

การปรับปรุงความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนแกมมา-อลูมินาที่เตรียมด้วยวิธีอิมเพรกเนชันในสถานะเบส

## Development of CO<sub>2</sub> capture capacity by using impregnation method in base condition for K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

จารุวรรณ เจริญชัยเพชร<sup>1</sup>, พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ<sup>1,2</sup> และ เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ<sup>1,2,\*</sup>

Jaruwan Charoenchai<sup>1</sup>, Pornpote Piumsomboon<sup>1,2</sup> and Benjapon Chalermssinsuwan<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

<sup>2</sup>ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

\*ติดต่อ E-mail: benjapon.c@chula.ac.th., เบอร์โทรศัพท์: 02-218-7682

### บทคัดย่อ

เนื่องจากผลกระทบจากภาวะโลกร้อนทำให้ต้องมีการพิจารณาการควบคุมปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ในปัจจุบันกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจ หนึ่งในวิธีการพัฒนากระบวนการดังกล่าว คือ การปรับปรุงตัวดูดซับของแข็งให้มีความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สเสียด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนแกมมา-อลูมินา มีตัวแปรในการปรับปรุงการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน ได้แก่ ค่าความเป็นเบสของสารละลายที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับในช่วง 8 ถึง 12 และระยะเวลาที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับในช่วง 12 ถึง 24 ชั่วโมง ผลที่ได้ พบว่า ตัวแปรในการปรับปรุงทั้งสองตัวส่งผลต่อความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นเบสส่งผลให้ความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น เนื่องจากสารตั้งต้นของการดักจับมีความเป็นกรดเมื่อทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับที่เป็นเบสจึงสามารถกระตุ้นให้เกิดการดักจับได้ดีขึ้น ส่วนผลของระยะเวลาที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับ ตัวดูดซับจะมีความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เมื่อใช้เวลาในการเตรียมตัวดูดซับ 12 ชั่วโมง

**คำสำคัญ:** แกมมา-อลูมินา, การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, ตัวดูดซับ, โพแทสเซียมคาร์บอเนต, อิมเพรกเนชันในสถานะเบส

### Abstract

Due to the effect of global warming, it is important to control the release of carbon dioxide from industrial plants which is a major cause of global warming. At present, the carbon

dioxide capture process with a solid adsorbent is gaining attention. One of the ways to develop this process is to improve the solid adsorbent to get higher carbon dioxide capture capacity. This research study is to improve capture capability of carbon dioxide from waste gas using the potassium carbonate adsorbent on gamma-alumina. By varying impregnation preparation parameters, the capture capability was investigated. The basic of the solution used in preparing the adsorbent in the range from 8 to 12 and the duration of preparation for adsorption in the range of 12 to 24 hours were the studied parameters. From the results, both parameters affect on carbon dioxide capture capacity. An increasing in basic of the solution results in higher carbon dioxide capture capacities, since the reactant is acidic. For the effect of the time spent on preparing the adsorbent, the ability to capture carbon dioxide decreases when using the 12 hours time spent on preparing the adsorbent.

**Keywords:** gamma-alumina, carbon dioxide capture capacity, adsorbent, potassium carbonate, impregnation in base condition.

## 1. บทนำ

จากปัญหาภาวะโลกร้อนอันเนื่องมาจากปริมาณแก๊สเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศมีปริมาณสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ทั้งคน สัตว์ และพืช ดังนั้น จึงได้มีการออกแนวทางเกี่ยวกับการควบคุมปริมาณการปล่อยแก๊สเสียต่างๆจากโรงงานอุตสาหกรรม กระบวนการดัดจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่สำคัญที่หลายๆ ส่วนให้ความสนใจ โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูง คือ ตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก็มีหลากหลายรูปแบบ เช่น ตัวดูดซับที่อยู่ในรูปสารละลาย และ ตัวดูดซับของแข็ง เป็นต้น

ในปัจจุบันสารประกอบเอมีนเป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับความนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม [1] เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นๆ แต่เนื่องจากสารประกอบเอมีนเป็นสารที่ระเหยง่าย อีกทั้งยังมีความเป็นพิษสูงและเป็นสารก่อมะเร็ง เมื่อใช้ในปริมาณมากอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้ การนำสารประกอบเอมีนไปใช้งานในหอดูดซับซึ่งมีการป้อนอากาศเสียเข้าทางด้านล่างของหอ และป้อนสารประกอบเอมีนเข้าทางด้านบน ทำให้เกิดการไหลสวนทางกันเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงขึ้น กระบวนการดังกล่าวทำให้มีการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานมากเนื่องจากต้องป้อนสารประกอบเอมีนขึ้นไปด้านบนของกระบวนการ อีกทั้งสารประกอบเอมีนเป็นสารที่ระเหยง่ายดังที่ได้กล่าวไปแล้วจึงทำให้เกิดการสูญเสียตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับเป็นจำนวนมาก จึงได้เกิดแนวคิดในการพัฒนาตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเปลี่ยนจากการใช้สารประกอบเอมีนซึ่งเป็นของเหลวและมีความเป็นพิษสูง เป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นของแข็งโดยการพัฒนาตัวดูดซับของแข็งให้มีประสิทธิภาพสูงเท่าเทียมหรือมากกว่าตัวดูดซับที่เป็นสารประกอบเอมีนในรูปของเหลว โดยได้มีแนวคิดในการวิจัยตัวดูดซับโดยใช้การเติมหมู่ฟังก์ชันของเอมีนลงไปบนตัวรองรับที่เป็นของแข็งเพื่อลดอัตรา

การสูญเสียตัวดูดซับและเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน [2] การศึกษาในส่วนนี้จะเน้นการออกแบบตัวรองรับ หรือ การเลือกตัวรองรับที่สามารถเติมหมู่ฟังก์ชันของเอมีนลงไปได้มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงขึ้น แต่ถ้าพิจารณาในเรื่องผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม การเตรียมตัวดูดซับโดยใช้การเติมหมู่ฟังก์ชันเอมีนลงไปเป็นเพียงการลดปริมาณการใช้สารประกอบเอมีนแต่ก็ยังมีสารที่เป็นอันตรายอยู่ในระบบ ดังนั้นจึงได้เริ่มมีการศึกษาและพัฒนาตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยให้ความสำคัญตัวดูดซับที่เป็นสารประกอบอื่นๆ ที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมต่ำมากยิ่งขึ้น

ตัวดูดซับของแข็งสำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ โลหะกัมมันต์ (active metal) และ ตัวรองรับ (support) โดยโลหะกัมมันต์จะทำหน้าที่เป็นตัวทำปฏิกิริยาหลักในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนตัวรองรับจะทำหน้าที่ในการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว ช่วยให้การกระจายตัวของโลหะกัมมันต์ดียิ่งขึ้น รวมทั้งช่วยเพิ่มความแข็งแรงทนทานให้กับตัวดูดซับ เพื่อตรวจสอบสมมุติฐานที่ว่า การมีตัวรองรับจะทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น จึงได้มีงานวิจัยที่เปรียบเทียบผลของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มีตัวรองรับและไม่มีตัวรองรับ [3] พบว่า ตัวดูดซับที่ไม่มีตัวรองรับมีประสิทธิภาพต่ำกว่ามากทั้งนี้เนื่องจากตัวรองรับที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะในการเกิดปฏิกิริยา

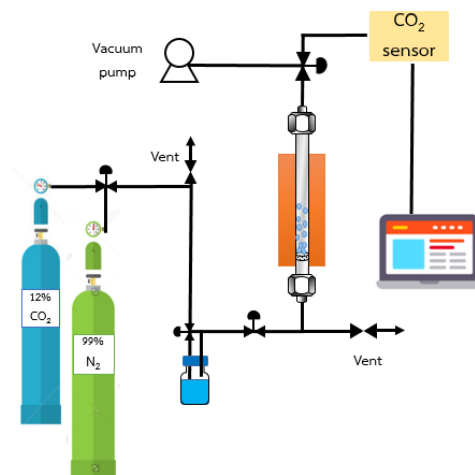
โลหะกัมมันต์ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ โลหะแอลคาไลน์ ที่อยู่ในรูปสารประกอบคาร์บอเนต เช่น โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) เป็นต้น จากการเปรียบเทียบผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่าง โซเดียม กับ โพแทสเซียม ทั้งกรณีที่มีตัวรองรับและไม่มีตัวรองรับ พบว่า โพแทสเซียมเป็นโลหะกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าโซเดียมซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัย [4] ที่ได้ทำการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อใช้โลหะกัมมันต์ต่างชนิดกัน คือ โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และซีเซียม (Cs) โดยใช้แกรไฟต์ออกไซด์เป็นตัวรองรับ ผลการทดลอง พบว่า โพแทสเซียมเป็นโลหะกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากมีความเป็นเบสลิวิสสูงกว่าโซเดียม แต่เมื่อเปรียบเทียบกับซีเซียมจะพบว่าโพแทสเซียมมีความเป็นเบสลิวิสที่ต่ำกว่า แต่เนื่องด้วยอะตอมของซีเซียมมีขนาดใหญ่กว่าโพแทสเซียมมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดปฏิกิริยาลดลงและปริมาตรรูพรุนลดน้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำกว่าโพแทสเซียม อย่างไรก็ตาม จากการพัฒนาที่ได้กล่าวไปข้างต้น พบว่า ตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งยังมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ต่ำกว่าการใช้เอมีนเป็นตัวดูดซับ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาตัวแปรที่สำคัญในการเตรียมตัวดูดซับซึ่งมีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับ รวมทั้งขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีสมมุติฐานในการปรับสภาวะในการเตรียมตัวดูดซับให้มีความเป็นเบสมากขึ้นเพื่อช่วยกระตุ้นให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 อุปกรณ์

ระบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนป้อนแก๊สขาเข้า ส่วนคอลัมน์ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ ส่วนบันทึกผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนป้อนแก๊สขาเข้าประกอบไปด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน และไอน้ำที่จะใช้ใน ระบบ ส่วนคอลัมน์ดูดซับจะใช้คอลัมน์แก้วเพื่อให้เห็นการไหลเวียนของตัวดูดซับได้และมีชุดให้ความร้อนที่มีฉนวนหุ้มอยู่เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลอง โดยตัวเครื่องจะมีการติดตั้งวาล์วนิรภัยเพื่อป้องกันกรณีมีแก๊สในระบบเกินไป จะทำให้ความดันในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อส่วนคอลัมน์ดูดซับ ในการควบคุมระบบขณะทำการทดลองจะควบคุมการเปิดปิดวาล์วผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปโดยคอมพิวเตอร์เพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์การเปิดปิดวาล์วตามที่ต้องการ รวมทั้ง มีอัตราการไหลของแก๊สที่เข้าสู่ระบบคงที่และมีความแม่นยำใน ทุกๆ ชุดการทดลอง นอกจากนี้ ส่วนของคอลัมน์ดูดซับจะเชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศเพื่อปรับความดันภายในระบบและช่วยดูดอากาศออกจากคอลัมน์ก่อนการทดลองเพื่อให้ในระบบไม่มีแก๊สอื่น ๆ ปนเปื้อน ส่วนบันทึกผลการทดลอง คือ บริเวณที่เชื่อมต่อแก๊สขาออกจากคอลัมน์เข้าไปยังอุปกรณ์วัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าเท่ากับขาออกแล้วแสดงว่าตัวดูดซับไม่สามารถดูดซับได้อีก ดังนั้น จึงควรนำตัวดูดซับที่ใช้งานแล้วนำออกจากคอลัมน์ แล้วนำไปผ่านกระบวนการคืนสภาพ แล้วนำกลับมาใช้งานใหม่ต่อไป



รูปที่ 1 แผนผังของเครื่องดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

## 2.2 วิธีการทดลอง

### 2.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

ในงานวิจัยนี้จะเตรียมตัวดูดซับโดยเลือกใช้วิธีการเตรียมแบบอิมเพรกเนชัน ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมที่นิยมใช้เตรียมตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมคือ แกมมา-ออลูมินาแบบผง (บริษัท Merck ผลิตที่ประเทศเยอรมันนี) เป็นตัวรองรับ และ โฟแทสเซียมคาร์บอเนต (บริษัท Merck ผลิตที่ประเทศเยอรมันนี) เป็นโลหะกัมมันต์ สำหรับขั้นตอนในการเตรียมจะแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลักได้แก่

**ขั้นตอนที่ 1** การทำความสะอาดแกมมา-อลูมินา ทำโดยนำแกมมา-อลูมินาไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำและสิ่งเจือปนในสารตั้งต้น

**ขั้นตอนที่ 2** การอิมเพรกเนชัน ทำโดยนำแกมมา-อลูมินาแบบผง และ โฟแทสเซียมคาร์บอเนตอย่างละ 5 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 25 มิลลิลิตร นำไปเขย่าในเครื่องเขย่าอัตโนมัติตามระยะเวลาควบคุม สำหรับงานวิจัยนี้ ได้มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ เข้าไปในขั้นตอนนี้เพื่อปรับสภาพพื้นผิวของตัวดูดซับ

**ขั้นตอนที่ 3** การกรองดูดตัวดูดซับที่ผ่านการอิมเพรกเนชันมาแล้วจะนำมากรองดูดและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนให้สะอาด

**ขั้นตอนที่ 4** การอบแห้งตัวดูดซับ เนื่องจากในกระบวนการอิมเพรกเนชันและการกรองดูดมีน้ำเป็นองค์ประกอบในกระบวนการ จึงต้องมีการนำตัวดูดซับที่เตรียมได้มากำจัดความชื้นออกโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

**ขั้นตอนที่ 5** การเผาตัวดูดซับ เป็นการกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเจือปนมาในกระบวนการเตรียมและเป็นการเปลี่ยนวัฏภาคของสารตั้งต้นให้อยู่ในรูปที่พร้อมนำไปใช้งาน โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงภายใต้ภาวะบรรยากาศ

## 2.2.2 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นการดูดซับในระบบปิดโดยมีการป้อนแก๊ส 2 ชนิดในกระบวนการ คือ แก๊สไนโตรเจน 99.99% และแก๊สผสมระหว่างไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์ 12% ก่อนจะเริ่มกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำความสะอาดระบบโดยป้อนแก๊สไนโตรเจนแห้งเข้าไปเพื่อให้ภายในระบบไม่มีแก๊สชนิดอื่นเจือปน จากนั้น จะทำการบรรจุตัวดูดซับปริมาณ 5 กรัมไว้ในคอลัมน์แก้วและดูดอากาศในคอลัมน์แก้วออกจนหมดโดยใช้ปั๊มสุญญากาศที่ติดตั้งไว้ดังแสดงในรูปที่ 1 จะป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็ยกเพื่อทำให้ตัวดูดซับขึ้นตามสมการดูดซับ ดังแสดงไว้ในสมการที่ 1 เนื่องจากจำเป็นต้องใช้น้ำในการทำปฏิกิริยา หลังจากเตรียมตัวดูดซับขึ้นแล้วจะป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็ยก (มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75) เข้าไปในคอลัมน์ที่อัตราการไหลคงที่ 5 ลิตรต่อนาที และ อุณหภูมิคงที่ 60 องศาเซลเซียส แล้ววัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนไปตามเวลา บันทึกค่าที่อ่านได้ และ นำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับ



## 2.2.3 การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากค่าที่บันทึกได้จากอุปกรณ์วัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาสามารถนำมาคำนวณความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตามสมการที่ 2

$$q = \frac{1}{m} \int_0^t Q(C_{in} - C_{out})dt \quad (2)$$

- เมื่อ  $q$  = ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [มิลลิกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ต่อ 1 กรัมของตัวดูดซับ]  
 $m$  = มวลของโลหะกัมมันต์ (Active-site) บนตัวดูดซับ [กรัม]  
 $C_{in}$  = ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ขาเข้า (% มวล) [-]  
 $C_{out}$  = ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ขาออก (% มวล) [-]  
 $Q$  = อัตราการไหลของแก๊สโดยมวล (กรัมต่อวินาที)  
 $t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ [วินาที]

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการศึกษานี้ ออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี 2<sup>k</sup> แฟคทอเรียลแบบมีค่ากลาง เพื่อให้ได้การทดลองที่ครอบคลุมกับตัวแปรที่ต้องการศึกษามากที่สุด โดยจำนวนชุดและตัวแปรการทดลองต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1 การทดลองทุกชุดการทดลองจะทำซ้ำ 3 รอบเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำ ค่าความสามารถในการดูดซับที่แสดงในตารางที่ 1 คือ ค่าเฉลี่ยจากทุกชุดที่ทำการทดลองซ้ำ จากผลการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่ 1 เป็นชุดการทดลองที่เตรียมตัวดูดซับในสภาวะปกติที่ใช้กันในปัจจุบัน ค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 209.45 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ที่เตรียมตัวดูดซับในสภาวะเบสแต่ระยะเวลาในการเขย่าต่ำ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ 6 ที่เตรียมตัวดูดซับในสภาวะเบสที่ pH เท่ากับ 12 และระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับชุดการทดลองที่ 1 พบว่า ชุดการทดลองที่ 6 ให้ค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด นอกจากนี้ เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ใช้สารประกอบเอมีน ยังพบว่า การใช้เบสในการเตรียมทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการดูดซับโดยใช้เอมีนอีกด้วย [5]

ตารางที่ 1 ชุดการทดลองและตัวแปรทั้งหมด

ชุดการทดลอง	ตัวแปร		ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ)
	เวลาเวลาเขย่า (hr)	ค่า pH (-)	
1	24	7	209.45
2	12	8	173.53
3	12	12	182.32
4	16	10	261.18
5	24	8	252.22
6	24	12	342.01

จากตารางที่ 2 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลการทดลอง พบว่า ตัวแปรระยะเวลาในการเขย่า (A) ตัวแปรค่า pH (B) และ ตัวแปร AB (อันตรกิริยาระหว่างค่าระยะเวลาในการเขย่าและ

ค่า pH) มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง โดยพิจารณาได้จากค่า p-value ที่มีค่าต่ำกว่า 0.05 ที่ร้อยละความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เมื่อพิจารณาค่า p-value ในตารางที่ 2 ตัวแปรทุกตัวมีค่า p-value ต่ำกว่า 0.0001

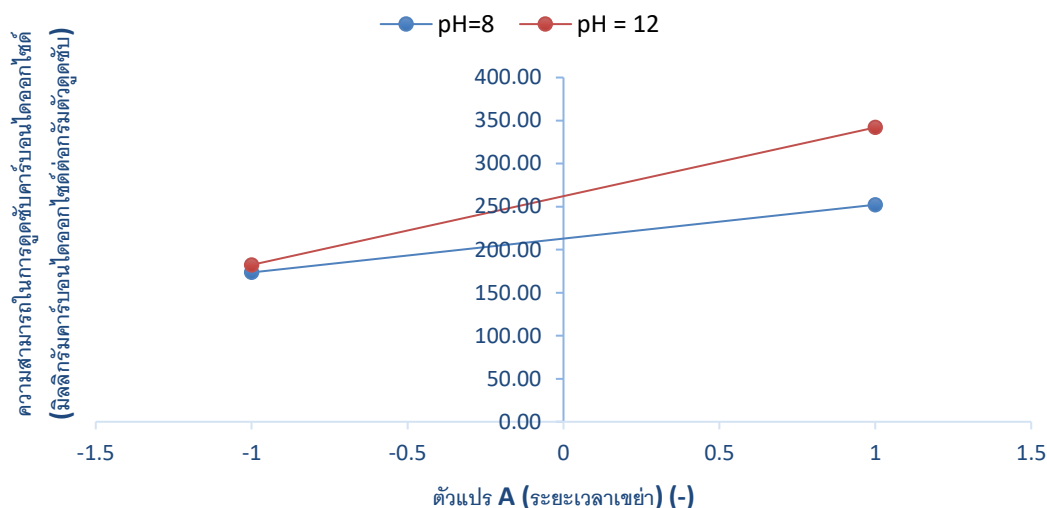
**ตารางที่ 2** การวิเคราะห์ ANOVA ของตัวแปรตอบสนองต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

Source	Sum of squares	DF	Mean square	F Value	Prob > F
A	42617.58	1	42617.58	2262.30	< 0.0001
B	7289.99	1	7289.99	386.98	< 0.0001
AB	4921.16	1	4921.16	261.23	< 0.0001
Curvature	1343.036	1	1343.036	71.293	< 0.0001
Residual	188.38	10	18.84		
Cor Total	56360.14	14			

จากการทำการทดลองเพื่อพัฒนาตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นโลหะกัมมันต์ผ่านกระบวนการอิมเพกเนชันลงไปในตัวรองรับแกมมา-อลูมินา พบว่า การเตรียมตัวดูดซับที่สภาวะต่างๆ กันส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสามารถอธิบายผลการวิเคราะห์ตัวแปรได้ ดังนี้

### 3.1 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่าต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของระยะเวลาเขย่าที่มีต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่ามีผลเชิงบวกกับความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อระยะเวลาในการเขย่านานขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งผลของการเปรียบเทียบที่ค่า pH ทั้งสองค่า พบว่า มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน จากการศึกษาผลของตัวแปร พบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเตรียม คือ 24 ชั่วโมง เนื่องจากระยะเวลาในการเขย่าส่งผลต่อการอิมเพกเนชันของโพแทสเซียมคาร์บอเนต โดยถ้าระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มโอกาสให้โพแทสเซียมคาร์บอเนตเกาะบนอลูมินาได้มากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น โดยผลที่ได้จากการศึกษามีแนวโน้มเดียวกันกับงานวิจัยของ Nathphatsorn และคณะ [6] ที่ได้ทำการเตรียมโดยใช้เวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกัน โดยส่วนใหญ่ระยะเวลาในการเขย่ามักจะคงที่ทุกชุดการทดลองเนื่องจากเป็นตัวแปรที่ยังมีงานวิจัยกล่าวถึงอยู่น้อย

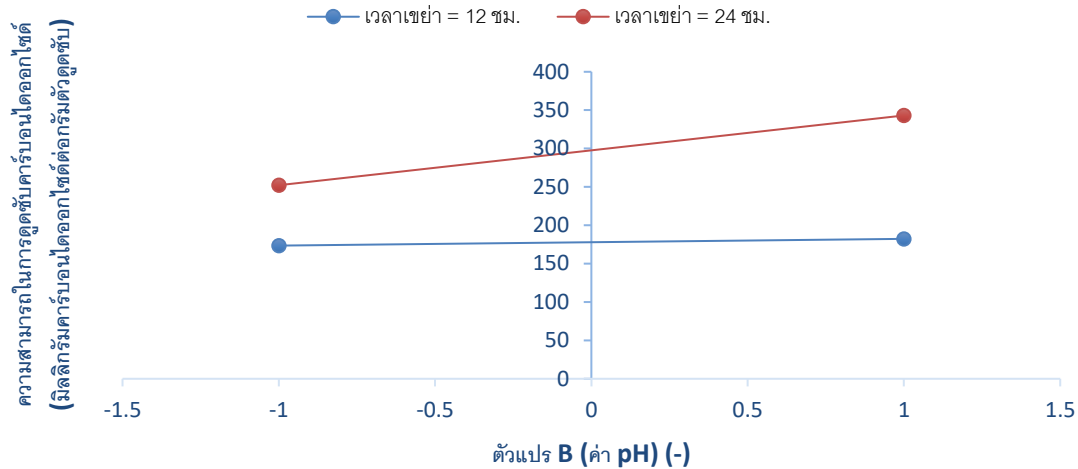


รูปที่ 2 อิทธิพลของระยะเวลาเขย่าที่มีต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

### 3.2 ผลของค่าความเป็นเบส (pH) ของสารต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของค่าความเป็นเบสที่มีต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ค่าความเป็นเบสมีผลเชิงบวกกับความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ เมื่อค่าความเป็นเบสของสารละลายสูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นทั้งที่ระยะเวลาเขย่าที่ 24 และ 12 ชั่วโมง แต่เมื่อพิจารณาโดยละเอียด จะพบว่า ระยะเวลาเขย่าที่ 12 ชั่วโมง เส้นกราฟมีการเบี่ยงเบนน้อยมากจนแทบจะไม่ส่งผลเชิงบวกทั้งนี้เนื่องจากผลของระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่าน้อยเกินไปส่งผลให้กระบวนการอิมเพกเนชันยังไม่สมบูรณ์ จึงมีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกัน แม้ว่าค่าความเป็นเบสจะแตกต่างกัน สำหรับเหตุผลของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Xi และคณะ [7] ที่ได้ทำการศึกษาการเตรียมตัวดูดซับโดยใช้วิธีการตกตะกอนร่วมในภาวะเบสโดยกำหนดให้ชนิดเบสแตกต่างกัน พบว่า เบสแก่ (NaOH หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์) ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า เนื่องจากการเติมเบสในกระบวนการเตรียมตัวดูดซับ ส่งผลให้มีความเป็นเบสที่พื้นผิวของตัวดูดซับมากขึ้น ซึ่งความเป็นเบสส่งผลให้การกระจายตัวของโลหะกัมมันต์ดีขึ้นจึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น



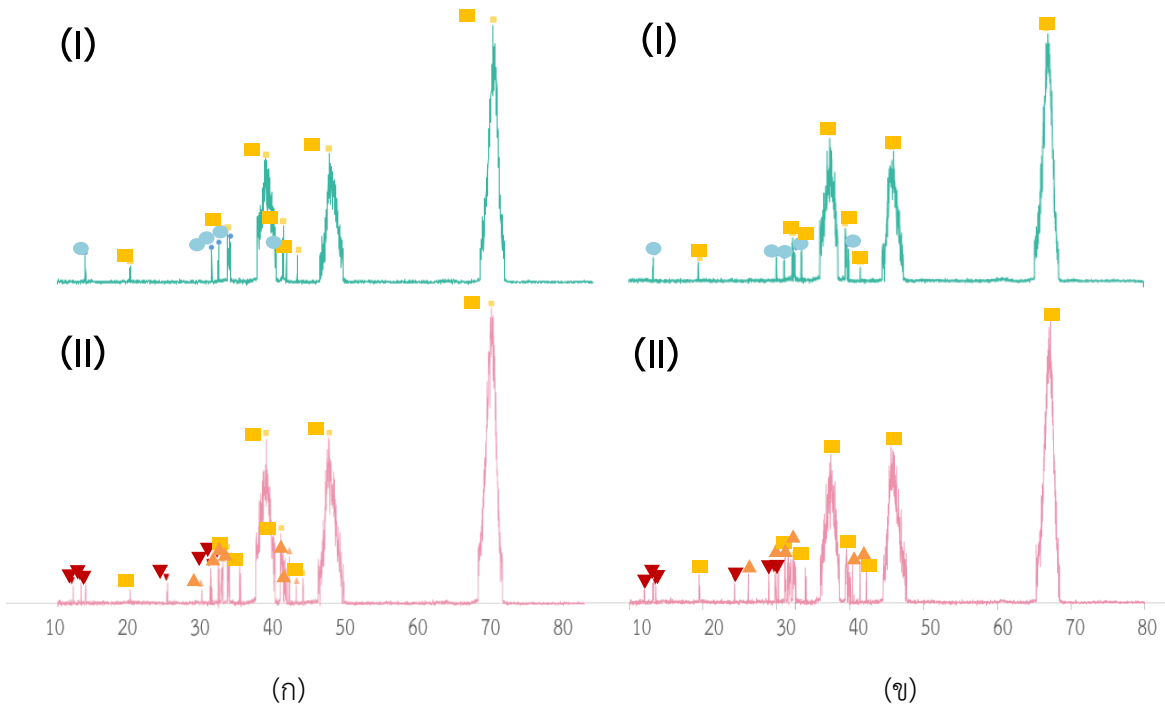


รูปที่ 3 อิทธิพลของค่าความเป็นเบสที่มีต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

### 3.3 การพิจารณาผลของโครงสร้างและองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงไป

จากการพิจารณารูปที่ 4I ซึ่งแสดง XRD Pattern พบว่า โครงสร้างของตัวดูดซับก่อนการดูดซับจะมีองค์ประกอบของสาร 2 ตัว คือ โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) และ แกมมา-อลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ซึ่งเป็นตัวรองรับ โดยเมื่อเปรียบเทียบ XRD Pattern ของรูป 4ก และ 4ข จะเห็นได้ว่า ตัวดูดซับทั้งสองมีสัดส่วนพื้นที่ได้กราฟที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นโลหะกัมมันต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณารูปที่ 4II พบว่า หลังการดูดซับ มีองค์ประกอบใหม่บนตัวดูดซับโดยจะสังเกตเห็นว่า โพแทสเซียมคาร์บอเนต ได้เปลี่ยนไปเป็นโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตและโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่อยู่ในรูปที่เป็นสารประกอบกับน้ำ ทั้งนี้ เนื่องจากในกระบวนการดูดซับมีการป้อนไอน้ำเข้าไปด้วยเพราะการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีน้ำอยู่ในระบบ ดังแสดงในสมการที่ 1

เมื่อเปรียบเทียบ XRD pattern ของตัวดูดซับหลังการดูดซับทั้งกรณีที่ไม่เติมเบสและไม่เติมเบส พบว่า สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการดูดซับเป็นผลิตภัณฑ์ตัวเดียวกันและค่าองศาตำแหน่งโครงสร้างที่อ่านได้มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองกรณี แต่จากผลการทดลองในตารางที่ 1 พบว่า การเติมเบสทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของการกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ดีขึ้นเมื่อเติมเบส โดย Xi และคณะ [7] พบว่า การเติมเบสจะช่วยให้เกิดการแตกตัวไอออนของไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป ซึ่งไอออนดังกล่าวจะไปขัดขวางการเกาะแบบรวมกลุ่มกันของโพแทสเซียมคาร์บอเนต ทำให้แม้ว่ากระบวนการการจะมีปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตเท่าเดิมแต่จะมีการกระจายตัวบนตัวรองรับที่ดีขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับสูงขึ้นด้วย ดังนั้น จากการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วย XRD Pattern เบื้องต้น พบว่า โครงสร้างที่เปลี่ยนไปทั้งก่อน และ หลังการดูดซับ ให้ผลสอดคล้องกับค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ข้างต้น



รูปที่ 4 XRD Pattern 4ก เป็นตัวดูดซับที่เตรียมในสภาวะปกติ 4ข เป็นตัวดูดซับที่เตรียมในสภาวะเบสที่มีค่า pH เท่ากับ 12 และ ระยะเวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง โดย (I) คือ ตัวดูดซับที่ยังไม่ผ่านการดูดซับ และ (II) คือ ตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับแล้ว โดยกำหนดสัญลักษณ์ต่างๆ เป็นองค์ประกอบของสารแต่ละชนิดดังต่อไปนี้



#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมทดแทนสารละลายเอมีน พบว่า ตัวดูดซับที่เตรียมโดยวิธีอิมเพกเนชันที่มีตัวแปรในการเตรียมแตกต่างกันส่งผลต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในการเขย่า 3 ค่า คือ 12 16 และ 24 ชั่วโมง พบว่า ระยะเวลาในการเตรียมที่ 24 ชั่วโมง ได้ตัวดูดซับที่มีสมรรถนะดีที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าความเป็นเบสที่เหมาะสม โดยทำการเตรียมตัวดูดซับที่ค่า pH แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 8 10 และ 12 พบว่า ค่า pH ที่สูงที่สุดส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับที่ดีที่สุด โดยการเตรียมตัวดูดซับโดยวิธีอิมเพกเนชันในสภาวะเบสที่เหมาะสม มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 342.01 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ ในขณะที่ตัวดูดซับที่เตรียมในสภาวะปกติความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 209.45 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมในสภาวะเบสทำให้การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตดีขึ้นอันก่อให้เกิดพื้นที่ผิวจำเพาะต่อการเกิด การดูดซับที่สูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (RSA5980052) กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Jacob N. K., Jørgen N. J., Poul-Jacob V., Ole B. (2009). Experience with CO<sub>2</sub> capture from coal flue gas in pilot-scale: Testing of different amine solvents, *Energy Procedia*, 783-790.
- [2] Genggeng Q., Yanbing W., Luis E., Xiaonan D., Nkechi A., Ah-Hyung A. P., Wen L., Christopher W. J., Emmanuel P. G. (2011). High efficiency nanocomposite sorbents for CO<sub>2</sub> capture based on amine-functionalized mesoporous capsules, *Energy & Environmental Science*, 4, 444-452.
- [3] Niels N. A. H. M., Johannes H. B., and Krijn P. de J. (2010). On the Influence and Role of Alkali Metals on Supported and Unsupported Activated Hydrotalcites for CO<sub>2</sub> Sorption, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49, 8086-8093.
- [4] Diana I., Xiaowen H., Milo S. P. S., David C. (2015). Influence of Alkali Metals (Na, K, and Cs) on CO<sub>2</sub> Adsorption by Layered Double Oxides Supported on Graphene Oxide, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54, 11610-11618.
- [5] Kong, Y.; Jiang, G.; Fan, M.; Shen, X.; Cui, S.; Russell, A. (2014) A new aerogel based CO<sub>2</sub> adsorbent developed using a simple sol-gel method along with supercritical drying. *Chemical Communications*, 50 (81), 12158-12161.
- [6] Nathphatsorn J., Saowaluck C., Pornpote P., Benjapon C. (2016). Correlations of kinetic parameters with various system operating conditions for CO<sub>2</sub> sorption using K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solid sorbent in a fluidized bed reactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4, 1938-1947.
- [7] Xi J., Lei L., Hongguang L., Fukui X., Ning Z., Wei W., Bingsheng Z. (2015). Influence of preparation parameters on the structural properties and the CO<sub>2</sub> capture performance of Mg-Zr solid sorbent. *Materials Research Bulletin*, 64, 163-170.