

ผลของการเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์

สำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำ

CaO-based Sorbent Promoted with K_2CO_3 for CO_2 Capture at Low Temperature

นันท์นภัส รุนรักษา (Nannaphas Runraksa)* ดร.อาทิตย์ เนรมิตตพวงศ์ (Dr.Arthit Neramittagapong)**

ดร.สุธาสิณี เนรมิตตพวงศ์ (Dr.Sutasinee Neramittagapong)**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำด้วยแคลเซียมออกไซด์ โดยทำการเตรียมตัวดูดซับด้วยการเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ และทำการทดสอบการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย K_2CO_3/CaO และ CaO ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่สภาวะภายใต้ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการทดสอบพบว่า K_2CO_3/CaO และแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า มีความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 145.66 และ 62.74 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตัวดูดซับ 1 กรัม และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD จะพบว่าตัวดูดซับ K_2CO_3/CaO มีโครงสร้างใหม่เกิดขึ้นคือ $K_2Ca(CO_3)_2$ และ $CaCO_3$ ซึ่งอาจเกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ABSTRACT

The aim of research is study carbon dioxide capture at low temperature by CaO-based sorbent. The CaO-based sorbent was prepared by doped potassium carbonate on calcium oxide. CO_2 capture was carried out over K_2CO_3/CaO sorbent and CaO in a fix bed reactor; the system was operated under atmospheric pressure and ambient temperature approximately 25°C. The results showed that the total CO_2 capture capacity of K_2CO_3/CaO and CaO reached 145.66 and 62.74 mg of CO_2/g of sorbent respectively. The X-ray diffraction (XRD) results revealed that new structures were formed during CO_2 adsorption such as $K_2Ca(CO_3)_2$ and $CaCO_3$.

คำสำคัญ: คาร์บอนไดออกไซด์ ตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ โลหะอัลคาไล

Key Words: Carbon dioxide, CaO sorbent, Alkali metal

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ปัจจุบันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ท่อไอเสียดยนต์ คิวโนห์ และจากการหายใจของมนุษย์ เป็นต้น แม้โอกาสที่จะเกิดพิษของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการทำงานจะมีไม่มากนัก แต่ถ้าเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มาก จะทำให้เป็นพิษต่อร่างกาย กล่าวคือ ถ้าหากเราอยู่ในที่ที่อับอากาศ อากาศถ่ายเทไม่สะดวก จะทำให้ร่างกายของเราได้รับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากเกินไป ซึ่งจะ ทำให้หายใจเร็ว หัวใจเต้นเร็ว กตสมอง ซึม มึนงง รู้สึกวิงเวียนศีรษะ และอาจเสียชีวิตได้ (จุฑารัตน์ และวิวัฒน์, 2555) อย่างไรก็ตามหากประเมินความเสี่ยงแล้ว โอกาสที่สถานที่ทำงาน จะเกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญในการคิดค้นวิธีการแยกและดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อลดปริมาณการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ

การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีด้วยกันหลายวิธีด้วยกัน เช่น การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation) การดูดซึมละลาย (Absorption with a solvent) และการดูดซับด้วยโมเลกุลาร์ซีฟ (Adsorption using molecular sieves) (Hayashi *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2009, 2006; Li *et al.*, 2011, 2010; Peng *et al.*, 2012; Seo *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2011) อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายที่สูง และสิ้นเปลืองพลังงานมาก อีกหนึ่งวิธีที่ช่วยในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การดูดซับทางเคมี โดยการเติมสารโลหะอัลคาไลลงบนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูง (Hayashi *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2009, 2006; Li *et al.*, 2011, 2010; Peng *et al.*, 2012; Seo *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2011) โลหะอัลคาไลที่เติมลงบนตัวรองรับจะอยู่ในรูปของโลหะอัลคาไลคาร์บอเนต เช่น โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate, K_2CO_3) โดยโลหะอัลคาไลคาร์บอเนตที่เติมลงไปจะทำ

ปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์โลหะอัลคาไลไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Alkali metal hydrogen carbonate) ซึ่งการเติมโลหะอัลคาไลลงบนตัวรองรับนั้นจะทำให้ตัวดูดซับ สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (50-70 องศาเซลเซียส) และง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยตัวรองรับที่นิยมใช้ในการรองรับการเติมสารโลหะอัลคาไล คือ ถ่านกัมมันต์ โฟทาไมนออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ เป็นต้น (Lee *et al.*, 2009, 2006)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการเติมโลหะอัลคาไลบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์สำหรับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยจะทำการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพ ก่อนและหลังการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น อัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิ เป็นต้น

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

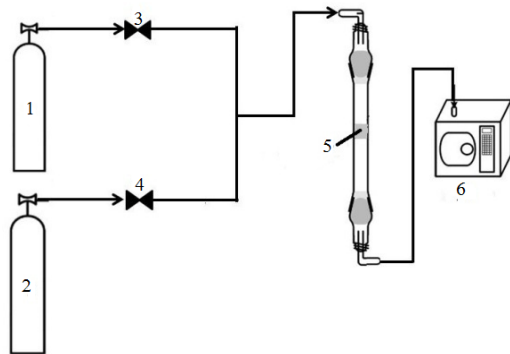
การเตรียมตัวดูดซับ

ละลายโลหะอัลคาไล (โพแทสเซียมคาร์บอเนต, โซเดียมคาร์บอเนต) 2.5 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 15 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายได้ลงบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ 5 กรัม ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำให้แห้ง โดยทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทำการบด แล้วนำไปเผาภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพด้วยเครื่อง XRD (X-ray diffraction) และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิว (Surface area analysis)

การทดสอบการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ทำการทดสอบการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร ด้วยตัวดูดซับที่เตรียมได้ และ แคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า ในการ

ทดสอบใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ (Fixed bed reactor) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ที่ปฏิบัติการภายใต้ความดันบรรยากาศ ภายในคอลัมน์ บรรจุสารดูดซับปริมาณ 1 กรัม โดยทำการวัดปริมาณอัตราการไหลรวมของอากาศผสม และวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งขาเข้าและขาออกด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัด TCD (Gas Chromatography) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

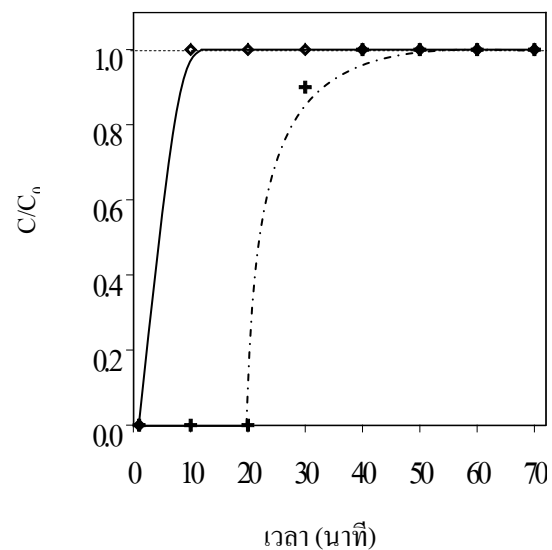
1. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 2. อากาศอัด
- 3 และ 4. Flow meter
5. เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง
6. Gas Chromatography (GC/TCD)

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเติมโลหะอัลคาไลบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ ที่มีผลต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุภายใต้ความดันบรรยากาศ ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 5 โดยปริมาตร อัตราการไหลของก๊าซผสม (อากาศ + คาร์บอนไดออกไซด์) เท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 1, 2 และ 3 กรัม ตามลำดับ

จากการทดลองการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะแสดงผลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน C/C_0 โดย C คือความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใดๆ และ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

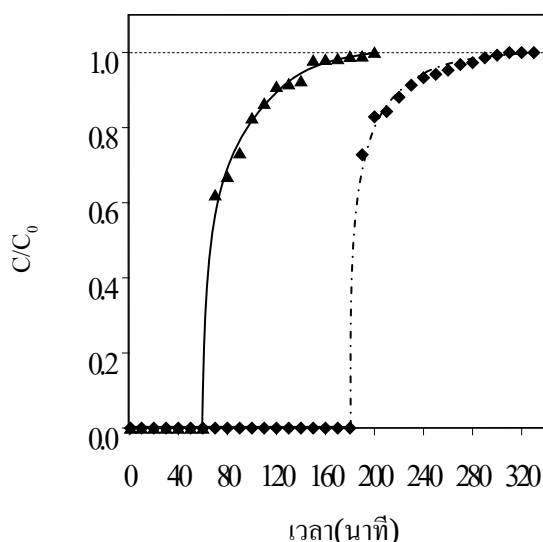
ผลของการเติมโลหะอัลคาไล



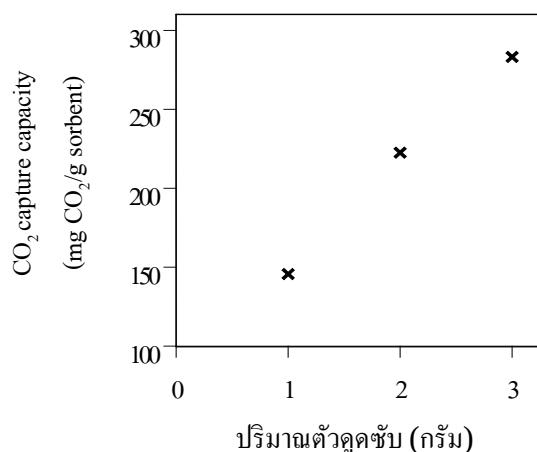
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 เทียบกับเวลาของตัวดูดซับ (♦) แคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า (+) K_2CO_3/CaO ปริมาณ 1 กรัม

ภาพที่ 2 เป็นการทดลองการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า และ K_2CO_3/CaO ปริมาณ 1 กรัม โดยทำการเปรียบเทียบค่า C/C_0 กับเวลา พบว่า ในช่วง 30 นาทีแรก K_2CO_3/CaO มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0 ซึ่งสามารถบอกได้ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถูกดักจับไว้ทั้งหมด ในขณะที่แคลเซียมออกไซด์เกรดการค้ามีประสิทธิภาพในการดักจับแค่ในช่วง 10 นาทีแรกเท่านั้น และเมื่อนำมาคำนวณหาอัตราการดูดซับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตัวดูดซับ จะได้อัตราการดูดซับของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าเท่ากับ 62.74 มิลลิกรัมต่อปริมาณสารดูดซับ 1 กรัม และ

K_2CO_3/CaO เท่ากับ 145.66 มิลลิกรัมต่อปริมาณสารดูดซับ 1 กรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมโลหะอัลคาไลลงบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ ทำให้ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 เทียบกับเวลาของตัวดูดซับ K_2CO_3/CaO ; (▲) ปริมาณ 2 กรัม (◆) ปริมาณ 3 กรัม



ภาพที่ 4 ความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณตัวดูดซับต่างกัน

ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ในรูปของ C/C_0 กับเวลา โดยเปรียบเทียบปริมาณของตัวดูดซับ

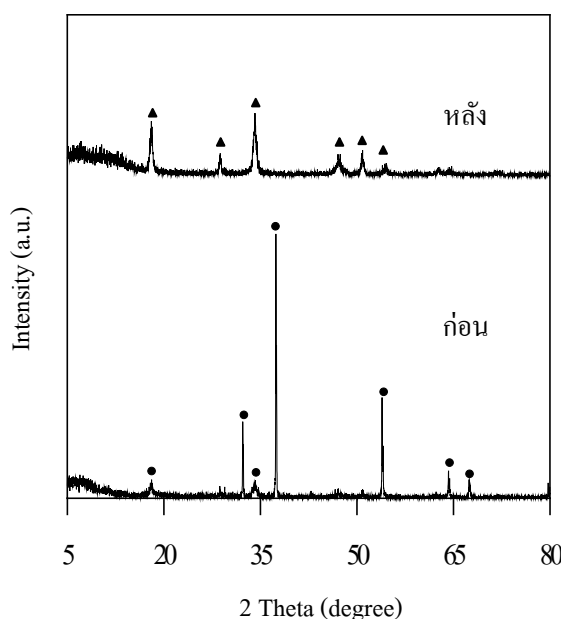
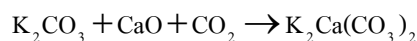
K_2CO_3/CaO ปริมาณ 2 กรัมและ 3 กรัม พบว่าเมื่อปริมาณน้ำหนักรับเพิ่ม จะทำให้การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และมีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยาวนานกว่า เนื่องจากปริมาณสารที่เพิ่มขึ้น ทำให้การแพร่ผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านได้ช้า ซึ่งเมื่อคำนวณหาอัตราการดูดซับของ K_2CO_3/CaO ปริมาณ 2 กรัม มีอัตราการดูดซับเท่ากับ 222.57 มิลลิกรัมต่อปริมาณสารดูดซับ 1 กรัม และ K_2CO_3/CaO ปริมาณ 3 กรัมเท่ากับ 283.22 มิลลิกรัมต่อปริมาณสารดูดซับ 1 กรัม

ภาพที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการบรรจุสารลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่น้ำหนักร่างต่าง ๆ คือ 1, 2 และ 3 กรัม และทำการทดสอบการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเดียวกัน ซึ่งจากภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อน้ำหนักของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย อาจเนื่องมาจาก เมื่อน้ำหนักของสารเพิ่มขึ้น ความสูงของสารในคอลัมน์ก็เพิ่มขึ้น ทำให้ก๊าซที่ไหลผ่านตัวดูดซับ แพร่ผ่านได้ช้าลง จึงทำให้เกิดการดูดซับที่ยาวนานขึ้น

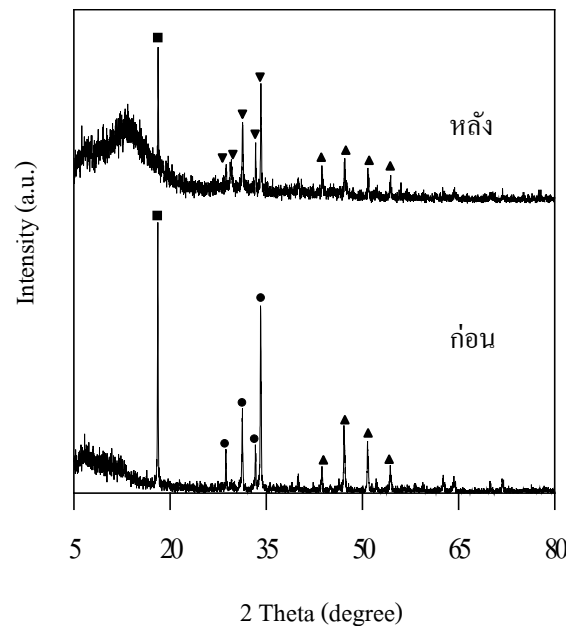
ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้า และ K_2CO_3/CaO ก่อนและหลังการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ภาพที่ 5 แสดงให้เห็นฟิสิกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งก่อนทำปฏิกิริยาจะพบเพียงฟิสิกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งฟิสิกที่พบอาจเกิดจากแคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับความชื้นในบรรยากาศ และหลังทำปฏิกิริยาพบว่าเกิดฟิสิกของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งฟิสิกที่พบเกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต และสาเหตุที่ไม่พบฟิสิกของแคลเซียมออกไซด์ อาจเนื่องมาจากฟิสิกของแคลเซียมออกไซด์อยู่ในรูปอสัณฐาน

ภาพที่ 6 เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ XRD ของ K_2CO_3/CaO ก่อนทำปฏิกิริยานั้นจะพบพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งอาจเกิดจากการที่แคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับความชื้นในบรรยากาศ พิกแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างเนื่องจากการเผา ส่วนหลังทำปฏิกิริยายังพบพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนตเหมือนกับก่อนทำปฏิกิริยา แต่จะพบพีคของโพแทสเซียมแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังปฏิกิริยา



ภาพที่ 5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแคลเซียมออกไซด์เกรดการค้าก่อนและหลังทำปฏิกิริยา; (●) $Ca(OH)_2$; (▲) $CaCO_3$



ภาพที่ 6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ K_2CO_3/CaO ก่อนและหลังทำปฏิกิริยา;
(■) $Ca(OH)_2$; (●) K_2CO_3 ; (▼) $K_2Ca(CO_3)_2$;
(▲) $CaCO_3$

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของแคลเซียมออกไซด์ทางการค้าและ K_2CO_3/CaO ก่อนทำปฏิกิริยา

ตารางที่ 1 พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)
แคลเซียมออกไซด์ทางการค้า	0.5554	0.004985
K_2CO_3/CaO	2.6899	0.012784

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยการวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนด้วยวิธีบีอีที พบว่า K_2CO_3/CaO มีพื้นที่ผิวมากที่สุดคือ 2.6899 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนมากที่สุดคือ 0.012784 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า จะเห็นได้ว่ามีพื้นที่ผิวมากกว่าถึง 5 เท่า และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะพบว่าพื้นที่ผิวมีผลต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เช่นกัน

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองสรุปได้ว่าการเติมสารโลหะอัลคาไลลงบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์มีผลต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำ (25 องศาเซลเซียส) ซึ่งพบว่าเมื่อเติมสารโลหะอัลคาไลบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ จะทำให้มีประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าแคลเซียมทางการค้าเนื่องจากในกระบวนการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะอัลคาไลและน้ำ เกิดเป็นสารอัลคาไลไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต และยังพบว่าปริมาณของสารดูดซับที่บรรจุภายในคอลัมน์และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ มีผลต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้มีความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยาวนานขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาอิทธิพลของไอน้ำที่มีผลต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และศึกษาโลหะอัลคาไลตัวอื่น ๆ ว่ามีผลต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไม่

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่อุดหนุนเงินในการทำวิจัย และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จุฬารัตน์ นักรวิธาวงศ์ และวิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์.

2555. พืชวิทยาอาชีพ ฉบับจัดทำ 2, ชลบุรี: สัมมาอาชีพะ.

Hayashi, H., Taniuchi, J., Furuyashiki, N., Sugiyama, S., Hirano, S., Shigemoto, N., Nonaka, T., 1998. Efficient Recovery of Carbon Dioxide from Flue Gases of Coal-Fired Power Plants by Cyclic Fixed-Bed Operations over K_2CO_3 -on-Carbon. Ind. Eng. Chem. Res. 37, 185–191.

Lee, SC., Chae, HJ., Lee, SJ., Park, YH., Ryu, CK.,

Yi, CK., Kim, JC., 2009. Novel regenerable potassium-based dry sorbents for CO_2 capture at low temperatures. J.Molecular Catalysis B: Enzymatic 56, 179–184.

Lee, SC., Choi, BY., Ryu, CK., Ahn, YS., Lee, TJ., Kim, J.C., 2006. The effect of water on the activation and the CO_2 capture capacities of alkali metal-based sorbents. Korean J. Chem. Eng. 23, 374–379.

Li, L., Li, Y., Wen, X., Wang, F., Zhao, N., Xiao, F., Wei, W., Sun, Y., 2011. CO_2 Capture over $K_2CO_3/MgO/Al_2O_3$ Dry Sorbent in a Fluidized Bed. J. Energy Fuels 25, 3835–3842.

Li, L., Wen, X., Fu, X., Wang, F., Zhao, N., Xiao, F., Wei, W., Sun, Y., 2010. MgO/Al_2O_3 Sorbent for CO_2 Capture. J. Energy Fuels 24, 5773–5780.

Peng, Y., Zhao, B., Li, L., 2012. Advance in Post-Combustion CO_2 Capture with Alkaline Solution: A Brief Review. Energy Procedia 14, 1515–1522.

Seo, Y., Jo, S.-H., Ryu, C.K., Yi, C.-K., 2007. Effects of water vapor pretreatment time and reaction temperature on CO_2 capture characteristics of a sodium-based solid sorbent in a bubbling fluidized-bed reactor. J. Chemosphere 69, 712–718.

Xiao, G., Singh, R., Chaffee, A., Webley, P., 2011. Advanced adsorbents based on MgO and K_2CO_3 for capture of CO_2 at elevated temperatures. International J. Greenhouse Gas Control 5, 634–639.