

MINI REVIEW

KARBON MESOPORI DALAM DUNIA GLOBAL

Mesoporous Carbon in the Global World

Maria Ulfa*

*Program Studi Pendidikan Kimia, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan,
Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami No. 36A, Surakarta, Indonesia 57126*

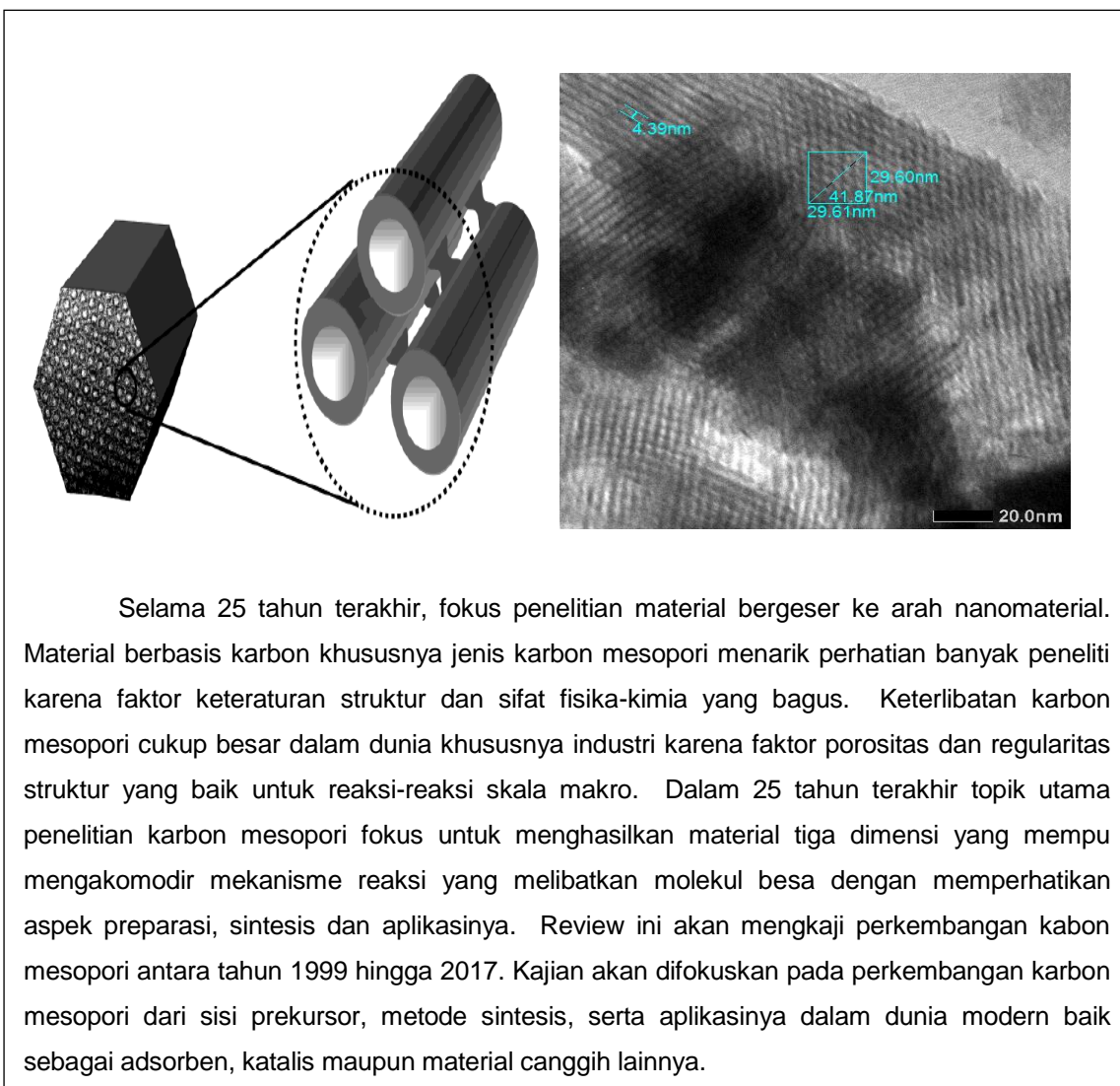
* Untuk Korespondensi, Telp/Fax (0274)545188, e-mail: ulfa.maria2015@gmail.com

Received: March 29, 2017

Accepted: April 29, 2017

Online Published: April 30, 2017

DOI : 10.20961/jkpk.v2i1.8522



ABSTRAK

Review ini disusun untuk memberikan informasi tentang perkembangan dari aspek preparasi, sintesis dan penerapan karbon mesopori di dunia global berdasarkan fenomena penelitian pada 100 jurnal karbon mesopori yang telah terpublikasi oleh Elsevier, ACS dan Springer pada kurun 25 tahun terakhir dengan metode analisis konten. Hasil review menunjukkan bahwa peneliti mulai meninggalkan sukrosa dan beralih pada non-sukrosa sebagai prekursor karbon. Pada tahun 1995-2000 peneliti yang menggunakan sukrose sekitar 90% dan pada tahun 2010-2015 turun menjadi 40%. Sebaliknya yang menggunakan non-sukrose pada tahun 1995-2000 hanya 10% dan akhir-akhir ini meningkat menjadi 60%. Untuk metode sintesis karbon mesopori peneliti lebih suka menggunakan cetakan lunak (sekitar 75 %) sebelum tahun 2000 dan menggunakan cetakan padat (sekitar 60%) pada tahun 2000-2010, tetapi sekarang ketiga metode yang digunakan yaitu cetakan lunak, cetakan keras, dan kombinasi keduanya adalah seimbang. Dari tahun 1995 sampai 2015 total peneliti yang menggunakan sukrosa sebagai prekursor karbon hampir 50%. Sekitar 40% peneliti menggunakan metode cetakan padat, 35% menggunakan cetakan lunak dan sisanya menggunakan paduan cetakan padat dan lunak. Struktur karbon mesopori berkebang dari bentuk amorf-lubang cacing, kubus hingga heksagonal pejal dan berbagai modifikasi ke empat bentuk tersebut. Sifat fisik seperti ukuran pori, luas permukaan dan keteraturan berkembang semakin membaik dari tahun ke tahun. Aplikasi karbon mesopori 60% digunakan dalam proses produksi dan pemurnian minyak bumi sedangkan sisanya dimanfaatkan dalam dunia teknologi komunikasi, pemurnian limbah dan kesehatan. Seluruh ulasan tentang karbon mesopori dalam dunia global menunjukkan bahwa karbon mesopori adalah material masa depan yang mempunyai peluang besar untuk dikembangkan terutama di Indonesia dan negara berkembang lainnya. Indonesia kaya dengan berbagai dengan sumber daya alam yang berupa sumber karbon, oleh karena itu dimasa depan Indonesia diperkirakan akan menjadi salah satu negara pemasok karbon mesopori.

Kata kunci: karbon mesopori, prekursor, metode, struktur, aplikasi

ABSTRACT

This review provided information about the development of the synthesis aspect, preparation and application of mesoporous carbon in the global world based on research phenomenon on 100 mesoporous carbon papers published by Elsevier, ACS and Springer during 25 year. Review results showed that researchers began to leave sucrose and switch to non-sucrose as carbon precursor. Researchers used sucrose about 90% in 1995-2000 and in 2010-2015 decrease to become 40%. Otherwise those using non-sucrose in 1995-2000 only 10%, recently increase to 60%. For the method used to synthesis the mesoporous carbon researchers prefer used soft template (about 75 %) before year 2000 and hard template (about 60%) in 2000-2010, but now the method used with soft templates, hard templates and combinations of both are balanced. From year 1995 until 2015 total researchers used sucrose as carbon precursor about 50% and researchers about 40% using hard template method, 35% using soft template method and the others using combination both of them. Structure form of the amorphous carbons are grown, from wormholes, cubic, until hexagonal, and modification to these four forms. Physical properties such as pore size, surface area, and structural order were developed for better performance year to year. Mesoporous carbon application up to 60% were used in the fuel production and refineries, but the other using on the communication technologies and medical areas. All of the mesoporous carbon in the global world shows that mesoporous carbon is a future material which has a great opportunity to develop especially in Indonesia and other developing countries. Indonesia have various natural resources as a carbon source, so in the future Indonesia are expected as one of the countries of mesoporous carbon supplier.

Keyword: mesoporous carbon, precursor, method, structure, application

1. PERKEMBANGAN PREKURSOR KARBON MESOPORI

Perkembangan karbon mesopori dimulai tahun 1997 ketika Kyotani mencoba mensintesis dari polimer organik dengan campuran silika [1]. Hasil sintesis Kyotani

tidak memberikan performa fisik dan kimia yang baik. Selama dua tahun setelah penemuan tersebut, karbon mesopori tidak terlalu banyak diminati oleh peneliti sehingga penelitian seputar karbon antara 1997-1999 hampir tidak ada.



Maria Ulfa mulai mempelajari kimia di Unair tahun 2000. Penulis menyelesaikan pendidikan Masternya di ITS tahun 2009. Penulis sempat bergabung dengan Pusat Studi Energi Alternatif (PSEA) UMS hingga tahun 2011. Kemudian Penulis mendapatkan gelar Doktornya di UGM di tahun 2015 dan menyelesaikan disertasinya pada grup penelitian Prof. Wega Trisunaryanti. Kedua jenjang Pendidikan ini diselesaikan dengan program Beasiswa Unggulan DIKTI. Setelah menamatkan pendidikan doktornya, penulis menjadi dosen anorganik di Prodi Pendidikan Kimia FKIP UNS dan menggeluti penelitian material hingga sekarang.

Daftar Isi:

1. Perkembangan Prekursor Karbon Mesopori
2. Perkembangan Metode Sintesis Karbon Mesopori
3. Revolusi Struktur Karbon Mesopori
4. Perkembangan Aplikasi Karbon Mesopori
5. Kilas Masa Depan

Semua berubah ketika ditahun 1999, Ryoo melakukan sintesis karbon mesopori menggunakan sumber karbon berupa sukrosa [2]. Menurut Ryoo, sukrosa memiliki sifat kelarutan yang sangat baik dalam pelarut air sehingga dinilai cukup kooperatif ketika direaksikan dengan molekul atau material pencetak pori. Kandungan karbon dalam sukrosa juga dinilai cukup tinggi dan membutuhkan energi yang tidak terlalu banyak saat proses konversi [3]–[5]. Penelitian Ryoo berhasil mendapatkan karbon mesopori dengan porositas serta regularitas struktur yang baik memiliki luas permukaan sekitar 1000 m²/g, volume pori 1 cm³/g, diameter pori 3,5 nm dengan bentuk spesifik berupa kubus. Hasil penelitian Ryoo akhirnya lebih dikenal dengan CMK-1.

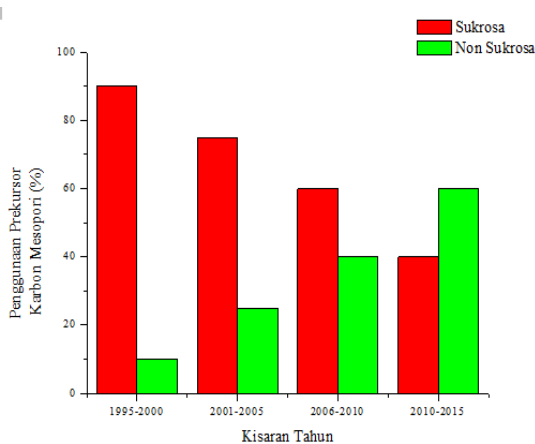
Karbon mesopori merupakan kelompok material nano berpori besar dalam

rentang ukuran mesopori (2-50 nm) [6]–[9]. Penelitian karbon mesopori dalam 20 tahun terakhir cukup pesat karena karbon mesopori dianggap sebagai material yang efektif dalam aplikasi yang melibatkan senyawa berukuran besar seperti senyawa sulfur. Hal ini terjadi karena karbon mesopori memiliki ketersediaan pori berukuran besar sebagai akses masuk senyawa besar [10]–[14]. Keunggulan karbon mesopori terdapat pada struktur porinya yang teratur, luas permukaan tinggi, inert dan stabilitas termal yang tinggi [15]–[22].

Penelitian karbon mesopori sudah sejak lama dilakukan oleh para peneliti. Sukrosa adalah prekursor yang umum digunakan hampir oleh 90% peneliti di kisaran 1995-2000. Prekursor lain yang banyak digunakan setelah itu antara lain: furfural alkohol [23], garam litium dari asam aromatik [24], resin [25], poliakrilonitril

[26], *pitch* karbon [27], dihidroksinaftalen [28], pati, gum arab surfaktan P-123 dan F-127 gliserol [29]–[34] dan gelatin [35]–[38], [36], [37], [39]–[41]

Struktur geometri, ukuran pori dan luas permukaan karbon mesopori dapat dikontrol selama sintesis [6], [29], [42]. Salah satu cara mengontrol performa fisik tersebut terjadi saat pemilihan prekursor karbon. Syarat umum pemilihan prekursor karbon diantaranya adalah memiliki kandungan karbon yang tinggi, mudah dikonversi, memiliki gugus fungsi yang berafinitas kuat terhadap molekul pengarah pori dan ekonomis [43]–[46]. Sejauh pengetahuan penulis, belum ada artikel yang membahas seputar sumber mesopori.



Gambar 1. Jenis-jenis prekursor karbon mesopori dari tahun ke tahun

Gambar 1 menunjukkan beragam jenis prekursor digunakan oleh para peneliti untuk mensintesis karbon mesopori dalam 25 tahun terakhir. Penggunaan sukrosa menurun tajam terutama 5 tahun terakhir. Isu pemanfaatan bahan non pangan diperkirakan menyebabkan prekursor non sukrosa dipakai lebih dari 60% peneliti di 5 tahun terakhir. Penelitian terdahulu

menunjukkan bahwa pada dasarnya semua molekul organik dapat digunakan sebagai prekursor karbon dalam sintesis karbon mesopori. Setiap prekursor karbon memiliki sifat khas yang menyebabkan proses konversi menjadi karbon memerlukan preparasi yang berbeda-beda.

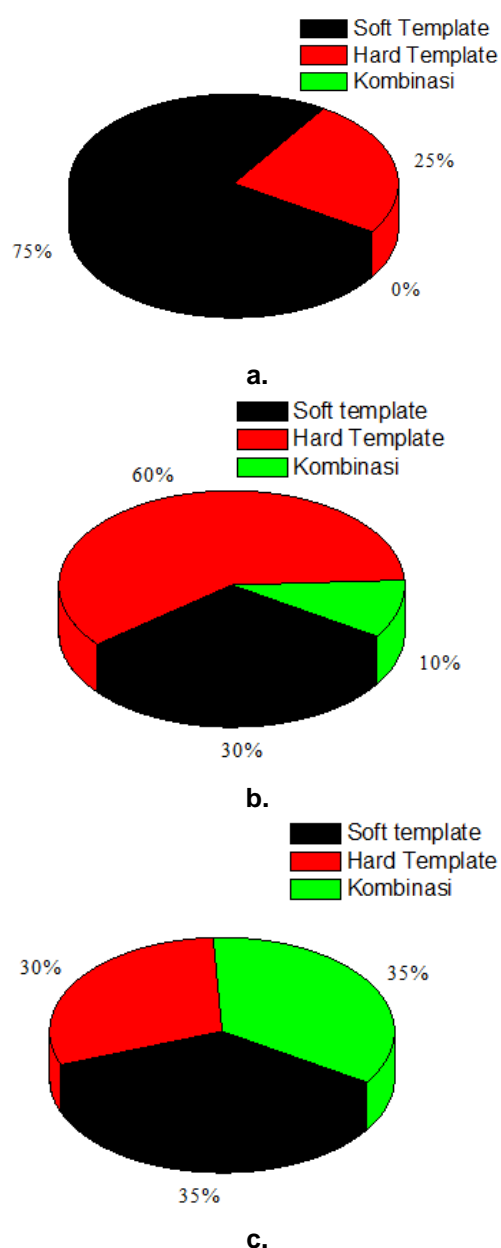
2. METODE PERKEMBANGAN SINTESIS KARBON MESOPORI

Sintesis karbon mesopori pertama kali dilakukan oleh Kyotani [1], [47]. menggunakan teknik cetakan lunak (*soft templating*). Penelitian tersebut belum mampu mendapatkan karbon mesopori dengan struktur pori teratur. Pada awal tahun 1999, karbon mesopori berpori teratur berhasil disintesis oleh Ryoo [2]. Penelitian tersebut menggunakan teknik cetakan padat (*hard templating technique*) melalui infiltrasi sukrosa ke dalam MCM-48 sebagai cetakan dilanjutkan karbonisasi dan pelepasan silika. Penelitian karbon mesopori berkembang pesat setelah penemuan Ryoo tersebut.

Para peneliti berupaya untuk mendapatkan karbon mesopori berukuran pori besar dengan distribusi ukuran dan keseragaman pori tinggi dengan mengembangkan metode sintesis. Metode sintesis karbon mesopori yang paling populer salah satunya dengan teknik cetakan [23], [25], [36], [48]–[50].

Ada dua macam teknik cetakan yaitu cetakan padat (*hard template*) [51], [52],[36] dan cetakan lunak (*soft template*) [25], [53], [54]. Cetakan padat menggunakan padatan berpori sebagai tempat pengendapan prekursor karbon, sedangkan cetakan lunak menggunakan misel surfaktan sebagai agen

pengarah struktur karbon atau dikenal dengan teknik sol-gel. Cetakan padat yang umum digunakan dalam sintesis karbon mesopori antara lain: MCM-48 [20], KIT [16], SBA-1 [55]–[57], SBA-15 [32], [58]–[60] dan SBA-16 [10], [43]. Sedangkan cetakan lunak yang umum digunakan antara lain: Pluronic F-127 [45], [61] dan P123 [53], [62]–[64].



Gambar 2. Perkembangan metode sintesis karbon mesopori: a. Sebelum tahun 2000; b. . Tahun 2000-2010 dan c. Setelah tahun 2010

Gambar 2 adalah fenomena penggunaan berbagai metode sintesis selama kurun 25 tahun terakhir. Penelitian karbon mesopori yaitu sekitar 75% menggunakan *soft template* banyak dilakukan sebelum tahun 2000 (Gambar a.) Hal ini diperkirakan karena saat itu belum banyak ditemukan *hard template*, sebagai contoh MCM-41 (*hard template* berbasis silika) yang ditemukan oleh para peneliti di Exxon ditemukan sejak 1990 an namun baru dikenal luas sejak awal 1995.

Sintesis karbon mesopori menggunakan *soft template* banyak mengalami kesulitan untuk mendapatkan hasil sintesis dengan keteraturan yang baik karena ketidakstabilan misel selama perlakuan panas. Karbon mesopori berpori teratur berhasil disintesis oleh Ryoo dengan memanfaatkan material silika mesopori berstruktur seragam sebagai cetakan padat. Sejak Penemuan inilah, penggunaan metode *hard template* sekitar 60% (Gambar...b.) dari keseluruhan penelitian karbon mesopori secara global. Peningkatan ini diperkirakan karena semakin banyak *hard template* ditemukan serta keberhasilan beberapa peneliti memperoleh keteraturan struktur dan performa porositas yang baik dengan metode ini.

Popularitas penggunaan metode *hard template* mulai menurun setelah tahun 2010. Hal ini diperkirakan terjadi karena mahalanya harga *hard template* khususnya yang berbahan dasar silika. Perkiraan kedua adalah ada beberapa peneliti yang berhasil mendapatkan karbon mesopori dengan keteraturan tinggi dengan mengkombinasikan metode *soft - hard template*. setekah tahun 2010, hampir 35% peneliti menggunakan metode kombinasi dalam mensintesis karbon mesopori. Metode

kombinasi tersebut dianggap lebih ekonomis, efektif serta efisien karena selama sintesis tidak memerlukan *hard template* dalam jumlah besar. Metode kombinasi *hard-soft template* dianggap favorit karena sintesis *hard template* terjadi simultan dengan proses konversi prekursor karbon menjadi karbon mesopori sehingga mengurangi energy, tenaga dan biaya.

3. REVOLUSI STRUKTUR KARBON MESOPORI

Distribusi ukuran dan keseragaman pori yang tinggi adalah salah satu tujuan utama maraknya penelitian karbon mesopori [66]. Keduanya tercermin dalam keteraturan struktur pori. Berbagai teknik sintesis berkembang untuk mencapai hal tersebut.

Tabel 2 menunjukkan perubahan struktur karbon mesopori dalam 25 tahun terakhir. Tahun 1999 karbon mesopori CMK-1 berstruktur teratur berhasil disintesis. Kemudian berlanjut dengan munculnya seri CMK-2, CMK-3, CMK-4, CMK5 dan CMK-6 yang memiliki struktur kubus dengan berbagai variasi sistem geometri [7], [11]–[14], [6], [43], [52], [65], [66], [4], [31], [54], [60], [67], [68]. Tahun 2003 untuk pertama kali berhasil mensintesis CMK-8 dan CMK-9 menggunakan KIT-6 sebagai cetakan [5], [7], [9], [69]–[71]. KIT-6 disintesis dari campuran triblok kopolimer-butanol sebagai agen pengarah struktur menghasilkan silika mesopori tipe batang dan tabung dengan simetri kubus $la3d$ [16], [7], [10], [34], [72]–[76]. CMK-8 berstruktur kubus dengan morfologi seperti kubus pejal, sedangkan CMK-9 berstruktur seperti sangkar kubus akibat perlakuan pirolisis dalam keadaan

vakum sehingga karbon hanya melapisi dinding cetakan [21],

Tabel 1. Perkembangan struktur karbon mesopori

| Nama | Struktur | Referensi |
|-------|-------------------------|-----------|
| MC | Lubang cacing | [67] |
| MCC | Amorf | [68,69] |
| CM | Amorf | [70] |
| CK | Amorf | [71] |
| CMM | lubang cacing | [72] |
| CMT | Serat | [73,74] |
| CMG | Amorf | [75] |
| CMK-1 | Kubus | [76] |
| CMK-2 | Semikubus | [77] |
| CMK-3 | Heksagonal | [78] |
| CMK-4 | disorder cubic | [79] |
| CMK-5 | batang inner-outer | [80] |
| CMK-6 | sangkar pori ganda | [81] |
| CMK-7 | kubus pejal | [82] |
| CMK-8 | sangkar kubus | [83] |
| CMK-9 | sangkar semi kubus | [84] |
| ICYS | modifikasi kubus | [85] |
| SNU | Kubus | [86] |
| NCC | modifikasi Semikubus | [87] |
| CKT-1 | semi heksagonal | [88] |
| CKT-2 | disorder cubic | [89] |
| C-125 | semi batang inner-outer | [90] |
| CMM | semi sangkar pori ganda | [91] |
| CSS | Semikubus | [92] |
| CP-1 | sangkar kubus | [93] |
| OMCG | sangkar semi kubus | [94] |

Ada dua macam teknik sintesis karbon mesopori yaitu cetakan padat dan cetakan lunak. Cetakan padat menggunakan padatan berpori sebagai tempat pengendapan prekursor karbon [20], [77], [78],[57], [61], [79], [80], sedangkan cetakan lunak menggunakan surfaktan sebagai agen pengarah struktur [25], [59], [67], [70], [81]–[86]. Kedua teknik tersebut menghasilkan beragam struktur karbon mesopori terutama di 25 tahun terakhir.

Penemuan seri CMK menginspirasi beberapa peneliti untuk membuat seri non CMK dengan berbagai inovasi jenis cetakan seperti KIT-61, FDU, KIT-5-100 menghasilkan

karbon mesopori seperti SNU, ICYS, CKT, C125, CMM, CP1 [6], [16], [21], [25], [28], [43], [65], [73], [87]. Jika dilihat lebih detil, terjadi revolusi struktur karbon mesopori ada 3 bentuk dasar yang terselip dalam penemuan karbon mesopori yaitu struktur bentuk kubus sederhana [45], [88]–[90], batang rod heksagonal [11], [21], [32], [91]–[94] hingga bentuk kombinasi keduanya baik pejal maupun sangkar. [16], [34], [53]

4. PERKEMBANGAN APLIKASI KARBON MESOPORI

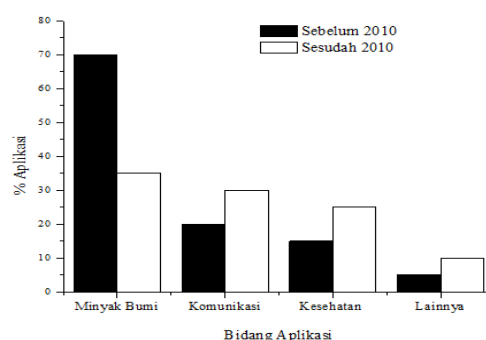
Karbon mesopori marak digunakan dalam berbagai aplikasi sejak mulai populernya nanomaterial dalam dunia industri. Karbon mesopori dengan segala kelebihan sifat fisik dan kimianya seperti tingginya performa porositas, keteraturan struktur dan stabilitas termal yang mencapai suhu diatas 3000 °C [15], [21], [23], [37], [95]–[97]. menyebabkan penggunaan karbon mesopori meningkat tajam. Sebelum 2010, hampir 70% aplikasi karbon mesopori adalah untuk mengolah minyak bumi, desulfurisasi hingga pemurniannya menjadi fraksi seperti bensin, avtur dan solar. Hal ini diperkirakan terjadi karena molekul minyak adalah molekul raksasa yang membutuhkan pori berukuran besar sebagai akses masuk.

Penelitian seputar aplikasi karbon mesopori berawal dari pengolahan sumber minyak bumi. Molekul-molekul sumber minyak bumi terutama yang berbasis sulfur seperti tiofen, dibenzotiofen atau trimetil tiofen memiliki ukuran besar sehingga membutuhkan materil pengolah dengan pori besar. Karbon mesopori memenuhi syarat tersebut karena selain menyediakan akses untuk molekul

besar, karbon mesopori juga memiliki kestabilan termal yang tinggi. Hal ini memungkinkan karbon mesopori untuk dilibatkan dalam proses pengolahan sumber minyak bumi baik dalam proses *cracking*, desulfurisasi maupun pemurnian [14], [24], [98], [99]

Studi awal desulfurisasi dimulai dari studi adsorpsi molekul tiofen menggunakan karbon mesopori sekitar tahun 2004. Tingginya kapasitas adsorpsi karbon mesopori terhadap senyawa sulfur telah dikaji oleh beberapa peneliti [69], [99], [98]. Penelitian selanjutnya merambah molekul yang lebih besar seperti dibenzotiofen dengan memanfaatkan karbon mesopori sebagai material pendukung katalis. Performa katalitik karbon mesopori cukup tinggi dengan konversi berkisar 50-90%. Hasil yang sangat bagus tersebut secara masiv diteliti secara berulang antara tahun 2005 hingga sekarang.

Secara umum dalam pengolahan minyak bumi, dibutuhkan material karbon mesopori 10x lebih sedikit dari material biasa karena dukungan porositas yang tinggi. Beberapa negara mulai gencar menggunakan karbon mesopori dalam pengolahan minyak bumi secara mandiri untuk menekan harga bahan bakar minyak [74], [24], [69], [85], [100].



Gambar 3. Aplikasi karbon mesopori dalam 25 tahun terakhir

Gambar 3 menunjukkan perkembangan aplikasi karbon mesopori sebelum dan sesudah 2010. Pada masa setelah 2010, hampir 35% penggunaan karbon mesopori adalah dibidang kesehatan dan komunikasi. Hal ini diperkirakan terjaud karena meningkatnya gaya hidup masyarakat dalam dunia gadget sehingga karbon mesopori mewakili material nano yang tepat sebagai bahan dasar alat komunikasi. Aplikasi karbon mesopori dibidang kesehatan meningkat tajam karena banyaknya kajian dan penelitian yang menunjukkan efektifitas penggunaan karbon mesopori sebagai *drug delivery*. Aplikasi lainnya seperti dalam refinery, pemurnian limbah, produksi cat dll meningkat sekitar 10% seiring semakin baiknya performa fisik dan kimia karbon mesopori.

5. KILAS MASA DEPAN

Pemanfaatan material nano dalam bidang kesehatan, energi hingga komunikasi telah menjadikan karbon mesopori menjadi salah satu material yang difavoritkan banyak peneliti. Stimulasi penemuan-penemuan baru varian karbon mesopori telah dilakukan beberapa peneliti dengan melakukan eksplorasi sumber daya alam dengan berbagai modifikasi metode. Penelitian bergeser dari pemanfaatan bahan pangan ke arah pemanfaatan limbah organik. Terobosan ini mengalami hambatan besar karena penelitian masih berkuat skala lab dan belum melangkah ke arah produksi skala besar. Untuk menangani masalah tersebut, diperlukan jalan tengah yang menjembatani antara penelitian skala lab dengan penyediaan sarana untuk mewujudkan produksi karbon mesopori skala industri. Para peneliti terdahulu

sukses melakukan berbagai riset dalam menguji sumber karbon baru seperti sukrosa dan glukosa. Mereka juga berhasil melakukan variasi metode seperti *soft templating*, *hard templating* hingga modifikasi *soft-hard templating*.

Pergeseran penggunaan bahan pangan seperti sukrosa ke arah limbah organik seperti gelatin sebagai prekursor karbon diperkirakan karena isu daur ulang (*recycling issue*) yang meningkat tajam 5 tahun terakhir. Gagasan tentang dunia global yang lebih bersih dengan kembali ke prinsip kembali ke alam (*back to nature*) diperkirakan akan bertahan 10-20 tahun ke depan. Gagasan ini akan berimplikasi kuat pada beberapa hal. Pertama, diperkirakan akan makin banyak penemuan sumber karbon baru yang berbasis limbah atau berbasis sumber daya alam non pangan yang melimpah. Kedua, terobosan metode sintesis karbon mesopori akan meningkat tajam baik menggunakan metode *soft template*, *hard template*, gabungan keduanya atau metode gas templating sebagai metode terbaru yang mulai dikaji baru-baru ini.

Kabar baik untuk Indonesia yang kaya dengan berbagai sumber daya alam sebagai sumber karbon. Perkembangan karbon mesopori dimasa depan diperkirakan akan sangat bergantung dengan pasokan sumber karbon mesopori dari negara-negara tropis seperti Indonesia. Ribuan varietas tanaman penghasil karbon jutaan varietas hewan yang menyediakan unsur karbon siap diteliti dan di eksplorasi menjadi berbagai varian karbon mesopori. Hal ini akan menjadikan Indonesia sebagai lumbung atau sentra sumber karbon mesopori dunia.

Penelitian-penelitian berbasis karbon mesopori diperkirakan akan meningkat tajam 10 tahun ke depan dengan dasar tingginya permintaan material nano dengan performa kimia dan fisik yang bagus. Gabungan metode *soft template* dan *hard template* akan mulai berganti dengan metode *gas template* yang sepanjang tahun 2017 saat review ini disusun mulai banyak dipertimbangkan sebagai metode baru lebih yang efektif, efisien serta ekonomis. Meskipun metode ini banyak mengundang keraguan karena rumitnya pengkondisian selama sintesis, metode ini tetap memberi banyak peluang untuk dikembangkan. Peluang ini didasarkan oleh banyaknya faktor yang akan mempengaruhi keberhasilan proses gas templating seperti suhu, waktu, tekanan, jenis gas dan lain sebagainya. Hal ini tentu saja menjadi peluang yang sangat besar bagi peneliti untuk mendapatkan kondisi optimum sintesis karbon mesopori.

Peluang adanya varian sumber karbon serta metode baru dalam mendapatkan karbon mesopori akan berimplikasi pada makin variatifnya struktur karbon yang akan ditemukan dimasa depan. Diperkirakan akan terjadi pergeseran struktur karbon mesopori mulai dari struktur amorf, lubang cacing, kubus hingga heksagonal pejal ke arah struktur yang lebih rumit seperti gabungan rombohedral, teragonal dan berbagai modifikasi sistem geometri. Tantangan sekaligus harapan pada produk karbon mesopori 10 tahun ke depan adalah munculnya varian karbon dengan ukuran pori >10 nm, luas permukaan > 1200 m²/g, volume total $> 1,4$ cm³/g, keteraturan mendekati 99% serta kestabilan termal hingga 2000 °C. Seluruh produk karbon mesopori

yang dihasilkan saat ini belum mencapai harapan tersebut, namun hal ini membuka berbagai ide dan gagasan baru dari para peneliti agar mampu menghasilkan karbon mesopori yang memiliki performa prima.

Dalam pandangan penulis melihat alur riset dan perkembangan karbon mesopori selama 25 tahun terakhir, karbon mesopori akan memiliki peran penting dalam 3 bidang di dunia global antaralain: lingkungan, ekonomi dan IPTEK khususnya untuk material penyimpan energi, pengolahan minyak bumi material termagnetisasi, pemindai.

Seluruh ulasan tentang karbon mesopori dalam dunia global ini menggambarkan peluang besar karbon mesopori sebagai material masa depan. Aplikasi karbon mesopori dalam nanoteknologi membuka peluang dalam penemuan strategi riset baru baik dalam eksplorasi sumber daya alam maupun dalam menemukan metode-metode terbaru. Sekarang adalah waktunya yang tepat untuk membuat kreativitas baru dalam pengembangan teknologi sintesis karbon mesopori dengan pemanfaatan sumber daya alam berkelanjutan yang memodifikasi strategi sintesis modern berbasis bahan alam

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada Perputakaan Pusat UGM, Perpustakaan Pusat UNS, PNRI (Perpustakaan Negara Republik Indonesia), UPM *Library* Malaysia dan teman-teman di Queensland University yang telah memberikan bantuan dalam penyusunan artikel ini.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Kyotani, T., Nagai, T., Inoue, S., and Tomita, A., *Chem, Mater*, vol. 9, pp. 609–615, 1997.
- [2] R. Ryoo, *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 13, no. 5, pp. 734–743, 1999.
- [3] R. Ryoo, S. H. Joo, M. Kruk, and M. Jaroniec, *Adv. Mater.*, vol. 13, no. 9, pp. 677–681, 2001.
- [4] S. H. Joo, S. Jun, and R. Ryoo, *Microporous Mesoporous Mater.*, 2001.
- [5] R. Ryoo and S. D. Kirik, *Microporous Mesoporous Mater.* vol. 48, pp. 299–302, 2003.
- [6] D. J. Kim, H. I. Lee, J. E. Yie, S. J. Kim, and J. M. Kim, *Carbon N. Y.*, vol. 43, no. 9, pp. 1868–1873, 2005.
- [7] H. Zhou, S. Zhu, I. Honma, and K. Seki, *Chem. Phys. Lett.*, 2004.
- [8] P. a. Bazuła, A.-H. Lu, J.-J. Nitz, and F. Schüth, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 108, no. 1–3, pp. 266–275, 2008.
- [9] C. Y. J. Fan, B. T. F. Zhang, and D. Zhao, *Carbon*, vol. 20, no. 29925309, pp. 45–48, 2003.
- [10] G. Liu, S. Zheng, D. Yin, Z. Xu, J. Fan, and F. Jiang, *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 302, no. 1, pp. 47–53, 2006.
- [11] L. A. Solovyov, A. N. Shmakov, V. I. Zaikovskii, S. H. Joo, and R. Ryoo, vol. 40, pp. 2477–2481, 2002.
- [12] X. Peng, D. Cao, and W. Wang, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 66, no. 10, pp. 2266–2276, 2011.
- [13] S. Inagaki, Y. Yokoo, T. Miki, and Y. Kubota, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 179, pp. 136–143, 2013.
- [14] N. Farzin Nejad, E. Shams, M. K. Amini, and J. C. Bennett, “239-246 *Microporous Mesoporous Mater.*, 2013.
- [15] Q. Huo, *Synthetic Chemistry of the Inorganic Ordered Porous Materials*. Elsevier B.V., 2011.
- [16] A. Vinu, M. Miyahara, and K. Ariga, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 113, no. 1–3, pp. 575–582, 2008.
- [17] J. Roggenbuck, T. Waitz, and M. Tiemann, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 113, no. 1–3, pp. 575–582, 2008.
- [18] J. Jin, N. Nishiyama, Y. Egashira, and K. Ueyama, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 118, no. 1–3, pp. 218–223, 2009.
- [19] A.-H. Lu, W.-C. Li, W. Schmidt, and F. Schüth, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 80, pp. 117–128, 2005.
- [20] C. N. Mbileni, F. F. Prinsloo, M. J. Witcomb, and N. J. Coville, *Carbon N. Y.*, vol. 44, no. 8, pp. 1476–1483, 2006.
- [21] Y. Yan, J. Wei, F. Zhang, Y. Meng, B. Tu, and D. Zhao, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 113, no. 1–3, pp. 305–314, 2008.
- [22] L. Barthe, M. Hemati, K. Philippot, and B. Chaudret, *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 86, no. 4, pp. 349–358, 2008.
- [23] M. Sobiesiak, “Thermal properties of nanoporous carbons prepared by a template method using different polymeric and organic precursors,” *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Mater.*, vol. 27, no. 5, pp. 337–343, 2012.
- [24] A. Zhou, X. Ma, and C. Song, *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 87, no. 3–4, pp. 190–199, 2009.
- [25] J. Feng, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 174, pp. 62–66, 2013.
- [26] J. H. Kim, S. Y. Ha, S. Y. Nam, J. W. Rhim, K. H. Baek, and Y. M. Lee, *CJ. Memb. Sci.*, vol. 186, no. 1, pp. 97–107, 2001.
- [27] G. Tzvetkov, B. Tsyntsarski, and K. Balashev, *Micron*, vol. 89, pp. 34–42, 2016.
- [28] J. B. Xu, T. S. Zhao, and L. Zeng, vol. 7, pp. 3–9, 2012.
- [29] M. Ignat, M. Mertens, E. Popovici, E. F. Vansant, and P. Cool, *Carbon*, p. 10712, 2005.
- [30] P. Arab, A. Badiei, A. Koolivand, and G. M. Ziarani, *Chinese J. Catal.*, vol. 32, no. 1, pp. 258–263, 2011.
- [31] M. Jahanbakhshi, *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 70, pp. 544–551, 2017.
- [32] Z. Luan and J. A. Fournier, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 79, no. 1–3, pp. 235–240, 2005.
- [33] H. M. A. El, S. A. Younis, H. R. Ali, and T. Zaki, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 241, pp. 210–217, 2017.

- [34] Y. P. Lin, H. P. Lin, D. W. Chen, H. Y. Liu, H. Teng, and C. Y. Tang, *Mater. Chem. Phys.*, vol. 90, no. 2–3, pp. 339–343, 2005.
- [35] M. Ulfa, W. Trisunaryanti, I. I. Falah, and I. Kartini, *Indones. J. Chem.*, vol. 16, no. 3, pp. 239–242, 2016.
- [36] M. Ulfa, W. Trisunaryanti, I. I. Falah, and I. Kartini, *Chem. Tech.*, vol. 4, no. V, pp. 1–7, 2014.
- [37] M. Ulfa, W. Trisunaryanti, I. I. Falah, and I. Kartini, *Chem. Eng. Res.* vol. 7, no. 3, pp. 849–856, 2014.
- [38] M. Ulfa, W. Trisunaryanti, I. Falah, and I. Kartini, *Appl. Chem*, vol. 9, no. 9, p. 9555, 2016.
- [39] M. Ulfa, W. Trisunaryanti, I. I. Falah, and I. Kartini, *J. Chem. Eng. Chem. Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2014.
- [40] M. Ulfa, W. Trisunaryanti, I. I. Falah, and I. Kartini, *Appl. Chem*, vol. 8, no. 8, pp. 57–63, 2015.
- [41] M. Ulfa, *J. Kim. Ris.*, vol. 1, no. 2, pp. 103–110, 2016.
- [42] V. Guknebauta, M. Maaloumb, M. Bonhiver, R. Wept, K. Leonarda, and J. K. H. Hiirber, *Carbon*, vol. 69, pp. 129–137, 1997.
- [43] H. Darmstadt, C. Roy, S. Kaliaguine, S. Choi, and R. Ryoo, *Carbon N. Y.*, vol. 40, no. 14, pp. 2673–2683, 2002.
- [44] B. Pramanick, A. Salazar, S. O. Martinez-chapa, and M. J. Madou, *Carbon N. Y.*, vol. 113, pp. 252–259, 2017.
- [45] J. Yang *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 342, no. 2, pp. 579–585, 2010.
- [46] S. Sciencedirect, K. Herein, A. Organics, and Q. Autosorb, “Microporous and Mesoporous Materials vol. i, pp. 71–74, 2012.
- [47] A. Kyotani, T., Nagai, T., Inoue, S., and Tomita, *Carbon*, p. 20130727, 2013.
- [48] J. B. Koo, N. Jiang, and S. *J. Catal.*, vol. 276, no. 2, pp. 327–334, 2010.
- [49] F. Su, J. Zeng, Y. Yu, L. Lv, J. Y. Lee, and X. S. Zhao, *Carbon*, vol. 43, pp. 2366–2373, 2005.
- [50] M. Beretta, *thesis*, vol. 40766, pp. 1–214, 2009.
- [51] M. Jaroniec, J. Gorka, J. Choma, and A. Zawislak, *Carbon N. Y.*, vol. 47, no. 13, pp. 3034–3040, 2009.
- [52] Y. Li, J. Zhong, X. Z. Yang, G. J. Lan, H. D. Tang, and H. Z. Liu, “Simple synthesis of semi-graphitized ordered mesoporous carbons with tunable pore sizes,” *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Mater.*, vol. 26, no. 2, pp. 123–129, 2011.
- [53] J. Górka, C. Fenning, and M. Jaroniec, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 352, no. 1–3, pp. 113–117, 2009.
- [54] P. Li, Y. Song, Q. Guo, J. Shi, and L. Liu, *Mater. Lett.*, vol. 65, no. 14, pp. 2130–2132, 2011.
- [55] C. Cai, Z. Zhang, and H. Zhang, *J. Hazard. Mater.*, vol. 313, pp. 209–218, 2016.
- [56] S. Karthikeyan, M. P. Pachamuthu, M. A. Isaacs, S. Kumar, A. F. Lee, and G. Sekaran, “*Applied Catal. B, Environ.*,” vol. 199, pp. 323–330, 2016.
- [57] S. G. De Avila, L. Carlos, C. Silva, and J. R. Matos, “*Microporous and Mesoporous Materials*,” vol. 234, pp. 277–286, 2016.
- [58] D. Srinivas and P. Ratnasamy, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 105, no. 1–2, pp. 170–180, 2007.
- [59] H. M. A. Hunter and P. A. Wright, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 43, no. 3, pp. 361–373, 2001.
- [60] A. Y. Khodakov, V. L. Zholobenko, R. Bechara, and D. Durand, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 79, no. 1–3, pp. 29–39, 2005.
- [61] L. Li, H. Song, and X. Chen, *Microporous Mesoporous Mater.*, 2006.
- [62] A. Prabhu, A. Al Shoaibi, and C. Srinivasakannan, *Mater. Lett.*, vol. 136, pp. 81–84, 2014.
- [63] R. Wüstneck and J. Krägel, “*Stud. Interface Sci.*,” vol. 7, no. C, pp. 433–490, 1998.
- [64] K. K. Han, Y. Zhou, W. G. Lin, and J. H. Zhu, “*Microporous and Mesoporous Materials*” vol. 169, pp. 112–119, 2013.
- [65] X. Wang, P. Liu, and Y. Tian, *J. Solid State Chem.*, vol. 184, no. 6, pp. 1571–1575, 2011.
- [66] R. Guo, J. Guo, F. Yu, and D. D. Gang, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 175, pp. 141–146, 2013.

- [67] J. C. Vartuli, T. Kresge, W. J. and S. B. Mccullen, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 175, pp. 141–146, 2013.
- [68] C. Felser, K. Landfester, J. Long, C. Mellot-draznieks, and D. Worsley, 207890, 2017.
- [69] C. Song and X. Ma, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 175, pp. 141–146, 2013.
- [70] A. E. C. Palmqvist, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 8, pp. 145–155, 2003.
- [71] V. Berbenni and A. Marini, *Mater. Res. Bull.*, vol. 38, no. 14, pp. 1859–1866, 2003.
- [72] D. D. Do, C. Nguyen, and H. D. Do, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 187–188, pp. 51–71, 2001.
- [73] Y. K. Kim, K. P. Rajesh, and J.-S. Yu, *J. Hazard. Mater.*, vol. 260, pp. 350–7, 2013.
- [74] Y. R. J. Thomas, M. M. Bruno, and H. R. Corti, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 155, pp. 47–55, 2012.
- [75] I. Suarez-Martinez and N. A. Marks, *Carbon N. Y.*, vol. 50, no. 15, pp. 5441–5449, 2012.
- [76] S. Deng, W. Chu, H. Xu, L. Shi, and L. Huang, *J. Nat. Gas Chem.*, vol. 17, no. 4, pp. 369–373, 2008.
- [77] R. K. Iler, "Description of MCM-41 Structure," *Chem. Silica Solubility, Polym. Colloid Surf. Prop. Biochem. Silica*, pp. 139–177, 1979.
- [78] J. B. Mcmonagle, M. Seay, and J. B. Moffat, *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 175, pp. 141–146, 2013.
- [79] X. Wu *Electrochim. Acta*, vol. 89, pp. 400–406, 2013.
- [80] B. Lin, G. Yang, B. Yang, and Y. Zhao, *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 198, pp. 276–285, 2016.
- [81] L. H. Lin and K. M. Chen, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 272, no. 1–2, pp. 8–14, 2006.
- [82] P. Application and A. Of, "6. t h e o r y and practical application aspects of surfactants."
- [83] V. I. Uricanu, M. H. G. Duits, D. Filip, R. M. F. Nelissen, and W. G. M. Agterof, *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 298, no. 2, pp. 920–934, 2006.
- [84] E. Leontidis, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 7, no. 1–2, pp. 81–91, 2002.
- [85] A. Vinu, *Mater. Res. Bull.*, vol. 38, no. 14, pp. 1859–1866, 2003.
- [86] J. E. Hampsey, Q. Hu, Z. Wu, L. Rice, J. Pang, and Y. Lu, *Carbon N. Y.*, vol. 43, no. 14, pp. 2977–2982, 2005.
- [87] G. Goglio, D. Foy, and G. Demazeau, *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 58, no. 6, pp. 195–227, 2008.
- [88] J. Lin, B. Mishra, J. J. Moore, and W. D. Sproul, *Surf. Coatings Technol.*, vol. 202, no. 14, pp. 3272–3283, 2008.
- [89] J. Widany, F. Weich, T. Köhler, D. Porezag, and T. Frauenheim, *Diam. Relat. Mater.*, vol. 5, no. 9, pp. 1031–1041, 1996.
- [90] D. C. Calabro, E. W. Valyocsik, and F. X. Ryan, "*Microporous Mater.*, vol. 7, no. 5, pp. 243–259, 1996.
- [91] G. Chandrasekar, W. J. Son, and W. S. Ahn, *J. Porous Mater.*, 2009.
- [92] L. Xiang, S. Royer, H. Zhang, J. M. Tatibouët, J. Barrault, and S. Valange, *J. Hazard. Mater.*, vol. 172, no. 2–3, pp. 1175–1184, 2009.
- [93] M. Santiago, J. C. Groen, and J. Pérez-ramírez, "Carbon vol. 257, pp. 152–162, 2008.
- [94] H. Wang, K. Sun, A. Li, W. Wang, and P. Chui, *Powder Technol.*, vol. 209, no. 1–3, pp. 9–14, 2011.
- [95] I. Ruthven, A. Processes, A. Society, and T. Materials, "Porosity in Carbons: Modeling," 1995.
- [96] P. Jana, V. Fierro, and A. Celzard, "*Ind. Crops Prod.*, vol. 89, pp. 498–506, 2016.
- [97] R. Comesaña, M. A. Gómez, M. A. Álvarez, and P. Eguía, *Thermochim. Acta*, vol. 547, pp. 13–21, 2012.
- [98] C. Song, *Carbon*, vol. 86, pp. 211–263, 2003.
- [99] J. Bu, G. Loh, C. G. Gwie, S. Dewiyanti, M. Tasrif, and A. Borgna, *Carbon*, vol. 166, pp. 207–217, 2011.
- [100] J. Wen, X. Han, H. Lin, Y. Zheng, and W. Chu, *Chem. Eng. J.*, vol. 164, no. 1, pp. 29–36, 2010.
- [101] J. Ramí and P. Castillo-villalo, *Carbon*, vol. 130, pp. 320–326, 2008.