

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 การดักจับและการกักเก็บคาร์บอน (Carbon capture and storage)

การดักจับและการกักเก็บคาร์บอน (CCS) หรือ การดักจับและการตัดแยกคาร์บอน (Carbon capture and sequestration) เป็นกระบวนการในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล การคมนาคมขนส่ง อุตสาหกรรม และกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวัน เป็นต้น จุดมุ่งหมายของกระบวนการนี้ คือ การป้องกันไม่ให้เกิดการปล่อยหรือลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากสู่ชั้นบรรยากาศ อันก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศหรือที่รู้จักกันดีคือภาวะโลกร้อน^[10] และลดความเป็นกรดของมหาสมุทร^[11] แม้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์ได้รับการนำกลับได้พื้นโลกเพื่อก่อตัวทางธรณีวิทยาและกักเก็บน้ำมันเป็นเวลาหลายทศวรรษที่ผ่านมา รวมถึงการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแนวคิดที่ค่อนข้างใหม่ ตัวอย่างในเชิงพาณิชย์ครั้งแรกเป็นของเวย์เบอร์น เมื่อปี ค.ศ. 2000^[12] ตัวอย่างอื่น ๆ ได้แก่ เชื้อนในเขตแดนของซาสค์พาวเวอร์ (SaskPower's Boundary Dam) และโครงการเคมเปอร์พลังงานมิสซิสซิปปี (Mississippi Power's Kemper Project Kemper) นอกจากนี้การดักจับและการกักเก็บคาร์บอนยังสามารถนำมาใช้เพื่ออธิบายการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอากาศที่เป็นเทคนิควิศวกรรมสภาพภูมิอากาศ

การดักจับและบีบอัดคาร์บอนไดออกไซด์อาจช่วยเพิ่มความต้องการเชื้อเพลิงร้อยละ 25-40 ของโรงดักจับและตัดแยกคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาถ่านหิน^[13] ค่าใช้จ่ายของระบบเหล่านี้และอื่นๆ คาดว่าจะเพิ่มค่าใช้จ่ายของพลังงานที่ผลิตร้อยละ 21-91 สำหรับโรงที่สร้างตามวัตถุประสงค์ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีให้กับโรงงานที่มีอยู่จะมีราคาแพงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลจากโรงดักจับและตัดแยกคาร์บอนไดออกไซด์ อุตสาหกรรมล่าสุดแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จด้านการวิจัยในการพัฒนาและการใช้งาน ที่ถูกแยกจากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในปี ค.ศ. 2025 จะมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่า การผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินที่ใช้ในปัจจุบัน^[14]

การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถูกคาดการณ์ทั้งในก่อตัวทางธรณีวิทยาระดับลึกหรือในรูปแบบของแร่คาร์บอนเนต การกักเก็บในทะเลลึกถือว่าเป็นไปได้แค่เพียงระยะสั้นเพราะเป็น

การเพิ่มปัญหาอย่างมากที่ก่อให้เกิดความเป็นกรดของมหาสมุทร^[15] ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ (The National Energy Technology Laboratory หรือ NETL) รายงานว่าอเมริกาเหนือมีความจุในการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากพอในระยะเวลาที่มากกว่า 900 ปี ด้วยอัตราการผลิตในปัจจุบัน^[16] ปัญหาทั่วไป คือ การคาดการณ์ในระยะยาวเกี่ยวกับความปลอดภัยในการกักเก็บได้น้ำหรือใต้ดินเป็นเรื่องที่ยากมากและไม่แน่นอน ทั้งยังมีความเสี่ยงที่อาจเกิดการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ^[17]

2.1.2 ประเด็นสำคัญของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

การดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture and storage หรือ CCS) สามารถนำไปใช้กับโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuelled power plants) ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมและการผลิตเชื้อเพลิงและส่วนของการเปลี่ยนรูป (Transformation sectors)

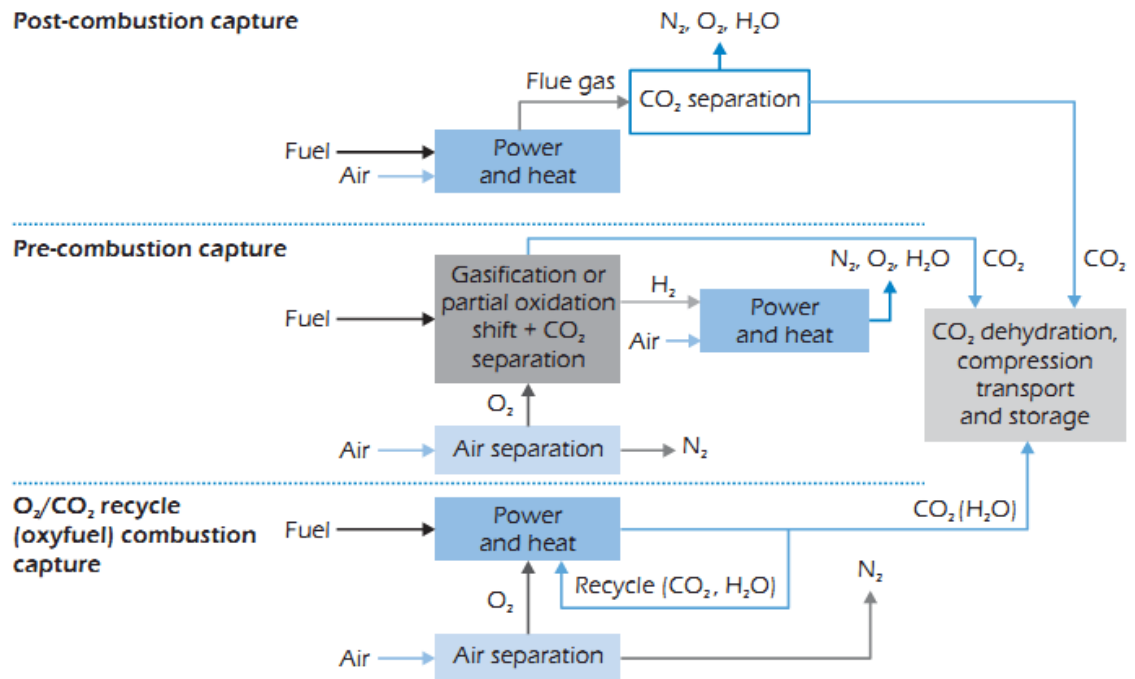
สามตัวเลือกหลักของเทคโนโลยีสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การเผาไหม้หลัง (Post-combustion) การเผาไหม้ก่อน (Pre-combustion) และกระบวนการเผาไหม้ในออกซิเจน (Oxyfuel combustion) หรือกระบวนการดีไนโตรจีเนชัน (Denitrogenation)

การลดค่าใช้จ่ายในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผ่านการออกแบบกระบวนการใหม่และการปรับปรุงการออกแบบที่มีอยู่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการใช้งานขนาดใหญ่สำหรับการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการแยกก๊าซธรรมชาติ การผลิตเอทานอลและการผลิตปุ๋ยมีความเป็นไปได้ที่จะมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการดักจับจากโรงไฟฟ้า และการผลิตไฮโดรเจนและกระบวนการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงอื่นๆ เป็นที่น่าสนใจสำหรับการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกวันนี้

2.1.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าและความร้อน (CO₂ Capture in Electricity and Heat Generation)

มีสามตัวเลือกหลักสำหรับเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตไฟฟ้าและความร้อน คือ การเผาไหม้หลัง (Post-combustion) ดักจับโดยใช้การดูดซับทางเคมี (Chemical absorption) การเผาไหม้ก่อน (Pre-combustion) และกระบวนการเผาไหม้ในออกซิเจน (Oxyfuel combustion หรือ denitrogenation) (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์^[18]

ในกระบวนการเผาไหม้ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดักจับจากแก๊สปล่องไฟ (Flue gases) ที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ร้อยละ 4-8 โดยปริมาตรสำหรับโรงไฟฟ้าเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ (Natural gas-fired power plants) และร้อยละ 12-15 โดยปริมาตรสำหรับโรงไฟฟ้าเผาไหม้ถ่านหิน (Coal-fired power plants) โดยทั่วไปแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับมักจะใช้ตัวทำละลายและตัวทำละลายภายหลังการฟื้นฟูสภาพ ซึ่งในบางครั้งรวมกับการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation) เทคโนโลยีขั้นพื้นฐานที่ใช้ตัวทำละลายจำพวกสารประกอบเอมีนได้ถูกนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมมานานหลายทศวรรษ แต่ความท้าทายคือการนำกลับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้พลังงานขั้นต่ำและค่าใช้จ่ายที่ยอมรับได้

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับกระบวนการเผาไหม้สามารถนำมาใช้ในโรงงานถ่านหินหรือก๊าซธรรมชาติ โดยเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนและ/หรือไอน้ำก่อนแล้วดำเนินการต่อไปในเครื่องปฏิกรณ์ชิฟต์ (Shift reactor) เพื่อผลิตแก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และจะดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมความดันสูง (สูงถึง 70 บาร์) ที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ระหว่างร้อยละ 15 และ 40 ส่วนแก๊สไฮโดรเจนถูกนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนในกังหันแก๊สวงจรรวม (Combined-cycle gas turbine)

กระบวนการเผาไหม้ในออกซิเจนจะเกี่ยวข้องกับการแยกแก๊สไนโตรเจนออกจากอากาศในกระแสสารที่มีแก๊สออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxidant stream) โดยใช้หน่วยแยกอากาศ (Air separation unit หรือ ASU) หรืออาจใช้เยื่อแลกเปลี่ยนในอนาคต เพื่อเพลิงฟอสซิลจะถูกเผาไหม้กับแก๊สออกซิเจนที่ความเข้มข้นใกล้เคียงกับอากาศโดยใช้แก๊สปล่อยไฟที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled flue gas) ในการควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้

2.1.4 ประเภทของเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

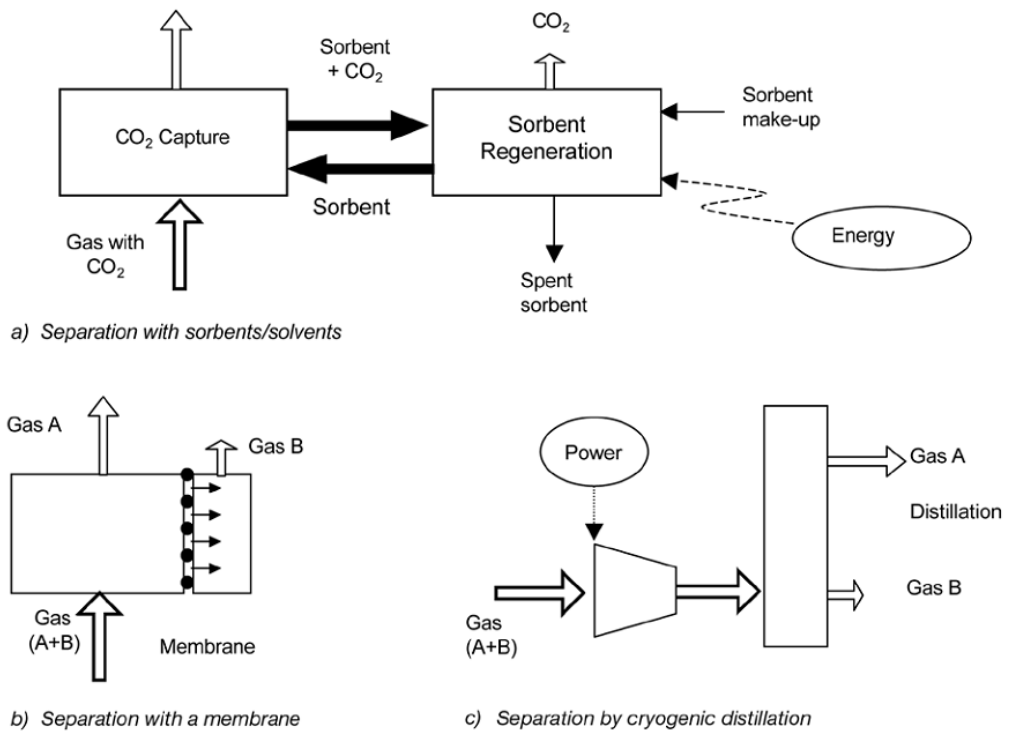
ระบบดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ใช้หลายเทคโนโลยีที่เป็นที่รู้จักกันสำหรับการแยกแก๊สซึ่งมีรวมเข้ากับระบบพื้นฐานสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระบุไว้ในส่วนสุดท้าย รายละเอียดวิธีการแยกมีดังต่อไปนี้

1) การแยกด้วยตัวดูดซับ/ตัวทำละลาย (Separation with sorbents/solvents)

การแยกทำได้โดยการผ่านแก๊สที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ให้สัมผัสกับตัวดูดซับของเหลวหรือตัวดูดซับของแข็งที่สามารถจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ **รูปที่ 2.2a** แสดงผังโดยทั่วไปของระบบการแยกด้วยตัวดูดซับ/ตัวทำละลาย ซึ่งตัวดูดซับที่เต็มไปด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับ จะถูกส่งไปยังภาชนะที่แตกต่างกัน ที่ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนจะปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนของการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) หลังจากการลดลงความดันหรือหลังการเปลี่ยนแปลงสภาวะอื่นๆรอบๆตัวดูดซับ โดยตัวดูดซับหลังจากขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพจะถูกส่งกลับเพื่อดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในลักษณะหมุนเวียน ในกรณีที่ตัวดูดซับเป็นของแข็งจะไม่มีการไหลเวียนระหว่างภาชนะ เนื่องจากการดูดซับและการฟื้นฟูสภาพทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงแบบวงจร (การเพิ่ม/ลดความดันหรืออุณหภูมิ) ในภาชนะที่ตัวดูดซับบรรจุอยู่ และต้องมีการเพิ่มตัวดูดซับใหม่เข้ามาเสมอเพื่อชดเชยตัวดูดซับที่เสื่อมสภาพไป ในบางสถานการณ์ ตัวดูดซับอาจเป็นออกไซด์ของแข็งที่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือชีวมวลในภาชนะได้ความวร้อนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก และตัวดูดซับที่ใช้แล้วจะถูกหมุนเวียนไปยังภาชนะที่สองเพื่อออกซิไดซ์ในอากาศอีกครั้ง แล้วจึงนำมาใช้กับตัวดูดซับใหม่บางส่วนที่สูญเสียไปและที่เพิ่มเข้ามา

ผังทั่วไปที่แสดงใน**รูปที่ 2.2** มีอิทธิพลต่อระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญมากมาย รวมทั้งตัวเลือกในเชิงพาณิชย์ชั้นนำ เช่น การดูดซับทางเคมี การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับ กระบวนการที่เกิดขึ้นใหม่อื่นๆ ที่ใช้ตัวดูดซับของเหลวใหม่หรือตัวดูดซับของแข็งใหม่ที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ ที่ได้รับการพัฒนาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดของ

ระบบที่มีอยู่ หนึ่งในปัญหาที่พบบ่อยของระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหล่านี้ คือ การไหลของตัวดูดซับระหว่างภาชนะของรูปที่ 2.2a นั้นแรง เพื่อให้สอดคล้องกับการไหลที่แรงของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถูกดำเนินการในโรงไฟฟ้า ดังนั้นขนาดของอุปกรณ์และพลังงานที่จำเป็นสำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับควรมีขนาดใหญ่และมีแนวโน้มที่จะแปลเป็นประสิทธิภาพที่สูญเสียและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเป็นสำคัญ นอกจากนี้ในระบบที่ใช้ตัวดูดซับที่มีราคาแพง ทั้งยังค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นที่เกี่ยวข้องกับการซื้อตัวดูดซับและการกำจัดสารพิษตกค้างของตัวดูดซับที่ใช้แล้ว ประสิทธิภาพการทำงานของตัวดูดซับที่ดีภายใต้สภาวะที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงในหลายรอบซ้ำๆ เป็นสภาวะที่จำเป็นในระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.2 รูปแบบทั่วไปของกระบวนการแยกหลักที่เกี่ยวข้องกับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สที่ถูกแยกออกอาจจะเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน หรือแก๊สออกซิเจน ในรูปที่ 2b และ 2c หนึ่งในกระแสแก๊สที่ถูกแยก (A และ B) คือ กระแสที่มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน หรือแก๊สออกซิเจน และอื่นๆ ที่เป็นกระแสแก๊สกับแก๊สที่เหลืออยู่ในแก๊สเดิม (A+B)^[19]

2) การแยกด้วยเยื่อแผ่นเลือกผ่าน (Separation with membranes)

เยื่อแผ่นเลือกผ่าน (รูปที่ 2.2b) เป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นเป็นพิเศษที่ช่วยเลือกซึมผ่านแก๊สบางชนิดจากแก๊สผสม ซึ่งการเลือกผ่านของเยื่อแผ่นเลือกผ่านสำหรับแก๊สที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่น แต่การไหลของแก๊สผ่านเยื่อแผ่นจำเป็นต้องใช้แรงผลักดันโดยใช้ความแตกต่างความดันผ่านเยื่อแผ่น ดังนั้นกระแสแรงดันสูงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการแยกด้วยเยื่อแผ่นเลือกผ่าน ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่นมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท เช่น พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก เป็นต้น ที่อาจประยุกต์ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแยกแก๊สไฮโดรเจนออกจากกระแสแก๊สเชื้อเพลิง การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการ หรือ การแยกแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศ แก๊สออกซิเจนที่ถูกแยกจะถูกส่งต่อไปเพื่อผลิตกระแสคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง แม้ว่าการแยกด้วยเยื่อแผ่นเลือกผ่านพบว่า ในปัจจุบันมีการใช้งานเชิงพาณิชย์อยู่มากในอุตสาหกรรม บ้างก็มีขนาดใหญ่เช่นเดียวกับการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซธรรมชาติ ซึ่งยังไม่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับขนาดใหญ่ และสถานะที่ต้องการในแง่ของความน่าเชื่อถือและต้นทุนที่ต่ำสำหรับระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หน่วยวิจัยและพัฒนาขนาดใหญ่ระดับโลกมีความพยายามที่จะติดตามความคืบหน้า โดยมุ่งเป้าไปที่การผลิตวัสดุเยื่อแผ่นอื่นๆ ที่เหมาะสมกว่าสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการใช้งานขนาดใหญ่

3) การกลั่นของกระแสแก๊สเหลวและการแยกที่ใช้ความเย็น (Distillation of a liquefied gas stream and refrigerated separation)

แก๊สสามารถทำเป็นของเหลวโดยชุดของขั้นตอนการบีบอัด (Compression) ระบายความร้อน (Cooling) และการขยายตัว (Expansion) เมื่ออยู่ในรูปของเหลวส่วนประกอบของแก๊สสามารถแยกออกจากกันในหอกลั่น (Distillation column) ในกรณีของอากาศการดำเนินการนี้จะดำเนินการในระดับขนาดใหญ่ในเชิงพาณิชย์ แก๊สออกซิเจนสามารถแยกออกจากอากาศได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2c และจะถูกใช้ในวงจรของระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (การเผาไหม้ในออกซิเจนและการดักจับการเผาไหม้ก่อน) ในบรรดาก่อนหน้านี้ปัญหาที่สำคัญสำหรับระบบเหล่านี้คือต้องการกระแสแก๊สออกซิเจนปริมาณมาก นอกจากนี้การแยกที่ใช้ความเย็นยังสามารถใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สอื่นๆ ซึ่งสามารถใช้ในการแก๊สเจือปนออกจากกระแสแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่อนข้างสูงความบริสุทธิ์ ตัวอย่างเช่นจากการเผาไหม้ในแก๊สออกซิเจนและสำหรับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซธรรมชาติหรือ

แก๊สสังเคราะห์ที่ได้รับการแปลงจากแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยาซิฟต์

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะติดตั้งในโรงงานที่มีการใช้พลังงานแบบใหม่หรืออาจจะถูกดัดแปลงให้กับโรงงานที่มีอยู่ ซึ่งถ้าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นได้รับการแนะนำอย่างรวดเร็วก็อาจจะต้องการดัดแปลงบางส่วนของโรงงานที่มีอยู่หรือโรงงานเหล่านี้จะต้องมีหมดอายุการใช้งานก่อนกำหนดและถูกแทนที่ด้วยโรงงานใหม่ที่มีการดักจับ ข้อเสียของการดัดแปลงคือ

- อาจจะมีข้อจำกัดของสถานที่ เช่น ความพร้อมของที่ดินสำหรับอุปกรณ์การดักจับ
- โรงงานที่มีอายุยาวนานที่เหลืออยู่อาจมีความจำเป็นที่จะปรับค่าใช้จ่ายที่จำนวนมากสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์การดักจับ
- โรงงานเก่ามีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งการเพิ่มส่วนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานเก่าจะมีผลกระทบมากกว่าในโรงงานที่มีประสิทธิภาพสูง

เพื่อการลดข้อจำกัดของสถานที่ตั้ง โรงงานที่ใช้พลังงานแบบใหม่สามารถที่จะสร้างส่วนพร้อมดักจับที่อยู่กับการออกแบบกระบวนการโดยใช้ตัวแปรเริ่มต้นในการเปลี่ยนแปลงที่จำเป็นในการเพิ่มการดักจับและมีพื้นที่เพียงพอและสิ่งอำนวยความสะดวกให้พร้อมสำหรับการติดตั้งอย่างง่ายของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่จะติดตั้งต่อไป สำหรับบางประเภทของการดักจับที่ปรับปรุงใหม่ ตัวอย่างเช่น การจับภาพการเผาไหม้ก่อนและการเผาไหม้ในออกซิเจน อุปกรณ์ที่ปรับปรุงใหม่ส่วนมากสามารถสร้างขึ้นบนสถานที่ที่แยกต่างหากถ้ามีความจำเป็น อุปสรรคอื่นๆ สามารถแก้ไขได้โดยส่วนใหญ่จะปรับปรุงหรือสร้างใหม่อย่างแข็งแกร่งจากโรงงานที่มีอยู่เดิมเมื่อมีการปรับปรุงการดักจับใหม่ ตัวอย่างเช่น หม้อไอน้ำและกังหันไอน้ำเก่าที่ด้อยประสิทธิภาพจะถูกแทนที่ด้วยหม้อไอน้ำและกังหันไอน้ำเหนือวิกฤติที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพสูงหรือโรงงาน IGCC ในขณะที่ประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของโรงงานที่ปรับปรุงกับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะสูงที่สุดเทียบเท่ากับของโรงงานเดิมโดยปราศจากการดักจับ

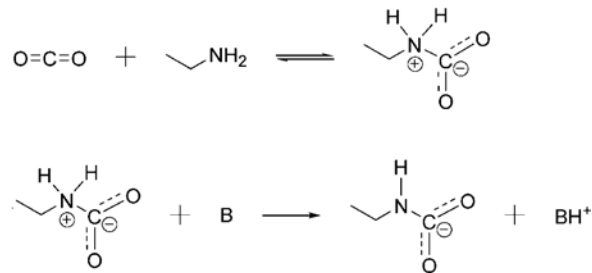
2.1.5 ทฤษฎีพื้นฐานในเบื้องต้นสำหรับปฏิกิริยาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดักจับที่มีหมู่เอมีน และ รูปแบบการเตรียมตัวดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีน

ปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดักจับที่มีหมู่เอมีน

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่มีความเป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) สามารถรับอิเล็กตรอนจากเบสลิวอิสได้ เอมีนจัดว่าเป็นเบสลิวอิส (Lewis base) เพราะที่มีหมู่เอมีน ($-NH_2$) ประกอบด้วยไนโตรเจนที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวทั้งสองจึงสามารถแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา และกรณีที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา

กรณีที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (In absence of water)

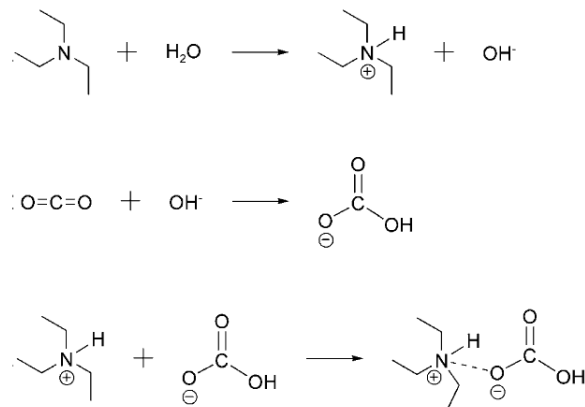
เอมีน 1 โมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์โดยให้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไนโตรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ และกลายเป็น สวิทเทอร์ไอออน (Zwitterion) จากนั้นเอมีนอีก 1 โมเลกุลทำการดึงโปรตอนจากสวิทเทอร์ไอออนเกิดเป็นเกลือของแอมโมเนียมและคาร์บาเมท (Carbamate) สัดส่วนเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยานี้คือ 2:1 เกิดขึ้นกับเอมีนชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ (Primary/Secondary amines) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนในภาวะที่ไม่มีน้ำ โดยที่ B หมายถึง เอมีนชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ^[20]

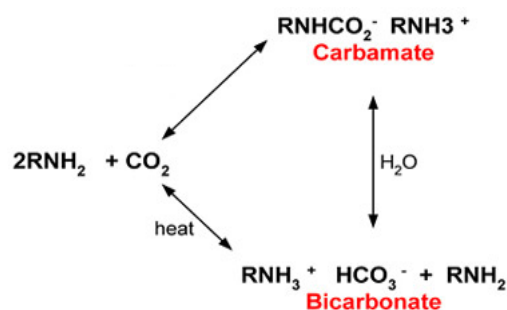
กรณีที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (In presence of water)

สำหรับเอมีนตติยภูมิ (Tertiary amines) มักจะเกิดปฏิกิริยาประเภทนี้ กล่าวคือ ไนโตรเจนบนเอมีนให้อิเล็กตรอนกับน้ำ ได้ควอเตอร์นารีแคทไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน จากนั้นไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์กลายเป็นไบคาร์บอเนตแอนไอออน จากนั้นทั้งสองตัวจับกันด้วยแรงระหว่างไอออน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนตติยภูมิในภาวะที่มีน้ำ^[20]

นอกจากนี้ เอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิสามารถเกิดปฏิกิริยานี้ได้เช่นกัน โดยมีพลังงานการกระตุ้นน้อยกว่าการเกิดเป็นคาร์บาเมต สำหรับเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิจะเกิดเป็นคาร์บาเมตก่อนแล้วจึงเกิดต่อเป็นไบคาร์บอเนต ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่สัดส่วนเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยานี้คือ 1:1



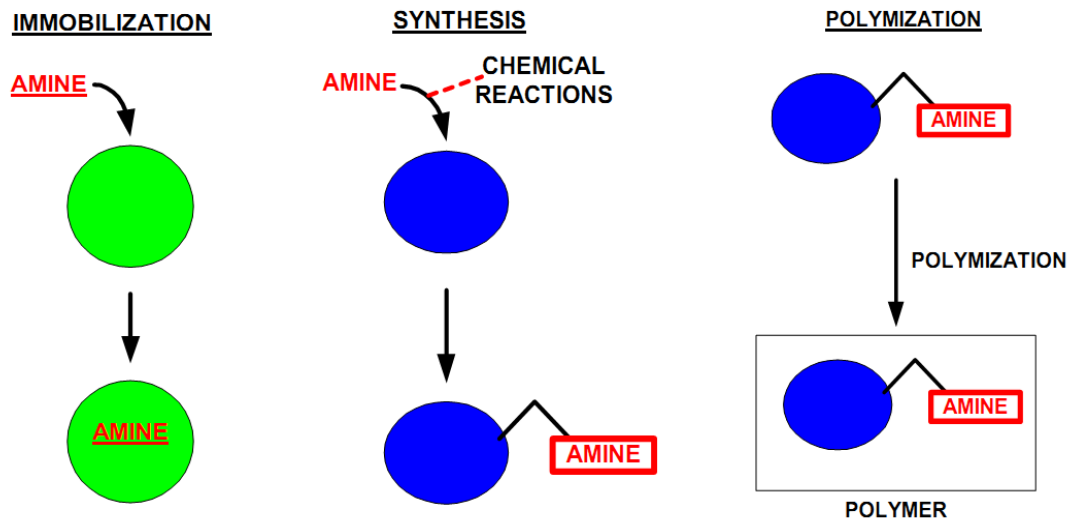
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิในภาวะที่มีน้ำ (ดัดแปลงมาจาก [21])

รูปแบบการเตรียมตัวดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีน การเตรียมตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีนสามารถจำแนกออกเป็น 3 วิธี ดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนี้คือ

- 1) การจำกัดการเคลื่อนไหว (Immobilization) คือ การนำเอมีนไปเคลือบที่ผิวของเม็ดของแข็งโดยตรงด้วยวิธีฝังตัว (Impregnation)

2) การสังเคราะห์ (Synthesis) คือ การทำให้เอมีนเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือเกิดการเชื่อมพันธะระหว่างเอมีนกับพื้นผิวของของแข็ง

3) พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) คือ การนำตัวดักจับที่ได้จากวิธีที่ 2 มายึดติดกับวัสดุพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนสูง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของของแข็งเอมีน



รูปที่ 2.6 การเตรียมตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีน^[22]

2.1.6 ตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Solid sorbents for carbon dioxide capture)

ตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงวัสดุของแข็งที่มีขนาดรูพรุนที่หลากหลาย รวมทั้งซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดเมโซ (Mesoporous silicas) ซีโอไลต์ (Zeolites) และโครงร่างโลหะอินทรีย์ (Metal-organic frameworks) ที่มีศักยภาพในการทำงานสูงและเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่และขนาดย่อม^[23] ในขณะที่ความพร้อมด้านเทคโนโลยีของตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มีความแตกต่างกันระหว่างระดับการวิจัยและระดับสาธิต ซึ่งตัวดูดซับของแข็งแสดงให้เห็นถึง ศักยภาพในเชิงพาณิชย์ของตัวดูดซับในการประยุกต์ใช้กับส่วนที่เกี่ยวข้องกับการช่วยชีวิตและกระบวนการกลั่นอนุกรมสูง อย่างไรก็ตามตัวดูดซับของแข็งนั้นมีความเหมาะสมสำหรับการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์และได้รับความสนใจในการวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ นอกจากนี้ในปัจจุบันเทคโนโลยีดังกล่าวยังมีอุปสรรคในด้านข้อจำกัดในการพัฒนาเทคโนโลยีของการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

การเปรียบเทียบกับตัวดูดซึมสารละลายเอมีน

สารละลายเอมีนที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านการก่อตัวที่ผันกลับได้ (Reversible formation) ของแอมโมเนียมคาร์บาเมต (Ammonium carbamate) แอมโมเนียมคาร์บอเนต (Ammonium carbonate) และแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium bicarbonate)^[24] การก่อตัวและความเข้มข้นโดยเทียบเคียงของสารประกอบเหล่านี้ในสารละลายขึ้นอยู่กับเอมีนที่เฉพาะเจาะจงหรือเอมีนที่ถูกนำมาใช้ เช่นเดียวกับอุณหภูมิและความดันของแก๊สผสม คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซึมได้ดีโดยเอมีนที่อุณหภูมิต่ำและจะหลุดออกที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่สารละลายเอมีนของเหลวได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อที่จะกำจัดแก๊สที่เป็นกรดมาเป็นเวลาเกือบศตวรรษ เทคโนโลยีการคัดแยกด้วยเอมีนยังคงอยู่ภายใต้การพัฒนาในระดับที่จำเป็นสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สไอเสีย^[25]

ข้อดีของตัวดูดซับของแข็ง

ข้อดีของการใช้ตัวดูดซับของแข็งได้รับรายงานอยู่จำนวนมาก เอมีนที่แตกต่างกันของตัวดูดซับของแข็งสามารถเลือกดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยไม่เกิดการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) ที่สำคัญค่าความร้อนของการดูดซับที่ต่ำกว่า (Lower heat of adsorption) สำหรับของแข็งต้องใช้พลังงานที่น้อยกว่าการคายซับ (Desorption) คาร์บอนไดออกไซด์ออกจากพื้นผิววัสดุ นอกจากนี้เอมีนปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ (Primary or secondary amines) โดยทั่วไปจะดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เดียวๆ ในของเหลว สำหรับพื้นผิวของของแข็งแล้วความจุในการดูดซับรวมที่สูงมากจะสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี และในกระบวนการดูดซับแบบเปลี่ยนอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption) ได้มีการรายงานค่าความร้อนของการดูดซับที่ต่ำกว่าของของแข็งเพื่อที่จะลดการใช้พลังงานที่เหมาะสมที่จำเป็นสำหรับการฟื้นฟูตัวดูดซับ^[26] ที่สำคัญยังมีความกังวลด้านสิ่งแวดล้อมต่อผลกระทบที่ร้ายแรงของการใช้เอมีนเหลว โดยหันมาใช้ตัวดูดซับของแข็งแทน^[27]

ข้อเสียของตัวดูดซับของแข็ง

ด้วยในการผลิตตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยคาดว่า มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าค่าใช้จ่ายของเอมีนพื้นฐานที่สามารถผลิตได้โดยง่ายในระดับที่ใหญ่อย่างมีนัยสำคัญ เพราะแก๊สไอเสียหรือแก๊สปล่องควัน (Flue gas) มีสิ่งปนเปื้อนบางส่วนที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ นี่คือการท้าทายทางวิศวกรรมอย่างมีนัยสำคัญที่จะป้องกันตัวดูดซับของแข็งจากการใช้งานในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งยังพลังงานที่เหมาะสมที่จำเป็นสำหรับ

การฟื้นฟูตัวดูดซับนั้นไม่สามารถกู้คืนได้อย่างมีประสิทธิภาพถ้าของแข็งถูกใช้งาน นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนผ่านเบดของแข็งอย่างช้าๆ และไม่มีประสิทธิภาพทำให้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูงในการทำให้ตัวดูดซับเย็นลงในระหว่างการดูดซับและการให้ความร้อนแก่ตัวดูดซับในระหว่างการคายซับ ทำยที่สุดตัวดูดซับของแข็งที่ได้รับความสนใจมากมายมีเพียงการวัดภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ซึ่งจะไม่สนใจผลกระทบของน้ำอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการทำงานและพลังงานที่ใช้ในการฟื้นฟู

ตัวดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorbents)

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุที่มีรูพรุนจำนวนมากจะเกิดผ่านปฏิสัมพันธ์แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals interactions) คาร์บอนไดออกไซด์จะดูดซับได้มากกว่าอย่างมากเมื่อเทียบกับไนโตรเจนเพราะโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์มีความมีขั้วที่มากกว่า^[26] และเกิดการดูดซับได้ดีขึ้นในภาวะที่มีน้ำที่เกี่ยวข้องกับกลไกการดูดซับทางกายภาพ ดังนั้นการค้นพบวัสดุที่มีรูพรุนที่สูงสามารถเลือกดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะแก๊สไอเสียโดยใช้เพียงกลไกการดูดซับทางกายภาพในขอบเขตงานวิจัยที่ศึกษา

ตัวดูดซับทางเคมี (Chemical adsorbents)

ในที่นี้ คือ ของแข็งที่ผ่านการฝังตัวด้วยเอมีน (Amine impregnated solids) ที่พบบ่อยมักเป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนมากและมีพื้นที่ผิวสูง แต่ด้วยเกิดการดูดซับอย่างอ่อนทำให้มีความจุไม่เพียงพอต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะความดันบรรยากาศ เพื่อเพิ่มความจุหรือความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ความดันต่ำ วัสดุที่มีรูพรุนสูงจะถูกเพิ่มหมู่เอมีนซึ่งได้รับการรายงานว่าได้ตัวดูดซับที่มีความจุในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น ซึ่งที่ผ่านมาได้ใช้วัสดุของแข็งจำพวกโพลิเมอร์ ซิลิกา ถ่าน และโครงร่างโลหะอินทรีย์^[23] ของแข็งที่ผ่านการฝังตัวด้วยเอมีนถูกนำมาใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาเคมีกรดเบสของคาร์บอนไดออกไซด์กับเอมีนสามารถเจือจางเอมีนผ่านการบรรจุในรูพรุนของของแข็งได้มากกว่าที่กรณีสารละลายเอมีนที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ในการเปรียบเทียบกับตัวดูดซับของแข็งอื่นๆ เอมีนมีการรายงานเพื่อรักษาขีดความสามารถในการดูดซับและการเลือกดักจับภายใต้สภาวะที่ขึ้น

ตัวอย่างวัสดุของแข็งที่ใช้เป็นตัวดูดซับ แสดงดัง ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างวัสดุของแข็งที่ใช้เป็นตัวดูดซับ^[28]

ตัวดูดซับ	ชนิด	ความจุที่ 0.15 บาร์ (ร้อยละโดยมวล)
PEI-MIL-101	Amine	17.7
mmen-Mg ₂ (dobpdc)	Amine	13.7
Mg-MOF-74	MOF	20.6
SIFSIX-3(Zn)	MOF	10.7
HKUST-1	MOF	11.6
Ni-MOF-74	MOF	16.9
Co-MOF-74	MOF	14.2
mmen-CuBTtri	MOF	9.5
Zn(ox)(atz) ₂	MOF	8.3
Zn-MOF-74	MOF	7.6
CuTATB-60	MOF	5.8
bio-MOF-11	MOF	5.4
FeBTT	MOF	5.3
MOF-253-Cu(BF ₄)	MOF	4.0
ZIF-78	MOF	3.3
NH ₂ -MIL-53(Al)	MOF	3.1
CuBTtri	MOF	2.9
SNU-50	MOF	2.9
en-CuBTtri	MOF	2.3
USO-2-Ni-A	MOF	2.1
MIL-53(Al)	MOF	1.7
MIL-47	MOF	1.1
UMCM-150	MOF	1.8
MOF-253	MOF	1.0
ZIF-100	MOF	1.0
MTV-MOF-EHI	MOF	1.0
ZIF-8	MOF	0.6
IRMOF-3	MOF	0.6
MOF-177	MOF	0.6
UMCM-1	MOF	0.5
MOF-5	MOF	0.5
13X	Zeolite	15.3
Ca-A	Zeolite	18.5

2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Singh และคณะ^[29,30] ศึกษาผลความยาวสายโซ่ของเอมีนต่อความสามารถในการดักจับและอัตราการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการเพิ่มความยาวสายโซ่ระหว่างหมู่เอมีนกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆในโครงสร้างของตัวดักจับมีผลให้อัตราการดักจับลดลง แต่กลับทำให้มีความสามารถในการดักจับเพิ่มขึ้น ศึกษาผลจากโซ่กิ่ง จำนวนหมู่ฟังก์ชันบนเอมีนโซ่ตรง และการแทนที่หมู่แอลคิลบนไดเอมีนเอโรแมติกต่อความสามารถในการดักจับและอัตราการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า การแทนที่โซ่กิ่งด้วยหมู่แอลคิลบนเอมีนที่ตำแหน่งแอลฟาคาร์บอนทำให้เกิดแรงกีดขวางเนื่องจากขนาดของโซ่กิ่ง ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการแทนที่บนบีตาคาร์บอน การเพิ่มจำนวนหมู่ฟังก์ชันบนเอมีนทำให้ความสามารถในการดักจับสูงขึ้นซึ่งมากถึง 3.03 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีนที่ใช้ และการแทนที่หมู่แอลคิลที่ตำแหน่ง 2 และ/หรือ 5 บนไดเอมีนอะโรมาติกทำให้ความเป็นต่างของสารประกอบเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการดักจับและความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

Liu และคณะ^[31] ศึกษาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบผันกลับได้ของตัวดักจับ SBA-15 ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไทโรเอทานอลามีนในแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน พบว่า การปรับปรุง SBA-15 ด้วยไทโรเอทานอลามีนช่วยเพิ่มการเลือกจับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการเลือกจับแก๊สมีเทนมากถึง 7 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับ SBA-15 ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง โดยไทโรเอทานอลามีนไม่ได้เข้าไปเปลี่ยนโครงสร้างของตัวดักจับ SBA-15 แต่อย่างใด การปรับปรุงนี้ช่วยทำให้กระบวนการดักจับสามารถผันกลับได้ โดยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องโดยใช้แก๊สมีเทนบริสุทธิ์เป็นตัวนำพาหรือใช้ความดันสูญญากาศ การทำซ้ำระหว่างการดักจับและการผันกลับเป็นข้อยืนยันถึงเสถียรภาพและศักยภาพในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทนของตัวดักจับนี้

Gray และคณะ^[20] ศึกษาประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดักจับของแข็งที่ตรึงด้วยเอมีนตติยภูมิ ซึ่งแตกต่างจากเอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิ กล่าวคือ อัตราส่วนในการเข้าทำปฏิกิริยาของเอมีนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิ เท่ากับ 2:1 ในขณะที่อัตราส่วนในการเข้าทำปฏิกิริยาของเอมีนตติยภูมิอัตราส่วนเป็นเพียง 1:1 เท่านั้น โดยทดสอบตัวดักจับดังกล่าวพบว่า มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาสูงถึง 3.0 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดักจับ ณ อุณหภูมิ 298 เคลวิน ซึ่งมีประสิทธิภาพเทียบได้กับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลาย และจากการทดสอบคุณลักษณะตัวดูดซับด้วยเทคนิค XPS และ TGA พบว่าตัวดักจับมีเสถียรภาพในการดักจับและการผันกลับ ณ อุณหภูมิช่วง 298-360 เคลวิน

Khalil และคณะ^[32] ศึกษาการตรึงเอมีนสองชนิดได้แก่ โมโนเอทานอลามีน(MEA) และ 2-อะมิโน-2-เมทิล-1-โพรพานอล(AMP) บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำจากกะลาปาล์มด้วยวิธีการฝังตัว พบว่า การตรึงเอมีนลงบนพื้นผิวทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง แต่กลับช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการตรึงเอมีนบนพื้นผิวเป็นการเพิ่มพื้นที่ว่างในการปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น โดยถ่านกัมมันต์ที่ตรึงด้วย MEA มีความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ตรึงด้วย AMP จากการทดสอบด้วยเทคนิค FESEM พบว่า การตรึงเอมีนบนพื้นผิวทำให้รูพรุนภายในถ่านกัมมันต์ถูกปิดกั้น และการทดสอบการผันกลับของปฏิกิริยา พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสามารถเกิดการผันกลับได้ ด้วยการผ่านแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที แต่กลับไม่เพียงพอที่ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการตรึงด้วยเอมีนเกิดการผันกลับได้ เนื่องจากมีพลังงานไม่เพียงพอต่อการสลายพันธะที่เกิดจากกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

Kamarudin และคณะ^[33] ศึกษาการตรึงเอมีนบนพื้นผิวของ MCM-41 โดยเปรียบเทียบระหว่างเอมีนสองชนิดได้แก่ โมโนเอทานอลามีน (MEA) และไดเอทานอลามีน (DEA) พบว่า การตรึงเอมีนบนพื้นผิวช่วยเพิ่มความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น โดยการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวดักจับ แต่ขึ้นอยู่กับพื้นที่เข้าทำปฏิกิริยาของเอมีนในตัวดักจับ การตรึง MEA สามารถทำได้สูงสุดที่ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการตรึงเอมีนด้วย DEA บนพื้นผิว MCM-41 การทดสอบการดักจับและการผันกลับโดยใช้วิธีสลับเปลี่ยนความดันแสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของตัวดูดซับแม้ผ่านการใช้งานมากกว่า 10 วัฏจักร

Belmabkhout และคณะ^[34] ศึกษาการดักจับของคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงกว้างโดยใช้ตัวดักจับซิลิกาที่มีรูพรุนระดับมีโซ ซึ่งประกอบด้วย MCM-41 ซินทรอมดา, MCM-41 ขยายรูพรุน (PE-MCM-41) และ PE-MCM-41 ปรับปรุงผิวด้วยไตรเอมีน (TRI-PE-MCM-41) จากการศึกษาไอโซเทอมการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์และข้อมูลจลนพลศาสตร์แสดงถึงศักยภาพที่สูงของวัสดุ TRI-PE-MCM-41 สำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในการแยกและการทำให้แก๊สบริสุทธิ์ และมีการเลือกจับคาร์บอนไดออกไซด์ของเพิ่มขึ้นในช่วงกว้างเมื่อเทียบกับซิลิกาที่มีรูพรุนระดับมีโซบริสุทธิ์ นอกจากนี้การดักจับสามารถผันกลับได้อย่างรวดเร็วและทนต่อความร้อนและความชื้นได้ดี

León และคณะ^[35] ศึกษาออกไซด์คู่ควบของอลูมิเนียมและแมกนีเซียมที่ได้มาจากการให้ความร้อนของไฮโดรทาลไซต์สำหรับทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการดูดซับนี้เกี่ยวข้องกับการก่อตัวของสปีชีส์ยูนิเดนเทตคาร์บอนไดออกไซด์ (Unidentate CO_2) กับตัวดูดซับกับตำแหน่งการดูดซับอย่างแข็งแรง ในขณะที่ไบเดนเทต (Bidentate) และไบคาร์บอเนต (Bicarbonates) แบบพื้นผิวนำไปสู่การย้อนกลับของการดูดซับที่สูง โดยสรุปขั้นตอนการเตรียมที่นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของไซต์ชนิดเบสไม่ได้นำไปสู่การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของความจุในการดูดซับ แต่นำไปสู่การนำกลับมาใช้ที่ยากขึ้นของตัวรองรับที่อิ่มตัว

Ebner และคณะ^[36] ศึกษาเอมีนที่เป็นของแข็งประกอบด้วย poly (ethylenimine) ตรึงเป็นพื้นผิวบนซิลิกา CARIACT G10 ซึ่งเป็นสารดูดซับสำหรับการใช้งานในกระบวนการการดูดซับแบบความดันแกว่ง (PSA) สำหรับการจับคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงการเผาไหม้หลัง (postcombustion) อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 4-10 องศาเซลเซียส ความดันบางส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ระหว่างร้อยละ 1.2-100 โดยปริมาตร โดยคงที่ความดันรวมที่ 1 บรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงสภาวะที่แห้งถึงร้อยละ 2 โดยปริมาตรและจำนวนรอบของการดูดซับและคายซับอยู่ในช่วง 4-76 รอบ ผลการศึกษาพบว่า ตัวดูดซับเอมีนของแข็งนี้มีเสถียรภาพมากภายใต้ภาวะที่ศึกษา ใ้มน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำมีผลเพียงเล็กน้อยและผลย้อนกลับในทั้งอุณหภูมิศาสตร์และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ความจุทำงานของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิคงที่อยู่ระหว่าง 0.25 และ 2.8 โมลต่อกิโลกรัม เพิ่มขึ้นกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แสดงถึงค่าสูงสุดกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและการผลิตความร้อนของการดูดซับ/ปฏิกิริยาราว 50.0 กิโลจูลต่อโมล และถูกกำหนดว่าอุณหภูมิในการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการ PSA อยู่ที่ประมาณ 80 องศาเซลเซียส ความดันบางส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ >10 กิโลปาสคาลและ 60-70 องศาเซลเซียส ความดันบางส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ <10 กิโลปาสคาล

Zhang และคณะ^[37] ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเอมีนของแข็ง ซึ่งสารเติมแต่งจะเติมลงในโพลีเอทิลีนอิมิดหรือพีอีไอ (Polyethylenimine, PEI) เพื่อลดความต้านทานการแพร่สำหรับโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ คนได้รับสารเติมแต่งหลายชนิดได้เพิ่มเข้าไปในพีอีไอในตัวดูดซับเพื่อตรวจสอบผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับและอัตราการดูดซับ ประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับเอมีนของแข็งที่มีสารเติมแต่งแตกต่างกันพีอีไอถูกประเมินโดยใช้การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนและผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสารเติมแต่งเพียงบางส่วนสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญแต่ไม่ทั้งหมดทุกตัวดูด

ชั้น เพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการที่สารเติมแต่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ ความหนืดของพีอีไอที่มี และไม่มีสารเติมแต่งจะถูกวัดในสภาวะที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งพบว่าการลดลงของ ความหนืดหลังจากที่เพิ่มสารเติมแต่งอาจจะเป็นหนึ่งในสาเหตุของการช่วยในการแพร่ของโมเลกุล คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับจากพื้นผิวของพีอีไอเข้าไปในภายในของพีอีไอ อาจจะเนื่องมาจากการอ่อนลงของอันตรกิริยาของโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์กับกลุ่มเอมีน สารเติมแต่งอาจมีบาง ช่องทางสำหรับการย้ายคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในชั้นของพีอีไอที่ลึกกว่าและเพิ่มตำแหน่งที่ สามารถเข้าถึงทั้งหมดและปรับปรุงประสิทธิภาพของเอมีน และนี่อาจจะเป็นอีกเหตุผลหนึ่งสำหรับ สารเติมแต่งที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ

Veneman และคณะ^[38] ศึกษาการดูดซับของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ใน Lewatit VP OC 1065 ได้ศึกษาในมุมมองของการประยุกต์ใช้ศักยภาพของตัวดูดซับในการดักจับ คาร์บอนไดออกไซด์แบบเผาไหม้หลัง (Post combustion CO₂ capture) คาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำถูกดูดซับบนตำแหน่งวงไวเอมีนบนพื้นผิวของรูพรุนของวัสดุ ตัวดูดซับ อย่างไรก็ตามอันตรกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และกลุ่มเอมีนเป็นการดูดซับทาง เคมี ซึ่งพฤติกรรมดูดซับของน้ำบน Lewatit VP OC 1065 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของการดูด ซับหลายชั้นทางกายภาพ ความแตกต่างในอันตรกิริยายังสะท้อนให้เห็นอย่างชัดเจนในความ แตกต่างของความร้อนการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับน้ำ สูงสุด เท่ากับ 12.5 โมลต่อกิโลกรัม (ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ) ความสามารถในการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 2.8 โมลต่อกิโลกรัม (303 เคลวิน และความดัน คาร์บอนไดออกไซด์ 81 กิโลปาสกาล) เนื่องจากความสามารถในการดูดซับน้ำสูงเหล่านี้ วัสดุดูด ซับสามารถดูดซับน้ำทั้งหมดที่เข้ามาในคอลัมน์ดูดซับซึ่งเพิ่มความต้องการพลังงานทั้งหมดของตัว ดูดซับตามกระบวนการดักจับแบบเผาไหม้หลังร้อยละ 40 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการดูดซับร่วมของ น้ำปริมาณมากหลายตัวเลือกที่ถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับที่ได้สำหรับ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ