

เทคโนโลยีการกักเก็บและการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล

ธงไทย วิฑูรย์ *

บทคัดย่อ

ภาวะโลกร้อนซึ่งมีสาเหตุมาจากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศเป็นปัญหาสำคัญที่หลายหน่วยงานให้ความสนใจเป็นอย่างมาก การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหนึ่งในแหล่งที่มาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลลดลง ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศก็ลดลงไปด้วย อย่างไรก็ตามพลังงานที่มนุษย์ใช้กันอยู่ทุกวันนี้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการพัฒนาเทคโนโลยีที่จะทำให้มีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลต่อไปได้ ในขณะที่ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ ในการทบทวนงานวิจัยนี้กล่าวถึงความเป็นไปได้และข้อจำกัดในการนำเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้และ การกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ นอกจากนี้การพัฒนาเทคโนโลยีการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งประกอบด้วยการดูดซับทางกายภาพและเคมี การดูดซับทางกายภาพและทางเคมี ไครโอเจนิค และเมมเบรน ถูกอธิบายไว้อย่างละเอียด

คำสำคัญ: ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เทคโนโลยีการกักเก็บ เทคโนโลยีการแยก

*อาจารย์ ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900 ประเทศไทย
อีเมล: fengtwi@ku.ac.th

Capture and Separation Technologies of CO₂ from Combustion of Fossil Fuel

Thongthai Witoon*

Abstract

The problem of global warming caused by CO₂ emission has raised serious concerns since the CO₂ concentration in the atmosphere has increased rapidly. The combustion of fossil fuels is one of the major sources of the greenhouse gas CO₂. These fossil fuels are essential as they supply more than 70% of the world energy consumption. It is therefore essential to develop technologies that will allow us to utilize the fossil fuels while reducing the emission of greenhouse gas CO₂. This review highlights the challenges for capture technologies which have the greatest likelihood of reducing CO₂ emissions to the atmosphere, namely pre-combustion, post-combustion and oxy-fuel combustion. Various separation technologies, including physical and chemical absorption, physical and chemical adsorption, cryogenic and membrane are thoroughly discussed.

Keywords: Carbon dioxide, capture technology, separation technology

*Lecturer, National Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals and Advance Material, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand,
Email: fengttwi@ku.ac.th

1. บทนำ

ปัญหาภาวะโลกร้อนที่มีสาเหตุเนื่องมาจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ กำลังเป็นวิกฤตกังวลอย่างมาก โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีปริมาณมากที่สุดในชั้นบรรยากาศ นอกจากนี้พบว่า 75 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อผลิตพลังงานและกระแสไฟฟ้า การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศสามารถทำได้หลากหลายวิธีซึ่งถูกสรุปได้เป็นสมการต่อไปนี้ (Olajire, 2010)

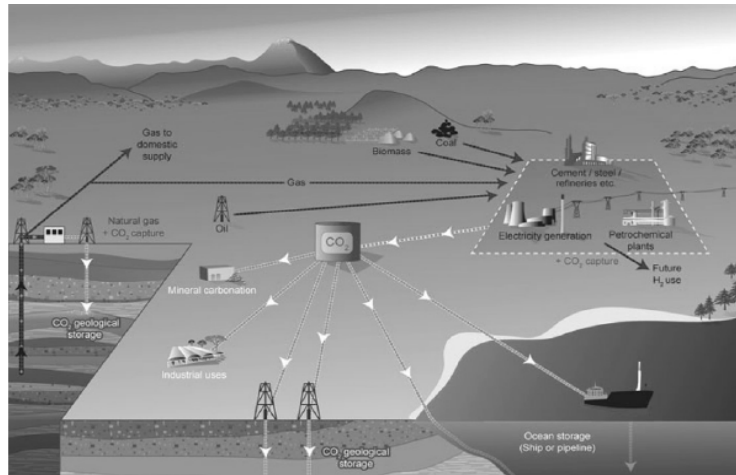
$$CO_2^{\uparrow} = POP \times \frac{GDP}{POP} \times \frac{BTU}{GDP} \times \frac{CO_2}{BTU} - CO_2^{\downarrow} \quad (1)$$

โดยที่ $CO_2^{\uparrow}$ หมายถึงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่ปล่อยสู่บรรยากาศ POP หมายถึง จำนวนประชากร $\frac{GDP}{POP}$ หมายถึงผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศต่อประชากร $\frac{CO_2}{BTU}$ หมายถึง การใช้พลังงานต่อหน่วย GDP $\frac{BTU}{GDP}$ หมายถึง ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยต่อหน่วยพลังงานและ $CO_2^{\downarrow}$ หมายถึง ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกักเก็บไว้ จากสมการที่ 1 จะเห็นได้ว่ามีอยู่ 5 วิธีในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ (1) การลดจำนวนประชากร (2) การลดผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (3) การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน (4) การเปลี่ยนไปใช้พลังงานที่ไม่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (non-carbon fuels) เช่น พลังงานจากชีวมวล พลังงานจากแสงอาทิตย์ และพลังงานจากลม และ (5) การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การลดจำนวนประชากรและการลดผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศเป็นเรื่องที่ควบคุมได้ยาก การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานเป็นเรื่องเร่งด่วนที่ควรทำ แต่จากการทำนายประชากรโลกพบว่า ประชากรโลกจะเพิ่มขึ้นจาก 6,600 ล้านคนในปี ค.ศ. 2007 เป็น 8,200 ล้านคนในปี ค.ศ. 2030 ซึ่งถึงแม้จะมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานก็ไม่อาจลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้

เนื่องจากมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่พลังงานที่ไม่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบยังมีต้นทุนสูง และเชื้อเพลิงฟอสซิลยังมีอยู่อย่างมากมาย ทำให้เชื้อเพลิงฟอสซิลจะถูกใช้ต่อไปอย่างน้อยอีก 20 ปีข้างหน้า ดังนั้นการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลจึงเป็น เทคโนโลยีที่จำเป็นที่ทำให้มีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลต่อไปได้ ในขณะที่ไม่ทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเพิ่มมากขึ้น

กระบวนการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซผสม การขนส่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากรูปที่ 1 แสดงแผนผังของสายโซ่กระบวนการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกแยกออกจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งกระบวนการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีการพัฒนาในปัจจุบัน ได้แก่ การดูดซึม (absorption) การดูดซับ (adsorption) ไครโอเจนิค (cryogenic) และ การแยกด้วยเมมเบรน (membrane) สาเหตุที่ต้องมีกระบวนการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อน ก็เพราะว่าก๊าซผสมที่ออกมาจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล จะมีองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ไม่เกินร้อยละ 15 โดยปริมาตร ถ้านำก๊าซผสมทั้งหมดไปกักเก็บ จะมีปริมาตรที่ใหญ่มากทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่ในการกักเก็บ ดังนั้นจึงต้องมีการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาให้มีความเข้มข้นเกินกว่าร้อยละ 90 โดยปริมาตร หลังจากนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกเพิ่มความดันจนเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวเพื่อเตรียมจัดส่งไปทางท่อหรือทางเรือต่อไป คาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะถูกปั๊มลงสู่ใต้ดินลึกมากกว่า 700 เมตร ไปยังชั้นหินที่มีความพรุนและถูกกักอยู่ใต้หิน ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะละลายได้ในน้ำเกลือ ซึ่งจะกลายเป็นตะกอนและสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยา กับแร่ธาตุโดยรอบ กลายเป็นสารประกอบคาร์บอเนตต่อไป



รูปที่ 1 แผนผังของสายโซ่กระบวนการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (IPCC, 2005)

2. เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากที่กล่าวไปข้างต้นแล้วว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญ ปัจจุบันเทคโนโลยีการกักเก็บแบ่งออกเป็น 3 วิธี (Figueroa และคณะ, 2008) ได้แก่ การกักเก็บก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion capture) การกักเก็บหลังการเผาไหม้ (post-combustion capture) และการกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (oxy-fuel combustion capture)

2.1 การกักเก็บก่อนการเผาไหม้ (pre-combustion capture)

ในกระบวนการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือน้ำ เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) หรือ การรีฟอร์มด้วยไอน้ำ (steam reforming) ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้ก๊าซสังเคราะห์ (synthesis gas) คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไอน้ำเกิดเป็นปฏิกิริยา water-gas-shift ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และได้ก๊าซไฮโดรเจนที่มีปริมาณมากขึ้นซึ่งก๊าซไฮโดรเจน

สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้ในกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) หรือ ทำปฏิกิริยากับอากาศ เพื่อให้เกิดพลังงานใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป จากรูปที่ 2 พบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจากหน่วย water-gas-shift มีปริมาณค่อนข้างมากคือร้อยละ 40 ซึ่งทำให้สามารถเลือกวิธีการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้หลากหลายวิธีซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.2 การกักเก็บหลังการเผาไหม้ (post-combustion capture)

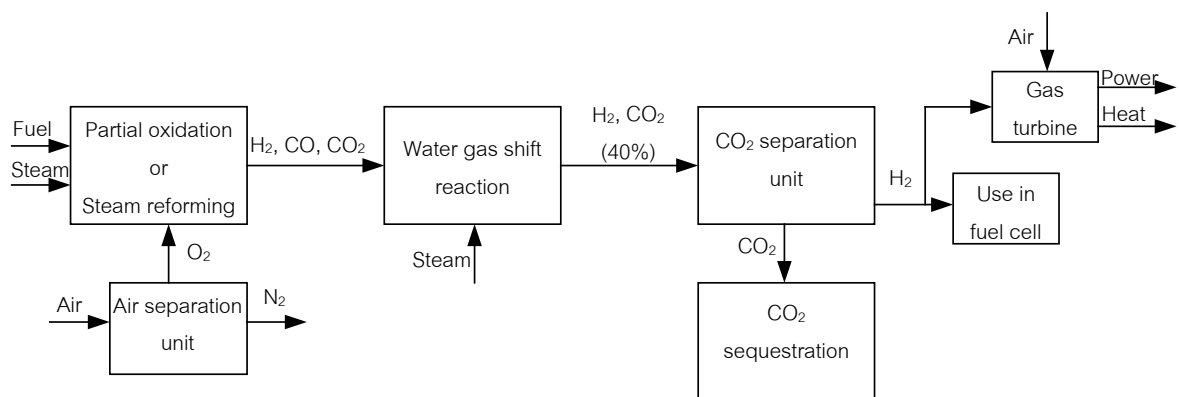
ในกระบวนการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับอากาศตั้งแต่เริ่มต้นทำให้ได้พลังงานและความร้อน เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป ซึ่งก๊าซที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการนี้องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นก๊าซไนโตรเจนซึ่งมีมากถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่เพียง 4-14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งก็หมายความว่าต้องมีการออกแบบเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะรองรับปริมาตรของก๊าซผสมที่มาก ส่งผลให้ต้นทุนในกระบวนการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง นอกจากนี้เนื่องจากว่าอากาศในการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ทำให้เกิดก๊าซไนตรัสออกไซด์ซึ่งต้องกำจัดก่อนที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศต่อไป ซึ่งการแยกก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ก่อนปล่อยก๊าซผสมสู่ชั้นบรรยากาศ ต้องเลือกวิธีที่สามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่านั้น (selective CO₂ capture) ในขณะที่ปล่อยก๊าซ อื่นๆออกไป

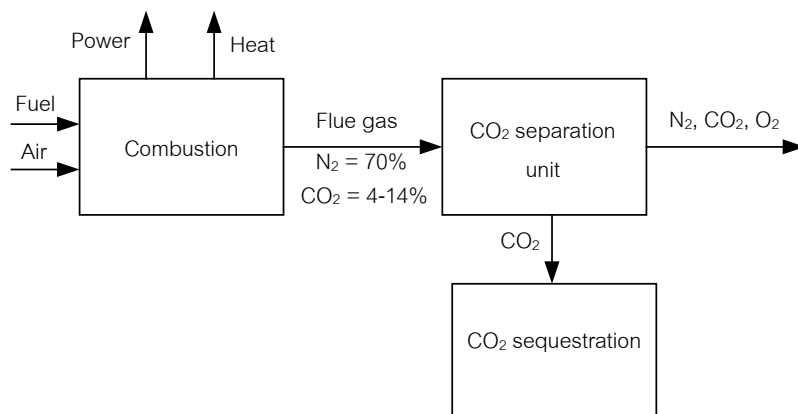
2.3 การกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจน บริสุทธิ์ (oxy-fuel combustion capture)

การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนา ต่อมาจากการกักเก็บหลังการเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงทำ ปฏิกิริยากับออกซิเจนบริสุทธิ์ทำให้ได้พลังงานและความ ร้อนข้อได้เปรียบของการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผา ไหม้คือ ทำให้องค์ประกอบของก๊าซผสมมีก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์อยู่มากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ทำให้

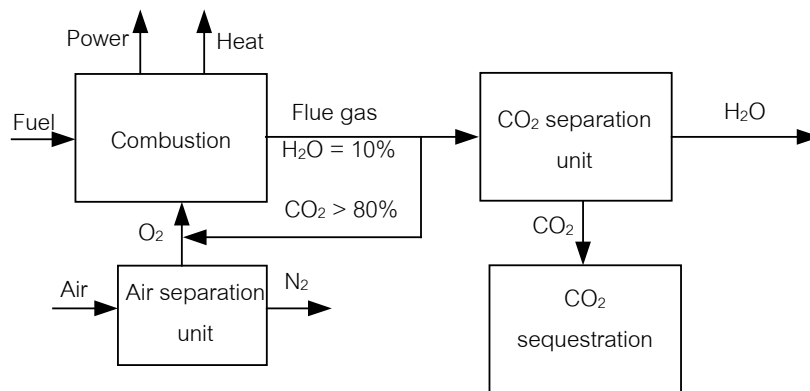
สามารถเลือกใช้เทคนิคการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้หลากหลาย การใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้ให้ อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูงชันอย่างมาดงั้นจึงมีการนำ ก๊าซผสมมาออกมารีไซเคิลไปยังเตาปฏิกรณ์เพื่อทำให้อุณหภูมิในเตาไม่สูงเกินไป ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของวิธีนี้คือ ออกซิเจนบริสุทธิ์ จะไม่ทำให้เกิดไนโตรส ออกไซด์เป็นสารประกอบ อย่างไรก็ตามการใช้ออกซิเจน บริสุทธิ์ทำให้ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการแยกออกซิเจน ออกจากอากาศ ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของ เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 3 แบบ จะถูกสรุปไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 2 เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (ดัดแปลงมาจาก Figueroa, 2008)



รูปที่ 3 เทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (ดัดแปลงมาจาก Figueroa, 2008)



รูปที่ 4 เทคโนโลยีการกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (ดัดแปลงมาจาก Figueroa, 2008)

ตารางที่ 1 ข้อได้เปรียบเสียเปรียบของเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการ	ข้อได้เปรียบ	อุปสรรคในการดำเนินงาน
การกักเก็บก่อนการเผาไหม้	- มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ - มาก ทำให้สามารถเลือกเทคโนโลยีการแยกได้หลากหลาย - ลดค่าใช้จ่าย	- ยังถือว่าเป็นเรื่องใหม่ ต้องมีการปรับปรุงโรงงานเพื่อจะใช้เทคโนโลยีนี้ ซึ่งจะต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากการปรับเปลี่ยน
การกักเก็บหลังการเผาไหม้	- สามารถใช้กับกระบวนการผลิตไฟฟ้า - จากถ่านหินที่มีอยู่แล้วในปัจจุบันได้	- ก๊าซผสมมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ - เจือจางทำให้ต้องใช้เทคนิคการแยกที่มีประสิทธิภาพสูง
การกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์	- ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง - มาก ทำให้สามารถเลือกเทคโนโลยีการแยกได้หลากหลาย	- ต้องใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์จำนวนมากด้วย - เทคนิคโครโอเจนิคทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงจึงอาจเป็นข้อจำกัด - สูญเสียพลังงานในการลดอุณหภูมิสารรีไซเคิลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3. เทคนิคการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใช้เงินลงทุนประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด (รวมทั้งการขนส่งและการฝังเก็บ) ดังนั้นการลดต้นทุนในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้โรงงานต่างๆ สามารถติดตั้งหน่วยแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้จริง ซึ่งเทคโนโลยีการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่กล่าวในบทความนี้ประกอบไปด้วย เทคนิคการดูดซึม (absorption) เทคนิคการดูดซับ (adsorption) เทคนิคโคร

โอเจนิค (cryogenics) และเทคนิคการเลือกผ่านโดยใช้เมมเบรน (membrane) ซึ่งการเลือกเทคโนโลยีการแยกเหล่านี้ให้เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของก๊าซผสมที่ปล่อยออกมา เช่นในเทคโนโลยีการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้จะมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 40 ที่ความดันประมาณ 20 บาร์ ในกรณีนี้ใช้เทคนิคการดูดซึมแบบกายภาพ (physical absorption) ก็เพียงพอแล้วที่จะสามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาได้ เมื่อดูดซึมมาได้แล้วก็ทำการลดความดันทำให้ก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกมา ซึ่งจะทำให้ประหยัพลังงานในการรีเจนเนอเรตสารดูดซึม

3.1 การดูดซึม (absorption)

ในเทคนิคนี้จะแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ การดูดซึมทางกายภาพ (physical absorption) และการดูดซึมทางเคมี (chemical absorption)

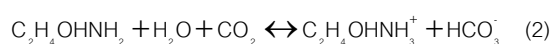
3.1.1 การดูดซึมทางกายภาพ (physical absorption)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมทางกายภาพในตัวทำละลายโดยใช้กฎของเฮนรี (Henry's Law) ซึ่งทำให้การดูดซึมทางกายภาพนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมได้ดีที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูงโดยตัวดูดซึมสามารถรีเจนเนอเรตได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน การที่อันตรปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไซด์และตัวดูดซึมต่ำส่งผลทำให้การรีเจนเนอเรตไม่ใช้พลังงานที่สูงมาก ตัวดูดซึมที่ใช้ในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เช่น เมทานอล ไดเมทิลอีเทอร์ พอลิเอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีนคาร์บอเนต เป็นต้น (Olajire, 2010)

3.1.2 การดูดซึมทางเคมี (chemical absorption)

ในกรณีที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีอยู่ในก๊าซผสมในระดับต่ำจำเป็นต้องใช้ตัวดูดซึมที่มีแรงทางเคมี เพื่อให้เกิดการเลือกดูดซับเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซกรด ตัวดูดซึมทางเคมีที่ใช้จึงมีคุณสมบัติเป็นเบส โดยตัวดูดซึมทางเคมีสามารถที่จะทำการรีเจนเนอเรตได้เช่นเดียวกับตัวดูดซึมทางกายภาพ คือให้ความร้อนแต่จะใช้พลังงานสูงกว่าเพื่อเป็นการทำลายพันธะทางเคมี ซึ่งตัวดูดซึมที่ใช้ในปัจจุบันได้แก่สารละลายที่มีอนุพันธ์ของหมู่เอมีน และสารละลายแอมโมเนีย (Stewart และ Hessami, 2005)

การดูดซึมโดยใช้สารละลายเอมีน เช่น โมโนเอทานอลามีน มีการใช้มายาวนานกว่า 60 ปีในโรงงานอุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติ ปฏิกริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และโมโนเอทานอลามีนแสดงดังสมการที่ 2



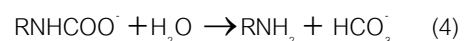
โมโนเอทานอลามีนจะดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซผสม จากนั้นสารละลายจะผ่านไปยังหน่วยรีเจนเนอเรตโดยสารละลายจะไหลสวนทางกับไอน้ำที่อุณหภูมิ 100–200 องศาเซลเซียส ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกถ่ายโอนมายังสายของไอน้ำจากนั้นทำการลดอุณหภูมิของสายไอน้ำลงทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำกลายเป็นของเหลว ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะถูกแยกออกมาได้ อย่างไรก็ตามการใช้โมโนเอทานอลามีนมีข้อเสียคือ (1) ประสิทธิภาพในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำ (กรัมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของโมโนเอทานอลามีนต่ำ) (2) อัตราการกัดกร่อนเครื่องมือที่สูงเนื่องจากความเป็นเบส (3) การสลายตัวของโมโนเอทานอลามีนโดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก และออกซิเจน ดังนั้นก่อนที่จะทำการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำเป็นต้องกำจัดก๊าซเหล่านั้นเสียก่อนซึ่งเป็นการสิ้นเปลือง (4) การใช้พลังงานที่สูงในระหว่างการรีเจนเนอเรต (Fauth และคณะ, 2005; Resnik และคณะ, 2004; Yeh และคณะ, 2005)

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาความพยายามที่จะปรับปรุงตัวดูดซึมให้มีประสิทธิภาพในการดูดซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ดีขึ้น โดยมีการศึกษาการใช้ sterically hindered เอมีน เช่น อะมิโนอีเทอร์ อะมิโนแอลกอฮอล์ ในการดูดซึม โดยไนโตรเจนอะตอมใน sterically hindered เอมีน จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและโดยตรงกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการต่อไปนี้

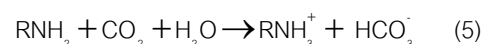


โดยที่ R คือหมู่แอลคิล

คาร์บาเมต (RNHCOO^-) จะถูกไฮโดรไลซ์ต่อไปกลายเป็นไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ดังสมการต่อไปนี้



ซึ่งปฏิกิริยารวมสำหรับ sterically hindered เอมีนสามารถเขียนได้เป็น



1 โมลของ sterically hindered เอมีน จะสามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 1 โมลเช่นกัน

ในขณะที่ถ้าเป็นโมโนเอทานอลามีนจะต้องใช้ถึง 2 โมล เพื่อที่จะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล (Olajire, 2010)

3.2 การดูดซับ (adsorption)

เนื่องจากข้อเสียของการใช้ตัวดูดซับทางเคมีที่กล่าวไปแล้วข้างต้น จึงมีการพัฒนาหาเทคนิคอื่นในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งที่จะกล่าวในหัวข้อนี้คือ เทคนิคการดูดซับ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของแข็งซึ่งการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับแล้ว ก็สามารถทำการรีเจนเนอเรตโดยการลดความดันเรียกว่า Pressure Swing Adsorption หรือ การเพิ่มอุณหภูมิเรียกว่า Temperature Swing Adsorption

3.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถที่จะถูกดูดซับบนของแข็งที่มีรูพรุนได้ด้วยแรงวาลเดอร์วาลส์ ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการดูดซับเพราะจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการทำรีเจนเนอเรต ตัวดูดซับที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ มีความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และใช้พลังงานในการทำรีเจนเนอเรตที่ต่ำ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ (1) ขนาดและรูปร่างของก๊าซต่างๆกับขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ (2) ความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับพื้นผิวของตัวดูดซับ (3) ความเร็วในการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซ ปัจจุบันมีวัสดุที่มีรูพรุนหลายชนิดเช่น อะลูมินา ซีโอไลท์ ถ่านกัมมันต์ และ ซิลิกา ถูกนำมาทดสอบในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีขนาดรูพรุนจำเพาะเจาะจงในช่วงไมโครพอร์ และเมโซพอร์

ซีโอไลท์ถูกใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีการกักเก็บก่อนการเผาไหม้ซึ่งจะมีก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถใช้เทคนิค Pressure Swing Adsorption ในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาได้

(Siriwardane และคณะ, 2001) ในงานวิจัยของ Shao และคณะ (2008) ได้ศึกษาการดูดซับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนบนซีโอไลท์ชนิด NaY ซึ่งมีพื้นที่ผิว 723 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส NaY สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 160 มิลลิกรัมต่อกรัมของ NaY ในขณะที่ดูดซับก๊าซไนโตรเจนได้เพียง 15 มิลลิกรัมต่อกรัมของ NaY งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า NaY มีศักยภาพในการใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซผสม เพราะค่าการเลือกการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการดูดซับก๊าซไนโตรเจนถึง 10 เท่า อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงอย่างมากในระบบที่มีความชื้นอยู่ ดังนั้นต้องทำให้ก๊าซผสมแห้งก่อนผ่านเข้ามายังหน่วยดูดซับและการรีเจนเนอเรตจำเป็นที่จะต้องใช้อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส (Harlick และ Sayari, 2006) ซึ่งเป็นการเพิ่มราคาใช้จ่าย

คาร์บอนก็ถูกศึกษากันอย่างแพร่หลายในกระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเทคโนโลยีการกักเก็บก่อนการเผาไหม้และพบว่าสามารถใช้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นอย่างดี แต่ในกระบวนการที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำ คาร์บอนจะไม่เหมาะสมในการใช้เป็นตัวดูดซับเนื่องจากค่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำเมื่อเทียบกับก๊าซไนโตรเจน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่มีราคาถูกเพื่อที่จะชดเชยกับประสิทธิภาพที่เสียไป Olivares-Marín และ Maroto-Valer (2011) ได้ทำการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนที่มีรูพรุนระดับไมโครพอร์จากพรมเหลือทิ้งและใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าตัวดูดซับคาร์บอนที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวสูงถึง 1910 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนเป็น 0.85 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อนำมาดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าให้ผลการตอบสนองที่เร็ว กล่าวคือใช้เวลาเพียง 10 นาทีก็ได้ค่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดแล้ว และความสำเร็จในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 84.1 และ 33.7

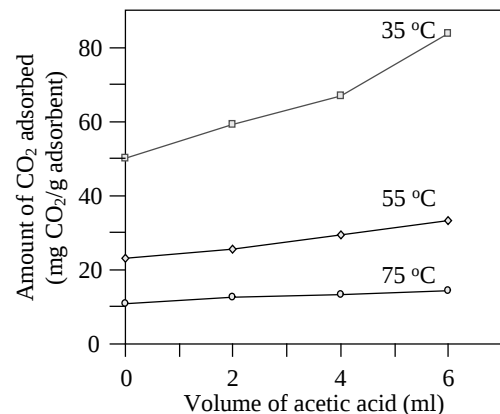
มิลลิกรัมต่อกรัมคาร์บอน ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Chen และ Ahn (2011) สังเคราะห์อะลูมินาเมโซพอร์ด้วยกระบวนการโซล-เจลซึ่งอะลูมินาเมโซพอร์มีพื้นที่ผิวสูง 812 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุน 0.83 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวดูดซับชนิดอื่นๆพบว่า ค่าการดูดซับเรียงจากน้อยไปมากดังนี้ อะลูมินาในเชิงพาณิชย์ < SBA-15 < zeolite 13X < อะลูมินาเมโซพอร์ ตามลำดับ

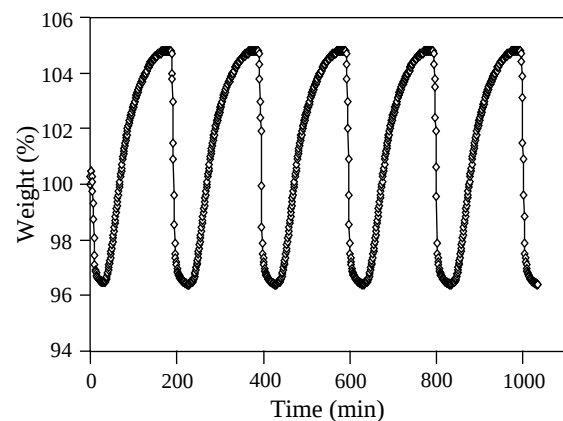
Witoon และคณะ (2011a) ทำการเตรียมซิลิกาซีโรเจลโดยใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นแหล่งของซิลิกาเนื่องจากมีราคาถูก โดยทำการเพิ่มปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกาซีโรเจลจากการปรับสัดส่วนระหว่างกรด 2 ชนิด ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริกและกรดอะซิติก พบว่าปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิว และปริมาตรรูพรุนสามารถเพิ่มขึ้นได้จากการเพิ่มปริมาณกรดอะซิติก จากนั้นนำมาทำสอบการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ (รูปที่ 5) พบว่า ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกรดอะซิติกที่ใช้เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับเป็น 75 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับต่างๆไม่มีความแตกต่างกันแม้ว่าบนพื้นผิวจะมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มากกว่าก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า การเพิ่มอุณหภูมิลดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์และหมู่ไฮดรอกซิลของซิลิกา ในการทดสอบเสถียรการดูดซับและการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 5 รอบ พบว่าซิลิกาที่สังเคราะห์ได้มีเสถียรภาพในการดูดซับและการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี (รูปที่ 6)

จากที่กล่าวไปแล้วข้างต้นพบว่า การดูดซับทางกายภาพจะมีประสิทธิภาพดีในกรณีที่ก๊าซผสมมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่มาก (> 40 เปอร์เซ็นต์) เพราะค่าการเลือกการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับก๊าซชนิดอื่นๆไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งเหมาะกับเทคโนโลยีการกักเก็บก่อนการเผาไหม้ นอกจากนี้การดูดซับจะต้อง

ทำที่อุณหภูมิต่ำเพราะแรงในการดูดซับเป็นแรงแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น จึงมีการพัฒนาตัวดูดซับที่สามารถดูดซับได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นและมีความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 5 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับได้ของซิลิกาซีโรเจลที่อุณหภูมิการดูดซับต่างๆ (Witoon และคณะ, 2011a)



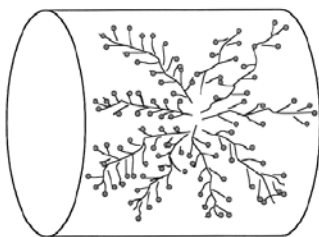
รูปที่ 6 การทดสอบเสถียรภาพในการดูดซับและการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสของซิลิกาซีโรเจลเตรียมจากกรดอะซิติกปริมาณ 6 มิลลิตร (Witoon และคณะ, 2011a)

3.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

พอลิเมอร์ที่มีอนุพันธ์ของเอมีนสามารถที่จะดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยใช้กลไกในการดูดซับคล้ายกับการใช้สารละลายเอมีนดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อการดูดซับ Satyapal และคณะ (2001) ใช้พอลิเอทิลีนโอมินัม

บนพอลิเมอร์และใช้เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
พบว่าความจุในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 40
มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

และความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 0.02 บรรยากาศ ในปี 2002 Xu และคณะ. มีแนวคิดใหม่ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่า “ตะกร้าโมเลกุล” (Molecular basket) โดยใช้พอลิเมอร์ที่มีหมู่อนุพันธ์เอมีน โหลดลงบนวัสดุที่มีรูพรุน (รูปที่ 7) วัสดุที่มีรูพรุนที่ใช้ควรจะมีปริมาตรรูพรุนที่สูงเพียงพอที่จะให้พอลิเมอร์เข้าไปกระจายตัวอยู่และดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดย MCM-41 ถูกเลือกมาทดสอบเป็นตัวรองรับการโหลดพอลิเอทิลีนเอมีนเป็นตัวแรก พบว่าที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงถึง 133 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ หลังจากงานวิจัยนี้ได้มีการนำแนวคิดนี้มาใช้กับตัวรองรับชนิดต่างๆ มากมาย Yan และคณะ (2011) ใช้ซิลิกาชนิดเมโซเซลลูโลสโฟม เป็นตัวรองรับการโหลดเอมีน จุดเด่นของเมโซเซลลูโลสโฟม คือมีโครงสร้างของรูพรุนที่เป็นระเบียบและมีขนาดใหญ่ 20–40 นาโนเมตร ในขณะที่ยังคงมีพื้นที่ผิวที่สูงประมาณ 532 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่าสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงขึ้นถึง 152 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวรองรับการโหลดเอมีนชนิดต่างๆ ได้ถูกสรุปไว้ดังตารางที่ 2 การโหลดพอลิเมอร์ที่มีอนุพันธ์ของเอมีนบนตัวรองรับให้ประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึงแม้จะมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยในก๊าซผสม นักวิจัยจึงให้ความสนใจอย่างมากในการพัฒนาตัวดูดซับและทดลองในโรงงานนำร่อง (Pilot-plant)

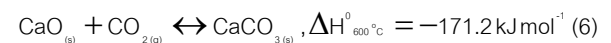


รูปที่ 7 โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีอนุพันธ์เอมีนในรูพรุน โดยที่ ● แทนโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับบนเอมีน (Xu และคณะ, 2002)

3.2.3 การดูดซับแบบเกิดปฏิกิริยา (Chemical-looping cycle)

แคลเซียมออกไซด์สามารถใช้มาดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยจะเกิดปฏิกิริยาเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตดังสมการที่ 6 ในปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกเรียกว่า คาร์บอนเนชัน (carbonation) และในปฏิกิริยาการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงกว่าเรียกว่า แคลซิเนชัน (calcination) ซึ่งการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซผสมด้วยเทคนิคนี้มีข้อได้เปรียบอยู่หลายอย่างเช่น การประหยัดพลังงานในการรีเจนเนอเรต ไม่ต้องกำจัดของเสีย และค่าการเลือกการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซผสมได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ เพราะมี

ความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น



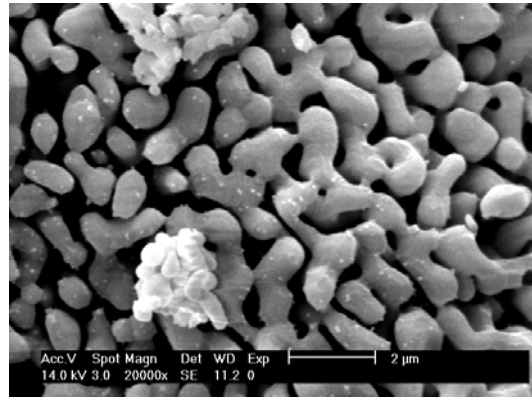
อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังมีข้อเสียอยู่คือ ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อจำนวนรอบในการดูดซับและการคายซับ (carbonation–calcination) มากขึ้นเรื่อยๆ การเสื่อมสภาพของแคลเซียมออกไซด์มีสาเหตุมาจากการหลอมตัวของอนุภาคเนื่องจาก 2 ปัจจัย (1) กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อนอย่างสูง (2) เกิดการขยายตัวของปริมาตรเมื่อเปลี่ยนจากแคลเซียมออกไซด์ไปเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (16.9 เป็น 34.1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล) (Li และคณะ, 2010a) นักวิจัยหลายท่านจึงได้มีความพยายามที่จะแก้ไขปัญหาเหล่านี้โดย (1) ทำการลดขนาดของแคลเซียมออกไซด์ (Florin และคณะ, 2009) (2) ปรับปรุงรูพรุนโดยการใช้น้ำในการรีเจนเนอเรต (Manovic และ Anthony, 2011) (3) เติมเฟสที่มีความเฉื่อยลงไปผสมเช่น KMnO_4 , MgO , La_2O_3 (Li และคณะ, 2010a; Li และคณะ, 2010b; LuO และคณะ, 2010) (4) ใช้แคลเซียมออกไซด์ที่มาจากธรรมชาติ เช่น โดโลไมท์และฮันไทท์ (Silaban และคณะ, 1996)

เพื่อที่จะลดประสิทธิภาพการดูดซับที่ลดลง นอกจากแคลเซียมออกไซด์จากธรรมชาติที่กล่าวไปแล้วยังมีแคลเซียมออกไซด์จากธรรมชาติที่เป็นขยะเช่น เปลือกหอย และเปลือกไข่ เป็นต้น ซึ่งน่าสนใจในการนำมาศึกษาเป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ Witoon (2011b) ทำการศึกษาการใช้ขยะเปลือกไข่เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยเปรียบเทียบผลการศึกษากับแคลเซียมออกไซด์เชิงพาณิชย์ พบว่าขนาดผลึกของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากขยะเปลือกไข่ (รูปที่ 8) มีขนาดเล็กกว่าขนาดผลึกของแคลเซียมออกไซด์เชิงพาณิชย์ (รูปที่ 9) และจากการศึกษาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าอัตราในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่เร็วกว่าและให้ค่าการดูดซับที่สูงกว่าแคลเซียมออกไซด์เชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงอย่างมากในช่วงการดูดซับและการคายซับใน 3 รอบแรก หลังจากนั้นการลดลงจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าขนาดผลึกที่เล็กของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากขยะเปลือกไข่ทำให้มีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาที่สูงแต่โครงสร้างจะไม่เสถียรเกิดการหลอมตัวได้ง่ายในช่วงการดูดซับและการคายซับใน 3 รอบแรก หลังจากนั้นจึงมีความเสถียรของโครงสร้างมากขึ้นทำให้การลดลงของการดูดซับค่อนข้างคงที่ เมื่อทำการศึกษากการดูดซับและการคายซับจำนวน 11 รอบ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากขยะเปลือกไข่สูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแคลเซียมออกไซด์เชิงพาณิชย์ประมาณ 1.6 เท่า (รูปที่ 9)

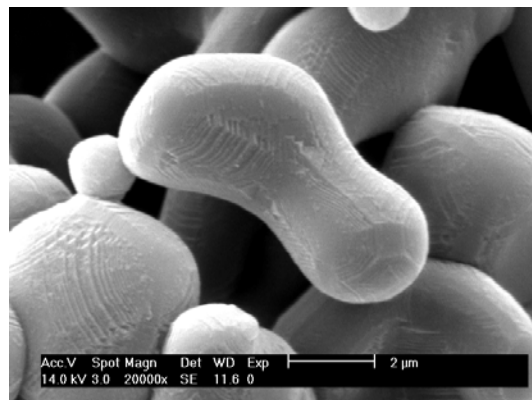
3.4 ไครโอเจนิค (Cryogenic)

การใช้ไครโอเจนิคในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซผสม สามารถทำได้โดยทำการลดอุณหภูมิเพื่อควบแน่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นของเหลว (อุณหภูมิต่ำกว่า -73.3 องศาเซลเซียส) ซึ่งทำให้สามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาจากก๊าซอื่นๆ เช่น

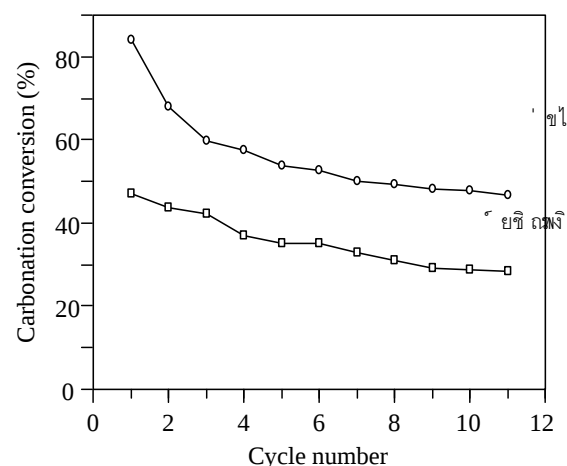
ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซออกซิเจน เพราะก๊าซเหล่านี้ยังคงอยู่ในสถานะก๊าซที่อุณหภูมิ -73.3 องศาเซลเซียส Hart และ Gnanendran (2009) ได้ใช้วิธีนี้ในการแยกก๊าซ



รูปที่ 8 โครงสร้างของอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากขยะเปลือกไข่ (Witoon, 2011b)



รูปที่ 9 โครงสร้างของอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์เชิงพาณิชย์ (Witoon, 2011b)



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันคาร์บอนขึ้นของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากขยะเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์เชิงพาณิชย์ (Witoon, 2011b)

คาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซธรรมชาติ พบว่าสามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างดี จึงมีการตรวจสอบค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบกับ การดูดซับด้วยสารละลายเอมีน เพื่อจะประยุกต์ใช้ในกระบวนการจริงต่อไป

3.5 เมมเบรน (Membrane)

วิธีใหม่ อีกวิธีหนึ่งในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คือการเลือกผ่านโดยใช้เมมเบรน ซึ่งเมมเบรนสามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซผสมจากการกักเก็บหลังการเผาไหม้ การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซธรรมชาติ และการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการกักเก็บก่อนการเผาไหม้

การแยกโดยเมมเบรนใช้กลไกหลายอย่างได้แก่ การละลาย/การแพร่ การดูดซับ/การแพร่ การเลือกผ่าน/

การถ่ายโอนด้วยไอออน โดยใช้วัสดุได้หลากหลาย เช่น ออร์แกนิก (พอลิเมอร์) อินออร์แกนิก (คาร์บอน ซีโอไลต์ เซรามิก หรือโลหะ) ซึ่งเป็นได้ทั้งวัสดุที่มีรูพรุนและไม่มีรูพรุน การศึกษาการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซไนโตรเจนพบว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถซึมผ่านได้ดีและมีค่าการเลือกผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อก๊าซไนโตรเจนที่สูง

อย่างไรก็ตามในระบบจริงจะมีปริมาณก๊าซผสมที่จะต้องทำการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากทำให้ต้องการเมมเบรนที่มีขนาดใหญ่มาก ซึ่งก็จะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการสร้าง และต้องใช้เครื่องอัดที่มีขนาดใหญ่อีกด้วย งานวิจัยในการพัฒนาด้านเมมเบรนมีมาอย่างต่อเนื่องซึ่งถูกสรุปไว้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บนพอลิเอทิลีนโอมีนที่ไหลบนตัวรองรับชนิดต่างๆ ที่ 75 องศาเซลเซียส

ตัวรองรับ	พื้นที่ผิว (ตาราง เมตรต่อ กรัม)	ปริมาตรรู พรุน (ลูก บาศก์ เซนติเมตรต่อ กรัม)	ปริมาณพอลิ เอทิลีนโอมีน (เปอร์เซ็นต์ โดยมวล)	สภาวะการทดลอง	ปริมาณการดูด ซับก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อ กรัมตัวดูดซับ)	เอกสารอ้างอิง
MCM-41	1229	1.15	50	14.9 vol.% CO ₂	89.2	Ma และคณะ (2009)
SBA-15	950	1.31	50	14.9 vol.% CO ₂	140	Ma และคณะ (2009)
KIT-6	895	1.22	50	100 vol.% CO ₂	135	Son และคณะ (2008)
HMS	561	1.44	60	100 vol.% CO ₂	184	Chen และคณะ (2010)
เมโซพอร์ แคปซูล	725	0.73	83	20 vol.% CO ₂	216	Qi และคณะ (2011)
ซิลิกาโมโนลิธ	950	3.2	65	5 vol.% CO ₂	165	Chen และคณะ (2009)
อะลูมินา เมโซพอร์	812	0.82	46.5	100 vol.% CO ₂	120	Chena และคณะ (2011)

ตารางที่ 3 การศึกษาการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคเมมเบรน

กระบวนการ	ประเด็นที่เกี่ยวข้อง	เอกสารอ้างอิง
เมมเบรน	- การทบทวนเอกสารเกี่ยวกับการใช้เมมเบรนพอลิเมอร์ในการแยก CO ₂ /N ₂	Powell และ Qiao (2006)
	- เปรียบเทียบการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการดูดซับด้วยเอมีนและการใช้เมมเบรนพอลิเมอร์ในการกักเก็บหลังการเผาไหม้	Favre (2007)
	- การอธิบายการทำดูลมวและพลังงานและทำการจำลองประสิทธิภาพเมมเบรนภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน	Zhao และคณะ (2008)
	- การประเมินราคาในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซผสมโดยใช้เมมเบรนภายใต้สภาวะสุญญากาศ	Ho และคณะ (2008)

4. แนวโน้มงานวิจัยในอนาคต

ปัจจุบันมีเพียงการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้การดูดซับทางเคมีและกระบวนการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้เท่านั้นที่ดำเนินการอยู่จริง ซึ่งมีปัญหาในเรื่องการใช้พลังงานสูงเพื่อที่จะทำการรีเจนเนอเรตตัวดูดซับทางเคมี การลดการใช้พลังงานจึงเป็นเรื่องที่จะต้องมีการศึกษาต่อไปเพื่อให้กระบวนการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถใช้ได้อย่างแท้จริง เทคนิคการกักเก็บหรือการแยกอื่นๆ เป็นเทคนิคที่กำลังอยู่ในช่วงพัฒนาถึงประสิทธิภาพและความคุ้มค่าในการลงทุน นอกจากนี้ความปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะต้องมีการคิดวิเคราะห์ก่อนที่จะนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้จริง เช่น ตัวดูดซับทางเคมีถ้ามีการรั่วออกสู่ภายนอกก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยากับสารอื่นเกิดเป็นสารก่อมะเร็งได้ ดังนั้นการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นของแข็ง (แคลเซียมคาร์บอเนต) ด้วยปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะไม่ทำให้เกิดขยะของเหลว ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับการใช้ตัวดูดซับทางเคมี

การนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์แทนการฝังก็เป็นอีกงานแผนงานหนึ่งที่ต้องทำ เช่น การใช้สาหร่ายมาทำการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และนำสาหร่ายไปผลิตน้ำมัน และการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีที่มีมูลค่า เช่น กรด

ฟอริกเมทานอล และ ไดเมทิลอีเทอร์ โดยสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรจีเนชันหรือกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เป็นต้น

5. เอกสารอ้างอิง

- Chen, C., Yang, S.T., Ahn, W.S., Ryoo R. (2009) Amine-impregnated silica monolith with a hierarchical pore structure: enhancement of CO₂ capture capacity, Chem. Commun. 3627-3629.
- Chen, C., Son, W.J., You, K.S., Ahn, J.W., Ahn, W.S. (2010) Carbon dioxide capture using amine-impregnated HMS having textural mesoporosity, Chem. Eng. J. Vol. 161, 46-52.
- Chen, C., Ahn, W.S. (2011) CO₂ capture using mesoporous alumina prepared by a sol-gel process, Chem. Eng. J. Vol. 166, 646-651.
- Favre, E. (2007) Carbon dioxide recovery from post-combustion processes: can gas permeation membranes compete with absorption ?, J. Membr. Sci. Vol. 294, 50-59.
- Fauth, D.J., Frommell, E.A., Hoffman, J.S., Reasbeck, R.P., Pennline, H.W. (2005) Eutectic salt promoted lithium zirconate: novel high temperature sorbent for CO₂ capture, Fuel Process. Technol. Vol. 86, 1503-1521.

- Figuerola, J.D., Fout, T., Plasynski, S., McIlvried, H., Srivastava, R.D. (2008) Advances in CO₂ capture technology—The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program, *Int. J. Greenhouse Gas Control* Vol. 2, 9-20.
- Florin, N.H., Harris, A.T. (2009) Reactivity of CaO derived from nano-sized CaCO₃ particles through multiple CO₂ capture-and-release cycles, *Chem. Eng. Sci.* Vol. 64, 187-191.
- Harlick, P.J.E., Sayari, A. (2006) Applications of pore-expanded mesoporous silicas. 3. triamine silane grafting for enhanced CO₂ adsorption, *Ind. Chem. Eng. Res.* Vol. 45, 3248-3255.
- Hart, A., Gnanendran, N. (2009) Cryogenic CO₂ capture in natural gas, *Energy Procedia* Vol. 1, 697-706, (GHGT-9).
- Ho, M.T., Allinson, G.W., Wiley, D.E. (2008) Reducing the cost of CO₂ capture from flue gases using membrane technology, *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 47, 1562-1568.
- IPCC. (2005) Special report on carbon capture and storage. In: Metz, B., et al. (Ed.), Working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK, New York.
- Li, L., King, D.L., Nie, Z., Li, X.S., Howard, C. (2010a) MgAl₂O₄ spinel-stabilized calcium oxide adsorbents with improved durability for high-temperature CO₂ capture, *Energy & Fuel* Vol. 24, 3698-3703.
- Li, Y., Zhao, C., Chen, H., Duan, L., Chen, X. (2010b) Cyclic CO₂ capture behavior of KMnO₄-doped CaO-based sorbent, *Fuel* Vol. 89, 642-649.
- Luo, C., Zheng, Y., Ding, N., Wu, Q., Bian, G., Zheng, C. (2010) Development and performance of CaO/La₂O₃ sorbents during calcium looping cycles for CO₂ capture, *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 49, 11778-11784.
- Ma, X., Wang, X., Song, C. (2009) "Molecular Basket" sorbents for separation of CO₂ and H₂S from various gas streams, *J. Am. Chem. Soc.* Vol. 131, 5777-5783.
- Manovic, V., Anthony, E.D. (2011) Reactivation and remaking of calcium aluminate pellets for CO₂ capture, *Fuel* Vol. 90, 233-239.
- Olajire, A.A. (2010) CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe application – A review, *Energy* Vol. 35, 2610-2628.
- Olivares-Marín, M., Maroto-Valer, M.M. (2011) Preparation of a highly microporous carbon from a carpet material and its application as CO₂ sorbent, *Fuel. Process. Technol.* Vol. 92, 322-329.
- Powell, C.E., Qiao, G.G. (2006) Polymeric CO₂/N₂ gas separation membranes for the capture of carbon dioxide from power plant flue gases, *J. Membr. Sci.* Vol. 279, 1-49.
- Qi, G., Wang, Y., Estevez, L., Duan, X., Anako, N., Park, A.A., Li, W., Jones, C.W., Giannelis, E.P. (2011) High efficiency nanocomposite sorbents for CO₂ capture based on amine-functionalized mesoporous capsules, *Energy Environ. Sci.* Vol. 4, 444-452.
- Resnik, K.P., Yeh, J.T., Pennline, H.W. (2004) Aqua ammonia process for simultaneous removal of CO₂, SO₂ and NO_x, *Int. J. Environ. Technol. Manage.* Vol. 4, 89-104.
- Satyapal, S., Filburn, T., Trela, J., Strange, J. (2001) Performance and properties of a solid amine sorbent for carbon dioxide removal in space life

- support applications, *Energy & Fuels* Vol. 15, 250-255.
- Shao, W., Zhang, L., Li, L., Lee, R.L. (2009) Adsorption of CO₂ and N₂ on synthesized NaY zeolite at high temperatures, *Adsorption* Vol. 15, 497-505.
- Silaban, A., Narcida, M., Harrison, D.P. (1996) Characteristics of the reversible reaction between CO₂(g) and calcined dolomite, *Chem. Eng. Commun.* Vol. 146, 149-162.
- Siriwardane, R.V., Shen, M.-S., Fisher, E.P., Poston, J.A. (2001) Adsorption of CO₂ on molecular sieves and activated carbon, *Energy & Fuels* Vol. 15, 279-284.
- Son, W.J., Choi, J.S., Ahn, W.S. (2008) Adsorptive removal of carbon dioxide using polyethyleneimine-loaded mesoporous silica materials, *Micropor. Mesopor. Mater.* Vol. 113, 31-40.
- Stewart, C., Hessami, M. (2005) A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration – the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach, *Energy Convers. Manage.* Vol. 46, 403-420.
- Witoon, T., Tatan, N., Rattanavichian, P., Chareonpanich M. (2011a) Preparation of silica xerogel with high silanol content from sodium silicate and its application as CO₂ adsorbent, *Ceram. Int.* Vol. 37, 2297-2303.
- Witoon, T. (2011b) Characterization of calcium oxide derived from waste eggshell and its application as CO₂ sorbent, doi:10.1016/j.ceramint.2011.05.125
- Xu, X., Song, C., Andresen, J.M., Miller, B.G., Scaroni, A.W. (2002) Novel polyethylenimine-modified mesoporous molecular sieve of MCM-41 type as high-capacity adsorbent for CO₂ capture, *Energy & Fuels* Vol. 16, 1463-1469.
- Yan, X., Zhang, L., Zhang, Y., Qiao, K., Yan Z., Komarneni, S. (2011) Amine-modified mesocellular silica foams for CO₂ capture, *Chem. Eng. J.* Vol. 168, 918-924.
- Yeh, J.T., Resnik, K.P., Pygle, K., Pennline, H.W. (2005) Semi batch absorption and regeneration studies for CO₂ capture by aqueous ammonia, *Fuel. Process. Technol.* Vol. 86, 1533-1546.
- Zhao, L., Riensche, E., Menzer, R., Blum, L., Stolten, D. (2008) A parametric study of CO₂/N₂ gas separation membrane processes for post-combustion capture, *J. Membr. Sci.* Vol. 325, 284-294.