

การปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับที่เตรียมจากเปลือกไข่ ด้วยออกไซด์โลหะสำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบด

The Surface Modification of the Adsorbent Prepared from Egg Shell by Metal Oxide for CO₂ Adsorption in Fluidized Bed Reactor

วรารณ เปียสุวรรณ¹ เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ²
และ เสาวลักษณ์ ชานูชัยฤกษ์^{1*}

Varaporn Peasuwan¹, Benjapon Chalermssinsuwan²
and Saowaluck Chanchairoek^{1*}

Received: 25 May 2023

Revised: 28 August 2023

Accepted: 27 October 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยเลือกใช้ขี้เถ้าเปลือกไข่ในชุมชนเป็นวัสดุตั้งต้น เปลือกไข่ซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลักจะถูกเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้ผ่านปฏิกิริยาการเผาที่อุณหภูมิสูง ปัจจัยในขั้นตอนของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ที่มีผลต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ที่เลือกศึกษาได้แก่ อัตราส่วนโดยอะตอมของไทเทเนียมต่อนิกเกิล ระยะเวลาในการรีดิวซ์นิกเกิล และอุณหภูมิในการเผา ผลของการศึกษาพบว่าการใช้อัตราส่วนโดยอะตอมของไทเทเนียมต่อนิกเกิลที่ไม่เท่ากันจะให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET สูงกว่าการใช้อัตราส่วนโดยอะตอมของไทเทเนียมต่อนิกเกิลที่เท่ากัน

¹ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10220

¹ Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Phranakorn Rajabhat University, Bangkok, Thailand 10220

² ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

² Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 10330

*ผู้รับผิดชอบประสานงาน (Corresponding author) e-mail: saowaluck_bh@yahoo.com

ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาตัวดูดซับจะส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะ BET เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มเวลาในการรีดิวซ์นิกเกิลจะส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ลดลง นอกจากนี้พบว่าสถานะการปรับปรุงพื้นผิวที่ใช้ น้ำหนักอะตอมของไทเทเนียมต่อนิกเกิลเท่ากับ 1:1 ระยะเวลาในการรีดิวซ์นิกเกิล 60 นาที และอุณหภูมิในการเผา 900 องศาเซลเซียส จะให้ตัวดูดซับที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET มากที่สุดเท่ากับ 7.37 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ จากการทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดโดยเลือกตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสถานะการทดลองที่ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET สูงที่สุด พบว่าตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้และความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 22.12 มิลลิกรัมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ มีค่ามากกว่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวซึ่งเท่ากับ 10.5 มิลลิกรัมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับที่สถานะการดูดซับเดียวกัน

คำสำคัญ: เปลือกไข่ แคลเซียมออกไซด์ ปรับปรุงพื้นผิว การดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์

ABSTRACT

This research studied the effect of modified surface of calcium oxide (CaO) adsorbent on the CO₂ adsorption by using local eggshell waste as an adsorbent raw material. Egg shell is a main source of calcium carbonate (CaCO₃) which can be converted to CaO via calcination reaction. The studying factors in the surface modifying step which affecting the BET specific surface area were atomic ratio of Titanium to Nickel, Nickel reducing time and calcination temperature. The results showed that the adsorbent with the different atomic ratio of Titanium to Nickel gave more BET specific surface area than using the same atomic ratio. The increasing of calcination temperature increased the BET specific surface area. However, the increasing of Nickel reducing time decreased the BET specific surface area. Moreover, the surface modified adsorbent which atomic ratio of Titanium to Nickel 1:1, Nickel reducing time in 60 min and calcination temperature at 900°C gave the highest BET specific surface area of 7.37 m²/g sorbent. When choosing the maximum BET surface area of modified adsorbent for CO₂ adsorption test in fluidized bed reactor, the results revealed that the modified surface calcium oxide adsorbent was capable to adsorb CO₂ with 22.12 mg CO₂/g sorbent. The adsorption capacity was higher than that of the CaO adsorbent without modification which was 10.5 mg CO₂/g sorbent at the same adsorption condition.

Keywords: Egg shell; Calcium oxide; Surface modification; Adsorption; CO₂

บทนำ

การขยายตัวของอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน ส่งผลให้มีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งถูกปล่อยออกมาจากกิจกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานเป็นหนึ่งในกลุ่มแก๊สที่มีอิทธิพลต่อการเกิดภาวะโลกร้อน กล่าวคือเมื่อพื้นผิวโลกคายความร้อนออกมา แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจะดูดกลืนความร้อนนั้นและไม่ยอมให้คลื่นความร้อนนั้นผ่านออกไป ทำให้เกิดการเก็บสะสมความร้อนอยู่ภายในชั้นบรรยากาศ เป็นผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นและเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่สัมพันธ์กับความต้องการในการใช้พลังงานฟอสซิลในอุตสาหกรรมนั้น ทำให้เกิดความพยายามที่จะลดปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ จากการประชุมคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศชี้ให้เห็นว่าทุกประเทศต้องมีการจัดทำข้อเสนอและแผนปฏิบัติการที่จริงจังมากขึ้นที่จะรักษาอุณหภูมิของผิวโลกไม่ให้เพิ่มสูงขึ้นเกิน 1.5 องศาเซลเซียส เพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการลดอุณหภูมิของผิวโลกและเพื่อจำกัดผลกระทบจากสภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้น การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิต้องถูกลดปริมาณลงร้อยละ 45 (เทียบกับปริมาณที่ปลดปล่อยของปี ค.ศ. 2010) ภายในปี ค.ศ. 2030 และต้องมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิเป็นศูนย์ ภายในปี ค.ศ. 2050 [1, 2] ในการลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ สามารถทำได้หลายวิธีการ ได้แก่ เพิ่มการใช้พลังงานหมุนเวียน ปลูกต้นไม้เพิ่มแหล่งพื้นที่สีเขียว และการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งปล่อยแก๊สอื่นๆในแหล่งกักเก็บ เป็นต้น [2]

กระบวนการดูดซับเป็นเทคโนโลยีในการดักจับและแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง ข้อดีของกระบวนการดูดซับ ได้แก่ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง (มากกว่าร้อยละ 85 โดยปริมาตรของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) เป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพที่ผันกลับได้ ตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เป็นต้น [3] การใช้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ในการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นนับเป็นทางเลือกหนึ่ง โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นวัฏจักรของปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและแคลซิเนชัน (Carbonation and calcination cycle) อุณหภูมิดำเนินงานของแต่ละปฏิกิริยาจะเท่ากับ 600 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ [3] ข้อดีของอุณหภูมิดำเนินงานที่ค่อนข้างสูงนี้ ทำให้สามารถประยุกต์ระบบการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นี้ได้กับระบบผลิตพลังงานขนาดใหญ่ที่มีขั้นตอนของการเผาไหม้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการ เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม โรงไฟฟ้าพลังถ่านหิน เพราะมีแนวโน้มที่จะสามารถผนวกขั้นตอนของการดักจับแก๊สให้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการได้ [4] นอกจากนี้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น หินปูน เปลือกของสัตว์ทะเลและเปลือกไข่ชนิดต่างๆ เป็นต้น [4] แต่กระบวนการเตรียมตัวดูดซับจากหินปูนซึ่งเป็นแหล่งแคลเซียมคาร์บอเนตส่วนใหญ่ในธรรมชาติเป็นสาเหตุให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ปัญหาดินเสื่อมโทรมและปัญหาดินถล่ม การศึกษาหาแหล่งแคลเซียมคาร์บอเนตจากแหล่งธรรมชาติอื่นๆที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและราคาไม่แพงมาทดแทนแหล่งหินปูนจึงมีความสำคัญ ซึ่งเปลือกไข่ นับเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลักมากถึงร้อยละ 90 และเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตโครงสร้างเดียวกันกับที่พบในหินปูนตามธรรมชาติ [5]

อย่างไรก็ตามในกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์เมื่อผ่านการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชันซ้ำๆระหว่างขั้นตอนการดูดซับที่อุณหภูมิสูงจะเกิดเป็นชั้นแคลเซียมคาร์บอเนตที่บริเวณพื้นผิว ตัวดูดซับจะเกิดการรวมตัวและการหลอมรวม (Aggregation and Sintering) ส่งผลให้พื้นที่

ผิวของตัวดูดซับลดลง ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สจึงลดลงตามไปด้วย ในงานวิจัยต่างๆ ได้พยายามที่จะปรับปรุงตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊ส ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการปรับปรุงออกเป็น 3 รูปแบบหลักคือ 1) พัฒนาการสังเคราะห์ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงขึ้น เช่น การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตระดับนาโนเมตรเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ เป็นต้น 2) การเตรียมตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์บนตัวรองรับที่ไม่ว่องไว เช่น อะลูมิเนียม ไทเทเนียม แมกนีเซียม เซอร์โคเนียม เป็นต้น และ 3) การปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ ได้แก่ การใช้กรดอินทรีย์ในการปรับสภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมตัวดูดซับเพื่อเพิ่มรูพรุนบริเวณพื้นผิว เป็นต้น [1, 5-6]

สำหรับการปรับปรุงตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ในงานวิจัยที่ผ่านมา Jing และคณะได้ปรับปรุงตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์โดยตัวดูดซับถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีการโซล-เจล ใช้อัตราส่วนโดยมวลของแคลเซียมออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์เท่ากับ 9:1 เผาตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส พบว่าจะให้ค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 13.1 ตารางเมตรต่อกรัมตัวดูดซับและความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 7.6 มิลลิโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ เมื่อนำไปผ่านการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับเป็นจำนวน 50 รอบพบว่าความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์จะยังมีค่าสูงกว่าถึงร้อยละ 10 [7] ส่วนการปรับปรุงตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ด้วยด้วยโลหะแมงกานีสโดย Li และคณะได้สังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ขึ้นผ่านปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล ตัวดูดซับที่ได้จะมีโครงสร้างเป็นทรงกลมขนาดไมโครเมตรมีผนังสองชั้น ด้านในกลวง เมื่อเติมโลหะแมงกานีสลงในขั้นตอนการสังเคราะห์พบว่าแมงกานีสกระจายตัวและแทรกอยู่ในโครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ได้ดีทำให้โครงสร้างผลึกมีความแข็งแรง เมื่อนำไปทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับผ่านเป็นวัฏจักรของปฏิกิริยาคาร์บอนชันและแคลชันจำนวน 25 รอบ พบว่าความสามารถในการดูดซับแก๊สลดลงไปเพียงร้อยละ 15 เท่านั้น ดังนั้นการเติมแมงกานีสสามารถป้องกันการหลอมรวมของผลึกแคลเซียมออกไซด์เมื่อผ่านการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชันซ้ำหลายรอบได้ [8]

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ด้วยการเคลือบโลหะออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับ โดยเลือกใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์มาปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าฟิล์มบางของโลหะออกไซด์ที่เคลือบผิวของตัวดูดซับจะช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคของแคลเซียมออกไซด์เคลื่อนย้าย (Migration) และหลอมรวมเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงได้ [9] นอกจากนี้จะศึกษาตัวแปรในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวที่ส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ซึ่งเป็นค่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ โดยตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์จะเตรียมขึ้นจากเปลือกไข่ที่หาได้ในขยะสดชุมชนโดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตให้เป็นแคลเซียมออกไซด์ วิธีการนี้นอกจากจะเป็นการช่วยลดปัญหาขยะแล้วยังเป็นการเปลี่ยนขยะให้เป็นวัสดุที่มีมูลค่าและเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ในด้านการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งในท้องถิ่นอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมเปลือกไข่สำหรับตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์

นำเปลือกไข่ไก่มาล้างน้ำให้สะอาด ตากให้แห้ง จากนั้นนำไปบดด้วยครกบด ทำการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน โดยคัดขนาดให้มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 149 ไมครอน (ตะแกรงร่อน เบอร์ 100 ยูเอส เมช) และ 74 ไมครอน (ตะแกรงร่อน เบอร์ 200 ยูเอส เมช) ตามลำดับ บรรจุในภาชนะป้องกันความชื้นเพื่อเตรียมไว้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับเตรียมตัวดูดซับต่อไป

2. การเตรียมตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

นำเปลือกไข่ที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว 20 กรัมใส่ลงในชามกระเบื้อง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ จากนั้นเก็บตัวดูดซับที่ได้ในภาชนะป้องกันความชื้นไว้สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับและการทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

3. การปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ด้วยการเคลือบโลหะออกไซด์

ในการปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับที่เตรียมจากเปลือกไข่ด้วยโลหะออกไซด์ ได้เลือกนิกเกิลออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่ใช้เคลือบพื้นผิว โดยศึกษาผลของตัวแปรในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวที่มีผลต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ ได้แก่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอมระหว่างโลหะไทเทเนียมต่อนิกเกิลที่ 2:1 1:1 และ 1:2 ระยะเวลาในการรีดิวซ์โลหะนิกเกิลที่ 30 และ 60 นาที และอุณหภูมิในการเผาเปลือกไข่เพื่อเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตให้เป็นแคลเซียมออกไซด์ที่ 500 700 และ 900 องศาเซลเซียส โดยค่าการตอบสนองที่สนใจศึกษาคือพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ของตัวดูดซับที่เตรียมขึ้น

การปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยไทเทเนียมออกไซด์ นำเปลือกไข่ที่บดละเอียดและผ่านการคัดขนาดแล้ว 18 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปใส่ในอ่างคลื่นเสียงความถี่สูง เป็นเวลา 10 นาที นำของผสมที่ได้มาผสมต่อ เติมน้ำละลายเตตระโบรไมด์ไททานเตต (Ti(OC₄H₉)₄ 97%, Sigma – Aldrich) ในปริมาณที่กำหนด โดยค่อย ๆ เติมน้ำลงไปทีละหยด กวนผสมทิ้งไว้เป็นเวลา 60 นาทีโดยควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยารีดิวซ์โลหะไทเทเนียมให้อยู่ที่ 15 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลาแล้ว นำไปกรองของแข็งที่ได้ด้วยการกรองแบบสุญญากาศ ล้างตะกอนของแข็งที่ได้ด้วยเอทานอล แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปเก็บในภาชนะป้องกันความชื้นเพื่อเตรียมสำหรับขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยโลหะนิกเกิลต่อไป [10]

การปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยนิกเกิลออกไซด์ นำตัวดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไทเทเนียมแล้วปริมาณ 18 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปใส่ในอ่างคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นเวลา 10 นาที นำของผสมที่ได้มาผสมต่อ เติมน้ำละลายนิกเกิลไดอะซิเตรต (Ni(OCOCH₃)₂, Sigma – Aldrich) ในปริมาณที่กำหนด โดยค่อย ๆ เติมน้ำลงไปทีละหยด กวนผสมทิ้งไว้เป็นเวลา 60 นาที ครบเวลาเติมน้ำละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพื่อรีดิวซ์นิกเกิล กวนผสมสารละลายทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด เมื่อครบเวลากรองของแข็งที่ได้ด้วยการกรองแบบสุญญากาศ ล้างตะกอนของแข็งที่ได้ด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำตะกอนของแข็งไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยการเปลี่ยนนิกเกิลไดอะซิเตรต (Ni²⁺) ให้เป็นอนุภาคของโลหะนิกเกิลด้วยตัวรีดิวซ์จะแสดงดังสมการที่ (1)



ในการเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตให้เป็นตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ รวมทั้งการเปลี่ยนโลหะไทเทเนียมและนิกเกิลที่อยู่บนพื้นผิวให้เป็นโลหะออกไซด์ จะนำตัวดูดซับที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 700 หรือ 900 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับสภาวะที่เลือกใช้ในการปรับปรุงตัวดูดซับเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการเคลือบโลหะออกไซด์ จากนั้นเก็บตัวดูดซับที่ได้ในภาชนะป้องกันความชื้นไว้สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับและการทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

4. การศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด [11]

การทดสอบความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะดำเนินการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด เริ่มต้นการทดลองด้วยการใช้แก๊สไนโตรเจนไล่ความชื้นภายในท่อไรเซอร์โดยใช้อัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที เมื่อสังเกตไม่พบฝ้าเกาะที่ผนังของท่อไรเซอร์ ให้เริ่มตั้งอุณหภูมิภายในท่อไรเซอร์ที่ 600 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิภายในท่อมีค่าตามที่กำหนด นำตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วปริมาณ 10 กรัมใส่ลงในท่อไรเซอร์ เปลี่ยนชนิดของแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยปริมาตร (12%vol CO₂ in N₂) โดยใช้อัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที เมื่อเริ่มทดสอบการดูดซับจะบันทึกข้อมูลผ่านโปรแกรม Real time gas analyzer ทั้งนี้จะบันทึกค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับร้อยละ 12 โดยปริมาตรหรือตัวดูดซับไม่สามารถใช้งานได้อีก

5. การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาและปริมาณของโลหะออกไซด์บนพื้นผิวของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (SEM-EDX; รุ่น QUANTA 450 (FEI)) พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับวิเคราะห์ด้วยเทคนิคบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller. Method, BET; รุ่น ASAP 2020 V4.00) โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงผิว ตรวจสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD; รุ่น Model D8 Advance: Bruker AXS, Germany)

ผลการวิจัย

1. ผลของการศึกษาตัวแปรในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโลหะออกไซด์ที่มีต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ของตัวดูดซับ

ผลการศึกษาตัวแปรในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโลหะออกไซด์ที่มีต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET แสดงดังตารางที่ 1 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ของตัวดูดซับกับการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับแสดงดังรูปที่ 1

Table 1 BET specific surface area of surface modified calcium oxide adsorbent at various conditions.

Sample	Parameters			Response
	Atomic weight ratio of Ti : Ni	Ni reducing time (min)	Calcination temperature (°C)	BET specific surface area (m ² /g adsorbent)
1	2:1	60	500	6.66
2	1:1	60	500	2.91
3	1:2	60	500	5.37
4	1:1	30	500	5.96
5	1:1	60	700	5.29
6	1:1	60	900	7.37

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักอะตอมของไทเทเนียมต่อนิกเกิลที่อุณหภูมิในการเผาเท่ากันและระยะเวลาในการรีดิวซ์นิกเกิลเท่ากันดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 1(a) พบว่าเมื่ออัตราส่วนของโลหะทั้งสองมีค่าเท่ากันจะส่งผลให้พื้นที่ผิว BET มีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนที่ใช้โลหะชนิดใดชนิดหนึ่งมีค่าสูง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อใช้อัตราส่วนของโลหะชนิดใดชนิดหนึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณอนุภาคของโลหะชนิดนั้นๆในระบบที่เกิดจากการรีดิวซ์ไอออนของโลหะจะมีมากกว่าและมีโอกาสที่จะเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากอนุภาคของโลหะหลังจากถูกรีดิวซ์จะมีขนาดเล็กและมีพลังงานพื้นผิวสูงทำให้พื้นผิวของแคลเซียมออกไซด์ขณะนั้นถูกปกคลุมด้วยโลหะออกไซด์สองชนิดที่มีขนาดอนุภาคไม่เท่ากันมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเนื่องจากช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดเล็กกับอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งความขรุขระของพื้นผิวที่มากขึ้นเป็นผลให้ค่าพื้นที่ผิว BET มากขึ้น [12-14]

เมื่อพิจารณารางที่ 1 และรูปที่ 1(b) ที่น้ำหนักอะตอมของไทเทเนียมต่อนิกเกิลเท่ากันและอุณหภูมิในการเผาเท่ากันพบว่า เมื่อระยะเวลาในการรีดิวซ์มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิว BET ลดลงเนื่องจากเวลาในการรีดิวซ์เพิ่มขึ้น จะทำให้จำนวนอนุภาคนิกเกิลในระบบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิของนิกเกิลขนาดเล็กที่อยู่ในระบบเป็นระยะเวลานานจะสามารถรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากมีพลังงานพื้นผิวสูง อนุภาคที่ใหญ่ขึ้นของนิกเกิลนั้นนอกจากจะทำให้พื้นที่ผิวของนิกเกิลที่ใช้ในการดูดซับลดลงแล้วยังอาจไปบดบังอนุภาคของไทเทเนียมและพื้นผิวของตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับทั้งหมดลดลงได้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang และคณะ ที่ได้กล่าวว่าพื้นที่ผิวจะลดลงตามปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากนิกเกิลจะไปเพิ่มขนาดตัวดูดซับให้ใหญ่ขึ้นทำให้พื้นที่ผิวลดลง [15]

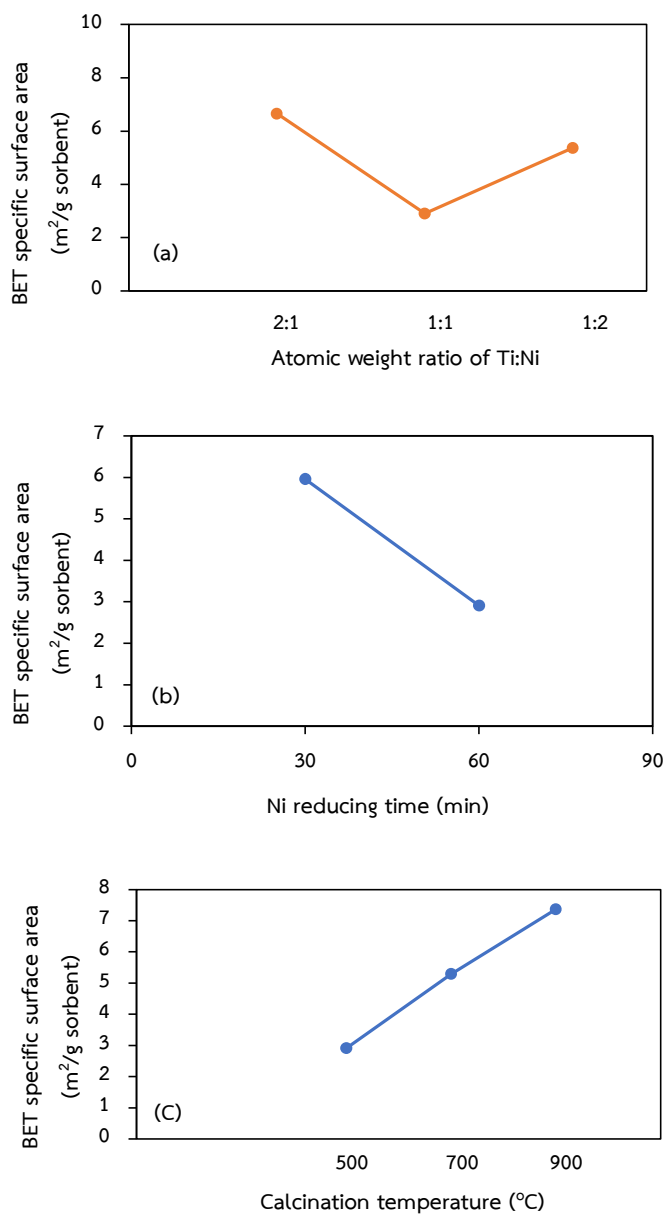


Figure 1 Effect of parameters in the sorbent preparation step on the BET specific surface area of the surface modified adsorbents. (a) Effect of Ti:Ni atomic weight ratio (b) Effect of Nickel reducing time (c) Effect of sorbent calcination temperature.

เมื่อพิจารณาตารางที่ 1 และรูปที่ 1(c) ที่น้ำหนักอะตอมของไทเทเนียมต่อนิกเกิลเท่ากันและระยะเวลาในการรีดิวซ์เท่ากันโดยปกติเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าพื้นที่ผิว BET ลดลงเนื่องจากในขณะที่ย้อนภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเข้าสู่กระบวนการเผาอุณหภูมิจะสูงขึ้นภายในอุณหภูมิครวมถึงเกิดกระบวนการ หลอมรวมของอนุภาค (Sintering) ขึ้นทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ค่าพื้นที่ผิว BET ลดลง [16] แต่จากการปรับปรุงพื้นที่ผิวของแคลเซียมออกไซด์โดยการเคลือบด้วยโลหะออกไซด์ทำให้ผลที่ได้คือเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นค่าพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นเป็นไปได้ว่าการเคลือบผิวมีส่วนช่วยในการป้องกัน การหลอมรวมของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ได้และในขณะเดียวกันการเผาที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้แคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลให้มีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นด้วย [17]

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของชนิดของโลหะที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นที่ผิวของตัวดูดซับพบว่าเมื่อปริมาณของไทเทเนียมเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 40) พบว่าพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นร้อยละ 120 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับปริมาณของนิกเกิลที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 400) พบว่าพื้นที่ผิว BET จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 84 แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณโลหะไทเทเนียมจะส่งผลมากต่อพื้นที่ผิว BET

2. ผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมและนิกเกิลแสดงดังตารางที่ 2 โดยวิเคราะห์จากตัวดูดซับที่ใช้สภาวะในการรีดิวซ์โลหะนิกเกิลด้วยเวลา 60 นาที และอุณหภูมิในการเผาเพื่อเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตให้เป็นแคลเซียมออกไซด์ที่ 500 องศาเซลเซียส

Table 2 The amount of composition elements on the surface of modified calcium oxide adsorbent in different atomic weight ratios of Ti:Ni.

Sample	Atomic weight ratios of Ti:Ni by theory	Atomic weight ratios of Ti:Ni by EDX technique
1	2:1	58.9: 41.0 (1.4:1)
2	1:1	51.6: 51.6 (1:1)
3	1:2	19.4: 80.6 (1:4.1)

จากตารางที่ 2 พบว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวนั้นมีโลหะไทเทเนียมและนิกเกิลเกาะอยู่ที่พื้นผิว โดยตัวดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยอัตราส่วนระหว่างไทเทเนียมต่อนิกเกิลเท่ากับ 1:1 จะเป็นเพียงตัวอย่างเดียวที่ผลการวิเคราะห์พื้นผิวได้อัตราส่วนเท่ากับปริมาณทางทฤษฎี สำหรับตัวดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยอัตราส่วนระหว่างไทเทเนียมต่อนิกเกิลเท่ากับ 2:1 และ 1:2 นั้น พบว่าปริมาณของโลหะไทเทเนียมที่ได้จะน้อยกว่าปริมาณทางทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิระหว่างการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของโลหะไทเทเนียมให้คงที่ได้ อาจส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์

3. ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

การศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดนั้น จะเลือกตัวดูดซับที่มีค่าพื้นผิวจำเพาะมากที่สุดมาทำการทดสอบ เนื่องจากพื้นที่ผิวเป็นปัจจัยที่สำคัญมีผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้นด้วย [6] จากผลการทดลองจึงได้เลือกตัวอย่างที่ 6 จากตารางที่ 1 มาทดสอบความสามารถของตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว จากข้อมูลที่รวบรวมผ่านโปรแกรม Real time gas analyzer เมื่อสร้างกราฟเบรคทูธ (Breakthrough curve) แล้ว ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2

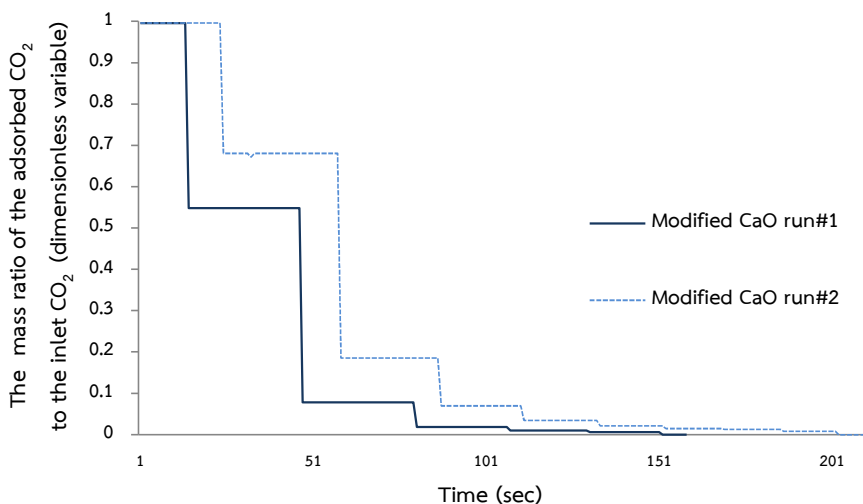


Figure 2 Breakthrough curves for CO₂ adsorption of surface modified calcium oxide adsorbents in a fluidized bed reactor.

จากรูปที่ 2 พบว่า ในการดูดซับครั้งที่ 1 ตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้หมดภายในช่วงเวลา 14 วินาที และหลังจากนั้นความสามารถของตัวดูดซับจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งถึงวินาทีที่ 150 จะไม่สามารถดูดซับได้อีก ส่วนการดูดซับครั้งที่ 2 สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้หมดภายในช่วงเวลา 24 วินาที หลังจากนั้นความสามารถของตัวดูดซับจะลดลงจนไม่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกที่วินาทีที่ 230 ซึ่งความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 22.12 มิลลิกรัมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ (mg CO₂/ g sorbent) ซึ่งสูงกว่าตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวที่สภาวะการดูดซับเดียวกัน โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 10.5 มิลลิกรัมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ และมีค่าพื้นที่ผิว BET เท่ากับ 5.23 [18] ทั้งนี้เนื่องจากออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมและนิกเกิลที่พื้นผิวของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์สามารถป้องกันการเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคตัวดูดซับขณะเกิดปฏิกิริยาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้นเมื่อเทียบกับตัวดูดซับที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว [1]

4. ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิววิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงดังรูปที่ 3

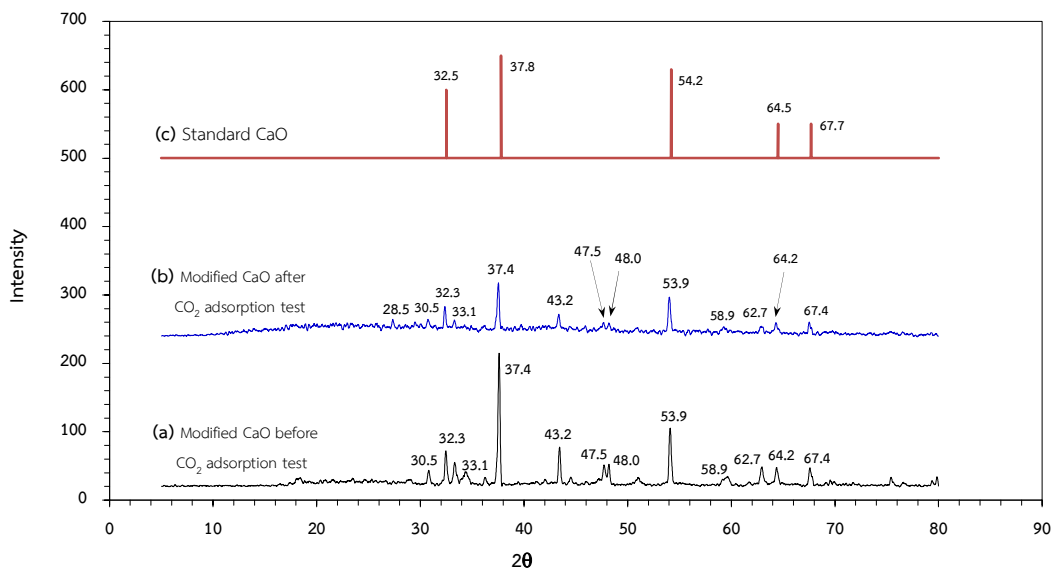


Figure 3 XRD analysis of surface modified calcium oxide adsorbents

(a) before the CO₂adsorption test

(b) after the CO₂ adsorption testand

(c) standard diffraction pattern of CaO.

จากรูปที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวก่อนและหลังนำไปดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าตัวดูดซับก่อนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แสดงโครงสร้างของแคลเซียมออกไซด์ซึ่งมีค่า 2θ เท่ากับ 32.2° 37.4° 53.9° 64.2° 67.4° ตามลำดับ รวมทั้งแสดงโครงสร้างของโลหะออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวคือโครงสร้างของไทเทเนียมออกไซด์ที่ค่า 2θ เท่ากับ 47.5° 48.0° 50.6° ตามลำดับ [19] และโครงสร้างของนิกเกิลออกไซด์ ที่ค่า 2θ เท่ากับ 30.5° 33.1° 37.4° 43.2° 58.9° 62.7° ตามลำดับ [20] เมื่อพิจารณาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับแก๊สแล้วจะมีองค์ประกอบที่เปลี่ยนไป โดยพบพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 28.5° ปรากฏเพิ่มขึ้นในโครงสร้างซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นการยืนยันว่ามีปฏิกิริยาการบอเนชันเกิดบนตัวดูดซับจริงดังแสดงในสมการที่ 2



ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับก่อนและหลังการทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4 จากรูป 4(a) และ 4(b) พบว่าก่อนนำไปดูดซับแก๊ส ตัวดูดซับมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลแดง พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ มีช่องว่างขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป หลังทดสอบการดูดซับรูปดังแสดงในรูปที่ 4(c) ตัวดูดซับยังมีลักษณะเป็นผงละเอียดแต่เปลี่ยนเป็นสีเทาอมเขียว ทั้งนี้เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นไทเทเนียมคาร์บอเนตซึ่งให้สีขาว ส่วนนิกเกิลออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นนิกเกิลคาร์บอเนตซึ่งให้สีเขียวอ่อน [21]

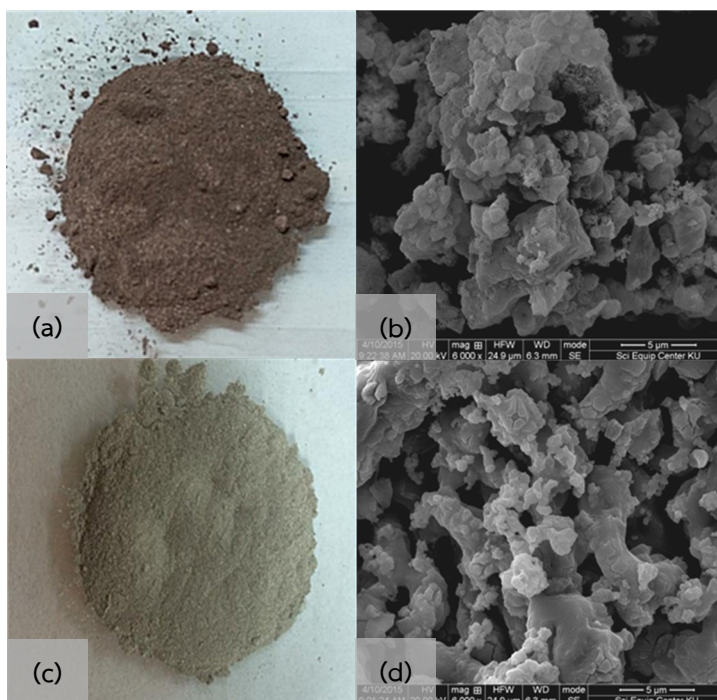


Figure 4 Modified surface calcium oxide adsorbents with metal oxide and SEM images of the modified adsorbents morphology; (a) and (b) before the CO₂ adsorption test, (c) and (d) after the CO₂ adsorption test.

นอกจากนี้จากรูป 4(d) หลังผ่านการดูดซับยังพบช่องว่างขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป ไม่พบการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ของตัวดูดซับหลังจากผ่านปฏิกิริยาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโลหะออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้เติมออกไซด์ของโลหะที่ไม่ว่องไวลงบนตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ พบว่ามีส่วนช่วยป้องกันการเกิดการรวมตัวของเกรนแคลเซียมออกไซด์ขนาดเล็กและสามารถปรับปรุงความสามารถในการต้านการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับเมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานานได้ [1]

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ในการเตรียมตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์สามารถใช้เปลือกไข่ซึ่งเป็นขยะเหลือทิ้งที่มีคุณค่าและเป็นแหล่งแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้ ในส่วนของการปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับด้วยการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์ลงบนพื้นผิวนั้น การใช้อัตราส่วนโดยอะตอมระหว่างไทเทเนียมต่อนิกเกิลที่ไม่เท่ากันและการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเพื่อเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตให้เป็นแคลเซียมออกไซด์จะมีผลทำให้ค่าพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดที่สภาวะการดูดซับเดียวกัน บ่งชี้ว่า การปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และนิกเกิลออกไซด์สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เมื่อเทียบกับตัวดูดซับที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเคมีและศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร รวมทั้งขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยรวมถึงบุคลากรทุกท่านสำหรับการสนับสนุนในการทำวิจัย

References

- [1] Yi-qi, G., et al. (2021). Research Progress of Calcium-Based Adsorbents for CO₂ Capture and Anti-Sintering Modification. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 49(7), 998-1013.
- [2] Hong, W. Y. (2022). A Techno-Economic Review on Carbon Capture, Utilisation and Storage Systems for Achieving a Net-Zero CO₂ Emissions Future. *Carbon Capture Science & Technology*, 3, 100044.
- [3] Xiao, G., et al. (2011). Advanced Adsorbents Based on MgO and K₂CO₃ for Capture of CO₂ at Elevated Temperatures. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(4), 634-639.
- [4] Abanades, J. C., et al. (2011). Experimental Validation of *In Situ* CO₂ Capture with Cao During the Low Temperature Combustion of Biomass in a Fluidized Bed Reactor. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(3), 512-520.
- [5] Hsieh, S. L., et al. (2021). CaO Recovered from Eggshell Waste as a Potential Adsorbent for Greenhouse Gas CO₂. *Journal of Environmental Management*, 297, 113430.
- [6] Sun, H., et al. (2018). Progress in the Development and Application of CaO-Based Adsorbents for CO₂ Captured - A Review. *Materials Today Sustainability*, 1-2, 1-27.
- [7] Jing, J., et al. (2017). Improving CO₂ Sorption Performance of Cao/Ca₃Al₂O₆ Sorbents by Thermally Pretreated in CO₂ Atmosphere. *Energy Procedia*, 142, 3258-3263.
- [8] Li, S., et al. (2019). The Mn-Promoted Double-Shelled Caco₃ Hollow Microspheres

Research Article

Journal of Advanced Development in Engineering and Science

Vol. 14 • No. 39 • January – April 2024

- as High Efficient CO₂ Adsorbents. *Chemical Engineering Journal*, 372, 53–64.
- [9] Wu, S. F. & Zhu, Y. Q. (2010). Behavior of CaTiO₃/Nano-CaO as a CO₂ Reactive Adsorbent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49, 2701–2706.
- [10] Jassal, P. S., et al. (2022). Green Synthesis of Titanium Dioxide Nanoparticles: Development and Applications. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100361.
- [11] Kanchanaphongsawet, P. (2014). *The Study of the Effect of the Operating Variables in the Fluidized Bed Reactor on CO₂ Adsorption of the Calcium Oxide Adsorbent Prepared from Eggshell Waste*, (Undergraduate thesis, Phranakhon Rajabhat University). (in Thai)
- [12] Beetz, M., et al. (2016). *The Chemistry of Metal-Organic Frameworks-Synthesis, Characterization, and Application Volume 2*. Weinheim: Wiley-VCH.
- [13] Yekeler, M. (2007). *Handbook of Powder Technology-Particle Breakage*. Oxford: Elsevier.
- [14] Bodycomb, J., et al. (2014). *Introduction to Surface Area Analysis*. Available from https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Products/Scientific/Particle_Characterization/Webinars/Slides/TE005_V2.pdf. Accessed date: 24 May 2023.
- [15] Huang, J. Q., et al. (2008). Effect of Doped Ni²⁺ on the Dielectric Properties of NiO-BaTiO₃ Composites. *Journal of Electroceramics*, 21, 394–397.
- [16] Vieille, L., et al. (2012). Improvements of Calcium Oxide Based Sorbents for Multiple CO₂ Capture Cycles. *Powder Technology*, 228, 319–323.
- [17] Wang, Y., et al. (2013). A New Nano CaO-Based CO₂ Adsorbent Prepared Using an Adsorption Phase Technique. *Chemical Engineering Journal*, 218, 39–45.
- [18] Chuanchob, J. (2013). *The Effects of the Preparation Factors on the Properties of CO₂ Capture Sorbent Derived from Local Waste Eggshell*, (Undergraduate thesis, Phranakhon Rajabhat University). (in Thai)
- [19] Zhang, W., et al. (2012). Effects of Calcination Temperature on Preparation of Boron-Doped TiO₂ by Sol-Gel Method. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 528637.
- [20] Sim, L. C., et al. (2013). Preparation of Improved p-n Junction NiO/TiO₂ Nanotubes for Solar-Energy-Driven Light Photocatalysis. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 659013.
- [21] National Institutes of Health. *Nickel carbonate*. Available from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Nickel-carbonate>. Accessed date: 16 May 2023.