

**MATERIAL KARBON NANOPORI DAN MASA
DEPAN PENGEMBANGAN PERANGKAT
PENYIMPAN ENERGI**



UNIVERSITAS GADJAH MADA

**Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar
dalam Bidang Teknik Kimia
pada Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada**

**Disampaikan pada Pengukuhan Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
pada tanggal 9 Januari 2024**

**Oleh:
Prof. Ir. Imam Prasetyo, M.Eng., Ph.D.**

Bismillahirrahmanirrahim.

Yang terhormat,
Ketua, Sekretaris dan Anggota Majelis Wali Amanat;
Rektor dan Wakil Rektor Universitas Gadjah Mada;
Ketua, Sekretaris, dan Anggota Senat Akademik;
Ketua, Sekretaris, dan Anggota Dewan Guru Besar;
Dekan dan Wakil Dekan, Ketua dan Sekretaris Senat Fakultas Teknik;
Rekan rekan sejawat dosen, dan segenap sivitas akademika
Universitas Gadjah Mada;
Para tamu undangan, keluarga yang saya cintai,
serta hadirin sekalian yang saya hormati.

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Salam Sejahtera Bagi Kita Semua, Shalom, Om Swastiastu, Namu Buddaya, Salam Kebajikan.

Alhamdulillah rabbil'alamin, segala puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, taufik dan hidayah-Nya kepada kita semua sehingga pada hari ini kita dapat hadir bersama di Balai Senat dalam keadaan sehat walafiat. Pada acara Pengukuhan Jabatan Guru Besar ini, saya akan menyampaikan pidato ilmiah terkait dengan bidang penelitian yang selama ini saya lakukan beserta status perkembangannya di dunia hingga saat ini, yaitu tentang:

Material Karbon Nanopori dan Masa Depan Pengembangan Perangkat Penyimpan Energi

Definisi Material Karbon Nanopori

Sebelum saya menguraikan lebih lanjut terkait topik di atas, perkenankan saya menyampaikan penjelasan atau definisi Material Karbon Nanopori. Secara umum, yang dimaksud dengan Material Karbon Nanopori (MKNP) adalah material karbon yang porous yang memiliki ukuran pori lebih kecil dari 100 nm dengan struktur pori yang hierarkis dan membentuk jaringan pori yang terinterkoneksi, serta luas permukaan spesifik yang besar (Shrestha *et.al*, 2020). Perlu

ditekankan di sini bahwa yang berdimensi nanometer bukan ukuran partikel karbonnya melainkan ukuran porinya (1 nanometer = 1/1.000.000.000 meter). Dalam aplikasinya, partikel karbon tersebut dapat berbentuk serbuk halus, granular, pellet atau dicetak dalam bentuk blok.

Bapak, Ibu dan hadirin yang saya muliakan.

Paparan ini akan saya mulai dengan latar belakang atau alasan mengapa isu tentang “Material Karbon Nanopori dan Masa Depan Pengembangan Perangkat Penyimpan Energi” penting dan relevan untuk diangkat sebagai topik bahasan dalam orasi ilmiah ini.

Latar Belakang

Bahan bakar fosil, seperti minyak bumi dan batubara, merupakan sumber energi utama dalam menunjang peradaban manusia modern hingga saat ini. Namun karena ketersediaannya yang semakin terbatas serta dampak ekologi yang ditimbulkan (oleh emisi gas dari penggunaan bahan bakar fosil) semakin parah, membangkitkan kesadaran manusia untuk mencari alternatif sumber energi yang lebih ramah lingkungan dan terbarukan. Di samping menimbulkan masalah lingkungan, ketergantungan yang sangat tinggi terhadap bahan bakar minyak juga dapat mengakibatkan komplikasi di hampir segala aspek kehidupan ketika terjadi kelangkaan serta lonjakan harga minyak bumi.

Di tengah kuatnya dorongan untuk menggunakan energi terbarukan seperti energi matahari dan energi angin, ada satu prasyarat agar energi terbarukan tersebut dapat dimanfaatkan secara optimal, yaitu keberadaan suatu sistem penyimpanan energi (*energy storage*) yang efisien dan handal. Karena matahari tidak mungkin menyinari suatu tempat secara terus menerus selama 24 jam dan angin tidak bertiup sepanjang hari di tempat tersebut. Kondisi berjeda atau intermitten yang menyebabkan ketersediaan energi listrik tidak ajeg ini dapat diatasi dengan menggunakan sistem penyimpanan energi, agar supaya kebutuhan energi pada saat matahari tidak bersinar dan angin tidak

bertiup, dapat dipenuhi dari simpanan energi yang tersedia melalui perangkat sistem penyimpanan energi yang ada.

Dalam pembangunan pembangkit listrik sering terjadi kondisi kelebihan pasok atau *oversupply* yang disebabkan oleh ketidaksesuaian antara proyeksi kebutuhan energi listrik dengan realisasi kapasitas pembangkit listrik yang dibangun. Kondisi kelebihan pasok pada pembangkit listrik terjadi ketika target pertumbuhan permintaan energi listrik, terhambat oleh kondisi yang tidak terprediksi pada saat perencanaan, seperti misalnya kasus pandemi Covid-19. Salah satu solusi yang dapat dilakukan untuk mengatasi kelebihan pasok energi listrik tersebut adalah dengan membangun unit utilitas sistem penyimpanan energi pada pembangkit tenaga listrik.

Kebutuhan suatu perangkat yang dapat menyimpan energi juga dapat dilihat pada pemanfaatan energi dalam kehidupan sehari-hari. Penggunaan kendaraan listrik serta perangkat elektronik yang *portable* seperti laptop, telepon selular dll. memerlukan perangkat penyimpanan energi seperti baterai, superkapasitor, *Hydrogen fuel cell*, dll. Pemilihan teknologi penyimpanan energi ditentukan oleh peruntukannya, keekonomiannya, integrasi di dalam sistemnya, serta ketersediaan sumber dayanya. Perangkat penyimpanan energi yang dibutuhkan seringkali tidak hanya harus mempunyai kapasitas penyimpanan yang besar tetapi juga harus dapat menyimpan dan melepas energi secara cepat, berwujud kompak, dan praktikal untuk dibawa mengikuti keberadaan penggunaannya.

Energy storage

Perangkat penyimpanan energi adalah suatu sistem yang dikembangkan dalam rangka mengakumulasi dan menyimpan energi sehingga dapat dipergunakan pada saat diperlukan nantinya. Energi tersebut dapat disimpan secara *electrical*, *chemical*, *electrochemical*, *thermal* dan *mechanical* (Mitali *et.al*, 2022). Riset dan inovasi terkait *energy storage* sangat intensif dilakukan oleh para peneliti di berbagai belahan dunia. Mereka menyadari bahwa temuan dalam pengembangan teknologi penyimpanan energi akan mampu membawa suatu pengaruh yang sangat besar atau menjadi *game changer* dalam perkembangan teknologi. Sebagai contoh, temuan perangkat

penyimpan energi berupa baterai ion lithium oleh John Goodenough pada tahun 1985, yang dikomersilkan oleh perusahaan elektronik Sony pada tahun 1991, memicu pengembangan baru teknologi kendaraan listrik (Katsnelson, 2023).

Salah satu karakteristik utama yang diharapkan dari suatu perangkat penyimpan energi adalah kapasitas penyimpanannya yang besar. Untuk dapat menyimpan energi dalam bentuk energi listrik maupun energi kimia dalam jumlah yang besar, diperlukan suatu medium penyimpan yang dapat mengakumulasikan sejumlah energi secara efektif dan dengan densitas yang tinggi. Kebutuhan perangkat penyimpan energi dengan kriteria tersebut dapat difasilitasi oleh suatu material karbon nanopori yang mempunyai luas permukaan internal besar. Secara teoretis, semakin porous suatu material karbon nanopori, berarti semakin besar luas permukaan dinding porinya, dengan demikian semakin besar kapasitas penyimpanannya (Shao, *et.al*, 2020).

Di dalam sistem penyimpan energi seringkali juga melibatkan pengkonversian energi dari bentuk yang tidak mudah disimpan, menjadi bentuk yang dapat disimpan secara kompak, praktis dan ekonomis. Misal sistem penyimpan energi yang dikembangkan oleh para peneliti di TU Delf Belanda yang dinamakan Battolyser (kependekan dari kata “*battery*” dan “*electrolyser*”) merupakan kombinasi antara penyimpan energi listrik dengan pembangkit hidrogen, yang dikemas dalam satu sistem. Hal ini memungkinkan energi listrik yang dibangkitkan dari tenaga surya dan angin dapat disimpan dan dimanfaatkan secara efisien dan ekonomis. Pada sistem Battolyser ini, energi listrik yang dihasilkan dari sel surya dan turbin angin, disimpan dalam baterai dan ketika baterai tersebut penuh, listrik dialirkan ke sel elektrolisis guna memecah molekul air menjadi gas hidrogen dan oksigen (Jenkins, 2022). Kemudian hidrogen yang dihasilkan dari proses elektrolisis tersebut dapat dimanfaatkan secara langsung sebagai bahan bakar atau diubah menjadi energi listrik lagi dengan menggunakan *fuel cell*.

Uraian terkait perangkat penyimpan energi dalam pidato ini akan difokuskan pada sistem penyimpanan energi secara kimia dan elektrokimia yang di dalam pengembangannya memerlukan dukungan

riset tentang material karbon nanopori yang merupakan bidang kajian utama di dalam grup riset kami, yaitu: Grup Riset Karbon, Departemen Teknik Kimia UGM.

Riset yang intensif terkait material karbon nanopori telah memberikan kontribusi pengembangan yang penting dalam cara baru pemanfaatan karbon nanopori dalam industri kimia. Hal ini dapat dilihat dari semakin beragamnya pemanfaatan material karbon nanopori dalam proses separasi, purifikasi, adsorpsi, katalisis, serta untuk material aktif perangkat penyimpanan energi. Terkait dengan pengembangan perangkat penyimpanan energi, material karbon nanopori yang dikembangkan di grup riset kami, ditargetkan untuk pembuatan material elektroda dan material nanokomposit berbasis karbon yang mempunyai afinitas penjerapan terhadap molekul hidrogen. Penyimpanan gas hidrogen secara penjerapan atau *adsorptive storage* dengan menggunakan material karbon nanopori ini termasuk kategori *chemical energy storage*, karena di dalam molekul hidrogen terkandung energi yang relatif besar yang siap untuk digunakan sebagai sumber energi. Oleh karena itu gas hidrogen sering disebut sebagai *energy carrier* (Mazloomi and Gomes, 2012).

Chemical Energy Storage: sistem penyimpanan energi secara kimia

Di antara berbagai alternatif sumber energi non-minyak bumi, hidrogen merupakan salah satu sumber energi yang paling prospektif untuk menggantikan bahan bakar minyak pada kendaraan bermotor (Kostoglou *et al.*, 2022). Sebagai sumber energi, hidrogen mempunyai banyak keunggulan dibandingkan dengan bahan bakar fosil seperti minyak bumi, gas alam, batubara atau bahkan dibandingkan dengan bahan bakar nabati seperti biodiesel dan bioetanol. Karena di samping memenuhi karakteristik sebagai sumber energi yang ramah lingkungan (terkait dengan sifatnya yang non-polutif serta terbarukan), hidrogen juga mempunyai kandungan energi per satuan massa yang lebih besar dibandingkan dengan bahan bakar lainnya. Jika dibandingkan dengan bensin yang mempunyai kandungan energi 47 MJ/kg, hidrogen mempunyai kandungan energi yang besarnya sekitar tiga kali lipatnya, yaitu 142 MJ/kg (Rivard, *et.al*, 2019).

Hydrogen Fuel Cell

Pemanfaatan hidrogen sebagai sumber energi pada FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*) dilakukan dengan mengkonversi gas hidrogen menjadi energi listrik secara efisien melalui suatu proses elektrokimia di dalam sebuah *fuel cell*. Kendaraan listrik bertenaga *Hydrogen fuel cell* memiliki keunggulan dibandingkan dengan kendaraan listrik bertenaga baterai yang saat ini mulai digiatkan pemakaiannya oleh pemerintah (Parikh *et al.*, 2023). Sampai saat ini, kendaraan listrik bertenaga baterai atau BEV (*Battery Electric Vehicle*) masih terkendala oleh kapasitas energi baterai yang terbatas sehingga perlu sering dilakukan proses pengisian baterai yang menjadikan teknologi ini dianggap kurang praktis. Produsen mobil terkemuka seperti Toyota bahkan mengambil sikap lebih berhati-hati dalam pengembangan BEV (Kobayashi, 2022). Mereka percaya bahwa BEV bukan merupakan solusi yang paling tepat untuk penyelamatan lingkungan yang dipicu oleh emisi kendaraan bermotor. Mengingat sampai saat ini sumber listrik untuk pengisian baterai sebagian besar masih diproduksi dari pembangkit listrik yang bahan bakarnya berupa bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batubara, atau gas alam.

Kendaraan listrik berbasis *Hydrogen fuel cell*, energi listriknya dibangkitkan secara *in situ* dalam sistem *fuel cell* yang dipasang di dalam kendaraan, sehingga pasokan energi listrik untuk menggerakkan kendaraan bermotor akan selalu ada selama persediaan hidrogen di dalam kendaraan tersebut masih tersedia. Kendala utama yang dihadapi pada pemanfaatan gas hidrogen sebagai sumber energi kendaraan listrik berbasis *fuel cell* adalah mengusahakan ketersediaan sistem penyimpan hidrogen yang dapat memasok gas hidrogen ke unit *fuel cell* secara efektif, handal, dan aman. Hal ini berkenaan dengan karakteristik gas hidrogen yang sangat eksplosif, mudah menyala, serta sukar untuk dikemas dalam bentuk yang kompak. Oleh karena itu pengembangan sistem penyimpan hidrogen yang dapat memasok gas hidrogen ke unit *fuel cell* secara efektif, handal, dan aman merupakan prasyarat utama dalam implementasi kendaraan listrik berbasis *Hydrogen fuel cell*.

Secara konvensional, hidrogen dapat disimpan dengan cara kompresi hingga tekanan 700 atmosfer pada suhu kamar atau dengan cara refrigerasi hingga suhu -253°C pada tekanan atmosferis (Usman, 2022). Kedua metode penyimpanan gas Hydrogen tersebut mempunyai kekurangan dan keterbatasan terutama ketika akan diaplikasikan untuk kendaraan. Metode penyimpanan gas dalam tangki bertekanan tinggi sangat berisiko serta memerlukan biaya yang relatif tinggi untuk sistem kompresinya, sedangkan metode penyimpanan gas pada suhu sangat rendah memerlukan biaya yang relatif mahal untuk sistem refrigerasinya. Salah satu teknologi yang mulai banyak dikembangkan untuk mengatasi kendala tersebut adalah dengan cara menyimpan gas hidrogen dalam keadaan terjerap dalam suatu medium material padatan berpori (Kostoglou *et.al*, 2022). Penyimpanan gas dengan teknik seperti itu dinamakan metode *adsorptive storage*. Prinsip dari metode ini adalah memanfaatkan jaringan pori berukuran nanometer dari suatu material yang mempunyai luas permukaan internal yang besar untuk menjerap dan mengakumulasikan molekul gas di dalamnya. Kapasitas penyimpanan gas pada metode *adsorptive storage* dibatasi oleh luas permukaan internal yang dapat disediakan oleh material penjerap (Prasetyo, *et al.*, 2013).

Electrochemical and Electrical Energy Storage: Baterai dan Superkapasitor

Baterai dan superkapasitor (atau ultrakapasitor) adalah perangkat penyimpan energi yang mirip, dalam arti kedua perangkat tersebut menyimpan energi dalam bentuk energi listrik kemudian melepaskannya juga dalam bentuk energi listrik. Perbedaannya, energi listrik yang disimpan dalam baterai dikonversi dalam bentuk energi kimia dan ketika dibutuhkan, energi kimia tersebut dikonversikan lagi menjadi energi listrik melalui proses elektrokimia di dalam baterai. Sedangkan pada superkapasitor, energi listrik disimpan dalam bentuk listrik statis dan ketika dibutuhkan, energi listrik tersebut langsung dapat dilepas dengan cepat. Konsekuensinya, proses pengisian-pelepasan (*charging-discharging*) energi listrik pada superkapasitor menjadi jauh lebih cepat dibandingkan pada baterai.

Contoh pemanfaatan sistem *energy storage* dalam bentuk baterai dan superkapasitor yang paling mudah untuk dilihat dalam kehidupan sehari-hari adalah dalam aplikasinya pada kendaraan listrik. Sampai saat ini, dalam aplikasinya pada kendaraan listrik, superkapasitor berperan sebagai sumber energi sekunder mendampingi baterai. Kedua perangkat penyimpan energi ini bersifat komplementer satu dengan yang lain (Kouchachvili *et al.*, 2018). Baterai berperan sebagai penyedia energi pada saat kendaraan berjalan pada kecepatan ajeg, sedangkan superkapasitor berperan sebagai penyedia energi pada saat akselerasi yaitu ketika kendaraan membutuhkan energi dalam jumlah besar dalam waktu yang singkat. Dalam hal ini baterai dapat dianalogikan seperti pelari marathon sedangkan superkapasitor seperti pelari sprinter. Penggunaan baterai dan superkapasitor secara hibrida ini, dapat membuat rentang umur baterai menjadi lebih panjang dan jarak tempuh kendaraan listrik menjadi lebih jauh, dibandingkan jika kendaraan listrik tersebut hanya menggunakan baterai saja sebagai sumber energinya. Hal ini secara sederhana dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada saat proses *charging-discharging* di dalam baterai, terjadi aliran ion lithium bolak balik antara anoda dan katoda. Ketika proses *charging-discharging* dilakukan secara cepat, aliran ion antara anoda dan katoda juga berlangsung secara cepat, sehingga baterai menjadi panas dan material elektroda akan mengalami ekspansi diikuti dengan kontraksi (Shao, *et.al*, 2020). Kondisi seperti ini mengakibatkan material baterai secara bertahap akan mengalami degradasi sehingga rentang umur baterai menjadi lebih pendek.

Selain berfungsi sebagai sumber energi untuk kebutuhan kendaraan listrik pada saat akselerasi, keberadaan superkapasitor pada kendaraan listrik juga berfungsi sebagai penampung energi yang dihasilkan dari konversi energi kinetik menjadi energi listrik pada saat proses pengereman. Mekanisme *energy recovery* dari proses pengereman ini dikenal dengan istilah *regenerative braking* (Partridge and Abouelamaimen, 2019). Pada saat kendaraan melaju kencang dan kemudian dilakukan pengereman, terdapat sejumlah energi kinetik yang dapat dikonversi menjadi energi listrik yang dapat disimpan dan dipergunakan nantinya. Penyimpanan secara cepat sejumlah energi

listrik hasil konversi energi kinetik dari proses deselerasi ini dapat difasilitasi melalui keberadaan superkapasitor.

Pemanfaatan Material Karbon Nanopori dalam Perangkat *Energy storage*

Salah satu material yang dianggap potensial dalam pengembangan perangkat penyimpan energi secara *electrical* dan *electrochemical* adalah material karbon nanopori (Shao, *et.al*, 2020). Material ini di samping dibutuhkan bagi pengembangan perangkat penyimpan hidrogen melalui sistem *adsorptive storage* seperti yang telah disampaikan uraian sebelumnya, juga diperlukan sebagai material elektroda pada perangkat *electrochemical energy storage* seperti baterai, superkapasitor, dan *fuel cell*.

Karbon merupakan unsur yang paling banyak dijumpai di alam yang tersebar di berbagai tempat dalam berbagai bentuk. Jika dilihat dari sejarahnya, material karbon sudah dimanfaatkan oleh manusia sejak ribuan tahun sebelum masehi. Pada awal pemanfaatannya, material karbon digunakan dalam bentuk arang dan jelaga, dan digunakan secara sederhana sebagai bahan bakar, alat tulis, pengobatan, serta untuk proses penjernihan cairan.

Sentuhan ilmu pengetahuan terhadap pembuatan dan pemanfaatan material karbon baru terjadi pada awal tahun 1900an ketika Raphael von Ostrejko mematenkan cara membuat material karbon berpori secara sistematis melalui proses pirolisis batubara (Cai *et.al*, 2020). Sejak saat itulah pemanfaatan material karbon berpori (yang mempunyai karakteristik berupa kemampuan menjerap dan mengakumulasikan atom atau molekul pada jaringan porinya), semakin meluas dalam berbagai bidang kehidupan. Fenomena terjerapnya atom atau molekul pada permukaan dinding pori disebut sebagai peristiwa adsorpsi dan semakin besar luas permukaan dinding pori maka semakin banyak molekul yang dapat terjerap oleh material padatan berpori tersebut. Dengan kata lain, kinerja penjerapan atau kemampuan suatu material berpori dalam mengakumulasikan suatu atom atau molekul dipengaruhi oleh luas permukaan dinding pori yang terbentuk pada saat proses pembuatan material tersebut. Material karbon berpori yang pertama kali diproduksi secara massal ini

dimanfaatkan pada Perang Dunia I sebagai bahan isian masker untuk melindungi dari paparan uap bahan kimia beracun yang berasal dari senjata kimia (Giannakoudakisa *et al.*, 2019).

Dengan semakin berkembangnya teknologi proses, memungkinkan dilakukannya rekayasa untuk mendapatkan material karbon nanopori dengan struktur pori, ukuran pori, serta luas permukaan spesifik yang diarahkan untuk target aplikasi tertentu. Material karbon berpori yang akan dipergunakan sebagai ayakan molekuler atau *molecular sieve*, misalnya, harus mempunyai karakteristik berupa ukuran pori yang relatif seragam agar mempunyai *sieving effect* yang efektif (Prasetyo and Do, 1999). Sedangkan karbon berpori yang dimanfaatkan sebagai material elektroda pada perangkat penyimpan energi harus mempunyai luas permukaan spesifik yang besar serta bersifat penghantar listrik atau elektrokonduktif. Luas permukaan spesifik yang tinggi, konduktivitas elektrik yang baik, serta stabilitas kimiawi dan fisis yang bagus, merupakan karakteristik yang unik yang menjadikan karbon nanopori sangat berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai material aktif untuk pembuatan perangkat penyimpan energi seperti superkapasitor, baterai, dan *fuel cell* (Shao, *et al.*, 2020).

Karakterisasi Material Nanopori dengan Menggunakan Metode Adsorpsi

Salah satu tahapan penting yang sangat diperlukan di dalam proses inovasi pengembangan material karbon nanopori adalah proses karakterisasi. Tujuan dari proses karakterisasi adalah untuk mendapatkan informasi apakah material yang dihasilkan dari proses preparasi tersebut mempunyai karakteristik yang sudah sesuai dengan target peruntukannya. Informasi yang rinci terkait morfologi dan struktur pori karbon yang kompleks tentu saja tidak dapat sepenuhnya diketahui. Namun demikian, melalui interpretasi karakteristik adsorpsinya (baik dari kesetimbangan adsorpsi maupun kinetika adsorpsinya), dapat diperoleh informasi berupa parameter yang nantinya dapat dipergunakan sebagai basis untuk memperkirakan kinerjanya (Prasetyo and Do, 1999; Do *et al.*, 2000).

Metode karakterisasi material padatan berpori untuk mendapatkan informasi terkait luas permukaan dinding pori, pertama

kali dikemukakan oleh tiga orang peneliti yaitu Stephen Brunauer, Paul Emmet dan Edward Teller pada tahun 1938. Teknik karakterisasi material berpori yang dikembangkan oleh Brunauer *et.al* (1938), memicu pesatnya perkembangan rekayasa material padatan berpori dengan menggunakan parameter luas permukaan sebagai tolok ukur capaian. Pengembangan metode estimasi luas permukaan suatu material padatan berpori ini pada mulanya dipicu oleh kebutuhan ketiga peneliti tersebut untuk memperkirakan luas permukaan spesifik suatu katalis berupa besi spons yang diperlukan untuk sintesis ammonia. Mereka menyadari bahwa aktivitas katalis besi spons dipengaruhi oleh luas permukaan spesifik katalis, tapi pada waktu itu mereka tidak tahu Bagaimana cara mendeskripsikannya. Luas permukaan spesifik merupakan karakteristik yang sangat penting dari suatu material padatan berpori, utamanya dalam aplikasi material tersebut dalam bidang keteknikan seperti proses separasi, adsorpsi, katalisis dan *energy storage*. Brunauer, Emmet dan Teller melakukan estimasi luas permukaan dinding pori suatu material padatan berpori dengan melakukan interpretasi karakteristik kesetimbangan adsorpsi gas nitrogen pada material tersebut. Luas permukaan dinding pori diestimasi dari jumlah molekul nitrogen yang terjerap dan menutupi permukaan dinding pori, yang diasumsikan tertata secara rapat dan membentuk suatu lapisan pada permukaan padatan dinding pori. Jumlah molekul nitrogen yang teradsorpsi pada permukaan dinding pori dihitung dari model persamaan kesetimbangan adsorpsi yang dikembangkan oleh mereka bertiga yang kemudian dikenal sebagai persamaan BET.

Keberhasilan Brunauer, Emmet dan Teller dalam mengembangkan metode karakterisasi material padatan berpori dengan metode adsorpsi tidak dapat dilepaskan dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Langmuir (1918). Irving Langmuir dengan kemampuan imajinasinya yang luar biasa mampu mendeskripsikan fenomena interaksi molekuler yang terjadi pada permukaan padatan secara kuantitatif. Dengan mendeskripsikan dan memodelkan proses interaksi molekuler pada *interface* gas-padat dalam bentuk suatu persamaan kesetimbangan adsorpsi, Langmuir berhasil memberikan gambaran serta pemahaman fundamental untuk pengembangan lebih lanjut

dalam upaya memahami fenomena antarfase. Penelitian yang dilakukan oleh Langmuir tersebut mempunyai dampak positif yang signifikan pada berbagai bidang ilmu dan masih relevan sampai sekarang.

Grup Riset Karbon di Departemen Teknik Kimia UGM

Bapak, Ibu dan hadirin yang saya muliakan.

Material karbon nanopori yang dikembangkan di Grup Riset Karbon di Departemen Teknik Kimia UGM secara umum ditargetkan untuk aplikasi di bidang separasi, purifikasi, adsorpsi, katalisis, *adorptive gas storage*, serta *energy storage*. Material nanopori berbasis karbon ini dibuat dari bahan alami atau bahan polimer sintesis melalui proses pirolisis dan gasifikasi parsial terkendali. Struktur pori karbon yang dihasilkan dari proses pirolisis dan gasifikasi parsial tersebut dipengaruhi oleh karakteristik prekursor, metode karbonisasi, serta kondisi proses perlakuan sesudahnya.

Pembuatan material karbon nanopori dari bahan alami seperti batubara dan biomassa mempunyai beberapa kekurangan antara lain kualitas karbon yang dihasilkan tidak bisa lepas dari karakteristik bahan alami yang sudah tertentu sehingga variasi rekayasannya akan lebih terbatas. Namun demikian pemanfaatan batubara dan biomassa sebagai prekursor material karbon nanopori mempunyai keunggulan dari aspek harganya yang relatif lebih rendah.

Pada penelitian yang dilakukan di Grup Riset Karbon DTK UGM, untuk mendapatkan material karbon nanopori yang lebih mudah diarahkan untuk target aplikasi tertentu, material polimer (yang disintesis secara khusus) menjadi pilihan utama untuk dieksplorasi sebagai kandidat prekursor. Keunggulan dari penggunaan polimer sintesis sebagai prekursor untuk material karbon nanopori adalah bahwa morfologi, struktur pori, ukuran pori, serta luas permukaan spesifik dari karbon yang dihasilkan tidak hanya dapat dikendalikan pada saat proses karbonisasi, tetapi juga dapat direkayasa pada saat pembuatan prekursornya (Prasetyo *et al.*, 2011).

Preparasi material karbon nanopori, yang peruntukannya dirancang sebagai material untuk perangkat penyimpan energi, dilaku-

kan melalui tiga tahapan proses, yaitu: preparasi material prekursor, konversi material prekursor menjadi material karbon nanopori, dan modifikasi material karbon nanopori melalui berbagai proses perlakuan. Pada saat preparasi material prekursor yang berupa material polimer, untuk mendapatkan material karbon nanopori dengan target karakteristik tertentu, dilakukan rekayasa dengan cara memvariasikan jenis monomer, katalis, solven, bahan aditif, serta kondisi proses polimerisasi (Prasetyo *et al.*, 2013). Kemudian pada tahap karbonisasi material prekursor, yang dilakukan melalui proses pirolisis dan diikuti dengan proses gasifikasi parsial, dilakukan optimasi kondisi proses terkait suhu, kecepatan pemanasan, serta jenis dan konsentrasi *gasifying agent*. Selanjutnya, material karbon nanopori yang dihasilkan dapat dimodifikasi melalui berbagai rekayasa kimia permukaan material karbon atau dengan memadukan material karbon nanopori tersebut dengan material lain sehingga terbentuk material nanokomposit dengan fitur dan karakteristik yang sesuai dengan target peruntukannya.

Seperti kita ketahui bahwa kinerja elektrokimia suatu perangkat penyimpan energi sangat dipengaruhi oleh karakteristik material elektrodanya. Untuk mendapatkan material elektroda berbasis karbon nanopori dengan konduktivitas elektrik dan *wettability* yang baik, dapat dilakukan dengan mensintesis material polimer yang banyak mengandung unsur nitrogen seperti polyaniline (PANI) sebagai material prekursornya (Yang and Zhou, 2017). Permukaan material karbon dengan *wettability* yang baik akan berimbas pada peningkatan luasan permukaan karbon yang dapat terbasahi oleh cairan elektrolit, sehingga juga akan meningkatkan kapasitansinya. Namun demikian material karbon nanopori dari hasil karbonisasi polyaniline mempunyai struktur pori yang didominasi mikropori. Ukuran pori yang relatif kecil tersebut berpotensi menghambat akses cairan elektrolit yang dipergunakan. Untuk menghasilkan material karbon nanopori dengan ukuran pori rata-rata yang lebih besar, digunakan material prekursor yang dibuat dengan mereaksikan antara resorsinol dengan formaldehid melalui reaksi polimerisasi kondensasi dengan menggunakan natrium karbonat sebagai katalis (Prasetyo *et al.*, 2011). Dalam reaksi polimerisasi ini juga ditambahkan aditif berupa senyawa

etilen glikol atau surfaktant pluronic F127 untuk merekayasa struktur molekul polimer agar ketika dikarbonisasi akan dihasilkan karbon nanopori dengan struktur pori yang didominasi mesopori (Ariyanto *et al.*, 2012). Namun demikian, material karbon nanopori yang dihasilkan dari karbonisasi polimer resorsinol-formaldehid ini cenderung bersifat hidrofobik sehingga *wettability* permukaan karbon terhadap cairan elektrolit akan cenderung rendah. Hidrofobisitas permukaan karbon ini dapat dikurangi secara signifikan dengan meningkatkan gugus fungsional oksigen pada permukaan karbon melalui rekayasa kimia permukaan menggunakan irradiasi sinar gamma (Annisa *et al.*, 2021).

Untuk mendapatkan material elektroda dengan konduktivitas elektrik yang baik, material karbon nanopori dapat juga dipadukan dengan senyawa polimer konduktif seperti polyaniline (PANI), melalui proses *in situ polymerization* sehingga terbentuk material nanokomposit yang relatif lebih konduktif (Wibowo, *et al.*, 2023). Sedangkan untuk meningkatkan densitas energi material elektroda, dapat dilakukan rekayasa melalui proses pengembangan sejumlah oksida logam transisi pada permukaan dinding pori karbon (Kusuma *et al.*, 2021) sehingga akan dihasilkan material elektroda berupa nanokomposit dengan kapasitansi yang relatif besar.

Nanokomposit untuk material aktif perangkat penyimpan energi yang saat ini sedang dikembangkan di Grup Riset Karbon DTK UGM, merupakan perpaduan atas tiga unsur utama, yaitu: material karbon nanopori, polimer konduktif, dan oksida logam transisi. Riset eksploratoris terkait preparasinya dimaksudkan untuk memberikan indikasi jawaban dari pertanyaan utama tentang modifikasi karakteristik material karbon nanopori melalui proses pengkompositan. Misal, bagaimana cara material lain dipadukan secara sistematis pada material karbon nanopori selaku material inang dan seberapa jauh teknik pengkompositan tersebut dapat meningkatkan kinerja material karbon nanopori. Penelitian material yang sesuai untuk dipadukan dengan karbon nanopori melalui proses pengkompositan adalah langkah pertama dalam pengembangan material karbon nanopori termodifikasi. Kemudian diikuti dengan karakterisasi material karbon

nanopori termodifikasi terkait kapasitas penyimpan serta kinerja elektrokimianya.

Bapak, Ibu dan hadirin yang saya muliakan.

Indonesia mengalami kelebihan pasokan listrik sejak 2015 dan diprediksi masih akan terjadi hingga tahun 2030 (Hasjanah, 2023). Hal ini disebabkan karena adanya *mismatch* atau ketidaksesuaian antara proyeksi permintaan (yang menjadi basis perencanaan) dengan realisasinya. Di satu sisi, yaitu aspek kehandalan atau jaminan ketersediaan energi, hal ini patut disyukuri, tetapi dari sisi keekonomian, kondisi kelebihan pasokan ini menyebabkan kerugian yang cukup membebani keuangan negara (Idris, 2022). Kondisi kelimpahan pasokan energi listrik juga berdampak pada investasi energi baru terbarukan (EBT), karena kondisi ini secara otomatis akan menjadikan tertutupnya ruang pengembangan untuk EBT. Karena dalam kondisi kelimpahan energi, pemerintah kemungkinan besar akan mengambil sikap pragmatis yaitu dengan memprioritaskan sumber energi yang sudah ada.

Kondisi kelimpahan pasokan listrik akan bisa dihindari jika dalam perencanaan pembangunan pembangkitan listrik tersebut melibatkan keberadaan sistem *energy storage* yang terintegrasikan di dalamnya. Sehingga dorongan pemerintah melalui pemberian insentif pada pembelian kendaraan listrik serta pemberian cuma-cuma peralatan elektronik rumah tangga seperti kompor listrik dan *rice cooker*, sebagai solusi jangka pendek memitigasi kelebihan pasokan listrik, tidak perlu dilakukan.

Adalah suatu keniscayaan bahwa unit utilitas *energy storage* yang efisien dan handal akan menjadi bagian yang tidak terpisahkan dalam sistem pembangkitan energi. Dengan munculnya berbagai perkembangan teknologi baru dalam sistem penyimpan energi serta kebutuhan mengintegrasikan sumber energi terbarukan dalam sistem pembangkit tenaga listrik, pembangunan sektor energi suatu negara akan menghadapi berbagai tantangan dan sekaligus memberikan peluang. Riset, pengembangan teknologi, serta inovasi diperlukan untuk mengantisipasi tren ke depan, serta untuk meningkatkan cakup-

an aplikasi teknologi *energy storage*. Guna mendukung perkembangan tersebut serta memfasilitasi proses transisi menuju sistem energi rendah karbon, peran perguruan tinggi dan badan riset sangat diperlukan.

Penelitian terkait material untuk pengembangan perangkat *energy storage* yang kami lakukan di Grup Riset Karbon Departemen Teknik Kimia UGM mungkin hanya memberikan kontribusi yang relatif kecil dalam pengembangan teknologi perangkat *energy storage* secara umum. Tetapi kontribusi tersebut akan menjadi sangat berarti jika nantinya muncul penelitian-penelitian lain terkait *energy storage* dari berbagai grup riset sehingga terbentuk *cluster* dan ekosistem yang sinergis yang mampu mendukung pengembangan sistem *energy storage* yang pada ujungnya nanti dapat mengakselerasi program elektrifikasi sektor transportasi dan energi. Oleh karena itu, pada kesempatan ini kami berharap dalam waktu yang tidak terlalu lama dapat diwujudkan berdirinya *research center* yang fokus pada pengembangan sistem *energy storage* di lingkungan Universitas Gadjah Mada tercinta.

Kesimpulan Dan Prospek Pengembangan

Bapak, Ibu, dan hadirin yang saya muliakan.

Akhirnya dari apa yang telah kami sampaikan tadi, akan kami coba ringkaskan dalam bentuk kesimpulan dan prospek pengembangan material karbon nanopori dan perangkat penyimpan energi sebagai berikut:

1. Riset terkait pengembangan material elektroda dari material karbon nanopori secara tidak langsung akan memacu pengembangan dan inovasi teknologi perangkat penyimpan energi seperti baterai, superkapasitor, *fuel cell*, serta adsorptive Hydrogen-storage.
2. Baterai, superkapasitor, *fuel cell* dan adsorptive Hydrogen-storage merupakan perangkat *energy storage* yang penting dan memainkan peran yang sangat strategis dalam proses elektrifikasi.
3. Keberadaan unit utilitas penyimpan energi dalam pembangkit tenaga listrik merupakan salah satu solusi penting untuk mengelola

kelimpahan pasokan energi listrik. Fungsi unit sistem penyimpanan energi ini dapat dioptimalkan dengan melakukan hibridisasi antara perangkat penyimpanan energi dengan perangkat elektrolisis. Energi listrik yang tidak tertampung dalam perangkat penyimpanan energi dapat dimanfaatkan untuk melakukan proses elektrolisis air sehingga dihasilkan gas hidrogen yang siap untuk dikonversi menjadi energi.

4. Dengan semakin berkembangnya teknologi penyimpanan energi maka kendala utama berupa ketidak-ajegan atau intermitensi dalam pemanfaatan energi surya dan energi angin dapat teratasi sehingga pemanfaatan energi baru terbarukan yang tidak polutif ini akan semakin meluas. Hal ini akan berdampak pada terakselerasinya target program substitusi batubara dan bahan bakar minyak sehingga peran *energy storage* dalam proses dekarbonisasi pembangkit listrik dalam rangka mengatasi perubahan iklim menjadi sangat strategis dan penting.
5. Pengembangan sistem *energy storage* akan mengakselerasi perluasan akses pembangunan elektrifikasi di samping juga memungkinkan peningkatan cakupan pemanfaatan energi baru terbarukan sehingga ketergantungan terhadap energi fosil dan dampak ekologis yang ditimbulkan oleh energi fosil dapat dikurangi.

Kutipan inspiratif:

Jens Martin Skibsted:

“The sun doesn't always shine; the wind doesn't always blow. This is why, if we want to rely on renewables, we need intelligent systems that integrate and coordinate different sources of energy at scale so that when one is scarce or unavailable, the others can automatically compensate”.

Jinzhang Liu:

“In the future, it is expected that Supercapacitors can be modified to store more energy than a Lithium-ion battery while retaining the ability to release its energy up to 10 times

faster. Meaning the Supercapacitors in its body panels could entirely power the car”. He goes onto add that, “After one full charge, this car should be able to run up to 500 km, similar to a petrol-powered car and more than double the current limit of an electric car.

Ucapan Terima Kasih

Sebagai penutup pidato pengukuhan ini, saya ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada Pemerintah Republik Indonesia melalui Kementerian Pendidikan, Kebudayaan Riset dan Teknologi yang telah memberikan kepercayaan sebagai guru besar dalam bidang Teknik Kimia di Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Rektor, Senat Akademik, Majelis Guru Besar, Dekan dan Senat Fakultas Teknik, dan Ketua Departemen beserta Bapak/Ibu dosen Departemen Teknik Kimia yang telah menyetujui pengangkatan saya dalam jabatan guru besar.

Pada kesempatan ini saya juga ingin menghaturkan terima kasih kepada kedua orangtua yang telah mengasuh dan mendidik kami, juga kepada istri dan anak untuk kesabarannya, serta kakak dan adik atas dukungannya.

Ucapan terima kasih dan salam takzim saya sampaikan untuk para bapak/ibu guru dan dosen yang telah mendidik dan menginspirasi kami selama ini. Secara khusus saya ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada almarhum Ir, Soegiarto selaku dosen pembimbing S1 di Teknik Kimia UGM, Profesor Bohumil Volesky selaku pembimbing S2 di McGill University, dan Profesor Duong D, Do selaku pembimbing S3 di University of Queensland, begitu juga kepada Profesor Rochmadi dan Dr.Ing Teguh Ariyanto selaku rekan penelitian dan teman diskusi di Grup Riset Karbon, Departemen Teknik Kimia UGM.

Terakhir, rasa terima kasih saya sampaikan kepada Profesor Rochmadi dan Profesor Sarto yang telah bersedia menjadi *reviewer* untuk naskah pidato ini, serta Bapak, Ibu, hadirin yang telah bersedia meluangkan waktu dan dengan sabar mengikuti pidato pengukuhan

ini. Kami memohon maaf sebesar besarnya atas segala kekurangan, kesalahan, dan kekhilafan yang ada.

*Alhamdulillah rabbil 'alamin,
Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh*

DAFTAR PUSTAKA

- Annisa, A., Prasetyo, I., Swantomo, D., Ariyanto, T., 2021, “Surface Modification of Nanoporous Carbon Using Gamma Irradiation Treatment as Supercapacitor Material”, AIP Conference Proceedings, 2349 (1)
- Ariyanto, T., Prasetyo, I., Rochmadi, R., 2012, “The Influence of Pore Structure on the Capacitance of Supercapacitor Electrode Prepared from Nanoporous Carbon”, Reaktor 14 (1), 25-32
- Brunauer, S., Emmett, P.H., Teller, E., 1938, “Adsorption of Gases in Multimolecular Layers”, Journal of the American Chemical Society, v. 60 (2), pp. 309-319
- Cai, Z., Deng, X., Wang, Q., Lai, J., Xie, H., Chen, Y., Huang, B., Lin, G., 2020, “Core-Shell Granular Activated Carbon and Its Adsorption of Trypan Blue, The Journal of Cleaner Production, vol.242, 118496
- Do, H.D., Do, D.D., Prasetyo, I., 2000, “Constant Molar Flow Semi-Batch Adsorber as a Tool to Study Adsorption Kinetics of Pure Gases and Vapors”, Chem. Eng. Sci., vol. 55, no. 9, pp.1717-1727
- Giannakoudakisa, D.A., Barczak, M., Florenta, M., and Bandosza, T.J., 2019, “Analysis of Interactions of Mustard Gas Surrogate Vapors with Porous Carbon Textiles”, Chemical Engineering Journal, v. 362, pp. 758–766
- Hasjanah, K., 2023, “Tantangan Ketenagalistrikan Indonesia, Bagaimana Menanggulangi Kelebihan Pasokan Listrik”, Institute for Essential Services Reform (IESR), Issue 11 Oktober 2023
- Idris, M., 2022, “Terlalu Banyak Pembangkit, Listrik PLN Jadi *Oversupply* dan Bikin Rugi”, KOMPAS, 14 September 2022
- Jenkins, B., Squires, D., Barton, J., Strickland, D., Wijayantha, K.G.U., Carroll, J., Wilson, J., Brenton, M., and Thomson, M.,

- 2022, “Techno-Economic Analysis of Low Carbon Hydrogen Production from Offshore Wind Using Battolyser Technology”, *Energies*, vol. 15, 5796
- Katsnelson, A., 2023, “Innovation in Lithium-Ion Batteries”, *Chemical and Engineering News*, vol. 101 (26), pp 40–41
- Kobayashi, H., 2022, “Evaluation of Toyota’s Strategy for BEV in Overtaking Tesla: Based on the Theories of Dynamic Managerial Capabilities and Ordinary Capabilities Journal of Strategic Management Studies”, vol. 14 (1), pp. 49–66
- Kostoglou, N., Koczwar, C., Stock, S., Tampaxis, C., Charalambopoulou, G., Steriotis, T., Paris, O., Rebholz, C., Mitterer, C., 2022, “Nanoporous Polymer Derived Activated Carbon for Hydrogen Adsorption and Electrochemical Energy Storage”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 427, 131730
- Kouchachvili, L., Yaïci, W., Entchev, E., 2018, “Hybrid Battery/Supercapacitor *Energy storage* System For The Electric Vehicles”, *Journal of Power Sources*, vol.374, pp. 237–248
- Kusuma, H.D., Rochmadi, Prasetyo, I., Ariyanto, T., 2021, “Mesoporous Manganese Oxide/Lignin-Derived Carbon for High Performance of Supercapacitor Electrodes, *Molecules*, vol. 26 (23), 7104
- Langmuir, I., 1918, “The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Pt”, *Journal of the American Chemical Society*, v. 40 (9), pp. 1361–1402.
- Mazloomi, K. and Gomes, C., 2012, “Hydrogen as An Energy Carrier: Prospects and Challenges”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 16, pp. 3024–3033
- Mitali, J., Dhinakaran, S, and Mohamad, A.A., 2022, “*Energy storage* Systems: a Review, *Energy storage and Saving*, vol. 1 (3), pp. 166-216
- Parikh, A., Shah, M., and Prajapati, M., 2023, “Fuelling the Sustainable Future: a Comparative Analysis Between Battery Electrical Vehicles (BEV) and Fuel Cell Electrical Vehicles (FCEV)”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol 30, pp. 57236–57252

- Partridge, J. and Abouelamaimen, D.I., 2019, "The Role of Supercapacitors in Regenerative Braking System", *Energies*, vo.12, 2683
- Prasetyo, I. and Do, D.D., 1999, "Adsorption Kinetics of Light Paraffins in AC by a Constant Molar Flow-Rate Method", *AIChE Journal*, vol. 45, no. 9, pp. 1892-1900
- Prasetyo, I. and Do, D.D., 1999, "Pore Structure Alteration of Porous Carbon by Catalytic Coke Deposition", *Carbon*, vol. 37, no.12, pp. 1909-1918
- Prasetyo, I., Budhijanto, B., Rochmadi, R., Yunanto, R., Ariyanto, T., 2011, "Methane *Storage* by Methane Hydrate Formation Within Water-Saturated Prous Carbon: The Effect of Mesoporosity", *Engineering a Better World: Proceedings of the CHEMECA Annual Conference held on 18-21 September 2011 in Sydney, Australia*, p. 56 (139)
- Prasetyo, I., Prihatiningsih, M.C., Putra, E.G.R., 2013, "Preparation of Nanophase Ammonia Borane in Mesoporous MCM-48 for Hydrogen *Storage*", 20th Regional Symposium on *Chemical Engineering (RSCE 2013)*, Alona Kew White Beach Resort, Panglao Island Bohol, Philippines November 12-13, 2013
- Prasetyo, I., Rochmadi, R., Ariyanto, T., Yunanto, R., 2013, "Simple Method to Produce Nanoporous Carbon for Various Applications by Pyrolysis of Specially Synthesized Phenolic Resin", *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 13 (2), pp.95-100
- Rivard, E., Trudeau, M., and Zaghbi, K., 2019, "Hydrogen *Storage* for Mobility: A Review", *Materials*, vol.12, 1973
- Shao, H., Wu, Y., Lin, Z., Taberna, P.L., and Simon, P., 2020, "Nanoporous Carbon for Electrochemical Capacitive *Energy storage*", *Chem. Soc. Rev.*, vol.49, pp. 3005-3049
- Shrestha, R.G., Maji, S., Shrestha, L.K., and Ariga, K., 2020, "Nanoarchitectonics of Nanoporous Carbon Materials in Supercapacitors Applications", *Nanomaterials*, v 10(4), 639
- Usman, M.R., 2022, "Hydrogen *storage* methods: Review and current status", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.167, 112743

- Wibowo, J.F., Prasetyo, I., Ariyanto, T., 2023, "PANI/Porous Carbon Palm Kernel Shell Via in Situ Polymerization Method for Supercapacitor Electrode, Solid State Phenomena, vol. 345, 123-130
- Yang, M. and Zhou, Z., 2017, "Recent Breakthroughs in Supercapacitors Boosted by Nitrogen-Rich Porous Carbon Materials", Advanced Science, vol 4(8), 1600408

BIODATA



Nama : Prof. Ir., Imam Prasetyo, M.Eng., PhD
 NIP/NIDN : 196110041988031003/ 0004106105
 Tempat dan tanggal lahir : Temanggung, 4 Oktober 1961
 E-mail : imampras@ugm.ac.id
 Alamat Kantor : Departemen Teknik Kimia FT UGM, Jl.
 Grafika No.2, Bulaksumur, Yogyakarta
 55281
 Keluarga : Yanisworo Wijaya Ratih (istri)
 Ian Adhyatma Prasetyo (anak)
 Alamat Rumah : Perumahan Jambusari Indah, Jl. Delima I,
 No.63B, Yogyakarta

Riwayat Pendidikan

1980-1986 : Ir. Departemen Teknik Kimia, Universitas
 Gadjah Mada
 1989-1992 : M.Eng. *Chemical Engineering Department, McGill
 University, Canada*
 1995-2000 : PhD. *Chemical Engineering Department,
 University of Queensland,*

A. Pengalaman Penelitian (5 tahun Terakhir atau terkait Penyimpanan Energi)

1. Pengembangan Katalis untuk Dehidrasi Alkohol (PT Greenhope 2022-2023)
2. Pre-adopsi Material Pengendali Proses Pemasakan Buah (EtilenScav) (Innovation Grant 2023)

3. Produksi Nanokomposit Berbasis Karbon Skala Pilot untuk Aplikasi Elektrode dan Adsorben Kontaminan (Kedaireka Matching Fund 2022)
4. Preparasi Karbon Nanopori untuk Aplikasi Carbon Molecular Sieve (World Class Research 2022)
5. Lignin Refinery untuk Pembuatan Karbon Berpori dan Aplikasinya sebagai Adsorben dan Material Elektroda Superkapasitor (World Class Research 2021)
6. Karbon Banopori untuk Purifikasi Biogas (BPDP Sawit)
7. Pembuatan Adsorben Penjerap Etilen Berbasis Karbon Sebagai Pengendali Proses Pemasakan Buah (Kemenristekdikti)
8. Pembuatan Karbon untuk Anoda Baterai (LPDP; Proyek Mobil Listrik Nasional)
9. Sistem Penyimpanan Hidrogen Dalam Bentuk Partikel Nano Ammonia Borane Untuk Aplikasi *Hydrogen fuel cell* (SINAS, Kemenristek)
10. Sistem Penyimpanan Gas Metan dalam Bentuk Metan Hidrat Menggunakan Medium Karbon Nanopori (DIPA)

B. Publikasi Artikel Ilmiah Dalam Jurnal (5 tahun Terakhir atau terkait Penyimpanan Energi)

1. JF Wibowo, I Prasetyo, T Ariyanto, 2023, PANI/Porous carbon palm kernel shell via in situ polymerization method for supercapacitor electrode, *Solid State Phenomena* 345, 123-130. <https://doi.org/10.4028/p-3A39kD>
2. BA Prasetyo, I Prasetyo, T Ariyanto, 2023, Ciprofloxacin degradation using a PANI-derived mesoporous carbon/TiO₂ photocatalyst, *Water, Air, & Soil Pollution* 234 (6), 391. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06405-6>
3. NIF Mukti, T Ariyanto, WB Sediawan, I Prasetyo, 2023, Efficacy of modified carbon molecular sieve with iron oxides or choline chloride-based deep eutectic solvent for the separation of CO₂/CH₄, *RSC advances* 13 (33), 23158-23168. <https://doi.org/10.1039/D3RA02890A>

4. AS Mutia, I Prasetyo, T Ariyanto, 2022, Synthesis of polymer-derived carbon for ibuprofen removal from simulated wastewater, *key engineering materials* 927, 34-40.
<https://doi.org/10.4028/p-641qw9>
5. MC Prihatiningsih, T Ariyanto, EGR Putra, VY Susilo, I Mahendra, I Prasetyo, 2022, Radioiodination of modified porous silica nanoparticles as a potential candidate of iodine-131 drugs vehicle, *ACS omega* 7 (16), 13494-13506
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06492>
6. AS Mutia, T Ariyanto, I Prasetyo, 2022, Ciprofloxacin removal from simulated wastewater through a combined process of adsorption and oxidation processes using Fe/C adsorbent, *Water, Air, & Soil Pollution* 233 (4), 146.
<https://doi.org/10.1007/s11270-022-05618-5>
7. AR Pangestu, I Prasetyo, I Perdana, 2022, Selective recovery of nickel from precipitates of NCA battery cathodes through leaching process using oxalic acid, *AIP Conference Proceedings* 2440, 030003.
<https://doi.org/10.1063/5.0075468>
8. HD Kusuma, R Rochmadi, D Swantomo, I Prasetyo, T Ariyanto, 2022, Enhancing capacitive performance of lignin-derived carbon by Mn oxide loading, *AIP Conference Proceedings* 2440 (1).
<https://doi.org/10.1063/5.0075785>
9. D Abriyani, T Ariyanto, I Prasetyo, 2021, Preparation of magnesium oxide confined in activated carbon synthesized from palm kernel shell and its application for Hydrogen sulfide removal, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 963 (1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/963/1/012031>
10. HD Kusuma, Rochmadi, I Prasetyo, T Ariyanto, 2021, Mesoporous manganese oxide/lignin- derived carbon for high performance of supercapacitor electrodes, *Molecules* 26 (23), 7104. <https://doi.org/10.3390/molecules26237104>
11. T Ariyanto, K Masrurroh, GYS Pambayun, NIF Mukti, RB Cahyono, A Prasetya, I Prasetyo, 2021, Improving the separation of CO₂/CH₄ using impregnation of deep eutectic solvents on

- porous carbon, ACS omega 6 (29), 19194-19201
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02545>
12. A Annisa, I Prasetyo, D Swantomo, T Ariyanto, 2021, Surface modification of nanoporous carbon using gamma irradiation treatment as supercapacitor material, AIP Conference Proceedings 2349 (1) <https://doi.org/10.1063/5.0052360>
 13. X Callista, I Prasetyo, T Ariyanto, 2021, Adsorption of carbon dioxide in porous carbon containing monoethanolamine (MEA): The effect of carbon surface pre-treatment, AIP Conference Proceedings 2349 (1).
<https://doi.org/10.1063/5.0052535>
 14. NBM Naryo, I Prasetyo, RB Cahyono, T Ariyanto, 2021, Upgrading methane purity in Biogas Plant Gamping by using carbon-based molecular sieve, Key Engineering Materials 884, 98-103.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.884.98>
 15. MI Al Fuady, R Rochmadi, I Prasetyo, T Ariyanto, 2021, Surface-modified carbon synthesized from palm kernel shell for electric double-layer capacitor applications, Key Engineering Materials 884, 423-429.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.884.423>
 16. S Suhirman, T Ariyanto, I Prasetyo, 2021, Preparation of potassium permanganate confined in porous carbon synthesized from palm kernel shell and its application for Hydrogen sulfide removal, Key Engineering Materials 884, 77-82.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.884.77>
 17. K Masruroh, RB Cahyono, I Prasetyo, T Ariyanto, 2021, The effect of amine types on breakthrough separation of methane on biogas, International Journal of Renewable Energy Development 10 (2), 249.
<https://doi.org/10.14710/ijred.2021.33514>
 18. NIF Mukti, T Ariyanto, WB Sediawan, I Prasetyo, 2021, Oxygen-enriched surface modification for improving the dispersion of iron oxide on a porous carbon surface and its application as carbon molecular sieves (CMS) for CO₂/CH₄ separation, RSC advances 11 (58), 36782-36791.

<https://doi.org/10.1039/D1RA07481D>

19. I Prasetyo, NIF Mukti, RB Cahyono, A Prasetya, T Ariyanto, 2020, Nanoporous carbon prepared from palm kernel shell for CO₂/CH₄ separation, *Waste and Biomass Valorization* 11, 5599-5606, <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01006-4>
20. FA Fajrin, I Prasetyo, T Ariyanto, 2020, Preparation of carbon monolith derived from resorcinol-formaldehyde resin and its application for antibiotic adsorption, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 572 (1), 012015 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/572/1/012015>
21. I Prasetyo, PR Permatasari, WT Laksana, R Rochmadi, WC Oh, T Ariyanto, 2020, Lignin refinery using organosolv process for nanoporous carbon synthesis, *Molecules* 25 (15), 3428 <https://doi.org/10.3390/molecules25153428>
22. P Satwikanita, I Prasetyo, M Fahrurrozi, T Ariyanto, 2020, Adsorption of ethylene using cobalt oxide-loaded pillared clay, *J. Eng. Technol. Sci* 52 (3), 424-435 <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.3.9>
23. S Kurnia, T Ariyanto, I Prasetyo, 2020, Jaranan wood (*Lannea coromandelica*)-derived porous carbon and its performance for anionic surfactant adsorption, *Key Engineering Materials* 840, 3-9. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.840.3>
24. S Amelia, WB Sediawan, I Prasetyo, M Munoz, T Ariyanto, 2020, Role of the pore structure of Fe/C catalysts on heterogeneous Fenton oxidation, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8 (1), 102921. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102921>
25. T Ariyanto, I Prasetyo, NF Mukti, RB Cahyono, A Prasetya, 2020, Nanoporous carbon based palm kernel shell and its characteristics of methane and carbon dioxide adsorption, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 736 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022057>
26. I Prasetyo, F Akbar, AW Prabandari, T Ariyanto, 2019, Fenton oxidation using easily recoverable catalyst of magnetite (Fe₃O₄) as an efficient approach to treatment of rhodamine B dyeing

- effluent in traditional fabrics industry, *ASEAN Journal on Science and Technology for Development* 36 (3), 103–108-103–108 <https://doi.org/10.29037/ajstd.592>
27. T Ariyanto, RAG Sarwendah, YMN Amimmel, WT Laksmana, I Prasetyo, 2019, Modifying nanoporous carbon through Hydrogen peroxide oxidation for removal of metronidazole antibiotics from simulated wastewater, *Processes* 7 (11), 835 <https://doi.org/10.3390/pr7110835>
 28. T Ariyanto, M Kurniasari, WT Laksmana, Rochmadi, I Prasetyo, 2019, Pore size control of polymer-derived carbon adsorbent and its application for dye removal, *International Journal of Environmental Science and Technology* 16, 4631–4636 <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2166-0>
 29. I Prasetyo, NIF Mukti, T Ariyanto, 2019, Ethylene adsorption using cobalt oxide-loaded polymer-derived nanoporous carbon and its application to extend shelf life of fruit, *Molecules* 24 (8), 1507. <https://doi.org/10.3390/molecules24081507>
 30. A Hernando, T Ariyanto, I Prasetyo, 2019, Preserving climacteric fruits by ripening hormone oxidation using nano-KMnO₄ Confined within nanoporous Carbon, *ASEAN Journal of Chemical Engineering* 19 (1), 54-65
 31. GAK Prawiaswarra, I Prasetyo, T Ariyanto, 2019, Hydrogen storage using metal oxide loaded in polymer-derived carbon, *AIP Conference Proceedings* 2085 (1). <https://doi.org/10.1063/1.5095021>
 32. DN Afifah, T Ariyanto, S Supranto, I Prasetyo, 2018, Separation of lithium ion from lithium- cobalt mixture using electro dialysis monovalent membrane, *Engineering Journal* 22 (3), 165-179 <https://doi.org/10.4186/ej.2018.22.3.165>
 33. I Prasetyo, R Rochmadi, T Ariyanto, R Yunanto, 2013, Simple method to produce nanoporous carbon for various applications by pyrolysis of specially synthesized phenolic resin, *Indonesian Journal of Chemistry* 13 (2), 95-100 <https://doi.org/10.22146/ijc.21290>
 34. T Ariyanto, I Prasetyo, R Rochmadi, 2012, The Influence of pore structure on the capacitance of supercapacitor electrode prepared

from nanoporous carbon, Reaktor 14 (1), 25-32
<https://doi.org/10.14710/reaktor.14.1.25-32>

C. Perolehan HKI

1. P00201501946 (2013): Sistem Penyimpangan Bahan Bakar Gas Alam Tekanan Rendah Menggunakan Karbon Nano-pori
2. IDP000071967 (2020): Adsorben Penjerap Etilen untuk Pengawet Buah
3. S00202214884 (2022): Pembuatan Carbon Molecular Sieve Dengan Lapisan Tipis Aktif Deep Eutectic solvent Berbasis Gliserol Untuk Pemurnian Metana