



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การเตรียมตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ ของอุตสาหกรรมน้ำตาล

Preparation of carbon-silica composite adsorbent from by-product of sugar industry

ยุวรัตน์ เงินเย็น* ณัฐพัชร จันทรสสมบัติ บุญญิสา อุ่นพิกุล และอธิป เหลืองไพโรจน์

Yuvarat Ngernyen* Natthapat Chantarasombat Boonyisa Ounphikul and Atip Laungphairojana

ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุและพลังงานชีวมวล สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Biomass and Bioenergy Research Laboratory, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
Khon Kaen University

Received: 2 December 2019

Revised: 17 July 2020

Accepted: 20 July 2020

Available online: 31 December 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา โดยเตรียมจากกากน้ำตาล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาลใช้เป็นแหล่งคาร์บอน สำหรับแหล่งซิลิกาใช้สารเคมีซึ่งเป็นที่นิยมใช้ คือ tetraethyl orthosilicate (TEOS) โดยทำการศึกษเปรียบเทียบกับการใช้สารเคมีที่มีราคาถูกกว่า ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโพแทสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3) เมื่อได้ตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตแล้ว ทำการวิเคราะห์สมบัติรูพรุน โดยใช้การดูดซับแก๊สไนโตรเจน วิเคราะห์ปริมาณความชื้นและเถ้าตามวิธีการ ASTM และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วัสดุที่เตรียมได้จากแหล่งซิลิกาทั้งสามมีโครงสร้างรูพรุนเป็นขนาดกลาง และโซเดียมซิลิเกตให้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด คือ $329 \text{ m}^2/\text{g}$ ผลการศึกษาปริมาณเถ้าของวัสดุคอมโพสิตแสดงให้เห็นว่ามีซิลิกาอยู่ในโครงสร้าง และการศึกษา FTIR แสดงถึงหมู่คาร์บอนและซิลิกาในโครงสร้าง ดังนั้น กากน้ำตาล โซเดียมซิลิเกต และโพแทสเซียมซิลิเกต จึงเป็นวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมในการผลิตคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา ที่มีต้นทุนต่ำ

คำสำคัญ: คาร์บอน-ซิลิกา คอมโพสิต ตัวดูดซับ กากน้ำตาล

Abstract

This research studied the preparation of carbon-silica composite materials from molasses which is by-product of sugar industry as a carbon source. For silica source, conventional chemical tetraethyl orthosilicate (TEOS) was used and compared with lower cost chemicals i.e. sodium silicate (Na_2SiO_3) and potassium silicate (K_2SiO_3). Porous properties, moisture content and ash content of the obtained composite materials were characterized using N_2 adsorption and ASTM method, respectively. The surface functional groups were characterized using Fourier transform Infrared spectroscopy (FTIR). The results revealed that all silica sources have led to materials with mesoporous structure and among different silica sources, Na_2SiO_3 showed the highest surface area of $329 \text{ m}^2/\text{g}$. The ash content of composite materials indicated the presence of silica in their structure and the FTIR studies also confirm the carbon and silica groups in the structure. It is to be emphasized that molasses, Na_2SiO_3 and K_2SiO_3 are suitable materials to produce low cost carbon-silica composite.

Keywords: Carbon-silica: Composite: Adsorbent: Molasses

*ติดต่อ: nyuvarat@kku.ac.th, 081-288-9649

1. บทนำ

อุตสาหกรรมน้ำตาลเป็นอุตสาหกรรมเกษตรแปรรูปที่สำคัญของประเทศไทย มีจุดแข็งเนื่องจากการใช้วัตถุดิบหรืออ้อยที่ปลูกภายในประเทศมาแปรรูปเป็นน้ำตาล เพื่อตอบสนองของความต้องการบริโภคภายในประเทศ อีกทั้งยังส่งออกเพื่อนำรายได้ให้กับผู้ปลูกอ้อย ซึ่งในฤดูการผลิตปีพ.ศ. 2561-2562 มีโรงงานน้ำตาลถึง 57 โรงงาน กระจายตัวอยู่ในภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศ ยกเว้น ภาคใต้ โดยมีอ้อยเข้าหีบถึง 126 ล้านตัน [1] ซึ่งในกระบวนการผลิตน้ำตาลนั้น นอกจากจะได้น้ำตาลเป็นผลิตภัณฑ์หลักแล้ว ยังมีผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by-product) ที่เกิดขึ้นทั้งในรูปของแข็งและของเหลว ได้แก่ ชานอ้อย (bagasse) กากหม้อกรอง (filter cake) และกากน้ำตาลหรือ โมลาส (molasses) ซึ่งในปัจจุบันกากน้ำตาลถูกนำไปใช้ในการผลิตเอทานอล และใช้เป็นอาหารสัตว์งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มมูลค่าให้กับกากน้ำตาล โดยมีเป้าหมายว่าจะนำกากน้ำตาลไปผลิตเป็นวัสดุที่สามารถตอบโจทย์การแก้ไขปัญหาของประเทศ รวมถึงเป็นวัสดุใหม่ที่ยังไม่มีงานวิจัยใดเคยทำมาก่อน และต้องมีต้นทุนในการผลิตที่ไม่สูง

สำหรับปัญหาของประเทศที่งานวิจัยนี้มุ่งเป้าที่จะแก้ไข คือ ปัญหามลพิษทั้งทางน้ำและทางอากาศที่เกิดจากภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และครัวเรือน โดยวิธีการบำบัดมลพิษทั้งทางน้ำและทางอากาศนั้นมีอยู่หลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีต่างมีข้อดี

และข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม มีกระบวนการบำบัดอยู่หนึ่งวิธีที่เรียกว่า กระบวนการดูดซับ (adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดมลพิษ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง กระบวนการไม่ซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายของกระบวนการต่ำกว่ากระบวนการอื่น ๆ [2] โดยกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่นำตัวดูดซับของแข็ง (adsorbent) ที่มีรูพรุนสูงและมีพื้นที่ผิวที่มากมาดูดซับสารที่ไม่ต้องการ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือแก๊ส โดยวัสดุที่นำมาเป็นตัวดูดซับนั้นมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) อะลูมินากัมมันต์ (activated alumina) โมเลกุลลาร์ ซีฟ (molecular sieve) ซิลิกาเจล (silica gel) และซีโอไลท์ (zeolite) เป็นต้น [3] นอกจากนั้น ตัวดูดซับทางการค้าหลายชนิดมีราคาค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มมูลค่าให้กับกากน้ำตาลจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยนำมาผลิตเป็นตัวดูดซับที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ

อย่างไรก็ตามมีวัสดุชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจ นั่นคือ วัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) ฉนวนกันความร้อน (thermal insulator) ทั้งยังสามารถนำไปใช้งานเป็นตัวดูดซับได้อีกด้วย [4] เช่น ใช้ดูดซับ SO_2 , NH_3 , CO_2 , CH_4 หรือ C_2H_6 เป็นต้น [5, 7-8]

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มมูลค่าให้กับกากน้ำตาล โดยนำมาผลิตเป็นตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา ในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาของงานวิจัยที่ผ่านมาได้ใช้ เรโซซินอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ (resorcinol-formaldehyde) [4, 6] พอลิเพอร์ฟิวรีล แอลกอฮอล์ (polyfurfuryl alcohol, PFA) [7-8] กลูโคส (glucose) [9] ซูโครส (sucrose) [5] ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) [10] และถ่านกัมมันต์ (activated carbon) [11] เป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งยังไม่มีงานวิจัยใดใช้กากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอน เมื่อกากน้ำตาลซึ่งมีน้ำตาลซูโครส ($C_{12}H_{22}O_{11}$) เป็นองค์ประกอบหลักถึงประมาณ 30-40% ดังนั้น จึงสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ [12]

สำหรับแหล่งซิลิกานั้น งานวิจัยที่ผ่านมาได้ใช้ tetraethyl orthosilicate (TEOS, $C_8H_{20}O_4Si$) [4, 6, 9] tetramethyl orthosilicate (TMOS, $C_4H_{12}O_4Si$) [10-11] และ methyltrimethoxy silane (MTMS, $C_4H_{12}O_3Si$) [11] ซึ่งสารเคมีเหล่านี้มีราคาแพง และต้องสั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น TEOS มีราคาประมาณ 4 พันบาทต่อลิตร งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้สารที่สามารถผลิตได้ในประเทศไทย และมีราคาถูก เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา และเป็นการเพิ่มศักยภาพให้สารเคมีของประเทศไทย ให้สามารถใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น โดยผู้วิจัยได้เลือกโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโพแทสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3) ซึ่งมีราคาประมาณ 700

บาทต่อลิตร (ราคาจากบริษัทผู้ผลิต) ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับการใช้ TEOS

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน - ซิลิกา

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา คือ กากน้ำตาล ซึ่งใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และใช้ Tetraethyl Ortho-silicate (TEOS, $C_8H_{20}O_4Si$, Sigma-Aldrich $\geq 99.0\%$), โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate, Na_2SiO_3 , บริษัท ช.เคมีไทย จำกัด) และโพแทสเซียมซิลิเกต (potassium silicate, K_2SiO_3 , บริษัท ช.เคมีไทย จำกัด) เป็นแหล่งซิลิกา

การเตรียมวัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา ดัดแปลงจากวิธีการของ Sun และคณะ [13] ทำโดยนำกากน้ำตาลมาผสมกับกรดซัลฟิวริกที่เจือจาง 50% ปริมาตร 20 mL และน้ำกลั่นปริมาตร 5 mL โดยใช้อัตราส่วนระหว่างกากน้ำตาลต่อแหล่งซิลิกา เท่ากับ 1.5:1 โดยน้ำหนัก ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณกากน้ำตาล 7.5 กรัม และปริมาณแหล่งซิลิกา 5 กรัม จากนั้นนำของผสมไปให้ความร้อนพร้อมปั่นกวนด้วยเตาให้ความร้อน (hot plate digital, ULAB รุ่น UH-4550) อุณหภูมิ $35^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น $85^{\circ}C$ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา นำตัวอย่างไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ผ่านการล้างมีค่า pH เท่ากับ น้ำที่ใช้ล้าง หลังจาก

นํ้านำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง แล้วนำไปบดเป็นผงละเอียดเพื่อนำไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

2.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับที่เตรียมได้

การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา ประกอบด้วย สมบัติรูพรุน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และหมู่ฟังก์ชันพื้นผิว

สมบัติรูพรุนทำการวิเคราะห์โดยใช้การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ด้วยเครื่อง Surface area and Porosity Analyzer (ASAP2460, Micromeritics) โดยก่อนทำการวิเคราะห์ต้อง out gas ตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 105°C จนกระทั่งความดันภายในหลอดทดลอง < 50 mmHg ซึ่งการดูดซับทำตั้งแต่ความดันสัมพัทธ์ (P/P^0) 0.01–0.99 ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว (surface area) โดยใช้สมการ Brunauer-Emmett-Teller (BET) วัดที่ P/P^0 0.05–0.3 ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (micropore volume) ใช้สมการ Dubunin-Radushkevich (DR) โดยวัดที่ $P/P^0 = 0.05–0.3$ เช่นกัน ปริมาตรรูพรุนรวม (total pore volume) วัดที่ $P/P^0 = 0.99$ ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ (mesopore and macropore volume) คำนวณได้โดยลบปริมาตรรูพรุนรวมด้วยปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average pore diameter) คำนวณได้จากสมการ Barrett-Joyner-Halenda (BJH)

ปริมาณความชื้นวิเคราะห์ตาม ASTM D2867 ส่วนปริมาณเถ้า ทำโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้เตา Muffle furnace การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR, Bruker รุ่น TENSOR 27) โดยทำการวิเคราะห์ที่เลขคลื่น (wavenumber) 4000–600 cm^{-1}

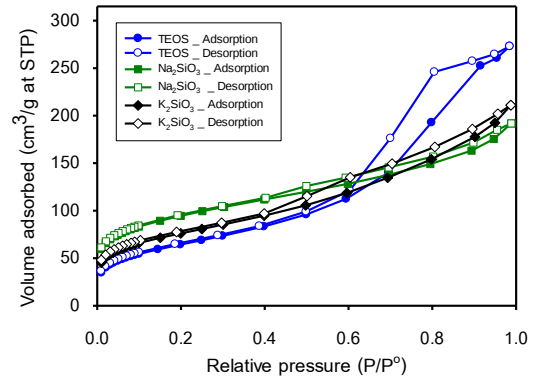
3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 สมบัติรูพรุนของตัวดูดซับคอมโพสิต ที่เตรียมได้

รูปที่ 1 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้ พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับของตัวอย่างทั้งสาม เป็นชนิด Type VI ตามการแบ่งของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ซึ่งแสดงถึงตัวดูดซับที่เป็นรูพรุนขนาดกลาง [14] โดยไอโซเทอร์มการดูดซับแสดงลักษณะของวงฮีสเทรีซิส (hysteresis loop) กล่าวคือ มีปริมาณการดูดซับและการคายซับที่ไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดกับตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง [14] และตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมโดยใช้ TEOS เป็นแหล่งซิลิกา (เส้นสีน้ำเงิน) มีวงฮีสเทรีซิสที่ใหญ่ที่สุด รองลงมา คือ การใช้โพแทสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3 , เส้นสีดำ) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , เส้นสีเขียว) ตามลำดับ นั่นคือ ตัวดูด

ซึบคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมจาก TEOS มีสัดส่วนของรูพรุนขนาดกลางมากที่สุด รองลงมา คือ ตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมจาก K_2SiO_3 และ Na_2SiO_3 ตามลำดับ

สมบัติรูพรุนของวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย แสดงผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า โซเดียมซิลิเกต มีพื้นที่ผิวสูงกว่า TEOS โดยมีพื้นที่ผิวเท่ากับ $329 \text{ m}^2/\text{g}$ ส่วนตัวดูดซับที่เตรียมจากโพแทสเซียมซิลิเกต มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับที่เตรียมจาก TEOS เล็กน้อย โดยมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 269 และ $230 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ดังนั้น โซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นสารเคมีที่ผลิตได้ในประเทศไทยและมีราคาถูก จึงมีศักยภาพในการใช้เตรียมตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา สามารถนำมาใช้ทดแทนสารเคมีจากต่างประเทศ หรือ TEOS ซึ่งมีราคาแพงได้ และเมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของตัวดูดซับรูพรุนขนาดกลางจากงานวิจัยอื่น ๆ เช่น แมงกานีสออกไซด์ชนิด birnessite ($\delta\text{-MnO}_2$) ที่มีพื้นที่ผิว $211.3 \text{ m}^2/\text{g}$ [15] หรือ ถ่านกัมมันตรูพรุนขนาดกลางที่เตรียมได้จากเกล็ดไคโตซาน ที่มีพื้นที่ผิว $318.3 \text{ m}^2/\text{g}$ [16] ซึ่งจะเห็นได้ว่า วัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับรูพรุนขนาดกลางชนิดอื่น ๆ ดังนั้น จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดกลาง ($> 2 \text{ nm}$) เช่น สีย้อม เป็นต้น



รูปที่ 1 ไอโซเทอรั่มการดูดซับ (adsorption) และการคายซับ (desorption) แก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้

ตารางที่ 1 สมบัติรูพรุนของตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้

	TEOS	Na_2SiO_3	K_2SiO_3
พื้นที่ผิว (m^2/g)	230	329	269
ปริมาตรรูพรุน	0.09	0.13	0.11
ขนาดเล็ก (cm^3/g)	(22%)	(43%)	(33%)
ปริมาตรรูพรุนขนาด	0.33	0.17	0.22
กลางและใหญ่ (cm^3/g)	(78%)	(57%)	(67%)
ปริมาตรรูพรุนรวม (cm^3/g)	0.42	0.30	0.33
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	7.33	3.61	4.85

ตัวดูดซับที่เตรียมได้ มีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่เป็นส่วนใหญ่ โดยตัวดูดซับที่เตรียมจาก TEOS มีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาด

ใหญ่สูงถึง 78% ส่วนตัวดูดซับที่เตรียมจากโซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกตมีปริมาตร รูพรุน ขนาดกลางและขนาดใหญ่ 57 และ 67% ตามลำดับ ซึ่ง IUPAC ได้ทำการแบ่งขนาดรูพรุนไว้ 3 ขนาด ดังนี้ (1) รูพรุนขนาดเล็ก มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 2 nm (2) รูพรุนขนาดกลาง มีขนาดรูพรุน 2–50 nm และ (3) รูพรุนขนาดใหญ่ มีขนาดรูพรุนมากกว่า 50 nm ซึ่งตัวดูดซับจากแหล่งซิลิกาทั้ง 3 แหล่ง เป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง โดยเมื่อใช้ Na_2SiO_3 K_2SiO_3 และ TEOS เป็นแหล่งซิลิกา มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 3.61 4.85 และ 7.33 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองจากงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เตรียมวัสดุคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกา แล้วได้ตัวอย่างที่มีขนาดรูพรุนเป็นรูพรุนขนาดกลาง [4, 9]

3.2 ปริมาณความชื้นและเถ้า

ปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้า ทำการทดสอบเฉพาะตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้โซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกต เนื่องจากเป็นแหล่งซิลิกาที่มีราคาถูกกว่า TEOS และได้ตัวดูดซับที่มีสมบัติรูพรุนที่ดี ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่า ตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้ มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) โดยมีปริมาณความชื้นที่ต่ำมาก เพียงร้อยละ 2–3 โดยน้ำหนัก ซึ่งถ้าตัวดูดซับใดมีปริมาณความชื้นมาก จะไม่ส่งผลดีต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งความชื้นที่เกาะติดอยู่ตรงพื้นผิวและรูพรุน

ของตัวดูดซับ จะทำให้ตัวดูดซับสูญเสียพื้นที่สำหรับใช้ดูดซับตัวถูกดูดซับที่ต้องการกำจัด

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นและเถ้าของตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้

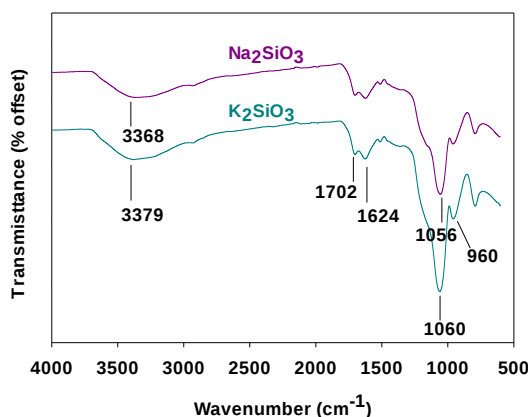
แหล่งซิลิกา	ความชื้น (wt%)	เถ้า (wt%)
Na_2SiO_3	2.33	24.73
K_2SiO_3	3.13	29.91

ตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้ มีปริมาณเถ้าอยู่ระหว่างร้อยละ 25–30 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากน้ำตาลเริ่มต้น มีปริมาณเถ้า ร้อยละ 22 โดยน้ำหนัก ดังนั้น จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มซิลิกาเข้าไปในกากน้ำตาล ทำให้มีปริมาณเถ้าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเถ้าที่เกิดขึ้นก็คือซิลิกาที่ใส่เข้าไปนั่นเอง ดังนั้น ผลการทดลองนี้ จึงเป็นการยืนยันว่า ในโครงสร้างของตัวดูดซับที่เตรียมได้มีซิลิกาอยู่ด้วย

3.3 หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวบนตัวดูดซับที่เตรียมได้

เมื่อนำตัวดูดซับคอมโพสิตคาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้จากโซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกตไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเทคนิค FTIR ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า พีกที่ตำแหน่ง 1056 cm^{-1} ของตัวดูดซับที่เตรียมจาก Na_2SiO_3 และที่ตำแหน่ง 1060 cm^{-1} ของตัวดูดซับที่เตรียมจาก K_2SiO_3 คือ หมู่ Si–O–Si [5] ส่วนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3368 และ 3379 cm^{-1} คือ O–H ของหมู่ Si–OH และ C–OH [6] และที่เลขคลื่น 960 cm^{-1} คือ

หมู่ Si-OH เช่นกัน [4] โดยที่ตำแหน่ง 1702 cm^{-1} คือ C=O ของหมู่ -COOH [9] และที่ตำแหน่ง 1624 cm^{-1} คือ อะโรมาติกคาร์บอน [9] แสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับที่เตรียมได้ทั้งคาร์บอนและซิลิกาอยู่ในโครงสร้าง



รูปที่ 2 FTIR spectra ของตัวดูดซับคอมโพสิต คาร์บอน-ซิลิกาที่เตรียมได้

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมตัวดูดซับคอมโพสิต คาร์บอน-ซิลิกา ชนิดใหม่ โดยใช้กากน้ำตาลเป็นแหล่ง คาร์บอน และใช้โซเดียมซิลิเกต และโพแทสเซียมซิลิเกต ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีราคาถูกและผลิตได้ในประเทศไทย เป็นแหล่งซิลิกา เทียบกับการใช้ TEOS ซึ่งเป็น สารเคมีที่มีราคาแพงกว่า และต้องสั่งซื้อจาก ต่างประเทศ พบว่า โซเดียมซิลิเกต และโพแทสเซียมซิลิเกต สามารถเตรียมตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าการใช้ TEOS โดยมีพื้นที่ผิว เท่ากับ 329 และ $269\text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ โดยตัวดูดซับที่เตรียมได้มีปริมาณความชื้น ร้อยละ 2.33 และ 3.13 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณเถ้า

ร้อยละ 24.73 และ 29.91 โดยน้ำหนัก ดังนั้น สารเคมี ทั้ง 2 ชนิด จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการ ผลิตตัวดูดซับ ที่มีต้นทุนต่ำ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้วิจัยจึง ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] โรงงานน้ำตาล สำนักงานคณะกรรมการอ้อย และน้ำตาลทราย. (สืบออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 8 พฤศจิกายน 2562]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.ocsb.go.th/th/factory/index.php>
- [2] Qin P, Yang Y, Zhang X, Niu J, Yang H, Tian S, Zhu J, Lu M. Highly efficient, rapid, and simultaneous removal of cationic dyes from aqueous solution using monodispersed mesoporous silica nanoparticles as the adsorbent. *Nanomaterials*. 2018; 8: 1-14.
- [3] Alghamdi AA, Al-Odauni A-B, Saeed WS, Al-Kahtani A, Alharthi FA, Aouak T. Efficient adsorption of lead (II) from aqueous phase solutions using polypyrrole-based activated carbon. *Materials*. 2019; 12: 1-16.

- [4] Xu H, Zhang H, Huang Y, Wang Y. Porous carbon/silica composite monoliths derived from resorcinol-formaldehyde/TEOS. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2010; 356: 971-6.
- [5] Furtado AMB, Wang Y, LeVan D. Carbon silica composites for sulfur dioxide and ammonia adsorption. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2013; 165: 48-54.
- [6] Ye L, Ji Z-H, Han W-J, Hu J-D, and Zhao T. Synthesis and characterization of silica/carbon composite aerogels. *Journal of the American Ceramic Society*. 2010; 93: 1156-63.
- [7] Glover TG, Dunne KI, Davis RJ, Levan MD. Carbon-silica composite adsorbent: Characterization and adsorption of light gases. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2008; 111: 1-11.
- [8] Barpaga D, Levan MD. Functionalization of carbon silica composites with active metal sites for NH₃ and SO₂ adsorption. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2016; 221: 197-203.
- [9] Nandan D, Sreenivasulu P, Konathala LNS, Kumar M, Viswanadham N. Acid functionalized carbon-silica composite and its application for solketal production. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2013; 179: 182-90.
- [10] Pilipavicius J, Sakalauskas D, Beganskiene A, Kareiva A. Synthesis of silica-carbon nanotube composite materials and their application for laser systems. *International Conference on Functional Materials and Nanotechnologies*; 2012 Apr 17-20; Riga, Latvia.
- [11] Givianrad MH, Rabani M, Saber-Tehrani M, Aberoomand-Azar P, Sabzevari MH. Preparation and characterization of nanocomposite, silica gel, activated carbon and its adsorption properties for Cd (II) ions from aqueous solution. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2013; 17: 329-35.
- [12] Clarke MA. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*. 2nd ed. Academic Press: San Diego; 2003.

- [13] Sun X, Yu W, Yan J, Li J, Jin G, Feng J, Guo Z, Liang X. Mesoporous silica-carbon composites fabricated by a universal strategy of hydrothermal carbonization. Controllable synthesis and applications. RSC Advances. 2018; 8: 27207-15.
- [14] Yu Z-H, Zhai S-R, Guo H, Lv T-M, Song Y, Zhang F, Ma H-C. Removal of methylene blue over low-cost mesoporous silica nanoparticles prepared with naturally occurring diatomite. Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2018; 88: 541-50.
- [15] Pang J, Fu F, Ding Z, Lu J, Li N, Tang B. Adsorption behaviors of methylene blue from aqueous solution on mesoporous birnessite. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2017; 77: 168-76.
- [16] Marrakchi F, Ahmed MJ, Khanday WA, Asif M, Hameed BH. Mesoporous-activated carbon prepared from chitosan flakes via single-step sodium hydroxide activation for the adsorption of methylene blue. International Journal of Biological Macromolecules. 2017; 98: 233-9.