

VOLUME 6

ISSUE 1

JANUARY-JUNE 2018

Al-Kimia

The Photosensitizer from the Basic Dye Extract of the Skin Fruit of Eggplant (*Solanum melongena* L.)

Indah Ayu Risnah, Aisyah, Jawiana Saokani, Iswadi

Aktivitas Antioksidan Ekstrak Metanol Madu Cair dan Madu Bubuk Lokal Indonesia

Laode Sumarlin, Ahmad Tjachja, Riana Octavia, Nur Ernita

Pengaruh Komposisi Kitosan Terhadap Sifat Biodegradasi dan *Water Uptake* Bioplastik dari Serbuk Tongkol Jagung

Muhammad Nur Alam, Kumalasari, Nurmalasari, Ilmiati Illing

Produksi Etil Ester dari Minyak Dedak Padi (*Oryza sativa*) Menggunakan Reaktor Ultrasonik

Aisyah, Riskayanti, Iin Novianty, Sjamsiah, Asriani Ilyas, St. Chadijah

Formalin Analysis of Food Ingredients In Palu

Rismawaty Sikanna, Ivone Venita Sarapun, Dwi Juli Puspitasari

Produksi Energi Listrik Dari Limbah Kulit Pepaya (*Carica papaya*) Menggunakan Teknologi *Microbial Fuel Cells*

Lisa Utami, Lazulva, Elvi Yenti

Pengaruh Suhu Hidrolisis Terhadap Kadar Glukosa yang Dihasilkan dari Serat Daun Nanas

Muhaimin

Pemanfaatan Limbah Gergaji Kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla* K.)

Sebagai Energi Alternatif dengan Metode Pirolisis

Asri Saleh, Hardiyanti Nur

Komposit Kitosan-Zeolit : Potensi Pemanfaatannya sebagai Adsorben CO₂

Riva Ismawati, Setiyo Prajoko

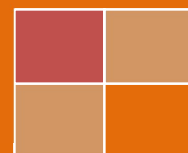
Bahan Utama Tongkat dan Tali Tukang Sihir Fir'aun Berubah Menjadi Ular adalah Senyawa Merkuri.

Barorotul Ulfah Arofah, R. Arizal Firmansyah, Sofa Muthohar

Jurusan Kimia UIN Alauddin Makassar

p-ISSN: 2302-2736

e-ISSN: 2549-9335



Volume 6, Issue 1, January-June 2018

p-ISSN: 2302-2736

e-ISSN: 2549-9335

Al-Kimia

EDITOR IN CHIEF

Sjamsiah

MANAGING EDITOR

Aisyah

REVIEWER

Sarifah Fauziah
Muharram
Desi harneti Putri Huspa
Safri Ishmayana
Ajuk Sapar
Asri Saleh
St .Chadijah
Asriyani Ilyas
Muhammad Qaddafi

SECTION EDITOR

Rani Maharani
Umni Zahra
Firnanelty Rasyid
A.Nurfitriani Abubakar
Chusnul Khatimah
Satriani

PUBLISHER

Department of Chemistry
Faculty of Science and Technology
Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar
Jl. H. M. Yasin Limpo No. 36 Gowa South Sulawesi Indonesia
E-mail: al-kimia@uin-alauddin.ac.id

Al-Kimia

TABLE OF CONTENT

The Photosensitizer from the Basic Dye Extract of the Skin Fruit of Eggplant (<i>Solanum melongena</i> L.) Indah Ayu Risnah, Aisyah, Jawiana Saokani, Iswadi	1-9
Aktivitas Antioksidan Ekstrak Metanol Madu Cair dan Madu Bubuk Lokal Indonesia Laode Sumarlin, Ahmad Tjachja, Riana Octavia, Nur Ernita	10-23
Pengaruh Komposisi Kitosan Terhadap Sifat Biodegradasi dan <i>Water Uptake</i> Bioplastik dari Serbuk Tongkol Jagung Muhammad Nur Alam, Kumalasari, Nurmalasari, Ilmiati Illing	24-33
Produksi Etil Ester dari Minyak Dedak Padi (<i>Oryza sativa</i>) Menggunakan Reaktor Ultrasonik Aisyah, Riskayanti, Iin Novianty, Sjamsiah, Asriani Ilyas, St. Chadijah	34-45
Formalin Analysis of Food Ingredients In Palu Rismawaty Sikanna, Ivone Venita Sarapun, Dwi Juli Puspitasari	46-51
Produksi Energi Listrik Dari Limbah Kulit Pepaya (<i>Carica papaya</i>) Menggunakan Teknologi <i>Microbial Fuel Cells</i> Lisa Utami, Lazulva, Elvi Yenti	52-62
Pengaruh Suhu Hidrolisis Terhadap Kadar Glukosa yang Dihasilkan dari Serat Daun Nanas Muhaimin	63-71
Pemanfaatan Limbah Gergaji Kayu Mahoni (<i>Swietenia macrophylla</i> K.) Sebagai Energi Alternatif dengan Metode Pirolisis Asri Saleh, Hardiyanti Nur	70-77
Komposit Kitosan-Zeolit : Potensi Pemanfaatannya sebagai Adsorben CO ₂ Riva Ismawati, Setiyo Prajoko	78-86
Bahan Utama Tongkat dan Tali Tukang Sihir Fir'aun Berubah Menjadi Ular adalah Senyawa Merkuri. Barorotul Ulfah Arofah, R. Arizal Firmansyah, Sofa Muthohar	87-96

Komposit Kitosan-Zeolit : Potensi Pemanfaatannya sebagai Adsorben CO₂

Riva Ismawati*, Setiyo Prajoko

Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Tidar

*E-mail: rivaismawati@untidar.ac.id

Received: April 4, 2018/Accepted: June, 18 2018

doi: 10.24252/al-kimia.v6i1.4635

Abstract: *The world has paid special attention to the increasing of CO₂ concentrations in the atmosphere. In climate change issue, CO₂ gas as part of greenhouse gases plays an important role in controlling earth surface temperature. Several CO₂ gas capture techniques have been reported. However, information on the utilization of potential natural materials as CO₂ adsorbents is still small. This study aims to determine the potential of chitosan zeolite composites as CO₂ adsorbents. Various literature is used to analyze the properties of zeolites, chitosan and the potential of chitosan- zeolite composites as CO₂ adsorbents. The results show the possibility of utilizing zeolite-chitosan composites as CO₂ adsorbents.*

Keywords: *CO₂, greenhouse gases, chitosan, zeolites, composites*

1. PENDAHULUAN

Pemanasan global telah menjadi perhatian utama selama beberapa dekade terakhir. Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer diketahui sebagai penyebab pemanasan global. Gas rumah kaca meliputi uap air, CO₂, CH₄, N₂O, perfluorokarbon, hidrofluorokarbon, sulfur heksafluorida (Songolzadeh *et al.*, 2014). CO₂ merupakan gas rumah kaca antropogenik utama. Dalam dekade terakhir, aktifitas manusia menyumbang 77 % terhadap efek rumah kaca. Penyumbang emisi antropogenik CO₂ paling utama berasal dari pembakaran bahan bakar fosil. Konsentrasi CO₂ dalam gas buang bergantung pada bahan bakar yang digunakan seperti batubara dan gas alam yang berturut-turut menyumbang 12-15 % mol dan 3-4 % mol CO₂. Selain itu, konsentrasi CO₂ dalam aliran gas buang industri lainnya bergantung pada prosesnya. Misalnya, dalam industri penyulingan minyak (8-9 % mol CO₂), produksi semen (14-33 % mol CO₂), serta besi dan baja (20-44 % mol CO₂). Secara global dari tahun 2004 sampai 2011, emisi CO₂ dari penggunaan energi meningkat 26% (Berstad, Anantharaman, & Nekså, 2013; Chiao *et al.*, 2011; Dantas *et al.*, 2011; Samanta *et al.*, 2012; Zanganeh, Shafeen, & Salvador, 2009; Zhao *et al.*, 2008).

Berbagai upaya telah dilakukan untuk memisahkan CO₂ dari gas buang seperti absorpsi menggunakan larutan amina, adsorpsi, dan membran (Oyeneke & Rochelle, 2007; Songolzadeh *et al.*, 2014; Spigarelli & Kawatra, 2013). Absorpsi CO₂ dalam larutan amina merupakan teknik yang menjanjikan. Namun demikian, penggunaan larutan amina dalam meregenerasi CO₂ memiliki beberapa kelemahan diantaranya kebutuhan energi yang tinggi untuk meregenerasi larutan

amina, penguapan/degradasi pelarut, menyebabkan korosi instalasi, dan bersifat toksik (Espinal *et al.*, 2013; Fujiki & Yogo, 2016; Ojala *et al.*, 2014).

Pada saat ini, material berpori yang memuat gugus amina dikembangkan untuk menangkap CO₂ dengan kelebihan yaitu kapasitas penyerapan CO₂ yang tinggi pada kondisi ada maupun tidak ada uap air, desorpsi CO₂ cepat, dan regenerasi mudah (Fauth *et al.*, 2012; Samanta *et al.*, 2012; Songolzadeh *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2013; Yu, Huang, & Tan, 2012). Sebagai contoh, silika teraminasi (NH₂-SBA-15 atau NH₂-MCM-41) telah disintesis dan menunjukkan kapasitas adsorpsi CO₂ 1,0-3,6 mmol/g pada tekanan 1 atm dan suhu 25 °C (Chang *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2003; Mello *et al.*, 2011). Sintesis silika teraminasi melibatkan reagen 3-aminopropiltrioksisilikat yang beracun dimana dapat merusak selaput lendir dan saluran pernapasan manusia, serta penggunaan toluena sebagai pelarut dalam jumlah 100 kali lipat dari masa silika yang dilarutkan (Zhang *et al.*, 2007). Penggunaan berlebih pelarut aromatik dan reagen yang bersifat toksik perlu dihindari.

Kelemahan adsorben tersebut di atas memungkinkan kita untuk mengembangkan material alam yang jumlahnya melimpah. Sementara itu, informasi mengenai pemanfaatan material alam sebagai adsorben CO₂ sangat sedikit. Pada tulisan ini akan dikaji mengenai potensi pemanfaatan komposit material alam sebagai adsorben CO₂. Komposit kitosan-zeolit akan ditelaah potensinya sebagai adsorben CO₂ berdasarkan sifat adsorpsi zeolit maupun kitosan.

2. METODE PENELITIAN

Metode penulisan bersifat studi pustaka. Berbagai literatur mengenai adsorpsi CO₂ oleh kitosan dan zeolit serta komposit kitosan-zeolit dikumpulkan. Informasi yang diperoleh disusun berdasarkan hasil kajian yang diperoleh.

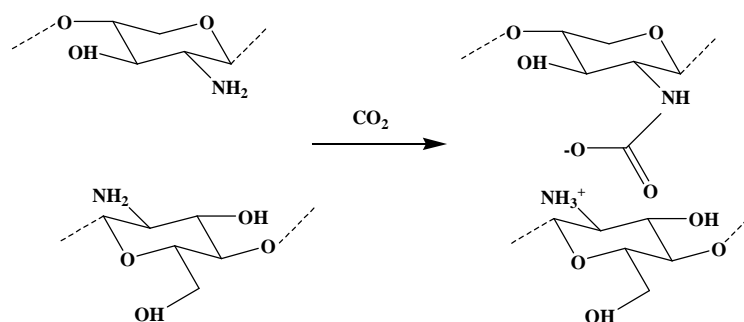
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Adsorpsi CO₂ oleh Kitosan

Kitosan merupakan deasetilasi kitin pada hewan avertebrata laut, darat, dan jamur dari genus *Mucor*, *Phycomyces*, dan *Saccaromyces* (Kumar Dutta, Dutta, & Tripathi, 2004). Kitin merupakan polimer alam melimpah kedua di dunia setelah selulosa (Muzzarelli *et al.*, 2012). Proses deasetilasi kimiawi kitin menggunakan basa bersifat acak. Oleh sebab itu, kitosan yang diperoleh tersusun secara acak dari unit 2-amino-2deoksi-β-(1-4)-D-glukopiranososa (unit terdeasetilasi) dan 2-asetamida-2deoksi-β-(1-4)-D-glukopiranososa (unit terasetilasi) dengan berat molekul yang beragam (Martinou, Kafetzopoulos, & Bouriotis, 1995; Nidhin *et al.*, 2008). Kitin dan kitosan banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang karena memiliki sifat dapat diperbaharui (*renewability*), kesesuaian secara hayati (*biocompatible*), terurai secara hayati (*biodegradable*), tidak beracun (*non-toxicity*), dan adsorpsi (Kumar, 2006). Pemanfaatan kitosan didukung oleh keberadaan gugus aktif amina, gugus aktif hidroksi primer dan gugus aktif hidroksi sekunder yang berturut-turut berada pada atom C2, C6, dan C3 (Shahidi, Arachchi, & Jeon, 1999). Jumlah kandungan gugus amina bebas dalam kitosan ditunjukkan oleh derajat

deasetilasi. Derajat deasetilasi merupakan salah satu karakteristik kimia penting yang mempengaruhi performa kitosan dalam mengadsorpsi CO₂.

Seperti halnya adsorben berbasis amina lainnya, adsorpsi CO₂ oleh kitosan dapat berlangsung dengan memanfaatkan gugus amina bebas dari unit D-glukosamin. Adsorpsi CO₂ oleh kitosan melalui adsorpsi kooperatif dimana satu molekul CO₂ berikatan dengan 2 gugus amina berdekatan (Danon, Stair, & Weitz, 2011). Adsorpsi CO₂ oleh dua unit D-glukosamin kitosan ditunjukkan oleh Gambar 1.

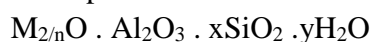


Gambar 1. Adsorpsi kooperatif satu molekul CO₂ oleh dua unit D-glikosamin kitosan (Sneddon, Ganin, & Yiu, 2015).

Kitosan memiliki luas permukaan yang rendah (0,31 m² g⁻¹) dan volume pori 0,0016 cm³g⁻¹ yang menunjukkan bahwa kitosan termasuk dalam material nonpori. Hal tersebut menyebabkan kapasitas adsorpsi CO₂ yang rendah. Peningkatan potensi kitosan sebagai adsorben CO₂ dapat dilakukan dengan memadukan material pendukung yang memiliki luas area yang lebih besar (Sneddon *et al.*, 2015; Yoshida *et al.*, 2002). Material alam berbasis silika yang memiliki luas area besar dan memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi CO₂ adalah zeolit. Oleh karena itu, zeolit memiliki peluang untuk mengatasi keterbatasan kitosan dalam mengadsorpsi CO₂.

Adsorpsi CO₂ oleh Zeolit

Zeolit merupakan kristalin mikropori aluminosilikat dengan struktur dasar jaringan tiga dimensi tetrahedral aluminium dan silikon yang dihubungkan oleh atom oksigen (Barrer, 1978; Breck, 1984). Zeolit mempunyai rumus empiris :



Dimana M adalah unsur alkali atau alkali tanah, n adalah muatan valensi unsur, x adalah jumlah molekul SiO₂ dari 2-10, dan y adalah jumlah molekul H₂O dari 2-7 (Mumpton, 1985).

Zeolit memiliki luas area yang tinggi, ukuran pori tertentu, kemampuan sebagai penyaring molekuler, dan bersifat asam. Luas permukaan aktif zeolit mencapai 200 m²/gram zeolit (Vyas, Shashi, & Kumar, 2004). Sifat zeolit tersebut menjadikan zeolit dimanfaatkan secara luas seperti adsorben, penyaring molekuler, dan katalis (Barrer, 1978; Breck, 1984). Zeolit memiliki

kapasitas adsorpsi CO₂ yang tinggi serta kemampuan desorpsi yang baik (Choi, Drese, & Jones, 2009; Wajima & Ikegami, 2009; Walton, Abney, & LeVan, 2006). Zeolit diketahui sebagai adsorben CO₂ yang baik karena kehadiran aluminium di dalam struktur silikat. Kehadiran aluminium menyebabkan muatan kerangka zeolit negatif dan diseimbangkan dengan kation tukar (alkali atau alkali tanah) di dalam rongga pori. Kation alkali dan alkali tanahlah yang memungkinkan zeolit untuk mengadsorpsi gas yang bersifat asam seperti CO₂ (Choi *et al.*, 2009). Jumlah Al yang menggantikan Si dalam kerangka tetrahedral zeolit dinyatakan sebagai kapasitas tukar kation (KTK). Semakin besar nilai KTK maka semakin besar jumlah Al dan semakin banyak kation kation tukar dalam rongga zeolit.

Adsorpsi CO₂ oleh zeolit memiliki beberapa keunggulan diantaranya adalah disukai adsorpsinya secara kinetik, kapasitas adsorpsi tinggi pada keadaan operasi suhu 0-100 °C tekanan 0,1-1 bar CO₂, dan sesuai untuk penangkapan CO₂ pasca aliran gas pembakaran. Sementara itu keberadaan gas NO_x, SO_x, H₂O akan menurunkan performa zeolit secara signifikan (Spigarelli & Kawatra, 2013). Hauchhum & Mahanta (2014) menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi zeolit terhadap CO₂ lebih tinggi daripada karbon aktif pada rentang suhu 25 °C sampai 60 °C dan tekanan sampai 1 atmosfer. Berlawanan dengan kapasitas adsorpsinya, regenerasi zeolit tidak sempurna sedangkan regenerasi sempurna dapat dicapai oleh karbon teraktivasi.

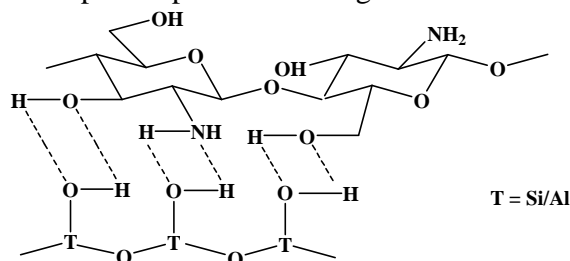
Secara geologi, zeolit ditemukan dalam batuan tuf yang dihasilkan dari hasil sedimentasi debu vulkanik yang telah mengalami proses alterasi. Indonesia berpotensi besar memiliki sumberdaya zeolit seperti yang terdapat di Sumatra (Lampung, Sumatera Utara), Jawa (Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur), Nusa Tenggara Timur dan Sulawesi. Indonesia berada dalam rangkaian gunung berapi mulai dari Sumatera, Jawa, Nusa Tenggara hingga Sulawesi. Berbagai jenis batuan gunung api dihasilkan, diantaranya adalah batuan piroklastika tuf berupa butiran halus, bersifat asam, dan tersusun atas dasit-riolit (Kusdarto, 2008). Oleh karena itu, sumberdaya zeolit yang besar di Indonesia sangat mendukung pemanfaatannya, terutama sebagai adsorben CO₂.

Komposit Kitosan- Zeolit

Kitosan dan zeolit memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi CO₂. Peningkatan potensi kitosan sebagai adsorben CO₂ dengan material pendukung zeolit dapat dimungkinkan dengan membuat komposit kitosan-zeolit. Kitosan merupakan poli-aminosakarida yang memiliki gugus aktif amina bebas, gugus hidroksi primer dan gugus hidroksi sekunder yang berturut-turut berada pada atom C2, C6, dan C3. Kitosan dapat berinteraksi dengan zeolit melalui ikatan hidrogen antara gugus amina dan hidroksi kitosan dengan gugus hidroksi aluminol dan silanol permukaan zeolit (Yuan *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008). Interaksi antara kitosan dengan zeolit di ilustrasikan pada Gambar 2.

Khalil, Aroua, & Daud, (2012) menguji kapasitas karbon teraktivasi terimpregnasi amina terhadap adsorpsi CO₂. Hasil kajian menunjukkan bahwa gugus amina dapat menutup bagian

struktur pori dan menurunkan luas permukaan karbon aktif tetapi juga menciptakan situs aktif yang sangat besar di permukaan dan di dalam pori-pori karbon aktif. Akibatnya, kapasitas adsorpsi dan selektifitas terhadap adsorpsi CO₂ meningkat.



Gambar 2. Ilustrasi interaksi hidrogen antara kitosan dengan zeolit

Dalam komposit kitosan-zeolit, penutupan zeolit oleh rantai polimer kitosan bergantung pada rasio masa zeolit dan kitosan yang digunakan. Bertambahnya rasio massa zeolit yang digunakan menjadikan permukaan komposit kasar, terjadi agregasi zeolit dan terbentuk celah atau rongga kosong. Agregasi zeolit mengindikasikan bahwa masa kitosan tidak dapat mendispersi dan menutup zeolit secara efektif. Sementara itu, bertambahnya rasio massa kitosan menjadikan morfologi komposit halus dan berkurangnya agregasi zeolit di permukaan komposit. Hal tersebut menyarankan bahwa rantai polimer kitosan mampu mendispersi dan melapisi zeolit lebih efektif (Sun *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2007; Yuan *et al.* 2007; Wang *et al.*, 2008; Ismawati & Arryanto, 2013). Morfologi komposit dapat digunakan untuk memprediksikan sifat adsorpsi CO₂. Zeolit diketahui memiliki kemampuan mengadsorpsi CO₂ lebih baik dari pada polimer alam kitosan. Oleh karena itu, komposit dengan perbandingan massa zeolit tinggi dimungkinkan memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan komposit dengan rasio massa kitosan tinggi.

Kitosan merupakan limbah biomasa dan tersedia dalam jumlah yang besar. Sampai saat ini, sebagian besar literatur melaporkan pemanfaatan adsorben berbasis silika mesopori dalam bentuk bubuk untuk mengadsorpsi CO₂. Namun, untuk aplikasi praktis, adsorben bentuk pelet atau granul lebih disukai untuk menghindari masalah pengepakan dan penanganan. Dengan demikian, adsorben berbasis kitosan adalah kandidat potensial sebagai adsorben CO₂ yang efektif (Fujiki & Yogo, 2014). Wahono *et al.* (2010) menyampaikan bahwa dalam proses adsorpsi gas lebih baik menggunakan adsorben bentuk pelet daripada bentuk serbuk. Proses adsorpsi gas menggunakan adsorben bentuk serbuk tidak dapat optimal karena aliran gas terhambat oleh adsorben, meskipun luas permukaannya lebih besar. Sementara itu, penggunaan adsorben bentuk pelet dapat lebih optimal karena gas dapat mengalir melalui celah-celah adsorben. Hal lain yang perlu dipertimbangkan adalah prosedur sintesis komposit kitosan-zeolit mengikuti prinsip *green chemistry* yaitu kondisi temperatur dan tekanan kamar, tidak menggunakan pelarut toksik, dan meminimalisir pembuangan limbah. Dengan demikian, penggunaan material alam sebagai bahan baku dan prosedur kerja yang ramah lingkungan dapat mendukung hidup berkelanjutan.

4. PENUTUP

Kitosan memiliki kemampuan mengadsorpsi CO₂ berdasarkan sifat asam basa lewis, namun luas permukaan dan volume pori yang rendah menyebabkan kapasitas adsorpsi CO₂ yang rendah. Peningkatan kapasitas adsorpsi CO₂ mungkin dilakukan dengan menambahkan material pendukung zeolit. Zeolit memiliki sifat luas area yang tinggi, ukuran pori tertentu, kemampuan sebagai penyaring molekuler yang mendukung sifat adsorpsi CO₂. Kapasitas adsorpsi komposit kitosan-zeolit perlu dikaji dengan memvariasikan variabel seperti jenis zeolit, aktivasi zeolit, massa zeolit, massa kitosan dan lainnya

DAFTAR PUSTAKA

- Barrer, R. M. (1978). *Zeolites and clay minerals as sorbents and molecular sieves*.
- Breck, D. W. (1984). *Zeolite molecular sieves: structure, chemistry and use*. Krieger.
- Berstad, D., Anantharaman, R., & Nekså, P. (2013). Low-Temperature CO₂ Capture Technologies – Applications and Potential. *International Journal of Refrigeration*, 36(5), 1403–1416. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.03.017>
- Chang, F. Y., Chao, K. J., Cheng, H. H., & Tan, C. S. (2009). Adsorption of CO₂ onto Amine-Grafted Mesoporous Silicas. *Separation and Purification Technology*, 70(1), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.08.016>
- Chiao, C., Chen, J., Lan, C., Chen, S., & Hsu, H. (2011). Development of Carbon Dioxide Capture and Storage Technology - Taiwan Power Company Perspective. *Sustain. Environ. Res.*, 21(1), 1–8.
- Choi, S., Drese, J. H., & Jones, C. W. (2009). Adsorbent Materials for Carbon Dioxide Capture From Large Anthropogenic Point Sources. *ChemSusChem*. <https://doi.org/10.1002/cssc.200900036>
- Danon, A., Stair, P. C., & Weitz, E. (2011). FTIR Study of CO₂ Adsorption on Amine-Grafted SBA-15: Elucidation of Adsorbed Species. *Journal of Physical Chemistry C*, 115(23), 11540–11549. <https://doi.org/10.1021/jp200914v>
- Dantas, T. L. P., Luna, F. M. T., Silva, I. J., de Azevedo, D. C. S., Grande, C. A., Rodrigues, A. E., & Moreira, R. F. P. M. (2011). Carbon Dioxide-Nitrogen Separation Through Adsorption on Activated Carbon in a Fixed Bed. *Chemical Engineering Journal*, 169(1–3), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.08.026>
- Espinal, L., Poster, D. L., Wong-Ng, W., Allen, A. J., & Green, M. L. (2013). Measurement, Standards, and Data Needs for CO₂ Capture Materials: A critical review. *Environmental Science and Technology*, 47(21), 11960–11975. <https://doi.org/10.1021/es402622q>
- Fauth, D. J., Gray, M. L., Pennline, H. W., Krutka, H. M., Sjoström, S., & Ault, A. M. (2012). Investigation of Porous Silica Supported Mixed-Amine Sorbents for Post-Combustion CO₂ capture. *Energy and Fuels*, 26(4), 2483–2496. <https://doi.org/10.1021/ef201578a>
- Fujiki, J., & Yogo, K. (2014). Carbon Dioxide Adsorption Onto Polyethylenimine-Functionalized Porous Chitosan Beads. *Energy and Fuels*, 28(10), 6467–6474. <https://doi.org/10.1021/ef500975g>
- Fujiki, J., & Yogo, K. (2016). The increased CO₂ Adsorption Performance of Chitosan-Derived Activated Carbons with Nitrogen-Doping. *Chem. Commun.*, 52(1), 186–189. <https://doi.org/10.1039/C5CC06934C>

- Hauchhum, L., & Mahanta, P. (2014). Carbon Dioxide Adsorption on Zeolites and Activated Carbon by Pressure Swing Adsorption in a Fixed Bed. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(4), 349–356. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0131-3>
- Huang, H. Y., Yang, R. T., Chinn, D., & Munson, C. L. (2003). Amine-Grafted MCM-48 and Silica Xerogel as Superior Sorbents for Acidic Gas Removal From Natural Gas. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42(12), 2427–2433. <https://doi.org/10.1021/ie020440u>
- Ismawati, R., & Arryanto, Y. (2013). *Komposit Kitosan-Zeolit sebagai Sistem Lepas Lambat Besi (III)* (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- Khalil, S. H., Aroua, M. K., & Daud, W. M. A. W. (2012). Study on The Improvement of The Capacity of amine-Impregnated Commercial Activated Carbon Beds for CO₂ Adsorbing. *Chemical Engineering Journal*, 183, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.011>
- Kumar, G.. (2006). “Development and Characterization of Novel Organic Coatings Based on Biopolymer Chitosan”. *Dissertation*. Ohio State University.
- Kumar Dutta, P., Dutta, J., & Tripathi, V. S. (2004). Chitin and Chitosan: Chemistry, Properties and Applications. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 63, 20–31. <https://doi.org/10.1002/chin.200727270>
- Kusdarto. (2008). Potensi Zeolit di Indonesia. *Jurnal Zeolit Indonesia*, 7(1411–6723), 2. <https://doi.org/http://journals.itb.ac.id/index.php/jzi/article/download/1714/1009>.
- Martinou, A., Kafetzopoulos, D., & Bouriotis, V. (1995). Chitin Deacetylation by Enzymatic Means: Monitoring of Deacetylation Processes. *Carbohydrate Research*, 273(2), 235–242. [https://doi.org/10.1016/0008-6215\(95\)00111-6](https://doi.org/10.1016/0008-6215(95)00111-6)
- Mello, M. R., Phanon, D., Silveira, G. Q., Llewellyn, P. L., & Ronconi, C. M. (2011). Amine-Modified MCM-41 Mesoporous Silica for Carbon Dioxide Capture. *Microporous and Mesoporous Materials*, 143(1), 174–179. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.02.022>
- Mumpton, F. A. (1985, July). Using Zeolites in Agriculture. In *Innovative Biological Technologies for Lesser Developed Countries, Washington, DC: US Congress, Office of Technology Assessment, OTA-13P-F-29*.
- Muzzarelli, R. A., Boudrant, J., Meyer, D., Manno, N., DeMarchis, M., & Paoletti, M. G. (2012). Current Views on Fungal Chitin/Chitosan, Human Chitinases, Food Preservation, Glucans, Pectins And Inulin: A Tribute to Henri Braconnot, Precursor of the Carbohydrate Polymers Science, on the Chitin Bicentennial. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 995–1012.
- Nidhin, M., Indumathy, R., Sreeram, K. J., & Nair, B. U. (2008). Synthesis of iron Oxide Nanoparticles of Narrow Size Distribution on Polysaccharide Templates. *Bulletin of Materials Science*, 31(1), 93–96. <https://doi.org/10.1007/s12034-008-0016-2>
- Ojala, M. S., Ferrer Serrano, N., Uusi-Kyyny, P., & Alopaeus, V. (2014). Comparative Study: Absorption Enthalpy of Carbon Dioxide into Aqueous Diisopropanolamine and Monoethanolamine Solutions and Densities of the Carbonated Amine Solutions. *Fluid Phase Equilibria*, 376, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2014.05.038>
- Oyenekan, B. A., & Rochelle, G. T. (2007). Alternative Stripper Configurations for CO₂ Capture by Aqueous Amines. *AIChE Journal*, 53(12), 3144–3154. <https://doi.org/10.1002/aic.11316>
- Samanta, A., Zhao, A., Shimizu, G. K. H., Sarkar, P., & Gupta, R. (2012). Post-Combustion CO₂ Capture Using Solid Sorbents: A review. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(4), 1438–1463. <https://doi.org/10.1021/ie200686q>

- Shahidi, F., Arachchi, J. K. V., & Jeon, Y. J. (1999). Food Applications of Chitin and Chitosans. *Trends in Food Science and Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(99\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(99)00017-5)
- Sneddon, G., Ganin, A. Y., & Yiu, H. H. P. (2015). Sustainable CO₂ Adsorbents Prepared by Coating Chitosan onto Mesoporous Silicas for Large-Scale Carbon Capture Technology. *Energy Technology*, 3(3), 249–258. <https://doi.org/10.1002/ente.201402211>
- Songolzadeh, M., Soleimani, M., Takht Ravanchi, M., & Songolzadeh, R. (2014). Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: A technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions. *The Scientific World Journal*. <https://doi.org/10.1155/2014/828131>
- Spigarelli, B. P., & Kawatra, S. K. (2013). Opportunities and Challenges in Carbon Dioxide Capture. *Journal of CO₂ Utilization*. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2013.03.002>
- Sun, H., Lu, L., Chen, X., & Jiang, Z. (2008). Surface-Modified Zeolite-Filled Chitosan Membranes for Pervaporation Dehydration of Ethanol. *Applied Surface Science*, 254(17), 5367–5374. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.02.056>
- Vyas, R. K., Shashi, & Kumar, S. (2004). Determination of Micropore Volume and Surface Area of Zeolite Molecular Sieves by D-R and D-A Equations: A comparative study. *Indian Journal of Chemical Technology*, 11(5), 704–709.
- Wahono, S. K., Maryana, R., Kismurtono, M., & Nisa, K. (2010). Modifikasi Zeolit Lokal Gunungkidul Sebagai Upaya Peningkatan Performa Biogas Untuk Pembangkit Listrik.
- Wajima, T., & Ikegami, Y. (2009). Synthesis of Zeolite X from Waste Sandstone Cake Using Alkali Fusion Method. *Nippon Kinzoku Gakkaishi/Journal of the Japan Institute of Metals*, 73(2), 124–130. <https://doi.org/10.2320/jinstmet.73.124>
- Walton, K. S., Abney, M. B., & LeVan, M. D. (2006). CO₂ Adsorption in Y and X Zeolites Modified by Alkali Metal Cation Exchange. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1–3), 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.023>
- Wang, J., Zheng, X., Wu, H., Zheng, B., Jiang, Z., Hao, X., & Wang, B. (2008). Effect of zeolites on chitosan/zeolite hybrid membranes for direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources*, 178(1), 9-19.
- Wang, W., Wang, X., Song, C., Wei, X., Ding, J., & Xiao, J. (2013). Sulfuric Acid Modified Bentonite as The Support of Tetraethylenepentamine for CO₂ Capture. *Energy and Fuels*, 27(3), 1538–1546. <https://doi.org/10.1021/ef3021816>
- Wu, H., Zheng, B., Zheng, X., Wang, J., Yuan, W., & Jiang, Z. (2007). Surface-Modified Y Zeolite-Filled Chitosan Membrane for Direct Methanol Fuel Cell. *Journal of Power Sources*, 173(2 SPEC. ISS.), 842–852. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.08.020>
- Yoshida, H., Oehlenschlaeger, S., Minami, Y., & Terashima, M. (2002). Adsorption of CO₂ on Composites of Strong and Weak Basic Anion Exchange Resin and Chitosan. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 35(1), 32–39. <https://doi.org/10.1252/jcej.35.32>
- Yu, C. H., Huang, C. H., & Tan, C. S. (2012). A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption. *Aerosol and Air Quality Research*. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.05.0132>
- Yuan, W., Wu, H., Zheng, B., Zheng, X., Jiang, Z., Hao, X., & Wang, B. (2007). Sorbitol-Plasticized Chitosan/Zeolite Hybrid Membrane for direct Methanol Fuel Cell. *Journal of Power Sources*, 172(2), 604-612.
- Zanganeh, K. E., Shafeen, A., & Salvador, C. (2009). CO₂ Capture and Development of an Advanced Pilot-Scale Cryogenic Separation and Compression Unit. In *Energy Procedia*, 1, 247–252. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.035>

- Zhang, L., Yu, C., Zhao, W., Hua, Z., Chen, H., Li, L., & Shi, J. (2007). Preparation of Multi-Amine-Grafted Mesoporous Silicas and Their Application to Heavy Metal Ions Adsorption. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 353(44–46), 4055–4061. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.06.018>
- Zhao, L., Riensche, E., Menzer, R., Blum, L., & Stolten, D. (2008). A Parametric Study of CO₂/N₂ Gas Separation Membrane Processes for Post-Combustion Capture. *Journal of Membrane Science*, 325(1), 284-294.