

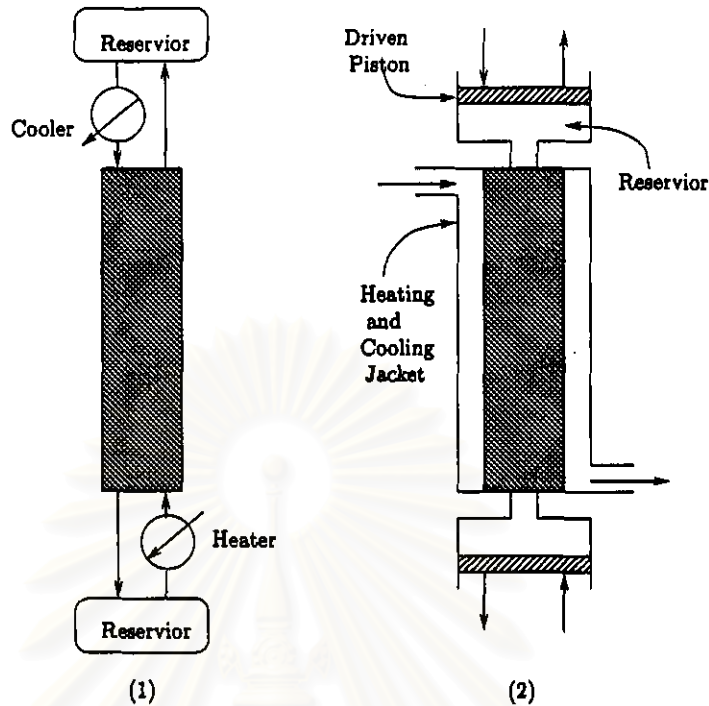
## บทที่ 2

# เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับ

การบรรจุตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ในหอบรรจุเดียว สามารถทำให้เกิดการแยกสาร และเกิดปฏิกิริยาเคมีพร้อมๆ กัน การศึกษาโดยการทดลองระบบดังกล่าวกับปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับพบว่า สามารถเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเคมี ได้มากขึ้นกว่าระบบที่เกิดปฏิกิริยาเคมีเพียงอย่างเดียว (Vaporciyan and Kadlec, 1989) สำหรับปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับได้ ซึ่งถูกจำกัดด้วยสมดุลเคมี มีงานวิจัยหลายชิ้นให้ความสนใจโดยเสนอลักษณะดำเนินการต่างๆ เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสม สำหรับการเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเคมี และสำหรับการแยกผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์มากขึ้น แนวความคิดของการเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ถูกจำกัดด้วยสมดุลเคมีอยู่บนพื้นฐานของหลักการของ Le Chatelier เนื่องจากการแยกด้วยการดูดซับเป็น การแยกผลิตภัณฑ์ออกจากกัน หรือออกจากสารตั้งต้น ภายในบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพียงชั่วคราวเท่านั้น ความเข้าใจในระบบการแยกก๊าซผสมด้วยการดูดซับ รวมทั้งการดำเนินการซึ่งมักเป็นการดำเนินการแบบไม่คงตัว (unsteady operation) หรือแบบคาบ (periodic operation) จึงเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่ง สำหรับการเลือกวิธีดำเนินการแยก หรือระบบการแยกก๊าซผสมด้วยการดูดซับ

### 2.1 การแยกของผสมด้วยการดูดซับ

การแยกของผสมด้วยการดูดซับ อาจอยู่บนพื้นฐานของความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับ หรือความแตกต่างของอัตราการดูดซับของแต่ละองค์ประกอบในของผสม เมื่อองค์ประกอบหนึ่งถูกดูดซับได้ดีกว่า หรือได้เร็วกว่าองค์ประกอบอื่นๆ องค์ประกอบนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านทะลุหลอดดูดซับได้ช้ากว่าองค์ประกอบอื่นๆ จึงสามารถแยกองค์ประกอบนั้นออกจากองค์ประกอบอื่นๆ ได้



รูปที่ 2.1: กระบวนการดูดซับแบบพาราเมตริกบีบี (1) การควบคุมอุณหภูมิที่ของไหลเข้า-ออกหอดูดซับ (2) การควบคุมอุณหภูมิที่หอดูดซับโดยตรง

กระบวนการดูดซับแบบต่างๆ ดำเนินการแตกต่างกัน ดังรายละเอียดโดยสังเขปต่อไปนี้

### 2.1.1 กระบวนการแบบพาราเมตริกบีบี

มีการเสนอกระบวนการดูดซับแบบพาราเมตริกบีบี (parametric pumping) เป็นครั้งแรก โดย Wilhelm (1966) เพื่อใช้ในกระบวนการแยกของเหลวผสม พิจารณารูป 2.1 (1) กระบวนการพาราเมตริกบีบีดำเนินการโดย การป้อนของผสมไป-กลับภายในท่อที่บรรจุด้วยตัวดูดซับ โดยทั้งสองปลายของหอดูดซับมีที่พักของเหลว ก่อนที่จะทำการป้อนของเหลวจากที่พักล่างกลับสู่หอดูดซับ จะมีการให้ความร้อนแก่ของเหลว และก่อนจะปล่อยของเหลวจากที่พักบนก็จะทำการลดอุณหภูมิกลับเพื่อให้ครบรอบดำเนินการ เนื่องจากการดูดซับเกิดได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ องค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีจึงถูกดูดซับอยู่บริเวณปลายด้านบนของหอดูดซับ และเมื่อของผสมไหลไป-กลับหลายรอบที่พักของเหลวด้านล่างจึงมีองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้น้อยกว่าในความเข้มข้นสูง จะเห็นว่ากระบวนการนี้ต้องดำเนินการแบบเป็นกะเท่านั้น

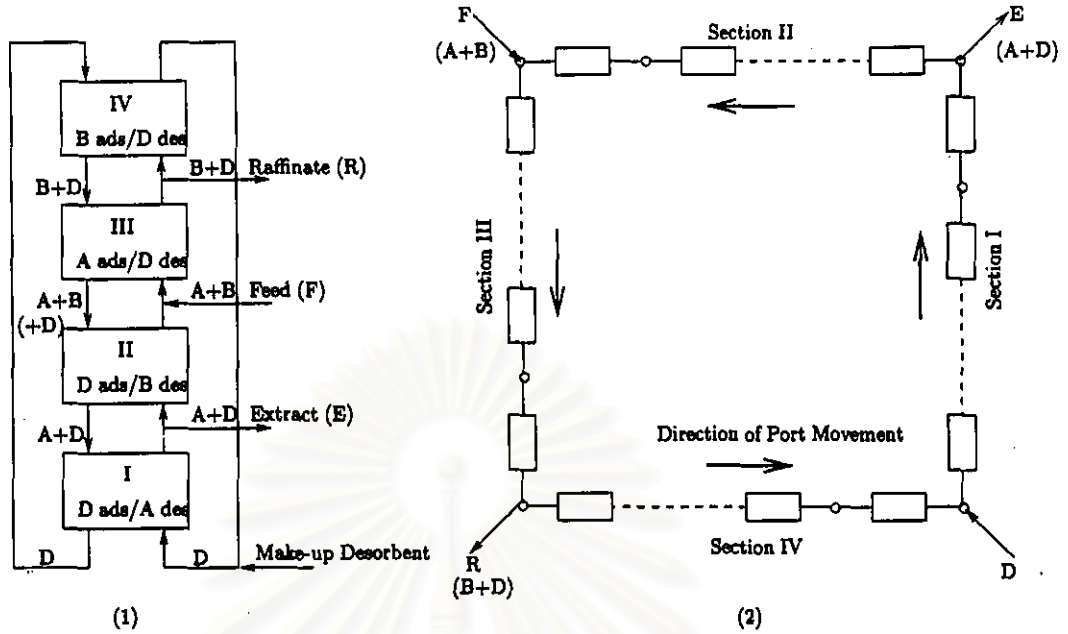
แนวความคิดนี้ได้รับการพัฒนาในหลายแบบ ตัวอย่างเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิ โดยให้การให้ความร้อนแก่หอดูดซับโดยตรง (Patrick, Schrod, and Kermod, 1972)

ดังรูป 2.1 (2) ในการแยกก๊าซผสมอาจใช้ความดันแทนอุณหภูมิ (Jenczewski, and Myers, 1970; Weaver and Hamrin, 1974) เนื่องจากพบว่า ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความดันมากกว่าเมื่อเป็นก๊าซ นอกจากการดูดซับ ยังสามารถใช้การสกัดกับวิธีแบบพาราเมตริกปั๊มบีได้ (Wankat, 1973) รายละเอียดเพิ่มเติมของพาราเมตริกปั๊มบีอาจหาได้จากงานของ Chen (1979) และ Sweed (1984) เป็นต้น

### 2.1.2 กระบวนการเบดเคลื่อนที่และเบดเคลื่อนที่จำลอง

การพัฒนาเทคนิคการแยกโดยการดูดซับอีกกระบวนการหนึ่ง คือ การใช้เบดเคลื่อนที่ (moving bed) โดยการควบคุมให้ตัวดูดซับเคลื่อนที่สวนทางกับการไหลของของไหล อนุภาคของตัวดูดซับที่ไหลผ่านหอยจะถูกขนส่งไปที่หน่วยฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ จากนั้นจะนำกลับมาป้อนเข้าสู่หอยดูดซับใหม่อีกครั้ง รายละเอียดเกี่ยวกับเทคนิคการแยกด้วยเบดเคลื่อนที่ที่สามารถหาได้จากงานของ Ruthven (1984) และของ Barker และ Ganetsos (1989) เป็นต้น

การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับอาจทำได้หลายวิธี กระบวนการที่เสนอในช่วงต้นมักใช้ความร้อนเพื่อให้เกิดการคายการดูดซับ แต่วิธีที่ได้รับความนิยม และมีการศึกษาค่อนข้างมาก คือ การใช้องค์ประกอบอื่น (เรียกว่า ตัวคายการดูดซับ) มาดูดซับแทนที่ ลักษณะดำเนินการนี้สามารถทำให้เกิดการแยกได้ที่สภาวะคงตัว รูปที่ 2.2 (1) แสดงการดำเนินการที่ใช้วิธีดังกล่าวของ Sorbex เพื่อใช้แยกองค์ประกอบ A และ B ซึ่ง A ถูกดูดซับได้ดีกว่า ระบบแบ่งได้เป็น 4 หน่วย การปรับอัตราการป้อนเข้าและดึงผลิตภัณฑ์ออกให้เหมาะสม ทำให้เกิดการดูดซับ และการคายการดูดซับของแต่ละองค์ประกอบ ดังรูป องค์ประกอบ D ที่ป้อนเข้าทางด้านล่างของหน่วยที่ 1 คือ ตัวคายการดูดซับ ตัวดูดซับเคลื่อนที่ลงจากหน่วยที่ VI ถึง I และสวนทางกับการเคลื่อนที่ของของไหล จุดป้อน (F) อยู่ระหว่างหน่วยที่ II และ III เมื่อสายป้อนเคลื่อนที่ผ่านหน่วยที่ III ซึ่งดูดซับองค์ประกอบ A ส่วนใหญ่เอาไว้ ผลิตภัณฑ์ R ที่ดึงออกหลังหน่วยที่ III จึงประกอบด้วย B และ C และเนื่องจากองค์ประกอบ B ส่วนใหญ่ถูกคายการดูดซับในหน่วยที่ II ทำให้ตัวดูดซับที่เคลื่อนจากหน่วยนี้ลงมายังหน่วยที่ I ดูดซับแต่ องค์ประกอบ A และ D เอาไว้ ผลิตภัณฑ์ E ที่ได้จากหน่วยที่ I จึงประกอบด้วย A และ D เป็นส่วนใหญ่ จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีดำเนินการเช่นนี้จะมีตัวคายการดูดซับผสมอยู่ด้วย ทำให้ต้องการหน่วยการแยกของผสมเพิ่มเติม



รูปที่ 2.2: ลักษณะดำเนินการแบบเบดเคลื่อนที่ของ Sorbex (1) เบดเคลื่อนที่จริง (2) เบดเคลื่อนที่จำลอง

การควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับเป็นปัญหาของกระบวนการเบดเคลื่อนที่ โดยเฉพาะกรณีที่มีหอนมีขนาดใหญ่ หรือใช้ความดันสูง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคเบดเคลื่อนที่จำลอง (simulated moving bed) โดยการใช้เบดนิ่งสำหรับการแยก แต่สร้างสถานะเสมือนเคลื่อนที่โดยการขยับตำแหน่งการป้อนและการดึงผลิตภัณฑ์ออก ในทิศทางเดียวกับการไหลของของไหล ซึ่งทำให้เกิดสถานะเสมือนเคลื่อนที่ของตัวดูดซับในทิศทางตรงกันข้าม การฟื้นฟูตัวเร่งปฏิกิริยาจำเป็นต้องใช้ตัวคายการดูดซับในการดูดซับแทนที่ รูป 2.2 (2) แสดงการดำเนินการแบบเบดเคลื่อนที่จำลอง ซึ่งเปรียบเทียบได้กับแบบเบดเคลื่อนที่จริงในรูป 2.2 (1) คือ แต่ละหน่วยมีหน้าที่เหมือนกัน อัตราการเคลื่อนที่ของตำแหน่งป้อนและดึงผลิตภัณฑ์ออก จะอยู่ระหว่างอัตราการผ่านทะลุขององค์ประกอบ A และ B เพื่อให้การเปลี่ยนตำแหน่งการดึงผลิตภัณฑ์ E เกิดก่อนการผ่านทะลุขององค์ประกอบ A กระบวนการนี้อาจใช้หลายหอดูดซับ (Universal Oil Product (UOP) Sorbex Technique; Broughton, 1984-85) หรือเป็นเบดนิ่งที่แบ่งเป็นส่วนๆ (Ruthven and Ching, 1989)

แม้ลักษณะดำเนินการของระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง จะเป็นการแก้ปัญหาเรื่องการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับของระบบเบดเคลื่อนที่จริง แต่ระบบเบดเคลื่อนที่จำลองยังคงมีความซับซ้อนของการดำเนินการอยู่ โดยเฉพาะในเรื่องของการสร้างอุปกรณ์ เพื่อให้สามารถทำการป้อน และดึงผลิตภัณฑ์ออก ณ

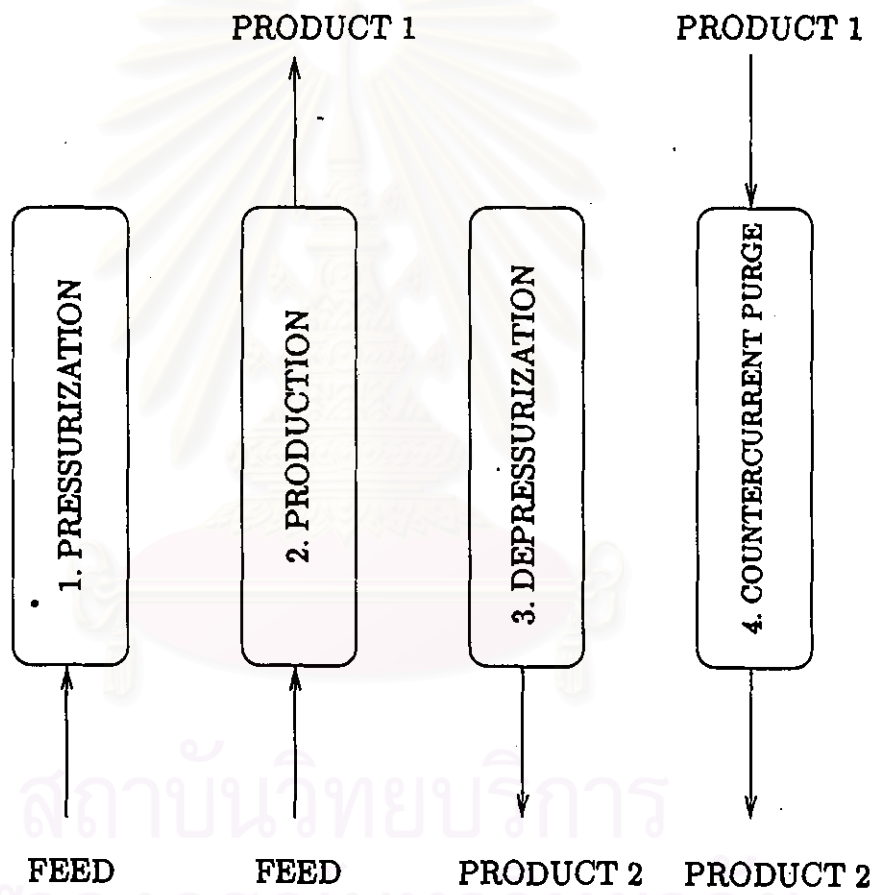
ตำแหน่งต่างๆ ของหอดูดซับได้ นอกจากนี้ ระบบเบดเคลื่อนที่จำลองยังจำเป็นต้องมีส่วนสำหรับแยกของผสมเพิ่มเติม เช่นเดียวกับในระบบเบดเคลื่อนที่จริง

### 2.1.3 กระบวนการดูดซับแบบความดันสลั้บ

นอกจากการดำเนินการแบบเบดเคลื่อนที่จำลอง ยังมีการพัฒนาการแยกภายในเบดหนึ่งแบบต่อเนื่องอีกหลายวิธีโดยการดำเนินการเป็นคาบ เช่น อุณหภูมิสลั้บ การไล่ด้วยก๊าซเฉื่อย การไล่แบบแทนที่ และความดันสลั้บ เป็นต้น (Keller, Anderson, and Yon, 1981) สำหรับการแยกก๊าซผสม กระบวนการแบบความดันสลั้บเป็นวิธีที่เป็นที่นิยม จึงมีการศึกษาและพัฒนามาก ในกระบวนการนี้ การสลั้บความดันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอดูดซับ และทิศทางการไหล เพื่อควบคุมการดูดซับและการคายการดูดซับโดยไม่ใช้พลังงานความร้อน

มีการเสนอแนวความคิดแรกเริ่มของกระบวนการดูดซับแบบความดันสลั้บ สำหรับการแยกอากาศในสิทธิบัตรของ Skarstrom (1960) ในช่วงเดียวกับสิทธิบัตรของ Guerin de Montgarenil และ Domine (1964) ทั้งสองวิธีมีขั้นตอนดำเนินการคล้ายคลึงกันยกเว้นการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ซึ่งกระบวนการของ Skarstrom เสนอการลดความดันตามด้วยการไล่ที่ความดันต่ำ เพื่อชะล้างตัวดูดซับ ส่วนอีกกระบวนการเสนอการคายการดูดซับโดยลดความดันต่ำกว่าบรรยากาศ และจากนั้นก็มีการพัฒนากระบวนการแบบความดันสลั้บเพื่อการแยกก๊าซอื่นๆ เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ อีเลียม ไอโซน เป็นต้น (Richter, Knoblauch, and Juentgen, 1984; Yang, 1987)

การพัฒนากระบวนการดูดซับแบบความดันสลั้บ ทำให้เกิดกระบวนการที่มีลักษณะดำเนินการแบบต่างๆ กระบวนการของ Skarstrom ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การเพิ่มความดัน การผลิต การลดความดันแบบสวนทาง และการไล่แบบสวนทาง เป็นกระบวนการพื้นฐานสำหรับงานวิจัยต่างๆ และการพัฒนาสมรรถนะ การปรับปรุงกระบวนการนี้ทั้งการเสนอกระบวนการที่ซับซ้อนขึ้น ซึ่งใช้หลายหอดูดซับและหลายขั้นตอนดำเนินการ และกระบวนการที่ใช้จำนวนหอดูดซับน้อยลง หรือมีขั้นตอนดำเนินการน้อยลง ตัวอย่างของกระบวนการต่างๆ อาจหาได้ในการรวบรวมสิทธิบัตรของสหราชอาณาจักร (Ray, 1986)



รูปที่ 2.3: กระบวนการดูดซับแบบความดันสลับของ Skarstrom (1960)

ลักษณะดำเนินการแบบ Skarstrom แสดงในรูป 2.3 ในขั้นตอนที่ 1 เป็นการป้อนสายป้อนที่ดันหอดูดซับที่ความดันสูง ในขณะที่ปลายหอบิดอยู่ เพื่อเป็นการเพิ่มความดันภายในหอดูดซับ องค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีส่วนใหญ่จะถูกดูดซับในบริเวณต้นหอดูดซับ ในขณะที่องค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้น้อยกว่าไหลสู่ปลายหอย

ในขั้นตอนที่ 2 เป็นการเริ่มปล่อยผลิตภัณฑ์ออกจากปลายหอดูดซับ ผลิตภัณฑ์ปลายหอดูดซับที่ได้จึงประกอบด้วยองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้น้อยกว่าเป็นส่วนใหญ่ เมื่อมีการดูดซับที่ด้านต้นของหอบรรจุ และตัวดูดซับในบริเวณดังกล่าวเข้าสู่สภาวะสมดุลกับองค์ประกอบในสายป้อน องค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีจึงเคลื่อนมาทางปลายหอดูดซับ

ก่อนจะมีการผ่านทะเล กระบวนการจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 3 คือการปิดปลายหอดูดซับ และลดความดันที่ต้นหอดูดซับสู่ความดันต่ำ เพื่อให้คายการดูดซับ การลดความดันที่ต้นหอดูดซับทำให้เกิดการไหลย้อนกลับในหอดูดซับ องค์ประกอบที่ถูกดูดซับจะออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต้นหอดูดซับ พร้อมกับองค์ประกอบอื่นในวัฏภาคก๊าซ

จากนั้นในขั้นตอนที่ 4 จะใช้ส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ปลายหอดูดซับเพื่อป้อนกลับทางปลายหอดูดซับ ทำให้เกิดการไล่แบบสวนทาง ผลิตภัณฑ์ปลายหอดูดซับจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้น้อย จะชะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีซึ่งอยู่ในวัฏภาคการดูดซับ เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ตัวดูดซับอีกครั้ง เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนที่ 4 ระบบจะมีลักษณะคล้ายสภาวะเริ่มต้น และพร้อมที่จะเริ่มขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง

ลักษณะการดำเนินการข้างต้นได้ปรับปรุงให้สามารถประหยัดพลังงานกลได้มากขึ้น ด้วยการเพิ่มขั้นตอนการเพิ่มความดันแบบสวนทาง และการถ่ายโอนความดัน (Yang, 1987) การเพิ่มความดันแบบสวนทาง คือ การใช้ส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ปลายหอดูดซับในการเพิ่มความดันจากทางปลายหอย โดยแทนที่ส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของการเพิ่มความดันโดยใช้สายป้อน ส่วนการถ่ายโอนความดัน คือ การเพิ่มความดันให้หอดูดซับความดันต่ำโดยใช้ก๊าซในหอดูดซับความดันสูง ซึ่งเป็นการลดความดันของหอดูดซับความดันสูงไปด้วย จึงเป็นการใช้พลังงานกลให้เป็นประโยชน์

ส่วนในขั้นตอนการลดความดัน อีกวิธีหนึ่งที่มีการเสนอ คือ การลดความดันแบบไหลตาม โดยส่วนหนึ่งของการลดความดันจะทำโดยการดึงผลิตภัณฑ์ออกจากปลายหอดูดซับ เนื่องจากการดึง

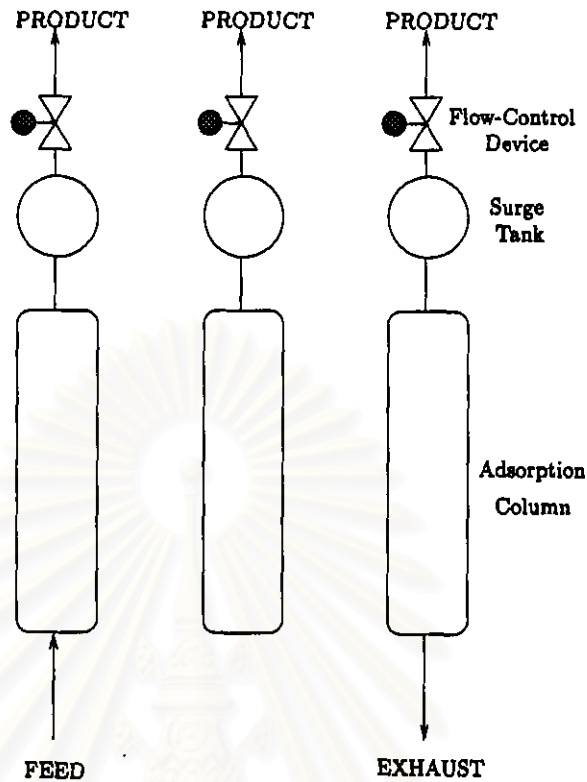
ผลิตภัณฑ์ปลายหอดูดซับเป็นการแยกองค์ประกอบที่ถูกได้น้อยกว่าออกไปจากหอดูดซับ สัดส่วนขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีในหอดูดซับจึงสูงขึ้น และทำให้ผลิตภัณฑ์ต้นหอดูดซับที่ได้ในขั้นตอนนี้กลับมา มีความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์ปลายหอดูดซับที่ได้จากขั้นตอนนี้ การลดความดันแบบไหลตามนี้ อาจนำไปใช้ในการไล่แบบสวนทาง หรืออาจเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ในกรณีการแยกก๊าซผสมหลายองค์ประกอบ ทั้งนี้จะเห็นว่า การลดความดันแบบไหลตามสามารถนำมาใช้ร่วมกับการถ่ายโอนความดัน เพื่อใช้ประโยชน์ของพลังงานกลได้

อีกขั้นตอนหนึ่ง que เพิ่มสมรรถนะในการแยกองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดี ให้ได้ความเข้มข้นสูง คือ การไล่ด้วยองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดี ซึ่งเสนอโดย Tamura (1974) แนวความคิด คือ การแทนที่ก๊าซในช่องว่างในบริเวณต้นหอดูดซับด้วยองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดี ก๊าซที่ใช้ในการไล่นี้คือผลิตภัณฑ์ต้นหอดูดซับ ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีเป็นส่วนใหญ่ โดยป้อนที่ต้นหอดูดซับ (ไล่แบบไหลตาม) พบว่า การไล่นี้ทำให้ทั้งวัฏภาคก๊าซ และวัฏภาคการดูดซับในบริเวณต้นหอดูดซับมีองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีที่ความเข้มข้นสูงขึ้น และเมื่อทำการลดความดันแบบสวนทาง ผลิตภัณฑ์ต้นหอดูดซับที่ได้ซึ่งประกอบด้วยก๊าซในบริเวณต้นหอดูดซับ และก๊าซจากการคายการดูดซับ จึงมีสัดส่วนขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีมากขึ้น

ตัวอย่างของกระบวนการที่ใช้ขั้นตอนนี้เช่น การทดลองการแยกของผสมไฮโดรเจนและมีเทน (Cen and Yang, 1986) ซึ่งสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่ความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 99 ทั้งสองชนิด นอกจากนี้ยังมีกระบวนการที่เสนอโดย Toray Industries (Yang, 1987) และ Air Product Corp. (Sircar and Zondlo, 1977) สำหรับการผลิตไนโตรเจนความเข้มข้นสูงจากอากาศด้วยตัวดูดซับไนโตรเจน

ลักษณะดำเนินการที่มีจำนวนขั้นต่อน้อยกว่าของ Skarstrom ถูกเสนอด้วยเช่นกัน เพื่อลดความซับซ้อนของระบบ ตัวอย่างเช่นการตัดขั้นต่อนการไล่แบบสวนทางออก (Lu et al., 1993) นอกจากนี้ยังมีการเสนอกระบวนการดูดซับความดันสลับแบบคาบสั้น (rapid pressure swing adsorption process) ซึ่งมีทั้งกรณีหนึ่งหอและหลายหอดูดซับ ลักษณะดำเนินการเช่นนี้ต้องใช้หอดูดซับที่มีความดันลดในหอดูดซับมากๆ จึงมักบรรจุด้วยอนุภาคที่มีขนาดเล็ก (0.25-0.84 มิลลิเมตร) และคาบของการดำเนินการมักไม่เกิน 30 วินาที





รูปที่ 2.4: กระบวนการดูดซับแบบความดันสลับคาบสั้น



รูปที่ 2.5: หอบรรจุแบบมีปริมาตรเปล่าปลายหอบรรจุ

รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับคาบสั้นแบบ 3 ขั้นตอน (Turnock and Kadec, 1971; Kowler and Kadlec, 1972) ขั้นตอนที่ 2 สามารถละได้ สิ่งที่แตกต่างกันกับกระบวนการแบบความดันสลับปกติอีกประการหนึ่ง คือ ไม่มีการใช้วาล์วเพื่อควบคุมการไหลระหว่างถังพักและหอดูดซับ หรืออาจบรรจุหอดูให้มีที่ว่างที่ด้านปลาย (ปริมาตรเปล่า) (รูปที่ 2.5) เพื่อใช้เป็นถังพักพิจารณากระบวนการความดันสลับคาบสั้นในรูป 2.4 ความดันที่ต้นหอดูดซับจะถูกควบคุมให้มีการสลับตามขั้นตอน ในขณะที่ปลายหอดูดซับทำการดึงผลิตภัณฑ์ออกโดยควบคุมอัตราการไหลคงที่ ในหนึ่งรอบดำเนินการประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

1. ขั้นตอนการป้อน เป็นการป้อนด้วยสายป้อนที่ต้นหอดูดซับที่ความดันสูง

ตารางที่ 2.1: เปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการความดันสลับแบบหลายหอดูดซับ และแบบคาบสั้น กับกระบวนการพื้นฐาน

	กระบวนการ	
	แบบหลายหอดูดซับ	แบบคาบสั้น
ค่าใช้จ่ายในการอัดความดันกำลังการผลิต	น้อยกว่า	เท่ากันหรือมากกว่า
ความสามารถในการแยก	ระดับเดียวกัน	มากกว่าอย่างมาก
ความซับซ้อนของกระบวนการ	มากกว่า	น้อยกว่า
เวลาที่รอบดำเนินการ	มากกว่า	น้อยกว่า
ความดันของผลิตภัณฑ์ปลายหอดูดซับ	ระดับเดียวกัน	น้อยกว่ามาก
	เท่ากัน	น้อยกว่า

2. ขั้นตอนการชะลอ เป็นช่วงที่ปิดตันหอดูดซับ
3. ขั้นตอนการคายการดูดซับ เป็นการสลับความดันดันหอดูดซับมาที่ความดันต่ำ ทำให้เกิดการไหลย้อนกลับออกมาทางตันหอดูดซับ จึงได้ผลิตภัณฑ์พร้อมกันทั้งสองทาง

การแยกก๊าซผสมของมีเทนและไนโตรเจน ด้วยลักษณะดำเนินการแบบคาบสั้นนี้ ได้ทดลองจริงโดย Turnock และ Kadlec (1971) และยังมีการศึกษาอื่นๆ สำหรับผลจากปัจจัยต่างๆ ส่วนใหญ่เป็นการพัฒนาเพื่อลดความซับซ้อน และค่าใช้จ่ายของกระบวนการ แต่มักได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่แยกได้น้อยลงด้วย สมรรถนะโดยทั่วไปของกระบวนการความดันสลับปกติ แบบหลายหอดูดซับ และแบบคาบสั้นแสดงในตาราง 2.1 (Keller, Anderson, and Yon, 1981)

## 2.2 เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบมีการแยกควบคู่

มีการเสนอแนวความคิดพื้นฐานของการเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา โดยให้เกิดการแยกในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีโดย Gluud และผู้ร่วมงาน (1931) และแนวความคิดนี้ได้รับความสนใจอีกครั้ง รวมทั้งการเสนอแนะวิธีแก้ปัญหาในแง่การปฏิบัติโดย Squires (1967) แม้ในเวลานั้นยังไม่มีการศึกษาแนวความคิดนี้เพื่อพัฒนาต่อ เนื่องจากขาดข้อมูลสนับสนุนจากการทดลอง หลังจากนั้นได้มีการเสนอกระบวนการแยกควบคู่กับการทำปฏิกิริยาหลายวิธี เช่น การกลั่น การใช้แผ่นเยื่อ และการดูดซับ เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ใช้ความร้อนในการแยกควบคู่

### 2.2.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแผ่นเยื่อ

ความสามารถในการแยกสารของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแผ่นเยื่อ (membrane reactor) เกิดจากการใช้แผ่นเยื่อที่มีความสามารถในการเลือกผ่าน เพื่อแยกบางผลิตภัณฑ์ออก ในขณะที่มีการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เคมี โดยปฏิกิริยาเคมีอาจเกิดได้ทั้งภายนอก และภายในของเยื่อแผ่น ตัวอย่างการรวบรวมการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์เคมีประเภทนี้ โดยเฉพาะผลดีในแง่การเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ งานวิจัยของ Wu และผู้ร่วมงาน (1990) Reo และผู้ร่วมงาน (1997) Weyten และผู้ร่วมงาน (1997) เป็นต้น เครื่องปฏิกรณ์ที่ศึกษาส่วนใหญ่เป็นแบบเบดนิ่ง แต่ก็มีการใช้เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบฟลูอิดไดซ์เบดด้วยเช่นกัน (Adris, Lim, and Grace, 1994)

การศึกษาเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแผ่นเยื่อในระยะหลังๆ เน้นที่ประโยชน์อื่น นอกเหนือจากการเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (Buxbaum, 1997) อันได้แก่ ขนาดอุปกรณ์ที่เล็กลง ความเป็นไปได้ที่จะสามารถดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำลง หรือความดันสูงขึ้น รวมทั้งการลดค่าใช้จ่ายสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ ลดปฏิกิริยาร่วม และการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

### 2.2.2 เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบมีการดูดซับควบคู่

การทำปฏิกิริยาแบบมีการดูดซับควบคู่สามารถทำได้โดย การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีความสามารถในการเลือกดูดซับด้วย (อนุภาคที่มีความสามารถทั้งในด้านการเร่งปฏิกิริยาและการดูดซับ) หรืออาจใช้อนุภาคที่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา (ถ้าปฏิกิริยาจำเป็นต้องใช้ตัวเร่ง) ร่วมกับอนุภาคอีกชนิดที่มีความสามารถในการดูดซับ เครื่องปฏิกรณ์เคมีประเภทนี้สามารถแบ่งย่อยได้หลายประเภทตามวิธีดำเนินการ

เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบโครมาโตกราฟีค

เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบโครมาโตกราฟีค (chromatographic reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบมีการดูดซับควบคู่ ที่มีการศึกษาในช่วงแรก (Magee, 1963; Roginskii, Yanovskii, and Graziev, 1962) เครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้มีลักษณะเป็นเบดนิ่งที่มีการป้อนแบบเป็นคาบ โดยผลิตภัณฑ์จะได้จากปลายหอบรรจุเท่านั้น ดังนั้นการดูดซับรวมทั้งการแยกจึงเกิดเพียงในช่วงเวลาหนึ่ง เนื่องจากการดูดซับทำให้เกิดการแยกระหว่างผลิตภัณฑ์ หรือระหว่างผลิตภัณฑ์กับสารตั้งต้นภายในคอลัมน์

ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เกินสัดส่วนตามสมดุลเคมี มีการศึกษาในปฏิกิริยาหลายประเภท และมีบางการศึกษาพบว่า กระบวนการนี้สามารถให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเกือบสมบูรณ์ รายละเอียดเกี่ยวกับการจำลองแบบรวมรวบโดย Cho, Aris และ Carr (1982) ส่วนตัวอย่างผลการทดลอง เช่น ปฏิกิริยาการแยกโมเลกุลไฮโดรเจน ที่มีสารตั้งต้นเป็นไซโคลเฮกเซนและผลิตภัณฑ์เป็นเบนซีน (Matsen, Harding, and Magee, 1965; Schweich, and Villermaux, 1982) และที่มีสารตั้งต้นเป็นอีเทนและได้ผลิตภัณฑ์เอทิลีน (Antonucci, Giordano, and Bart, 1978) นอกจากแบบเบตนี้ยังมีการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนรอบแกนทั้งในระบบของเหลว-ของแข็ง (Cho et al., 1980) และก๊าซ-ของแข็ง (Wardwell et al., 1982)

ในการทดลองปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับน้ำ (water-gas shift reaction) ควบคู่กับปฏิกิริยาประเภทเกิดสารประกอบคาร์บอนेट (carbonation reaction) โดย Han และ Harrison (1994) ผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยาถูกแยกโดยการดูดซึมเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเป็นสารประกอบคาร์บอนेट เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุบรรจุ วัสดุบรรจุที่ใช้ได้แก่ โดโลไมท์ หินปูน เศษหินอ่อน เนื่องจากมีแคลเซียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบ ผลการศึกษาพบว่า เครื่องปฏิกรณ์สามารถให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์เคมีปกติได้ แม้ในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกเหนือจากประโยชน์ในแง่การเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา ยังมีการใช้ประโยชน์ของเครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้ในแง่อื่น เช่น การศึกษาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา หรือการเพิ่มสมรรถนะในแง่การแยกสาร (Magee, 1963; Langer, Yurchak, and Patton, 1969) และ การกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำ (Andrews and Tien, 1981) เป็นต้น

**เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบพาราเมตริกบีบี**

มีการศึกษาเชิงทฤษฎีโดย Apostolopoulos (1975) และมีการพัฒนากระบวนการแยกโดยการสกัดแบบพาราเมตริกบีบี (Wankat, 1973) เป็นเครื่องปฏิกรณ์เคมีโดย Goto และ Matsubara (1977) การศึกษาข้างต้นทั้งหมดเป็นระบบของเหลว ทั้งการใช้การดูดซับและการสกัดพบว่าสามารถเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาได้สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์เคมีปกติได้

## เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดเคลื่อนที่และแบบเบดเคลื่อนที่จำลอง

ในปฏิกิริยาประเภท  $A \rightleftharpoons B + C$  การแยกผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกจากกันเป็นการลดการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ และเพิ่มสมรรถนะในการทำปฏิกิริยา แต่ในกรณีปฏิกิริยา  $A \rightleftharpoons B$  เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งไม่สามารถให้สมรรถนะได้ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์ปกติมาก ทั้งในแง่การทำปฏิกิริยาและการแยกสาร ในกรณีดังกล่าวพบว่า การใช้เบดเคลื่อนที่ที่สามารถให้สมรรถนะดีกว่ทั้งในการเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา และความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ (Cho, Aris, and Carr, 1982; Petroulas, Aris, Carr, 1985) ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีของเบดเคลื่อนที่ ผลิตภัณฑ์ B จะถูกคายการดูดซับภายนอกหอบรรจุซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงไม่เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจาก B เป็น A หลังการคายการดูดซับ ในขณะที่ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่ง การคายการดูดซับผลิตภัณฑ์ B เกิดในหอบรรจุ จึงเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้เนื่องจากปฏิกิริยามีผลิตภัณฑ์เพียงชนิดเดียว ดังนั้นสมรรถนะทั้งในแง่การทำปฏิกิริยาและการแยกสารจึงไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้มาก

มีการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งในปฏิกิริยาประเภทอื่นด้วยเช่นกัน รวมทั้งปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ (Takeuchi and Uraguchi, 1977) สำหรับปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ มีการศึกษาที่แสดงว่า ไม่ว่าจะใช้ตัวดูดซับที่เลือกดูดซับสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม สามารถทำให้เกิดการเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาได้ (Carr, 1992)

มีการเสนอวิธีการอื่นที่เฉพาะตัวดูดซับเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เช่น การใช้ตัวดูดซับขนาดเล็ก เพื่อให้สามารถไหลผ่านเบดนิ่ง ที่บรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดใหญ่กว่า และป้อนก๊าซที่จะทำปฏิกิริยาสวนทางกับตัวดูดซับ มีการศึกษากระบวนการนี้กับปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอล ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงการทดลอง (Kuczynsky et al., 1987) อีกกระบวนการหนึ่งคือ การใช้ตัวดูดซับขนาดใหญ่เพื่อให้ผ่านฟลูอิดไดซ์เบดของตัวเร่งปฏิกิริยา มีการทดลองกระบวนการนี้กับปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจนจากมีเทน โดยใช้  $Ni/Al_2O_3$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และโคโลไมท์เป็นตัวดูดซับผลิตภัณฑ์ร่วมคาร์บอนไดออกไซด์ (Brun-Teekhovoi et al., 1986)

แม้ในหลายการศึกษาจะพบว่า กระบวนการแบบเบดเคลื่อนที่ที่สามารถทำให้เกิดสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ และอัตราการผลิตสูง แต่ในระดับอุตสาหกรรมยังคงพบ

ปัญหาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค จึงมีการใช้เบดเคลื่อนที่จำลองเป็นเครื่องปฏิกรณ์เคมี ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Kruglov (1994) และของ Tonkovich และ Carr (1994a,b) เป็นต้น การศึกษาเบดเคลื่อนที่จำลองยังคงพบว่าสามารถเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา และให้ผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างเข้มข้นได้

เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับ

เครื่องปฏิกรณ์เคมีที่บรรจุด้วยดูดซับ ภายใต้การดำเนินการแบบความดันสลับถูกเสนอเป็นครั้งแรกโดย Kadlec และผู้ร่วมงาน (periodic separating reactor: Vaporciyan and Kadlec, 1987, 1989; pressure swing reactor: Lee and Kadlec, 1989) และได้จดสิทธิบัตรโดย Kadlec และ Vaporciyan (1993) การดำเนินการเหล่านี้ใช้ขั้นตอนเหมือนกับการดูดซับความดันสลับแบบคาบสั้นที่เสนอโดย Kadlec และผู้ร่วมงาน ลักษณะการดำเนินการจะมีการสลับความดันที่ต้นเครื่องปฏิกรณ์เป็นคาบ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ถูกดึงออกจากปลายเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหลคงที่ ขั้นตอนดำเนินการประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การป้อน การชะลอ และการคายการดูดซับ (รูป 2.4)

การศึกษากระบวนการดังกล่าวมีทั้งเชิงทฤษฎี (Vaporciyan and Kadlec, 1987; Lee and Kadlec, 1989) และเชิงการทดลอง (Vaporciyan and Kadlec, 1989) มีการศึกษาปฏิกิริยาหลายประเภทในเชิงทฤษฎี ทั้งกรณีปฏิกิริยาเดี่ยวและหลายปฏิกิริยา ได้แก่

- $A \rightarrow B$
- $A \rightarrow 1/2B + 1/2C$
- $C \leftarrow A \rightarrow B$
- $A \rightleftharpoons B$
- $A \rightleftharpoons 1/2B + 1/2C$
- $C \rightleftharpoons A \rightleftharpoons B$
- $C \leftarrow A \rightleftharpoons B$

การศึกษาพบว่าการพัฒนาสมรรถนะทั้งในด้านการแยกสาร และการทำปฏิกิริยาตามกฎของ Le Chatelier ในกรณีหลายปฏิกิริยาพบว่าการดูดซับส่งผลต่อการเลือกเกิดปฏิกิริยาด้วย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของการแปรการกระจายตัวของตัวดูดซับ และตัวเร่งปฏิกิริยาตามหอบรรจุในปฏิกิริยา  $C \leftarrow A \rightarrow B$ , (Lee and Kadlec, 1989) ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มสมรรถนะจากกรณีการกระจายตัวตามหอบรรจุคงที่ได้

ส่วนการทดลองเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ย้อนกลับ ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ แพลทินัม และตัวดูดซับคือซีโอไลต์ 5A สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นในบางช่วงดำเนินการ ทั้งนี้เนื่องจาก ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองดังกล่าวสามารถดูดซับคาร์บอนมอนอกไซด์ได้เล็กน้อย และคาร์บอนมอนอกไซด์มีส่วนขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาเมื่อถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษากระบวนการนี้ พบว่า ในบางช่วงดำเนินการ อาจได้สัดส่วนขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุมากกว่าที่ต้นหอบรรจุ ซึ่งลักษณะเช่นนี้ไม่เกิดขึ้นในการดูดซับแบบความดันสลับที่ไม่มีปฏิกิริยา

มีการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับในเชิงทฤษฎี ในรอบดำเนินการแบบอื่น เช่น รอบดำเนินการที่ศึกษาโดย Kadlec โดยละขั้นตอนการชะลอ (Alpay, Kenney, and Scott, 1993) และมีการศึกษาโดยใช้รอบดำเนินการแบบ Skarstrom (Alpay et al., 1994; Chatsiriwech et al., 1994; Kirkby and Morgan, 1994) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเพิ่มความดันบางส่วนแบบสวนทาง โดยแทนที่ขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง (Kirkby and Morgan, 1994) มีการศึกษาทั้งปฏิกิริยาผันกลับได้และไม่ผันกลับ สภาวะแบบอุดมทฤษฎีคงที่และไม่คงที่ รวมทั้งการเลือกดูดซับ การศึกษาพบว่า กระบวนการสามารถเพิ่มสมรรถนะจากเครื่องปฏิกรณ์ปกติได้ ความเข้มข้นของทั้งสองสายผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับทางเลือกดูดซับ ในกรณีรอบดำเนินการที่ไม่มีการไล่แบบสวนทางและปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับ พบว่ามีสภาวะที่สัดส่วนขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุมากกว่าต้นหอบรรจุ

มีการดัดแปลงรอบดำเนินการที่ศึกษาโดย Kadlec เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดย Lu และ Rodrigues (1993) โดยใช้การไล่แบบสวนทางแทนขั้นตอนการคายการดูดซับ มีการศึกษาปฏิกิริยา  $A \rightleftharpoons B + C$  ในเชิงทฤษฎี พบว่าสามารถเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาจากสัดส่วน

สมดุสเคมีได้ทั้งกรณีตัวดูดซับเลือกดูดซับเฉพาะ B และดูดซับทั้ง A และ B ในกรณีการบรรจุตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเป็นชั้น ไม่พบว่ามีการเพิ่มสมรรถนะอย่างชัดเจน นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เสนอกระบวนการแบบสองหอบรรจุ ว่าน่าจะเหมาะกับกรณีที่ทั้ง A และ B ถูกดูดซับ แม้กระทั่งกรณีที่ A ถูกดูดซับได้มากกว่า

Goto และผู้ร่วมงานได้ทดลองปฏิกิริยาแยกโมเลกุลไฮโดรเจนของไซโคลเฮกเซน และปฏิกิริยานอร์มัลเฮกเซนและโพรเพน ดีไฮโดรอะโรมาไทเซชัน สำหรับปฏิกิริยาแรก (Goto, Tagawa, and Omiya, 1993) สารตั้งต้นไซโคลเฮกเซนได้ผลิตภัณฑ์เป็นเบนซีนและไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และตัวดูดซับไฮโดรเจนที่ใช้คือ โลหะผสม CaNi<sub>5</sub> ส่วนปฏิกิริยาดีไฮโดรอะโรมาไทเซชัน (Goto, Tagawa, and Ohkawara, 1995;1996)ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn/H-ZSM5 โดยศึกษาการแยกไฮโดรเจนด้วยโลหะผสมต่างๆ ที่มีคุณสมบัติในการกักเก็บไฮโดรเจน (hydrogen storage alloy) ได้แก่ Mg, Ni, Mg<sub>2</sub>Cu, และ Mg<sub>51</sub>Zn<sub>20</sub> ในงานวิจัยใช้สายป้อนเป็นสารตั้งต้นที่เจือจางด้วยฮีเลียม

การศึกษาก่อนสถานะคงตัวพบว่า สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงเวลาหนึ่ง ผู้วิจัยได้ขึ้นตอนแบบต่อเนื่องโดยการใช้ฮีเลียมชะล้างตัวดูดซับ แต่พบว่าต้องใช้ปริมาณฮีเลียมสูงถึงประมาณ 20 เท่าของก๊าซในช่วงการทำปฏิกิริยาควบคู่กับการดูดซับ ทั้งนี้เพราะการชะล้างการที่ความดันสูงเท่ากับช่วงการทำปฏิกิริยา ส่วนผลในแง่การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์สำหรับปฏิกิริยาดีไฮโดรอะโรมาไทเซชันซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ C<sub>6</sub> ถึง C<sub>9</sub> ไม่พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากการใช้ตัวดูดซับ ทั้งนี้เพราะไฮโดรเจนที่ถูกดูดซับเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมในทุกผลิตภัณฑ์หลัก จึงไม่มีผลต่อปฏิกิริยาใด โดยเฉพาะ นอกจากนี้ได้ศึกษาการกระจายตัวของตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นกัน แต่ไม่พบผลสำคัญต่อสมรรถนะ

Dandekar และผู้ร่วมงาน (1996) ได้ศึกษาเชิงทฤษฎีและเสนอกระบวนการสำหรับสังเคราะห์เมทานอลจากก๊าซสังเคราะห์ (synthesis gas) ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์ออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินา และตัวดูดซับเมทานอลหลายชนิด เช่น ซิลิกาเจล ถ่านกัมมันต์ อะลูมินา และซีโอไลต์ ลักษณะสำคัญของกระบวนการ คือ การใช้ไฮโดรเจนไล่แบบสวนทางก่อนการลดความดัน เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจากเมทานอลความเข้มข้นสูงในช่วงคายการดูดซับ มีการศึกษาวิธีเพิ่มและลดความดันแบบต่างๆ และพบว่าสามารถ



### เพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาได้

อีกกระบวนการหนึ่งซึ่งเสนอโดย Carvill และผู้ร่วมงาน (1996) ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่

1. การทำปฏิกิริยาควบคู่กับการดูดซับ โดยการป้อนสายป้อนที่มีสารตั้งต้นตามสัดส่วนสารสัมพันธ์ ที่ความดันสูงทางด้านหอบรรจุ ผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับได้น้อย ซึ่งถูกใช้ในการเพิ่มความดันจาก ขั้นตอนก่อนหน้าถูกดึงออก เป็นผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุในความเข้มข้นสูง และเป็นผลิตภัณฑ์หลัก
2. การลดความดันแบบสวนทาง คือ การปิดปลายหอบรรจุและสลับความดันที่ด้านหอบรรจุมาสู่ความดันต่ำ
3. การไล่แบบสวนทาง โดยใช้องค์ประกอบเฉื่อยซึ่งไม่มีผลต่อปฏิกิริยาและการดูดซับ เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ
4. การไล่แบบสวนทาง โดยใช้ส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุจากขั้นตอนแรกเพื่อไล่องค์ประกอบที่ใช้ได้ในขั้นตอนที่ 3
5. การเพิ่มความดันแบบสวนทาง โดยใช้ผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุเพื่อเตรียมเบดให้พร้อมสำหรับขั้นตอนที่หนึ่ง

กระบวนการที่เสนอนี้เรียกว่า Sorption-Enhanced Reaction Process (SERP) ซึ่งมีการทดลองกับปฏิกิริยาออกเตอร-ก๊าซซิฟิเคชันกลับ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา BASF(Germany) และตัวดูดซับซีโอไลต์ NaX ของ UOP(US) พบว่าผลิตภัณฑ์หลักคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้มีความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 99 และได้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาร้อยละ 36 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์เดิมปกติต้องใช้อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส ผู้วิจัยเสนอแนะว่ากระบวนการนี้เหมาะสมกับปฏิกิริยาที่มีข้อจำกัดทางสมดุล มีผลิตภัณฑ์หลักหนึ่งชนิดและผลิตภัณฑ์รองหนึ่งชนิด