuels, in press (2023)

2. M.I. Nugraha, Indriyati, I. Primadona, M. Gedda, G.E. Timuda, **F. Iskandar**, T. D. Anthopoulos, Recent Progress in Colloidal Quantum Dot Thermoelectrics, *Advanced Materials*, 35(38), 2210683 (2023)
3. A. Fibriani, A.A.P. Taharuddin, R. Stephanie, N. Yamahoki, J. Laurelia, P.H. Wisnuwardhani, D.F. Agustiyanti, M. Angelina, Y. Rubiyana, R.A. Ningrum, A. Wardiana, **F. Iskandar**, F.A. Permatasari, E.A. Giri-Rachman, Curcumin-derived carbon-dots as a potential COVID-19 antiviral drug, *Heliyon*, 9(9) e20089 (2023)
4. Q. Aini, Y. Irmawati, J. Karunawan, M.H.R. Pasha, A. Alni, **F. Iskandar**, A. Sumboja, Para Grass Derived Porous Carbon-rich SiO_x/C as a Stable Anode for Lithium-ion Batteries, *Energy & Fuels*, 37 (15) 11397–11405 (2023)
5. Y. Irmawati, F. Balqis, P.B. Persada, F. Destyorini, R. Yudianti, **F. Iskandar**, A. Sumboja, Iron decorated nitrogen/boron co-doped reduced graphene oxide aerogel for neutral rechargeable Zn-air batteries, *Batteries*, 9(7), 356 (2023)
6. M.A. Irham, O.B. Abdillah, D.R. Rodiansyah, F.H.T. Baskoro, H. Fahmi, T. Ogi and **F. Iskandar**, Novel strategy for high-performance supercapacitors through the polyvinylpyrrolidone (PVP)-assisted in situ growth of FeS₂, *Dalton Transaction*, 52, 8685-8694 (2023)
7. Y. Irmawati, B. Prakoso, F. Balqis, Indriyati, R. Yudianti, **F. Iskandar**, and A. Sumboja, Advances and Perspective of Noble-Metal-Free Nitrogen-Doped Carbon for pH-Universal Oxygen Reduction Reaction Catalysts, *Energy & Fuels*, 37(7) 4858–4877 (2023)
8. P.N. Suryadi, J. Karunawan, O. Floweri, **F. Iskandar**, Toward High-rate Capability of Intercalation Cathodes Li-ion batteries, Potency for Fast Charging Application: A Materials Perspective, *Journal of Energy Storage*, 68, 107634 (2023)
9. A. Sohib, M.A. Irham, J. Karunawan, S. Santosa, O. Floweri, **F. Iskandar**, Interface Analysis of LiCl as Protective Layer of Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO₄)₃ for Electrochemically Stabilized All-Solid-State Li-Metal Batteries, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15 (13) 16562–16570 (2023)
10. M.A. Irham, F. Muttaqien, S.Z. Bisri, **F. Iskandar**, Enhancing Quantum Capacitance of Iron Sulfide Supercapacitor through Defect-Engineering: A First-principles Calculation" *Electrochimica Acta*, 449, 142235 (2023)

11. W. Mailisa, W.D. Annisa, F.A. Permatasari, R. Amalia, A.L. Ivansyah, **F. Iskandar**, and H. Rachmawati, In Vitro and Silico Studies on the N-Doped Carbon Dots Potential in ACE2 Expression Modulation, *ACS Omega*, 8, 11, 10077–10085 (2023)
12. Y. Irmawati, F. Balqis, F. Destyorini, C.G. Adios, R. Yudianti, **F. Iskandar**, and A. Sumboja, Cobalt Nanoparticles Encapsulated with N-Doped Bamboo-Like Carbon Nanofibers as Bifunctional Catalysts for Oxygen Reduction/Evolution Reactions in a Wide pH Range, *ACS Applied Nano Materials*, 6, 4, 2708–2718 (2023).
13. E.C.S. Mahen, A.R. Ummah, F.A. Permatasari, Suprijadi, A.H. Aimon, **F. Iskandar**, Highly Efficient Sandwich Design Thin Film Luminescent Solar Concentrators based on Blue and Green Emissive MAPbBr₃ Perovskites Nanostructures, *Materials Letters*, *Materials Letters* 337, 134008 (2023)
14. Rahmawati, Indriyati, F.A. Permatasari, M.A. Irham, M.I. Nugraha, T. Anthopoulos, **F. Iskandar**, Modulating Photothermal Properties of Carbon Dots Through Nitrogen Incorporation Enables Efficient Solar Water Evaporation, *ACS Applied Nano Materials*, 6, 4, 2517–2526 (2023)
15. J. Karunawan, O. B. Abdillah, O. Floweri, M.P. Aji, S.P. Santosa, A. Sumboja and **F. Iskandar**, Improving the Structural Ordering and Particle-Size Homogeneity of Li-Rich Layered Li_{1.2}Ni_{0.13}Co_{0.13}Mn_{0.54}O₂ Cathode Materials through Microwave Irradiation Solid-State Synthesis, *Batteries* 9, 31 (2023)
16. J. Karunawan, P. Suryadi, L. Mahfudh, S.P. Santosa, A. Sumboja, **F. Iskandar**, Truncated octahedral shape of spinel LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ via a solid-state method for Li-ion batteries, *Energy & Fuels* 36 (23) 14453–14463 (2023)
17. C. Eldona, N.H. Hawari, F.H. Hamid, W. Dempwolf, **F. Iskandar**, E. Peiner, H.S. Wasisto, A. Sumboja, A Free-Standing Polyaniline/Silicon Nanowire Forest as the Anode for Lithium-ion Batteries, *Chemistry - An Asian Journal* 17 (24), e202200946 (2022)
18. O.B. Abdillah, O. Floweri, M.A. Irham, A.H. Aimon, T. Ogi, **F. Iskandar**, Structural Modulation of Exfoliated Graphene via a Facile Post-ultrasonication Treatment toward Enhanced Electrochemical Properties of Supercapacitor Electrode, *Energy and Fuels* 36 (23) 14453–14463 (2022)
19. T. Hirano, S. Kaseda, K.L.A. Cao, **F. Iskandar**, E. Tanabe, and T. Ogi, Multiple ZnO Core Nanoparticles Embedded in TiO₂ Nanoparticles as

- Agents for Acid Resistance and UV Protection, *ACS Appl. Nano Mater* 5, 10, 15449–15456 (2022)
20. A.S. Santika, F.A. Permatasari, R. Umami, D.A.M. Muyassiroh, M.A. Irham, P. Fitriani, and **F. Iskandar**, Revealing the Synergetic Interaction between AMino and Carbonyl Functional Groups on the Electronic and Optical Properties of Carbon Dots, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 24, 27163-27172 (2022)
 21. P.Y.E. Koraag, A.M. Firdaus, N.H. Hawari, A.D. Refino, W. Dempwolf, **F. Iskandar**, E. Peiner, H.S. Wasisto, A. Sumboja, Afriyanti, Covalently Bonded Ball-Milled Silicon/CNT Nanocomposite as Lithium-Ion Battery Anode Material, *batteries* 8 (165) (2022)
 22. K.L.A. Cao, **F. Iskandar**, E. Tanabe and T. Ogi, Recent Advances in the Fabrication and Functionalization of Nanostructured Carbon Spheres for Energy Storage Applications, *KONA Powder and Particle Journal*, 2023016 (2022)
 23. D.A.M. Muyassiroh, F.A. Permatasari and **F. Iskandar**, Machine Learning-driven Advanced Development of the Luminescent Carbon-based Nanomaterials in Practical Application, *J Mater Chem C*, 10 (46), 17431-17450 (2022)
 24. F.A. Permatasari, R. Umami, C.D.D. Sundari, T.R. Mayangsari, A.L. Ivansyah, F. Muttaqien, T. Ogi, and **F. Iskandar**, New insight into pyrrolic-N site effect towards the first NIR window absorption of pyrrolic-N-rich carbon dots, *Nano Research*, 2023 (2022).
 25. I.C. Sophiana, **F. Iskandar**, H. Devianto, N. Nishiyama, Y.W. Budhi, Coke-Resistant Ni/CeZrO₂ Catalysts for Dry Reforming of Methane to Produce Hydrogen-Rich Syngas, *Nanoaterials* 12 (9) 1556 (2022)
 26. E.C.S. Mahen, F.A. Permatasaria, O. Floweri, B.W. Nuryadin, M.A. Irham, S.Z. Bisri, Suprijadi, A.H. Aimon, **F. Iskandar**, Evolutions of the optical properties in green-emitting MAPbBr₃ perovskite nanoplatelets /polymethyl methacrylate (PMMA) composite films for light-emitting diode applications, *Journal of Luminescence* 248, 118954 (2022)
 27. A.L. Sidiq, O. Floweri, J. Karunawan, O.B. Abdillah, S.P. Santosam, **F. Iskandar**, NCM cathode active materials reproduced from end-of-life Li-ion batteries using a simple and green hydrometallurgical recycling process, *Mater.Res. Bul* 153, 111901 (2022)
 28. Y. Kitamoto, K.L.A. Cao, P.H. Le, O.B. Abdillah, **F. Iskandar**, T. Ogi, A Sustainable Approach for Preparing Porous Carbon Spheres Derived from

Kraft Lignin and Sodium Hydroxide as Highly Packed Thin Film Electrode Materials, *Langmuir* 38, 11, 3540–3552 (2022)

29. M.A. Irham, F.H.T. Baskoro, F.A. Permatasari, and **F. Iskandar**, Toward Stable High-Performance Tin Halide Perovskite: First-Principles Insights into the Incorporation of Bivalent Dopants, *J. Phys. Chem. C* 126, 11, 5256–5264 (2022)
30. J. Karunawan, O. Floweri, S.P. Santosa, A. Sumboja, and **F. Iskandar**, Stable layered-layered-spinel structure of the $\text{Li}_{1.2}\text{Ni}_{0.13}\text{Co}_{0.13}\text{Mn}_{0.54}\text{O}_2$ cathode synthesized by ball-milling assisted solid-state method, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 907, 116050 (2022)
31. C.D.D. Sundari, A.L. Ivansyah, O. Floweri, I.M. Arcana and **F. Iskandar**, Insights into the intermolecular interactions and temperature-concentration dependence of transport in ionic liquid-based EMI-TFSI/LiTFSI electrolytes, *New Journal of Chemistry* 46(8), 3966–3977 (2022)
32. R. Umami, F.A. Permatasari, D.A.M. Muyassiroh, A.S. Santika, C.D.D. Sundari, A.L. Ivansyah, T. Ogi and **F. Iskandar**, A rational design of Carbon Dots via the combination of Nitrogen and Oxygen Functional Groups toward the first NIR window Absorption, *J. Mater. Chem. C* 10 (4), 1394–1402 (2022)
33. F.A. Permatasari, F. Nakul, T. Mayangsari, A. Aimon, B. Nuryadin, S.Z. Bisri, Z. Satria, T. Ogi, **F. Iskandar**, Solid-state Nitrogen-doped Carbon Nanoparticles with Tunable Emission Prepared by Microwave-assisted Method, *RSC Advances* 11(63) (2021)
34. M.A. Irham, F. Muttaqien, S.Z. Bisri, and **F. Iskandar**, Role of Intrinsic Points Defects on the Electronic Structure of Metal–Insulator Transition h-FeS , *J. Phys. Chem. Lett.* 12(44) 10777–10782 (2021)
35. F.A. Permatasari, H.E. Masitoh, E.C.S. Mahen, B.W. Nuryadin, A.H. Aimon, Y.M. Syah, **F. Iskandar**, Synergetic effect of the surface ligand and SiO_2 driven photoluminescence stabilization of the $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ perovskite magic-sized clusters, *Scientific Reports* 11(1) 22211 (2021)
36. A.P. Nugroho, N.H. Hawari, B. Prakoso, A.D. Refino, N. Yulianto, **F. Iskandar**, E. Kartini, E. Peiner, H.S. Wasisto, and A. Sumboja, Vertically Aligned n-Type Silicon Nanowire Array as a Free-Standing Anode for Lithium-Ion Batteries, *Nanomaterials* 11(11) 3137 (2021)
37. A.P. Yuda, P.Y.E. Koraag, **F. Iskandar**, H.S. Wasisto, A. Sumboja, Advances of the top-down synthesis approach for high-performance

- silicon anodes in Li-ion batteries, *Journal of Materials Chemistry A* 9(35) 18906 - 18926 (2021)
38. A.D. Refino, N. Yulianto, I. Syamsu, A.P. Nugroho, N.H. Hawari, A. Syring, E. Kartini, **F. Iskandar**, T. Voss, A. Sumboja, E. Peiner, H.S. Wasisto, Versatilely tuned vertical silicon nanowire arrays by cryogenic reactive ion etching as a lithium-ion battery anode, *Scientific Reports* 11 (1) (2021)
 39. K.L.A. Cao, Y. Kitamoto, **F. Iskandar**, T. Ogi, Sustainable porous hollow carbon spheres with high specific surface area derived from Kraft lignin, *Advanced Powder Technology* 32 (6) 2064 - 2073 (2021)
 40. O.B. Abdillah, O. Floweri, T.R. Mayangsari, S.P. Santosa, T. Ogi and **F. Iskandar**, Effect of H₂SO₄/H₂O₂ pre-treatment on electrochemical properties of exfoliated graphite prepared by an electro-exfoliation method, *RSC Adv.*, 11, 10881-10890 (2021)
 41. O.B. Abdillah, O. Floweri, T.R. Mayangsari, S.P. Santosa, T. Ogi and **F. Iskandar**, Effect of H₂SO₄/H₂O₂ pre-treatment on electrochemical properties of exfoliated graphite prepared by an electro-exfoliation method, *RSC Adv.*, 11, 10881-10890 (2021)
 42. Indriyati, I. Primadona, F.A. Permatasari, M.A. Irham, M. Nasir and **F. Iskandar**, Recent advances and rational design strategies of carbon dots towards highly efficient solar evaporation, *Nanoscale* 13, 7523-7532 (2021)
 43. N. Nabila, S.R. Hassan, G.P. Larasati, B. Yohan, R.T. Sasmono, A.C. Adi, **F. Iskandar**, H. Rachmawati, The Influence of Surface Charge on The Antiviral Effect of Curcumin Loaded in Nanocarrier System, *Pharm Nanotechnol* 9 (2021)
 44. F. A. Permatasari, M.A. Irham, S.Z. Bisri, **F. Iskandar**, Carbon-based Quantum Dots for Supercapacitors: Recent Advances and Future Challenges, *Nanomaterials*, 11(1), 91 (2021)
 45. M.W.A. Sektiono, F.A. Permatasari, A.H. Aimon, **F. Iskandar**, Rapid Growth of the CH₃NH₃PbCl₃ Single Crystal by Microwave Irradiation, *RSC Advances*, 11 (3) 1360-1366 (2021)
 46. R.M. Putri, C.D Sundari, O. Floweri, T.R. Mayangsari, S.P. Santosa, I.M. Arcana, **F. Iskandar**, PEO/PVA/LiOH Solid Polymer Electrolyte Prepared via Ultrasound-assisted Solution Cast Method, *Journal of Non-Crystalline Solids* 556, 120549 (2021)
 47. S. Refly, O. Floweri, T.R. Mayangsari, A. Sumboja, S.P. Santosa, T. Ogi, **F. Iskandar**, Regeneration of LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ Cathode Active

Materials from End-of-Life Lithium-ion Batteries through Ascorbic Acid Leaching and Oxalic Acid Coprecipitation Processes, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 8(43) 16104–16114 (2020)

48. I.C. Sophiana, A. Topandi, **F. Iskandar**, H. Devianto, N. Nishiyama, Y.W. Budhi, Catalytic oxidation of benzene at low temperature over novel combination of metal oxide-based catalysts: CuO, MnO₂, NiO with Ce_{0.75}Zr_{0.25}O₂ as support, *Materials Today Chemistry*, 17, 100305 (2020)
49. A.M.Rahmatika, Y.Goi, T. Kitamura, Y. Morita, **F. Iskandar**, T. Ogi, Silica-supported carboxylated cellulose nanofibers for effective lysozyme adsorption: Effect of macropore size, *Advanced Powder Technology*, 31(7), 2932-2941 (2020)
50. A. Fauzi, D.A. Hapidin, M.M. Munir, **F. Iskandar**, Khairurrijal, A superhydrophilic bilayer structure of a nylon 6 nanofiber/cellulose membrane and its characterization as potential water filtration media, *RSC Advances*, 10, 17205-17216 (2020)
51. R. Murniati, H.D. Rahmayanti, F.D. Utami, A. Cifriadi, **F. Iskandar**, M. Abdullah, Effects of magnetically modified natural zeolite addition on the crosslink density, mechanical, morphological, and damping properties of SIR 20 natural rubber reinforced with nanosilica compounds, *Journal of Polymer Research* volume 27, 37 (2020)
52. R.D. Septianto, L. Liu, **F. Iskandar**, N, Matsushita, Y. Iwasa, S.Z. Bisri, On-Demand Tuning of Charge Accumulation and Carrier Mobility in Quantum Dots Solids for Electric Transport and Energy Storage Devices, *NPG Asia Materials*, 12 (33) (2020)
53. K.L.A. Cao, S. Taniguchi, T.T. Nguyen; A.F. Arif; **F. Iskandar**, T. Ogi, Precisely Tailored Synthesis of Hexagonal Hollow Silica Plate Particles and their Polymer Nanocomposite Films with Low Refractive Index, *Journal of Colloid & Interface Science*, 571, 378-386 (2020)
54. T. Ogi, H. Fukazawa, A.M. Rahmatika, T. Hirano, K. Cao, **F. Iskandar**, Improving the crystallinity and purity of monodisperse Ag fine particles by heating colloidal sprays in-flight, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59, 13, 5745–5751 (2020)
55. S.A. Wella, Y. Hamamoto, **F. Iskandar**, Suprijadi, Y. Morikawa, and I. Hamada, Atomic and Molecular Adsorption on Single Platinum Atom at the Graphene Edge: A Density Functional Theory Study, *Journal of Chemical Physics* 152 (10), 104707 (2020)

56. A. Rajak, D.A Hapidin, **F. Iskandar**, M.M. Munir, K. Khairurrijal, K. Electrospun nanofiber from various source of expanded polystyrene (EPS) waste and their characterization as potential air filter media, *Waste Management* 103, pp. 76-86 (2020)
57. A.H. Aimon, R. Hidayat, D. Rahmawati, R. Sutarto, F.A. Permatasari, **F. Iskandar**, Facile Deposition of Reduced Graphene Oxide-Based Transparent Conductive Film with Microwave-Assisted Method, *Thin Solid Films* 692, 137618 (2019)
58. A. Zulfi, D.A. Hapidin, M.M. Munir, **F. Iskandar**, Khairurrijal, Synthesis of Nanofiber Membrane from Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Waste Using Electrospinning as Air Filtration Media, *RSC Advances* 9 (53), 30741-30751 (2019)
59. R. Maharsi, A. F. Arif, T. Ogi, H. Widiyandari, **F. Iskandar**, Electrochemical properties of TiOx/rGO composite as an electrode for supercapacitor, *RSC Advances*, 9 (48), 27896-27903 (2019)
60. S. Rahastama, A. Waris, S. Viridi, **F. Iskandar**, Optimization of surface passivation parameters in [147Pm]-Si planar pn junction betavoltaic based on analytical 1-D minority carrier diffusion equation approaches, *Applied Radiation and Isotopes*, 151, 226-234 (2019)
61. R. Abdul, H. Dian, **F. Iskandar**, Munir, Muhammad, Khairurrijal, Controlled Morphology of Electrospun Nanofibers from Waste Expanded Polystyrene for Aerosol Filtration, *Nanotechnology*, 30(42) (2019)
62. C.S. Yudha, S.U. Muzayanha, H. Widiyandari, **F. Iskandar**, W. Sutopo and A. Purwanto, Synthesis of LiNi_{0.85}Co_{0.14}Al_{0.01}O₂ Cathode Material and its Performance in an NCA/Graphite Full-Battery, *Energies* 12, 1886 (2019)
63. M. Taspika, F.A. Permatasari, B.W. Nuryadin, T.R. Mayangsari, A.H. Aimon, **F. Iskandar**, Simultaneous ultraviolet and first near-infrared window absorption of luminescence carbon dots/PVA composite film, *RSC Advanced* 9 (13) 7375-7381 (2019)
64. C. Yang, K.K. Chan, G. Xu, M. Yin, G. Lin, X. Wang, W-J. Lin, M.D. Birowosuto, S. Zeng, T. Ogi, K. Okuyama, F. A. Permatasari, **F. Iskandar**, C-K. Chen, K-T. Yong, Biodegradable Polymer-Coated Multifunctional Graphene Quantum Dots for Light-Triggered Synergetic Therapy of Pancreatic Cancer, *ACS Applied Materials and Interfaces* 11 (3), pp 2768–2781 (2019)
65. **F. Iskandar**, N. Zen, T.R. Mayangsari, A.H. Aimon, A. Pramana, Development of faujasite-type zeolite and iron oxide as mixed catalyst for

- aquathermolysis reaction of heavy oil, *Materials Research Express* 6(2), 026206 (2019)
66. M. Taspika, L. Nuraeni, D. Suhendra, **F. Iskandar**, Using Smartphone's magnetic sensor for low-cost experiment in studying magnetic field due to Helmholtz and anti-Helmholtz coil, *Physics Education* 54 (1) 015023 (2019)
 67. **F. Iskandar**, A. Fauziah, F. Permatasari, T. R. Mayangsari, A. H. Aimon, Physicochemical Study of Multicolor Boron Carbon Oxynitride (BCNO) Using a Urea Combustion Method, *Materials Research Express* 6 (2) (2018)
 68. **F. Iskandar**, B. Setiawan, T. R. Mayangsari, R. Maharsi, A. Purwanto and A. H. Aimon, Electrochemical impedance analysis of polyvinylpyrrolidone-coated sulfur/reduced graphene oxide (S/rGO) electrode, *Materials Research Express* 6 (2) (2018)
 69. N. Nuraeni, **F. Iskandar**, A. Waris, F. Haryanto, E. Hiswara. The Enhancement on thermoluminescence Response of Rare Earth Metal-doped CaSO₄/CaF₂-based Thermoluminescence Dosimetry Driven by Polytetrafluoroethylene Decomposition. *Materials Research Express*, 5(10), 106201 (2018)
 70. R.D. Septianto, **F. Iskandar**, M. Abdullah, K. Khairurrijal and M.H. Lee, Effect of polystyrene latex addition on size and pore volume of porous calcium oxide particles prepared by spray-pyrolysis method and its ability for SO₂ retention, *J. Eng. Tech. Sci.*, 50(2), 240-254 (2018)
 71. **F. Iskandar**, O.B. Abdillah, E. Stavila, and A. H. Aimon, The Influence of Copper Addition on Electrical Conductivity and Charge Transfer Resistance of Reduced Graphene Oxide (rGO), *New Journal of Chemistry* 2018, 42(19) 16362-16371 (2018)
 72. F.A. Permatasari, H. Fukazawa, T. Ogi, **F. Iskandar**, and K. Okuyama, Design of Pyrrolic-N-rich Carbon Dots with Absorption in the First Near-Infrared Window for Photothermal Therapy, *ACS Appl. Nano Mater*, 1 (5), pp 2368–2375 (2018)
 73. B. W. Nuryadin, Y. Suryani, Y. Yuliani, S. Setiadji, A.Y. Nuryantini and **F. Iskandar**, Sintering time optimization on red photoluminescence properties of manganese-doped boron carbon oxynitride (BCNO:Mn) phosphor, *Materials Research Express* 5(4) (2018)
 74. **F. Iskandar**, A. Fajri, N. Nuraeni, E. Stavila, A. H. Aimon and B. W. Nuryadin, The effect of addition of PTFE or urea on luminescence

- response of copper-doped lithium tetraborate, *Materials Research Express* 5 044003 (2018)
75. A. Zulfi, M. Munir, D. Hapidin, A. Rajak, D. Edikresnha, **F. Iskandar**, Khairurrijal, Air filtration media from electrospun waste high-impact polystyrene fiber membrane, *Materials Research Express* 5(3) (2018)
 76. A. Wibowo, R. Indrawan, U. Triadi, A. Aimon, **F. Iskandar**, H. ardy, Simple Preparation of Fenton Catalyst@Bacterial Cellulose for Waste Water Treatment, *Materials Research Express*, 5, 024005 (2018)
 77. T. Makino, S. Nagai, **F. Iskandar**, K. Okuyama, and T. Ogi, Recovery and Recycling of Tungsten by Alkaline Leaching of Scrap and Charged Amino Group Assisted Precipitation, *ACS Sustainable CHemistry & Engineering* 6(3), 4246–4252 (2018).
 78. M. Sianipar, S.H. Kim, Khoiruddin, **F. Iskandar** and I.G. Wenten, Functionalized carbon nanotube (CNT) membrane: progress and challenges, *RSC Adv.*, 7, 51175 (2017)
 79. **F. Iskandar**, U. Hikmah, E. Stavila, A.H. Aimon, Microwave-Assisted Reduction Method under Nitrogen Atmosphere for Synthesis and Electrical Conductivity Improvement of Reduced Graphene Oxide (rGO), *RSC Advances*, 7, 52391 (2017)
 80. B. Setiawan, R. Septianto, D. Suhendra, **F. Iskandar**, Measurement of 3-axis Magnetic Fields Induced by Current Wires using a Smartphone in Magnetostatics Experiments, *Phys. Educ*, 52, 065011 (2017)
 81. H.I. Umam, A.H. Aimon, **F. Iskandar**, Preliminary study of the effect microwave-heating on the morphology and surface area of NaX zeolite, *Materials Science Forum*, 895, 69-72 (2017)
 82. U. Saleem, F. A. Permatasari, **F. Iskandar**, T. Ogi, K. Okuyama, Y. Darma, M. Zhao, K. P. Loh, A. Rusydi, P. Coquet, M. D. Birowosuto, and H. Wang, Surface Plasmon Enhanced Nitrogen-doped Graphene Quantum Dots Emission by Single Bismuth Telluride Nanoplates, *Advanced Optical Materials*. 1700176 (2017)
 83. A. F. Arif, R. Balgis, T. Ogi, **F. Iskandar**, A. Kinoshita, K. Nakamura, K. Okuyama: Highly conductive nano-sized Magnèli phases titanium oxide (TiOx), *Scientific Reports* 7(1):3646 (2017)
 84. H. Miftahul, H. Fakhri, F. Rohman, A. Aimon, **F. Iskandar**, A Modified Marcano Method for Improving Electrical Properties of Reduced Graphene Oxide (rGO), *Mater. Res. Express*, *Materials Research Express* 4(6), (2017)

85. R. Maharsi, R. D. Septianto, F. Rohman, **F. Iskandar**, H. Devianto, Y. W. Budhi, Investigation of temperature and concentration dependence of Cu/ γ -Al₂O₃ as catalyst prepared by facile method using urea combustion route, *Mater. Res. Express*, 4(4) (2017)
86. M. Arifin, Y. B. Rus, A. H. Aimon, **F. Iskandar**, T. Winata, M. Abdullah and K. Khairurrijal, Composited reduced graphene oxide (rGO) into LiFePO₄/Li₂SiO₃ and its electrochemical impedance spectroscopy (EIS) properties, *Mater. Res. Express*, 4(3) (2017)
87. T. Ogi, T. Makino, S. Nagai, W. Stark, **F. Iskandar**, K. Okuyama, Facile and efficient removal of tungsten anions using lysine-promoted precipitation for recycling high-purity tungsten, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5 (4), 3141–3147 (2017)
88. B. W. Nuryadin, F. A. Permatasari, A.Y. Nuryantini, I. D. Faryuni, M. Abdullah and **F. Iskandar**, A red emitting of manganese-doped boron carbon oxynitride (BCNO) phosphor materials: facile approach and photoluminescence properties, *RSC Advances* 7, 4161-4166 (2017)
89. R.D. Septianto, D. Suhendra and **F. Iskandar**, Utilisation of the magnetic sensor in a smartphone for facile magnetostatics experiment: magnetic field due to electrical current in straight and loop wires, *Phys. Educ.* 52 , 015015 (2017)
90. T. Ogi, T. Makino, E. Tanabe, **F. Iskandar**, K. Okuyama: Heat-treated Escherichia coli as a high-capacity biosorbent for tungsten anions, *Bioresource Technology*, 218, pp 140-145 (2016)
91. O. Arutanti, A. F. Arif, R. Balgis, T. Ogi, **F. Iskandar**, K. Okuyama: Tailored synthesis of macroporous Pt/WO₃ photocatalyst with nanoaggregates via flame assisted spray pyrolysis, *AIChE Journal*, 62 (11),pp 3864-3873 (2016)
92. A. Ahab, F. Rohman, **F. Iskandar**, F. Haryanto, I. Arif, A Simple Straightforward Thermal Decomposition Synthesis of PEG-covered Gd₂O₃(Gd₂O₃@PEG) Nanoparticles, *Advanced Powder Technology*, 27 (4), pp 1800-1805 (2016)
93. T. Ogi, K. Aishima, F. A. Permatasari, **F. Iskandar**, E. Tanabe, K. Okuyama, Kinetics of nitrogen-doped carbon dot formation via hydrothermal synthesis, *New Journal of Chemistry*, 40, pp 5555-5561 (2016)
94. T. Ogi, T. Makino, K. Okuyama, W. Stark, **F. Iskandar**, Selective Biosorption and Recovery of Tungsten from an Urban Mine and

- Feasibility Evaluation, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55 (10), pp 2903–2910 (2016).
95. F.A. Permatasari, A. H. Aimon, **F. Iskandar**, T. Ogi, K. Okuyama, Role of C-N Configurations in the Photoluminescence of Graphene Quantum Dots Synthesized by a Hydrothermal Route, *Scientific Reports* 6, 21042 (2016)
 96. **F. Iskandar**, E. Dwinanto, M. Abdullah, Khairurrijal and O. Muraza, Viscosity Reduction of Heavy Oil Using Nanocatalyst in Aquathermolysis Reaction, *KONA Powder and Particle Journal*, 33, 3–16 (2016). Doi: 10.14356/kona.2016005 (2015)
 97. H. Iwasaki, T. Ogi, **F. Iskandar**, K. Aishima, K. Okuyama, Microwave synthesis of homogeneous and highly luminescent BCNO nanoparticles for the light emitting polymer materials, *Journal of Luminescence*, 166, 148–155 (2015)
 98. M. M. Munir, S.N. Wahid, **F. Iskandar** and Khairurrijal, A System for Characterizing Batteries and Their Charging-Discharging Properties, *Appl. Mech. Mater*, 771, 96-99 (2015)
 99. **F. Iskandar**, A. Asbahri, E. Dwinanto, M. Abdullah and Khairurrijal, Synthesis of Fe₃O₄ Nanoparticles Using Co-Precipitation Method and Its Development into Nanofluids as Catalyst in Aquathermolysis Reaction, *Advanced Materials Research*, Volume 1112, pp 205-208 (2015)
 100. **F. Iskandar** and Y.B. Rus, Synthesis of Reduced Graphene Oxide (rGO)/Ni Composite by a Combination of Marcano's and Microwave Assisted Reduction Methods, *Advanced Materials Research*, 1112, pp 290-293 (2015)
 101. G.K. Sukandi, T.D.K. Wungu and **F. Iskandar**, First Principle Calculation of Li₂Fe_{0.5}Cr_{0.5}SiO₄ for Li-ion Battery Cathode, *Advanced Materials Research*, 1112, pp 286-289 (2015)
 102. P. Noorlaily, M. Ulfa, S.Z. Bisri and **F. Iskandar**, Absorbance Studies of Perovskite CH₃NH₃PbI_(3-x)Cl_x as Light Harvester in Solar Cell, *Advanced Materials Research*, Volume 1112, pp 282-285 (2015)
 103. T. Ogi, H. Iwasaki, K. Aishima, **F. Iskandar**, W-N. Wang, K. Takimiya and K. Okuyama, Transient Nature of Graphene Quantum Dot Formation via a Hydrothermal Reaction, *RSC Adv.*, 4, 55709-55715 (2014)
 104. M. Rosi, **F. Iskandar**, M. Abdullah, Khairurrijal, Hydrogel-Polymer Electrolytes Based on Polyvinyl Alcohol and Hydroxyethylcellulose for Supercapacitor Applications, *Int. J. Electrochem. Sci*, 9 (8), 4251-4256 (2014)

105. T. Ogi, A.B. D. Nandiyanto, W.N. Wang, **F. Iskandar**, K. Okuyama, Direct White-Light-Emission from Rare-Earth Free Aluminum-Boron-Carbon-Oxynitride Phosphor, *Journal of Materials Chemistry C*, 2 (21), 4297 – 4303 (2014)
106. B.W. Nuryadin, T.P. Pratiwi, **F. Iskandar**, M. Abdullah, Khairurrijal, T. Ogi, K. Okuyama, Photoluminescence Optimization of BCNO Phosphors Synthesized Using Citric Acid as a Carbon Source, *Adv. Powder Technol*, 25 (3), 891–895 (2014).
107. A.P. Swardhani, **F. Iskandar**, M. Abdullah, and Khairurrijal, Synthesis of Fe₂O₃/C Nanocomposite Using Microwave Assisted Calcination Method, *Adv. Mater. Res*, 896, 100-103 (2014).
108. B. W. Nuryadin, E. C. S. Mahen, **F. Iskandar**, M. Abdullah, Khairurrijal: Microwave-Assited Synthesis of Red emitting BCNO Phosphors and Its Characterization, *Adv. Mat Res*, 896, 464-467 (2014)
109. O. Arutanti, A.B.D. Nandiyanto, **F. Iskandar**, T.O. Kim, T. Ogi and K. Okuyama: Synthesis of Composite WO₃/TiO₂ Nanoparticles by Flame-assisted Spray Pyrolysis and Their Photocatalytic Activity, *J. Alloys Compounds*, 591, 121-126 (2014).
110. I. D. Faryuni, B. W. Nuryadin, **F. Iskandar**, M. Abdullah, Khairurrijal, T. Ogi and K. Okuyama: Synthesis and photoluminescence of BCNO/SiO₂ nanocomposite phosphor materials, *J. Luminescence* 148, 165-168 (2014): 10.1016/j.jlumin.2013.12.033
111. O. Arutanti, T. Ogi, A.B.D. Nandiyanto, **F. Iskandar**, K. Okuyama: Controllable particle and crystal sizes of WO₃ particles by a spray-pyrolysis method and their photocatalytic activity, *AIChE J*, 60, 41-49 (2014)
112. S. Saehana, **F. Iskandar**, M. Abdullah, Khairurrijal, “Optimization of Electrospinning Parameter by Employing Genetic Algorithm in Order to Produce Desired Nanofiber Diameter”, *Int. J. Mater. Sci. Eng.*, 7 (1), 1219-1224 (2013)
113. A.B.D. Nandiyanto, O. Arutanti, A. Suhendi, T. Ogi, **F. Iskandar**, T.O. Kim, K. Okuyama: Synthesis of Spherical Macroporous WO₃ Particles and Their High Photocatalytic Performance, *Chem. Eng. Sci*, 101, 523-532 (2013)
114. P. Noorlaily, M. I. Nugraha, Khairurrijal, M. Abdullah, **F. Iskandar**, Ethylene Glycol Route Synthesis of Nickel Oxide Nanoparticles as a Catalyst in Aquathermolysis, *Mat. Sci. Forum*, 737, 93-97(2013)

115. T. Ogi, A.B.D. Nandiyanto, K. Okino, **F. Iskandar**, W-N Wang, E. Tanabe, K. Okuyama: Towards Better Phosphor Design: Effect of SiO₂ Nanoparticles on Photoluminescence Enhancement of YAG:Ce, ECS J. Solid State Sci. Technol, 2(5), R91-R95(2013)
116. M. I. Nugraha, P. Noorlaily, M. Abdullah, Khairurrijal, **F. Iskandar**: Synthesis of NixFe_{3-x}O₄ Nanoparticles by Microwave-Assisted Coprecipitation and their Application in Viscosity Reduction of Heavy Oil, Mater. Sci. Forum, 737, 204-208 (2013)
117. T. Nurhayati, **F. Iskandar**, Khairurrijal, M. Abdullah: Syntheses of Hematite (α -Fe₂O₃) Nanoparticles Using Microwave-Assisted Calcination Method, Mater. Sci. Forum, 737, 197-203 (2013)
118. M. Rosi, **F. Iskandar**, M. Abdullah, Khairurrijal: Syntheses and Characterizations of Supercapacitors Using Nano-Sized ZnO/Nanoporous Carbon Electrodes and PVA-Based Polymer-Hydrogel Electrolytes, Mater. Sci. Forum, 737, 191-196 (2013)
119. M. Munir, A. Y. Nuryantini, Khairurrijal, M. Abdullah, **F. Iskandar**, K. Okuyama: Preparation of Polyacrylonitrile Nanofibers with Controlled Morphology Using a Constant-Current Electrospinning System for Filter Applications, Mater. Sci. Forum, 737, 159-165 (2013)
120. F. A. Noor, **F. Iskandar**, M. Abdullah, and Khairurrijal, "Analysis of electron leakage current in MOS capacitors by using anisotropic and isotropic mass approaches", Electronics Letters, 48(25), 1585 – 1586 (2012)
121. F.A. Noor, **F. Iskandar**, M. Abdullah, and Khairurrijal, "Numerical Simulation of Tunneling Current in an Anisotropic Metal-Oxide-Semiconductor Capacitor", TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, Vol. 10, No. 3 (September 2012), pp. 477-485 (2012)
122. T. Ogi, A. B. D. Nandiyanto, W-N. Wang, **F. Iskandar**, and K. Okuyama, Direct synthesis of spherical YAG:Ce phosphor from precursor solution containing polymer and urea, Chem. Eng. J., 210, 461-466 (2012)
123. T. Ogi, **F. Iskandar**, A. B. D. Nandiyanto, W.-N. Wang, K. Okuyama Influence of Polymer Decomposition Temperature on the Formation of Rare-earth Free Boron Carbon Oxynitride Phosphors, J. Chem Eng Jpn, 2012, N/A (2012)
124. M.M. Munir, A. Suhendi, T. Ogi, **F. Iskandar** and K. Okuyama, Ion-induced nucleation rate measurement in SO₂/H₂O/N₂ gas mixture by soft X-ray ionization at various pressures and temperatures, Adv. Powder technology, 24(1) 143-149 (2012)

125. I. Matsui, T. Ogi, **F. Iskandar** and Kikuo Okuyama, Perpendicular easy axis alignment of FePt nanoparticles on a platinum-(001) buffer layer for high-density magnetic recording, *J. App. Phys*, 110, 083906 (2011)
126. S.Y. Lee, H. Chang, T. Ogi, **F. Iskandar** and K. Okuyama, Measuring the Effective Density, Porosity, and Refractive Index of Carbonaceous Particles by Tandem Aerosol Technique, *Carbon*, 49, 2163-2172 (2011)
127. R. Balgis, **F. Iskandar**, T. Ogi, A. Purwanto, K. Okuyama, Synthesis of Uniformly Porous NiO/ZrO₂ Particles, *Mater. Res. Bull.*, *Mater. Res. Bull.*, 46, 708-715 (2011)
128. W.-N. Wang, T. Ogi, Y. Kaihatsu, **F. Iskandar**, and K. Okuyama, Novel Rare-Earth-Free Tunable-Color-Emitting BCNO Phosphors, *J. Mater. Chem.*, *Journal of Materials Chemistry*, 21, 5183-5189 (2011) (Invited Highlight Article)
129. N. Hagura, T. Ogi, T. Shirahama, **F. Iskandar**, and K. Okuyama, Highly luminescent silica-coated ZnO nanoparticles dispersed in an aqueous medium, *J. Lumin.*, 131(5), 921-925 (2011)
130. A.B.D. Nandiyanto, T. Ogi, **F. Iskandar**, and K. Okuyama, Highly Ordered Porous Monolayer Generation by Dual-Speed Spin-Coating with Colloidal Templates, *Chem. Eng. J.*, 167, 409-415 (2011)
131. N. Hagura, T. Takeuchi, S. Takayama, **F. Iskandar**, and K. Okuyama, Enhanced photoluminescence of ZnO-SiO₂ nanocomposite particles and the analyses of structure and composition, *J. Lumin.*, 131(1), 138-146 (2011)
132. K.M. Yun, A.B. Suryamas, **F. Iskandar**, L. Bao, H. Niinuma, and K. Okuyama, Morphology optimization of polymer nanofiber for applications in aerosol particle filtration, *Sep. Purif. Technol.*, 75(3), 340-345 (2010).
133. M.M. Munir, A. Suhendi, T. Ogi, **F. Iskandar** and K. Okuyama, Experimental evaluation of the pressure and temperature dependence of ion-induced nucleation, *J. Chem. Phys.* 133, 124315-1-124315-8 (2010).
134. S.-Y. Lee, L. Gradon, S. Janeczko, **F. Iskandar** and K. Okuyama, Formation of Highly Ordered Nanostructures by Drying Micrometer Colloidal Droplets, *ACS Nano*, 4(8), 4717-4724 (2010)
135. Y. Kaihatsu, W. N. Wang, **F. Iskandar**, T. Ogi and K. Okuyama, Effect of the Carbon Source on the Luminescence Properties of Boron Carbon Oxynitride Phosphor Particles, *J. Electrochem. Soc.*, 157(10), J329-J333 (2010)

136. A.B.D. Nandiyanto, **F. Iskandar**, T. Ogi and K. Okuyama: Nanometer to Submicrometer Magnesium Fluoride Particles with Controllable Morphology, *Langmuir*, 26(14), 12260-12266 (2010)
137. W. Widiyastuti, D. Hidayat, A. Purwanto, **F. Iskandar** and K. Okuyama, Particle Dynamics Simulation of Nanoparticle Formation in a Flame Reactor using a Polydispersed Submicron-Sized Solid Precursor, *Chem. Eng. J.*, 158(2), 362-367 (2010)
138. Y. Kaihatsu, W.-N. Wang, **F. Iskandar** and K. Okuyama, Controlled Synthesis of Carbon-based Alumina Nanophosphors with Tunable Blue-Green Luminescence, *Mater. Lett.* 64 (7), 836-839 (2010)
139. **F. Iskandar**, A.B. Suryamas, M. Kawabe, M.M. Munir, K. Okuyama, T. Tarao and T. Nishitani: Indium Tin Oxide Nanofiber Film Electrode for High Performance Dye Sensitized Solar Cells, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 49, 010213 (2010)
140. N. Hagura, W. Widiyastuti, **F. Iskandar** and K. Okuyama, Characterization of Silica-coated Silver Nanoparticles Prepared by a Reverse Micelle and Hydrolysis-condensation Process, *Chem. Eng. J.*, 156(1), 200-205 (2010)
141. A.B.D. Nandiyanto, N. Hagura, **F. Iskandar** and K. Okuyama, Design of a Highly Ordered and Uniform Porous Structure with Multisized Pores in Film and Particle form using a Template-driven Self-Assembly Technique, *Acta Mater.*, 58(1), 282-289 (2010)
142. W. Widiyastuti, R. Balgis, **F. Iskandar**, K. Okuyama, Nanoparticle Formation in Spray Pyrolysis Under Low-Pressure Conditions, *Chem. Eng. Sci.*, 65(5), 1846-1854 (2010)

VII. PATEN

1. Kit untuk Penapisan Senyawa Kandidat Obat Antivirus Bertarget Domain Terminal Protein Nukleokapsid SARS-CoV-2, Azzania Fibriani, Ernawati Arifin Giri Rachman, Jessica Laurelia, Audrey Angelina Putri Taharuddin, Popi Hadi Wisnuwardhani, Dian Fitria Agustiyanti, Marissa Angelina, Andri Wardiana, Yana Rubiyana, Ratih Asmana Ningrum, **Ferry Iskandar**, Fitri Aulia Permatasari, P00202309089, 18 September 2023.
2. Material Nanopartikel Berbasis Karbon yang Disintesis dari Senyawa Kurkumin dan Metode Sintesisnya, **Ferry Iskandar**, Heni Rachmawati,

- Fitri Aulia Permatasari, Arum Sinda Santika, P00202301642, 23 Februari 2023.
3. Pembuatan Komposit Elektrolit Polimer Padat untuk Aplikasi Baterai Ion Litium, **Ferry Iskandar**, Akfiny Hasdi Aimon, Octia Floweri, Tirta Rona Mayangsari, Rakhmawati Muliana Putri, P00201908398, 24 September 2019.
 4. Modifikasi Metode Pengelupasan Elektrokimia untuk Sintesis Material Grafena, **Ferry Iskandar**, Akfiny Hasdi Aimon, Octia Floweri, Tirta Rona Mayangsari, Oktaviardi Bityasmawan Abdillah, P00201908437, 25 September 2019.
 5. Daur Ulang Material Aktif Katoda Baterai Ion Litium Bekas, **Ferry Iskandar**, Akfiny Hasdi Aimon, Octia Floweri, Tirta Rona Mayangsari, Septia Refly, P00201907374, 22 Agustus 2019.
 6. Metode Pembuatan Material Aktif Katoda Baterai Ion Litium Dengan Bantuan Pemanasan Gelombang Mikro, **Ferry Iskandar**, Akfiny Hasdi Aimon, Octia Floweri, Bramianto Setiawan, Putu Hendra Widyadharma, P00201907372, 22 Agustus 2019.
 7. Material Berpendar Kuantum Dot Perovskite Halida yang Stabil dengan Penambahan Fumed Silika untuk Aplikasi Bidang Fotonik Serta Metode Sintesisnya, **Ferry Iskandar**, Akfiny Hasdi Aimon, Hilma Eka Masitoh, Lely Nuraeni, P00201906362, 25 July 2019.
 8. Material Zeolite Berukuran Nanometer dan Metode Pembuatannya Menggunakan Bantuan Gelombang Mikro dan Ultrasonik sebagai Katalis dalam Reaksi Aquathermolysis untuk Menurunkan Viskositas Minyak Berat, **Ferry Iskandar**, Nur Afifah Zen, Akfiny Hasdi Aimon, Indonesian Patent Application No. P00201809884, 30 Nopember 2018. Granted.
 9. Material Grafena Tereduksi Menggunakan L-Ascorbic Acid (LAA) dan Pemanasan Microwave Sebagai Agen Pereduksi untuk Fabrikasi Film Konduktif Transparan, Akfiny Hasdi Aimon, Dina Rahmawati, **Ferry Iskandar**, Indonesian Patent Application No. P00201809878, 30 Nopember 2018.
 10. Material Karbon Partikel yang Digunakan untuk Menyerap Sinar UV Sekaligus Inframerah Dekat dan menghasilkan Cahaya Tampak Sekaligus Panas dan Metode Sintesisnya, **Ferry Iskandar**, Akfiny Hasdi Aimon, Suci Khairani, Fitri Aulia Permatasari, Indonesian Patent Application No. P00201804987, 11 Juli 2018. Granted.

11. Reaktor Termal Berkelanjutan (CTR) Sebagai Alat Uji Katalitik Pada Katalis Enhanced Oil Recovery (EOR) Dan Metode Uji Katalitik Menggunakan Reaktor Tersebut, **Ferry Iskandar**, Lesandre, Hilman Imadul Umam, Nur Afifah Zen, Indonesian Patent Application No. P002011803245, 3 Mei 2018.

VIII. PENGHARGAAN

1. World's Top 2% Most Cited Scientist by Stanford University and Elsevier BV, 2022.
2. Top Materials Science Scientists in Indonesia by Research.com, 2022.
3. World Top 100 Scientists in Indonesia 2022, AD Scientific Index, 2022.
4. Achmad Bakrie Award XVI/2018, Yayasan Achmad Bakrie, 2018.
5. Excellent Materials Scientist Award, Materials Research Society of Indonesia (MRS-id), 2018.
6. Penghargaan bidang Penelitian dalam Dies Natalis ITB ke 56, 2015.
7. Anugerah Kekayaan Intelektual Luar biasa (AKIL), Kemristek Dikti, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Kementerian Hukum dan HAM, Kementerian Perdagangan, Kementerian Pertanian dan Kementerian Pariwisata, 2014.
8. Habibie Award 2014 by the Habibie Center, Jakarta, 2014.
9. Penghargaan Dosen Berprestasi, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, 2014.
10. Outstanding Paper Award of 2012, Journal of Chemical Engineering of Japan, JCEJ, Takashi Ogi, Ferry Iskandar, Asep Bayu Dani Nandiyanto, Wei-Ning Wang, Kikuo Okuyama, "Influence of Polymer Decomposition Temperature on the Formation of Rare-Earth Free Boron Carbon Oxynitride Phosphors" 45 (12), 995-1000 (2012), announced and given on 8th March 2013.
11. 10 Tokoh penemu nasional versi Majalah Tempo, Agustus 2012.
12. Anugrah Iptek Widyasilpawijana, Duta Iptek 2011, Kementrian Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia.



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id [FgbItb](#) [FGB_ITB](#)
📱 [@fgbitb_1920](#) [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-346-6

