

การเตรียมคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ โดยการเกิดอิมัลชันผ่านการฉีดอย่างง่าย

Preparation of Carbon Aerogel Microspheres by Simple-Injection Emulsification

กรณิศ คงเจริญ* จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์** สุรัตน์ อารีรัตน์*

*สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ โดยใช้วิธีการฉีดอย่างง่าย ให้เกิดเป็นอิมัลชันผ่านกระบวนการโซลเจลพอลิคอนเดนเซชันของสารละลายริซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย การทำแห้งแบบเหนือวิกฤตโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ และการทำคาร์บอนไนเซชันในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูง ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของเวลาบ่มก่อนการฉีด 1-4 ชั่วโมง อัตราการฉีด 0.25-1.00 ml/h และอัตราการปั่นกวนของเฟสต่อเนื่อง 180-450 rpm ที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคและสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ หลังจากนั้นได้ทดลองนำคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมได้ ไปทดลองดูดซับฟีนอล เพื่อศึกษาหาความสามารถในการดูดซับฟีนอล จากการทดลองพบว่าขนาดอนุภาคถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง 20 ถึง 55 μm โดยที่คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมโดยใช้เวลาบ่มก่อนการฉีด 1 ชั่วโมง อัตราการฉีด 0.50 ml/h และอัตราการปั่นกวนของเฟสต่อเนื่อง 180 rpm จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค 44.6 μm พื้นที่ผิว BET 903.02 m^2/g ปริมาตรเมโซพอร์ 0.31 cm^3/g และปริมาตรไมโครพอร์ 0.27 cm^3/g และเมื่อนำคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมที่สภาวะเดียวกันนี้ไปทดลองดูดซับฟีนอลพบว่าสามารถดูดซับได้ถึง 29.20 mg/g

คำสำคัญ : คาร์บอนแอโรเจล โซลเจลพอลิคอนเดนเซชัน การทำแห้งแบบเหนือวิกฤต การกระจายตัวของขนาดอนุภาค การดูดซับ ฟีนอล

Abstract

Carbon aerogel microspheres were prepared by simple-injection emulsification, employing sol-gel polycondensation of a resorcinol-formaldehyde solution containing sodium carbonate as a catalyst. This process was followed by solvent exchange and supercritical drying with carbon dioxide. Carbon aerogel microspheres were prepared by carbonizing of the RF aerogel particles at a high temperature under a nitrogen atmosphere. The effect of curing time before starting injection in range of 1-4 h, injection rate in range of 0.25-1.00 ml/h and agitation rate of continuous phase in range of 180-450 rpm on the particle size and the porous properties of the carbon aerogel microspheres was investigated. Then adsorption of phenol by using carbon aerogel microspheres was examined. The particle size of carbon aerogel microspheres were controlled in the range from 20 to 55 μm . The carbon aerogel microspheres with an average diameter of 44.6 μm have a BET surface area 903.02 m^2/g , mesopore volume 0.31 cm^3/g and micropore volume 0.27 cm^3/g . For the adsorption of phenol, these carbon aerogel microspheres had adsorption capacity 29.20 mg phenol/g adsorbent.

Keywords : Carbon aerogel, Sol-gel polycondensation, Supercritical drying, Particle size distribution, Adsorption, Phenol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน นิยมนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ยกตัวอย่างเช่น ตัวดูดซับ ตัวกรองระดับโมเลกุล วัสดุรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา และข้าวอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น คาร์บอนแอโรเจลเป็นหนึ่งในวัสดุคาร์บอนที่มีความพรุนสูง และมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากประมาณ 400-900 m^2/g อาร์เอฟคาร์บอนแอโรเจลเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย โดยเตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรเจลพอลิคอนเดนเซชันของริซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ ในสารละลายเบสอ่อน ตามด้วยกระบวนการทำแห้งแบบเหนียววิกฤต และการทำคาร์บอนไนเซชัน ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูง [1-2]

วิธีการไฮโดรเจล เป็นวิธีการสังเคราะห์วัสดุที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตร โดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อควบคุมการเรียงตัวของโมเลกุล ทำให้สามารถควบคุมขนาดของรูพรุนได้ตามต้องการ นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่มีความเรียบง่ายและสามารถเตรียมสารได้ทั้งอุณหภูมิห้อง อาร์เอฟคาร์บอนแอโรเจลประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นร่างแห และมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งรูพรุนมีผลมาจากกระบวนการทำแห้งของไฮโดรเจล ซึ่งเป็นร่างแหของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของพอลิคอนเดนเซชัน โครงสร้างรูพรุนของไฮโดรเจลมีผลมาจากสภาวะในการสังเคราะห์ ตัวอย่างเช่น อัตราส่วนของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และค่า pH เริ่มต้นของสารละลาย เป็นต้น [3] กระบวนการทำแห้งของไฮโดรเจลมีด้วยกันหลายวิธีและมีชื่อเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกันดังนี้

- คาร์บอนแอโรเจล (Carbon Aerogel) จะใช้เรียกชื่อคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบเหนียววิกฤต

- คาร์บอนไครโอเจล (Carbon Cryogel) จะใช้เรียกชื่อคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying)

- คาร์บอนซีโรเจล (Carbon Xerogel) จะใช้เรียกชื่อคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการทำแห้งที่มีผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธีเช่น การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ การทำให้แห้งด้วยการพาของอากาศร้อน และการทำให้แห้งแบบสูญญากาศ

กระบวนการทำแห้งแบบเหนียววิกฤต และกระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง สามารถหลีกเลี่ยงผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการพังทลายของโครงสร้างจากแรงคาปิลลารีภายในรูพรุน แม้ว่า การทำแห้ง

แบบแช่แข็งจะใช้ค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการทำแห้งแบบเหนียววิกฤต แต่โดยทั่วไปแล้วความพรุนของคาร์บอนไครโอเจลจะน้อยกว่าคาร์บอนแอโรเจล ในขณะที่กระบวนการทำแห้งที่มีผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวนั้น จะไม่สามารถหลีกเลี่ยงแรงคาปิลลารีได้ ดังนั้นความพรุนของคาร์บอนซีโรเจลที่ได้จึงมีค่าน้อย เนื่องจากคาร์บอนแอโรเจลและไครโอเจลสามารถปรับเปลี่ยนขนาดรูพรุนได้ จึงนิยมประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับ [4-5] วัสดุบรรจุคอลัมน์สำหรับโครมาโตกราฟีของเหลวประสิทธิภาพสูง (HPLC) [6] และวัสดุรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา [7] เป็นต้น

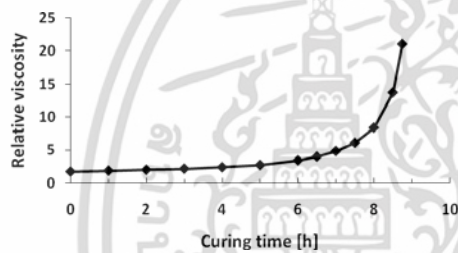
คาร์บอนเจลทรงกลมที่มีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุบรรจุสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลักซ์เบดหรือแบบฟลูอิดไคซ์เบด เพราะสามารถเพิ่มความแข็งแรงเชิงกล เนื่องจากมีรูปร่างเป็นทรงกลม มีความเป็นสมมาตร จึงทำให้เกิดการแตกหักได้ยาก และทำให้กระบวนการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สะดวกขึ้น เช่น การคำนวณ Void Fraction ของ Packed Bed จะมีความแม่นยำมากขึ้น และนอกจากนี้ยังถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เช่น โฟมล้างหน้าที่ผสม Activated Carbon ทรงกลม เป็นต้น

เนื่องจากปัจจุบันน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดปัญหาหมอกพิษทางน้ำ สารปนเปื้อนต่างๆ เช่น สารประกอบฟีนอล การปนเปื้อนสารเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ วิธีการดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสำหรับใช้ดูดซับพวกสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี การใช้วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ในการกำจัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียโดยอาศัยการดูดซับ

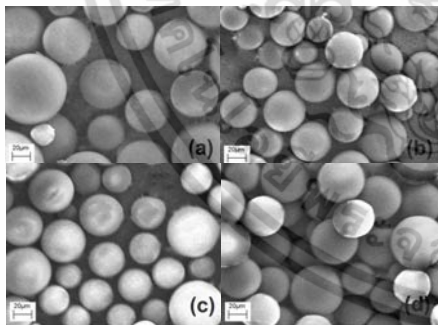
ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจล โดยการเกิดอิมัลชันผ่านการฉีดอย่างง่าย เพื่อให้ได้คาร์บอนแอโรเจลที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม และศึกษาอิทธิพลของสภาวะในการสังเคราะห์ ได้แก่ เวลาบ่มก่อนการฉีด อัตราการฉีด และอัตราการปั่นกววนของเฟสต่อเนื่องที่มีผลต่อขนาดอนุภาคและสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ หลังจากนั้นจะนำคาร์บอนแอโรเจลที่เตรียมได้ ไปทดลองดูดซับฟีนอล เพื่อศึกษาหาความสามารถในการดูดซับฟีนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

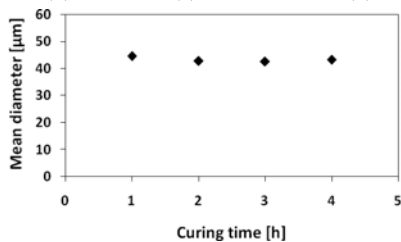
ภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ จากการเตรียมโดยใช้เวลารบก่อนการฉีด 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการฉีด 0.5 ml/h และอัตราการปั่นกววนของเฟสต่อเนื่อง 180 rpm แสดงไว้ในรูปที่ 3 จากผลการทดลองพบว่าคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้มีรูปร่างเป็นทรงกลมที่สมบูรณ์ และพบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการรบบก่อนการฉีดเพิ่มขึ้น จะไม่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ได้รับ เนื่องจากในช่วงเวลานี้เป็นการฉีดสารละลายอาร์เอฟก่อนที่ความหนืดของมันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อสารละลายเริ่มกลายเป็นเจล (ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 7 ชั่วโมง) ทำให้สารละลายอาร์เอฟที่มีความหนืดไม่แตกต่างกันมากนัก ส่งผลให้สารละลายอาร์เอฟสามารถไหลออกจากปากกรูพรุนของตัวเมทัลซินเตอร์ได้ใกล้เคียงกันทำให้ขนาดอนุภาคที่ได้รับไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความหนืดสัมพัทธ์ของสารละลายอาร์เอฟที่ 25 °C (เมื่อเทียบกับน้ำ)



รูปที่ 3 สัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ ที่เตรียมโดยใช้เวลารบก่อนการฉีด (a) 1 ชั่วโมง (b) 2 ชั่วโมง (c) 3 ชั่วโมง และ (d) 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4 ขนาดอนุภาคของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมโดยใช้เวลารบก่อนการฉีดต่างกัน

ผลการวิเคราะห์สมบัติรูพรุนด้วยเครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจน ของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมโดยใช้เวลารบก่อนการฉีด 1 และ 4 ชั่วโมง แสดงไว้ในตารางที่ 1 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลารบก่อนการฉีด จะส่งผลให้พื้นที่ผิว BET ปริมาตรไมโครพอร์ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเวลาให้สารตั้งต้นได้มีเวลาในการทำปฏิกิริยากันภายในบัลค์ (Bulk) ที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่สูงมากขึ้น ส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาโซลเจลพอลิคอนเดนเซชันได้มากกว่า และเนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้เลือกอัตราส่วนของรีซอร์ซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนตหรือตัวเร่งปฏิกิริยา (R/C) เป็น 50 mol/mol ซึ่งเป็นการใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค่อนข้างสูง การใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูง จะทำให้เกิดเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ส่งผลให้พื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 1 สมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ ที่เตรียมโดยใช้เวลารบก่อนการฉีดต่างกัน

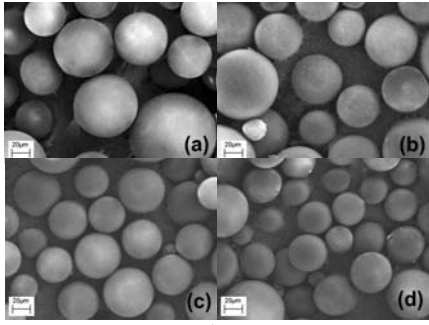
เวลารบก่อนฉีด (h)	S _{BET} (m ² /g)	V _{mic} (cm ³ /g)	V _{meso} (cm ³ /g)	V _{total} (cm ³ /g)	D _{peak} (nm)
1	903	0.27	0.31	0.60	3.83
4	1200	0.44	0.30	0.74	1.41

3.2 อิทธิพลของอัตราการฉีด

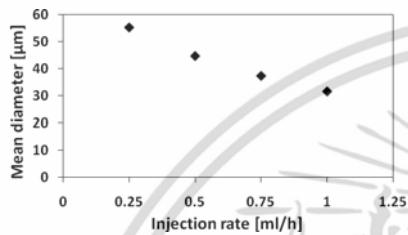
ภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ จากการฉีดสารละลายอาร์เอฟผ่านเมทัลซินเตอร์ด้วยอัตรา 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 ml/h โดยใช้เวลารบก่อนการฉีด 1 ชั่วโมงเนื่องจากหลังจากเวลารบ 1 ชั่วโมง จะต้องใช้เวลาฉีดอีกประมาณ 2 ชั่วโมง จึงต้องให้มั่นใจว่าความหนืดของสารละลายอาร์เอฟจะไม่เพิ่มขึ้นสูงเกินไปจนทำให้เมทัลซินเตอร์เกิดการอุดตัน และอัตราการปั่นกววนของเฟสต่อเนื่อง 180 rpm ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 จากผลการทดลองพบว่าคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้มีรูปร่างเป็นทรงกลมที่สมบูรณ์ และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการฉีดสูงขึ้น ขนาดอนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการฉีดจะส่งผลให้สารละลายอาร์เอฟสามารถไหลออกจากปากกรูพรุนของเมทัลซินเตอร์ไปติดกับการไหลของเฟสต่อเนื่องได้เร็วขึ้น จึงเกิดเป็นหยดของสารละลายอาร์เอฟที่เล็กกว่า และหยดที่เกิดขึ้นจะถูกทำให้เสถียรด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ละลายอยู่ในเฟสต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 6

เยื่อสัณฐานเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 สัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ ที่เตรียมด้วยอัตราการฉีด (a) 0.25 ml/h (b) 0.50 ml/h (c) 0.75 ml/h และ (d) 1.00 ml/h



รูปที่ 6 ขนาดอนุภาคของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมโดยใช้อัตราการฉีดต่างกัน

ผลการวิเคราะห์สมบัติรูพรุนด้วยเครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจน ของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมโดยใช้อัตราการฉีด 0.50 และ 1.00 ml/h แสดงไว้ในตารางที่ 2 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการฉีด จะส่งผลให้พื้นที่ผิว BET ปริมาตรเมโซพอร์ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการฉีด จะทำให้ได้รับหยดของสารละลายอาร์เอฟที่เล็กกว่าที่เคลื่อนที่อยู่ในเฟสต่อเนื่อง ซึ่งสารละลายอาร์เอฟหยดเล็กกว่า นั้น จะมีปริมาณสารตั้งต้นที่น้อยกว่าในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดเป็นร่างแหของสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่น้อยกว่าเมื่อเกิดเป็นเจล จึงทำให้ปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิวลดลง

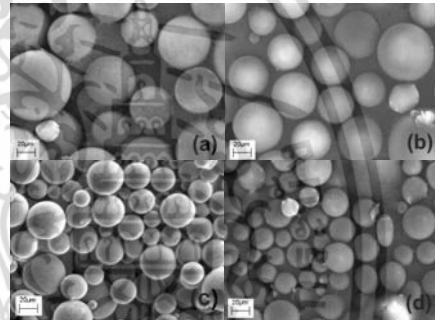
ตารางที่ 2 สมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ ที่เตรียมโดยใช้อัตราการฉีดต่างกัน

อัตรา การฉีด (ml/h)	S_{BET} (m^2/g)	V_{mic} (cm^3/g)	V_{meso} (cm^3/g)	V_{total} (cm^3/g)	D_{peak} (nm)
0.50	903	0.27	0.31	0.60	3.83
1.00	771	0.31	0.10	0.45	1.39

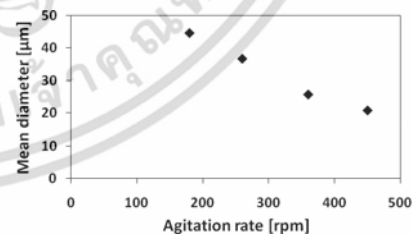
3.3 อิทธิพลของอัตราการปั่นกวนของเฟสต่อเนื่อง

ภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ จากการเตรียมด้วยอัตราการปั่นกวนของเฟสต่อเนื่อง 180 260 360 และ 450 rpm โดยใช้เวลาบ่ม

ก่อนการฉีด 1 ชั่วโมง และอัตราการฉีด 0.5 ml/h เพราะเป็นอัตราการฉีดที่ไม่เร็วจนเกินไปซึ่งจะทำให้ปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวลดลงและได้ขนาดอนุภาคสม่ำเสมอได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้อัตราการปั่นกวนของเฟสต่อเนื่องสูงขึ้น ขนาดของอนุภาคที่ได้จะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการปั่นกวน จะทำให้เฟสต่อเนื่องเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้น ส่งผลให้หยดของสารละลายอาร์เอฟสามารถหลุดออกจากปากรูพรุนของเมทิลซินเตอร์ได้เร็วขึ้น จึงเกิดเป็นหยดของสารละลายอาร์เอฟที่เล็กกว่า ดังแสดงในรูปที่ 8 และยังพบอีกว่าที่อัตราการปั่นกวนสูงๆ จะทำให้อนุภาคบางส่วนเกิดการแตกหักไม่เป็นทรงกลม เนื่องจากการปั่นกวนสูง แทะกวนแม้เหล็กจะหมุนด้วยอัตราเร็วที่สูงมาก และเมื่อไปกระทบกับอนุภาคไฮโดรเจลก็จะทำให้เกิดการแตกหักขึ้น



รูปที่ 7 สัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ ที่เตรียมด้วยอัตราการปั่นกวนของเฟสต่อเนื่อง (a) 180 rpm (b) 260 rpm (c) 360 rpm และ (d) 450 rpm



รูปที่ 8 ขนาดอนุภาคของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมโดยใช้อัตราการปั่นกวนของเฟสต่อเนื่องต่างกัน

ผลการวิเคราะห์สมบัติรูพรุนด้วยเครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจน ของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมโดยใช้อัตราการปั่นกวนของเฟสต่อเนื่อง 180 และ 450 rpm แสดงไว้ในตารางที่ 3 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการฉีด จะส่งผลให้พื้นที่ผิว BET ปริมาตรไมโครพอร์ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการปั่นกวนจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

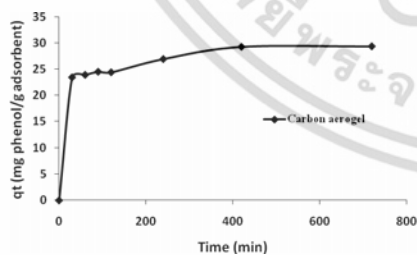
อนุภาคเกิดการแตกหักมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนเกิดความเสียหาย ทำให้ปริมาณรูพรุน และพื้นที่ผิวที่ลดลง โดยที่อัตราการปั่นกววน 450 rpm จะมีปริมาณของคาร์บอนแอโรเจลที่แตกหักมากที่สุดเมื่อสังเกตจากภาพสัณฐานวิทยา จึงใช้อัตราการปั่นกววน 180 rpm ทำการทดลองในตอนอื่น

ตารางที่ 3 สมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ ที่เตรียมโดยใช้อัตราการปั่นกววนของเฟสต่อเนื่องต่างกัน

อัตราการปั่นกววน (rpm)	S_{BET} (m^2/g)	V_{mic} (cm^3/g)	V_{meso} (cm^3/g)	V_{total} (cm^3/g)	D_{peak} (nm)
180	903	0.27	0.31	0.60	3.83
450	335	0.02	0.31	0.34	3.83

3.4 ความสามารถในการดูดซับฟีนอล

ผลการทดลองดูดซับ โดยใช้คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมโดยใช้เวลาปั่นกววนก่อนการฉีด 1 ชั่วโมง อัตราการฉีด 0.5 ml/h และอัตราการปั่นกววนของเฟสต่อเนื่อง 180 rpm มาดูดซับสารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/l สามารถแสดงดังกราฟในรูปที่ 9 พบว่าในช่วงเวลา 30 นาทีแรก จะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว และปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 420 นาที โดยสามารถคำนวณประสิทธิภาพของการกำจัดฟีนอลจากปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เวลาที่สมดุลคือ 420 นาที เทียบกับปริมาณฟีนอลที่เวลาเริ่มต้น ได้สูงถึง 58.40 % และมีค่าปริมาณการดูดซับฟีนอล 29.20 mg/g



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดูดซับจำเพาะของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ กับระยะเวลาในการดูดซับ

4. สรุป

คาร์บอนแอโรเจลที่มีรูปร่างทรงกลมประสบความสำเร็จในการเตรียม โดยใช้วิธีการทำให้เกิดอิมัลชันผ่านการฉีดอย่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ได้สังเคราะห์ได้อยู่ในช่วงประมาณ 20 ถึง 55 μm ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค

จะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการฉีดและอัตราการปั่นกววนของเฟสต่อเนื่อง ในขณะที่เมื่อเพิ่มเวลาปั่นกววนก่อนการฉีดจะไม่ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ได้รับ โดยที่คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมโดยใช้เวลาปั่นกววนก่อนการฉีด 1 ชั่วโมง อัตราการฉีด 0.50 ml/h และอัตราการปั่นกววนของเฟสต่อเนื่อง 180 rpm จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค 44.6 μm พื้นที่ผิว BET 903 m^2/g ปริมาตรเมโซพอร์ 0.31 cm^3/g และปริมาตรไมโครพอร์ 0.27 cm^3/g และเมื่อนำไปทดลองดูดซับฟีนอลพบว่าสามารถดูดซับได้ถึง 29.20 mg/g ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของปรินทร และคณะ[8] ซึ่งได้มีการนำถ่านกัมมันต์เชิงการค้า (จากบริษัท Fluka หมายเลขผลิตภัณฑ์ 05120 ซึ่งมีพื้นที่ผิว BET 900 m^2/g) มาทดลองดูดซับฟีนอลที่ 30 °C จะมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลแค่ 2.59 mg/g เท่านั้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยี อนุภาค คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความกรุณาอนุเคราะห์ที่เตาเผา สำหรับใช้ในการทำงานวิจัย และสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่นที่สนับสนุนงบประมาณบางส่วนในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R.W. Pekala, "Organic Aerogels from the Polycondensation of Resorcinol with Formaldehyde," *Journal of Materials Science*, Vol.24, No.9., pp.3221-3227, 1989.
- [2] H. Tamon, H. Ishizaka, M. Mikami and M. Okazaki, "Porous Structure of Organic and Carbon Aerogels Synthesized by Sol-Gel Polycondensation of Resorcinol with Formaldehyde," *Carbon*, Vol.35, No.6., pp.791-796, 1997.
- [3] J. Chaichanawong, T. Yamamoto, S. Kim and T. Ohmori, *Non-Crystalline Solids*, Vol.355, pp.160, 2009.
- [4] T. Yamamoto, A. Endo, T. Ohmori and M. Nakaiwa, "Porous properties of carbon gel microspheres as adsorbents for gas separation," *Carbon*, Vol.42, pp.1671-1676, 2004.
- [5] S.I. Kim, T. Yamamoto, A. Endo, T. Ohmori and M. Nakaiwa, "Adsorption of Phenol and Reactive Dyes from Aqueous Solution on Carbon Cryogel Microspheres with Controlled Porous Structure," *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol.96, pp.191-196, 2006.
- [6] T. Yamamoto, T. Nishimura, T. Suzuki and H. Tamon, "Control of Mesoporosity of Carbon Gels Prepared by Sol-Gel Polycondensation and Freeze Drying," *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol.288, pp.46-55, 2001.
- [7] N. Job, B. Heinrichs, S. Lambert and J.P. Pirard, "Carbon Xerogels as Catalyst Supports: Study of Mass Transfer," *AIChE J*, Vol.52, pp.2663-2676, 2006.
- [8] ปรินทร เต็มญารศิริปี่, "การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์ จากไผ่ตง และไผ่หมาจู," *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต(เคมี), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.*

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้