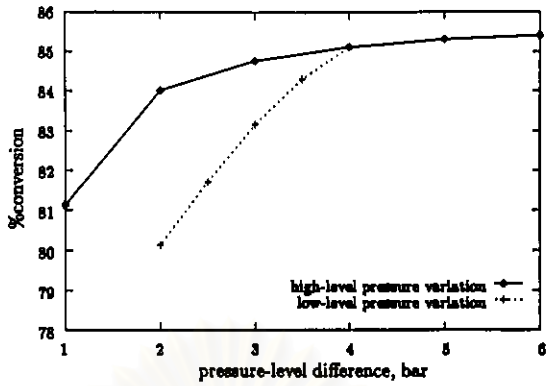
บทที่ 5

ผลของตัวแปรและขั้นตอนอื่นๆ

บทที่ 4 เป็นการศึกษาสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์เคมี ที่รอบดำเนินการมีพื้นฐานมาจากกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับ เมื่อมีการเพิ่มขั้นตอนการไล่ด้วยองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดี รวมทั้งผลจากเวลาในขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน การไล่แบบไหลตามและสวนทาง บทนี้จะเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ ในการพัฒนาสมรรถนะของกระบวนการที่มีขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม โดยเป็นการศึกษาถึงผลของตัวแปรและขั้นตอนอื่นๆ ที่น่าจะมีผลต่อสมรรถนะของกระบวนการในบางด้าน หัวข้อที่ 5.1 เป็นการศึกษาผลของความดันสูงและความดันต่ำในแต่ละรอบดำเนินการ หัวข้อที่ 5.2 เป็นการศึกษาผลของความสามารถในการทำปฏิกิริยา และการดูดซับของหอบรรจุ ตัวแปรที่ศึกษาคือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวดูดซับที่บรรจุในหอบรรจุ ผลขององค์ประกอบในสายป้อนได้ศึกษาในหัวข้อที่ 5.3 และในหัวข้อ 5.4 เป็นการศึกษาสมรรถนะที่เปลี่ยนไปเมื่อมีองค์ประกอบอื่นๆ ในระบบถูกดูดซับด้วย จากนั้นเป็นการเสนอการเพิ่มขั้นตอนอื่นๆ เพื่อเพิ่มสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์ โดยเป็นการศึกษาขั้นตอนการลดความดันแบบไหลตามในหัวข้อ 5.5 ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดี ในการแยกแบบความดันสลับ และในหัวข้อ 5.6 เป็นการเสนอการเพิ่มความดันแบบสวนทางและการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสาย โดยทั้งสองขั้นตอนดังกล่าวอาจทำให้เครื่องปฏิกรณ์สามารถแยกผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดได้ ในความเข้มข้นสูงในทั้งสองสายผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาสมรรถนะในขั้นตอนต่างๆ ในบทที่ 4 จะเห็นว่า การเพิ่มการไล่แบบไหลตามในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีรอบดำเนินการเดิมแบบ Skarstrom สามารถให้สมรรถนะในลักษณะการทำปฏิกิริยาและการแยกดีกว่ากรณีแบบรอบดำเนินการสั้น แต่อย่างไรก็ตาม รอบดำเนินการยาวทำให้

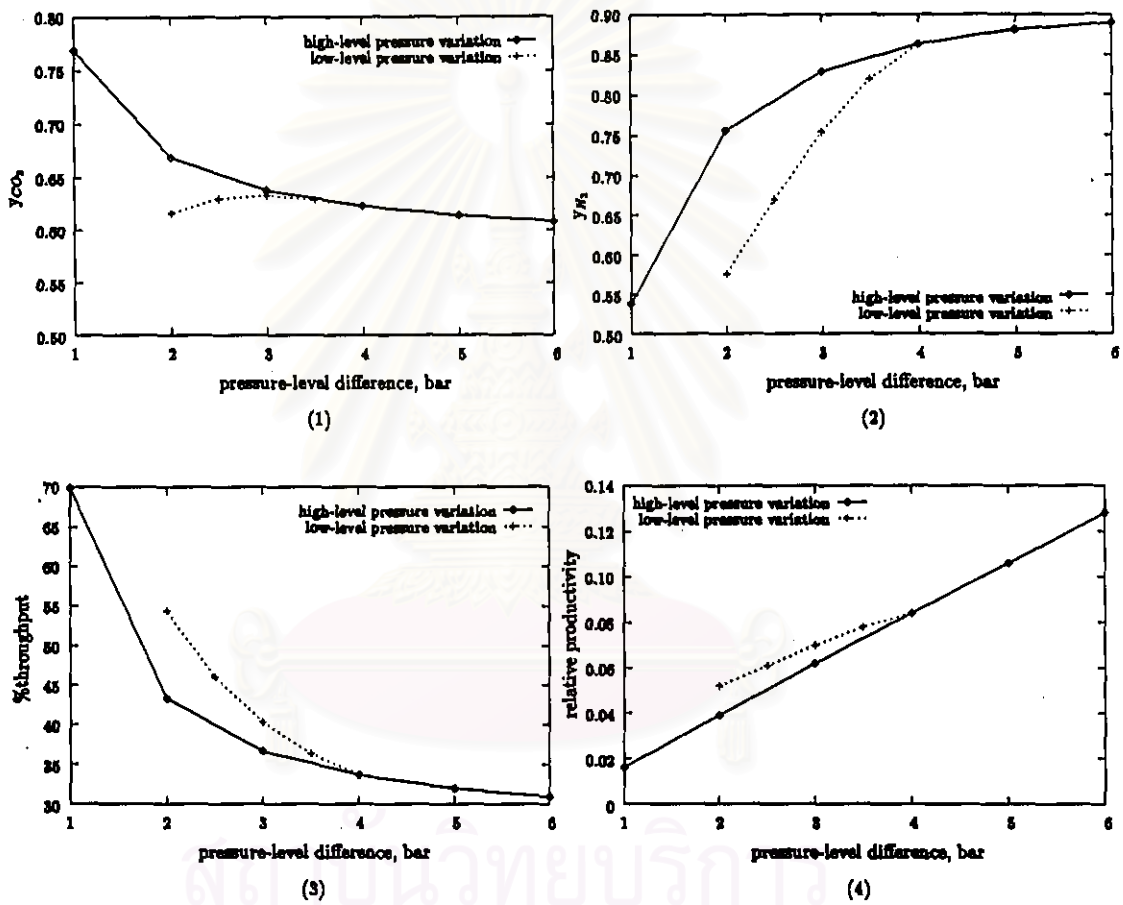


รูปที่ 5.1: ผลของผลต่างของความดันสูงและความดันต่ำ ต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเคมี

อัตราการผลิตต่ำ ดังนั้นกรณีเปรียบเทียบที่จะใช้ศึกษาในบทนี้จึงเลือกใช้รอบดำเนินการที่มีพื้นฐานมาจากแบบ Skartrom ดังเช่นหัวข้อ 4.2 แต่จะลดเวลาในแต่ละรอบปฏิบัติลงโดยลดเวลาในขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน จากหัวข้อ 4.5.1 จะเห็นว่า เวลาในการเพิ่มและลดความดันส่งผลสำคัญต่อสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์ เฉพาะในช่วงที่ขั้นตอนเหล่านี้มีเวลาสั้น ในบทนี้จะเลือกใช้เวลาในทั้งสองขั้นตอนนี้เท่ากับ 5 วินาที เนื่องจากเห็นว่าการเพิ่มเวลามากกว่านี้ไม่ได้ทำให้ได้สมรรถนะเพิ่มขึ้นมาก

5.1 ผลของความดันสูงและความดันต่ำ

การศึกษาแบ่งเป็น 2 ตอน คือ การแปรความดันสูง จาก 2 ถึง 7 บาร์ โดยคงความดันต่ำที่ 1 บาร์ และ การแปรความดันต่ำจาก 1 ถึง 3 บาร์ โดยคงความดันสูงไว้ที่ 5 บาร์ รูปที่ 5.1 แสดงผลของผลต่างของความดันสูงและต่ำต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา สำหรับการศึกษาทั้งสองตอน จะเห็นว่า การเพิ่มผลต่างของความดันทำให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก การใช้ความดันในขั้นตอนการผลิตสูงทำให้ดูดซับได้มาก และการใช้ความดันในขั้นตอนการคายการดูดซับต่ำก็ทำให้คายการดูดซับได้มาก ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างความดันสูงและต่ำมีจึงผลต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับได้ในแต่รอบดำเนินการ และมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา (สมดุลของปฏิกิริยา) ส่วนที่พบว่าสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเริ่มคงที่เมื่อเพิ่มความดันสูงมากขึ้น คาดว่าเนื่องมาจากสมรรถนะในการแยกผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 5.2: ผลของผลต่างของความดันสูงและความดันต่ำ ต่อสมรรถนะต่างๆ และสัดส่วนการไหลผ่าน (1) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ (2) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน (3) สัดส่วนการไหลผ่าน (4) อัตราการผลิตสัมพัทธ์

รูปที่ 5.2 (1) และ 5.2 (2) แสดงผลของผลต่างของความดันสูงและต่ำต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มผลต่างของความดันไม่ส่งผลสำคัญต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ ยกเว้นในช่วงความแตกต่างของความดันน้อยๆ ในกรณีที่แปรความดันสูง ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ลดลงค่อนข้างมาก ส่วนผลต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนพบว่า การเพิ่มผลต่างของความดันทำให้ได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ผลต่างของความดันน้อยๆ ผลดังกล่าวอาจพิจารณาได้จากสัดส่วนการไหลผ่าน (รูปที่ 5.2 (3)) เนื่องจากปริมาณก๊าซในขั้นตอนการป้อนเพิ่มขึ้นตามผลต่างของความดัน ส่วนอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุถูกกำหนดไว้คงที่ สัดส่วนการไหลผ่าน ซึ่งอาจพิจารณาว่าเป็นสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุต่อก๊าซที่ใช้ป้อน (เท่ากับปริมาณผลิตภัณฑ์ทั้งหมด) จึงแปรผันตามส่วนกลับของความแตกต่างของความดัน ในช่วงที่ผลต่างของความดันมีค่าน้อยจึงเห็นว่า สัดส่วนการไหลผ่านลดลงมากเมื่อเพิ่มค่าผลต่าง ซึ่งการที่ผลิตภัณฑ์ออกมาทางต้นหอบรรจุมากขึ้นทำให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (คาร์บอนไดออกไซด์) ลดลง เช่นเดียวกัน ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ (ไฮโดรเจน) จึงสูงขึ้น และเมื่อผลต่างของความดันมีค่ามากซึ่งเห็นว่าสัดส่วนการไหลผ่านไม่เปลี่ยนแปลงมาก ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ทั้งสองจึงไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ก็สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน คือ สัดส่วนของไฮโดรเจนที่แยกได้ลดลง และสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้เพิ่มขึ้นที่ผลต่างของความดันน้อยๆ ส่วนที่ผลต่างความดันมีค่ามากไม่มีผลสำคัญต่อสัดส่วนที่แยกได้ของทั้งสองผลิตภัณฑ์

เนื่องจากพบว่า การเปลี่ยนความดันในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งไม่ได้ทำให้อัตราการผลิตต่อขนาดหอบรรจุที่ต้องใช้เปลี่ยนแปลงไปมาก (อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ได้เร็วขึ้นมากเมื่อเพิ่มความดัน) ค่าอ้างอิงสำหรับอัตราการผลิตจึงยังคงใช้กรณีเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งที่ใช้ความดัน 5 บาร์ รูปที่ 5.2 (4) แสดงผลของความแตกต่างของความดันต่ออัตราการผลิตสัมพัทธ์ เนื่องจากผลต่างของความดันส่งผลโดยตรงต่อปริมาณก๊าซที่ใช้ป้อน อัตราการผลิตจึงเพิ่มเป็นเชิงเส้นตามผลต่างของความดัน

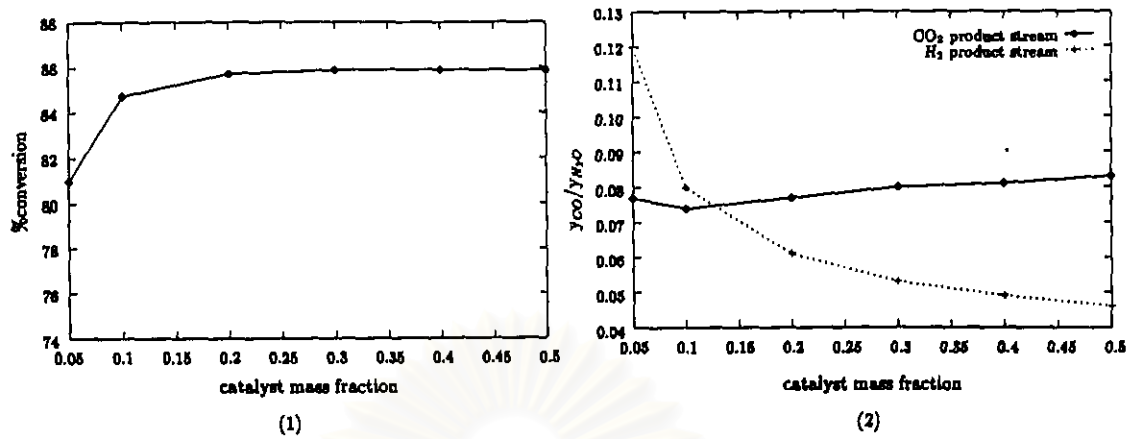
5.2 ผลของความสามารถในการทำปฏิกิริยา และการดูดซับของหอบรรจุ

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของคุณสมบัติของหอบรรจุในด้านการเร่งปฏิกิริยา และการดูดซับต่อสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์ ได้แก่ สมรรถนะในลักษณะการทำปฏิกิริยา การแยกสาร และอัตราการผลิต การแปรความสามารถในการทำปฏิกิริยาและการดูดซับของหอบรรจุทำโดยการแปรปริมาณบรรจุของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ ตามลำดับ โดยไม่ได้แปรปริมาณบรรจุทั้งสองพร้อม ๆ กัน คือ ทำการแปรปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในขณะที่ปริมาณตัวดูดซับคงที่ เพื่อให้ปริมาตรของหอบรรจุคงที่ เมื่อมีการลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวดูดซับลง การจำลองแบบจะคิดเสมือนมีการแทนที่ปริมาตรดังกล่าวด้วยวัสดุบรรจุอื่นที่ไม่มีผลต่อปฏิกิริยาและการดูดซับ

ในกรณีเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่ง การออกแบบเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสม ระหว่างสมรรถนะในการทำปฏิกิริยา และขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ หรือปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องใช้บรรจุเช่นเดียวกัน ในหัวข้อนี้จะเป็นการหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวดูดซับที่เหมาะสมกับสมรรถนะที่ได้ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับ โดยเฉพาะอัตราการผลิตสัมพัทธ์ซึ่งจากการหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า เมื่อใช้หอบรรจุเหมือนกัน อัตราการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่ง

5.2.1 ผลของความสามารถในการทำปฏิกิริยาของหอบรรจุ

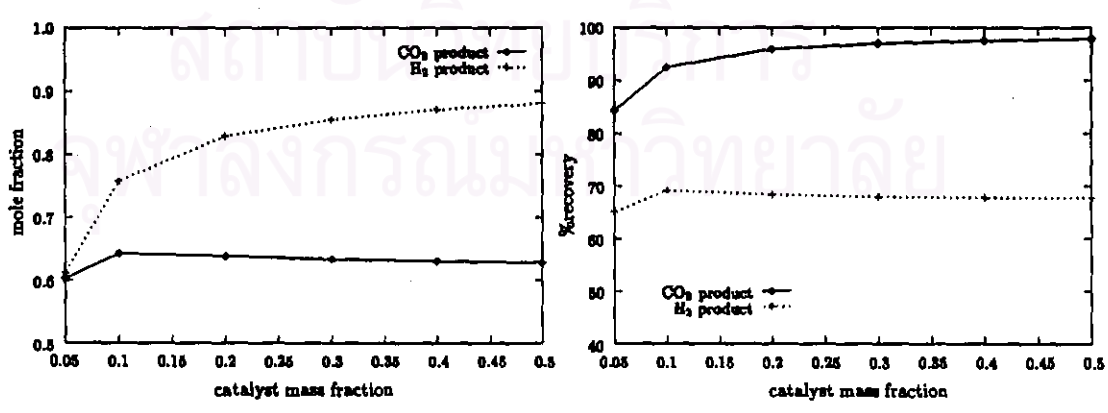
การศึกษาทำโดยการแปรสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อวัสดุบรรจุทั้งหมด โดยที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวดูดซับคงที่เท่ากับ 0.5 รูปที่ 5.3 (1) แสดงผลต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาช่วงที่ศึกษา คือ ที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.05 ถึง 0.5 จะเห็นว่า เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 0.1 การเพิ่มสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาน้อย (พบว่าเปลี่ยนแปลงประมาณร้อยละ 1.2 เมื่อเพิ่มจาก 0.1 ถึง 0.5) โดยเฉพาะเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักมากกว่า 0.2 นอกจากนี้ยังพบว่า มีตำแหน่งที่ให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด (ประมาณร้อยละ 85.9 ที่สัดส่วนเท่ากับ 0.4) ทั้งนี้จะเห็นว่าเมื่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงกว่าสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสมดุล การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไป ซึ่งทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง อาจทำให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาที่ได้น้อยลงเนื่องจากมีอัตราการเกิด



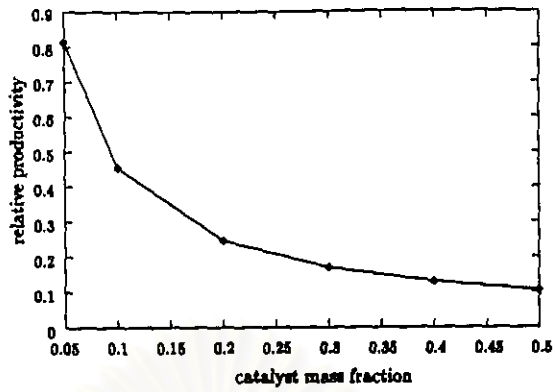
รูปที่ 5.3: ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาในวัสดุบรรจุ ต่อสมรรถนะในลักษณะการเกิดปฏิกิริยา (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (2) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้นที่เหลือ

ปฏิกิริยาย้อนกลับสูงเช่นกัน

เมื่อพิจารณาสารตั้งต้นที่เหลือในผลิตภัณฑ์ทั้งสองสาย (รูปที่ 5.3 (2)) จะเห็นว่า การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เหลือสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุน้อยลง แต่ก็มีแนวโน้มว่าจะไม่ลดลงมากเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเกินกว่า 0.5 ส่วนที่ผลิตภัณฑ์ตันหอบรรจุเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ปลายหอบรรจุ การแยกระหว่างผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดทำได้ดีกว่า คือ ได้ไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นสูง ในขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์ที่ตันหอบรรจุได้ความเข้มข้นไม่สูงมาก (ร้อยละ 60 ถึง 65 ในช่วงที่ศึกษา) จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้มากเมื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา (สัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา)



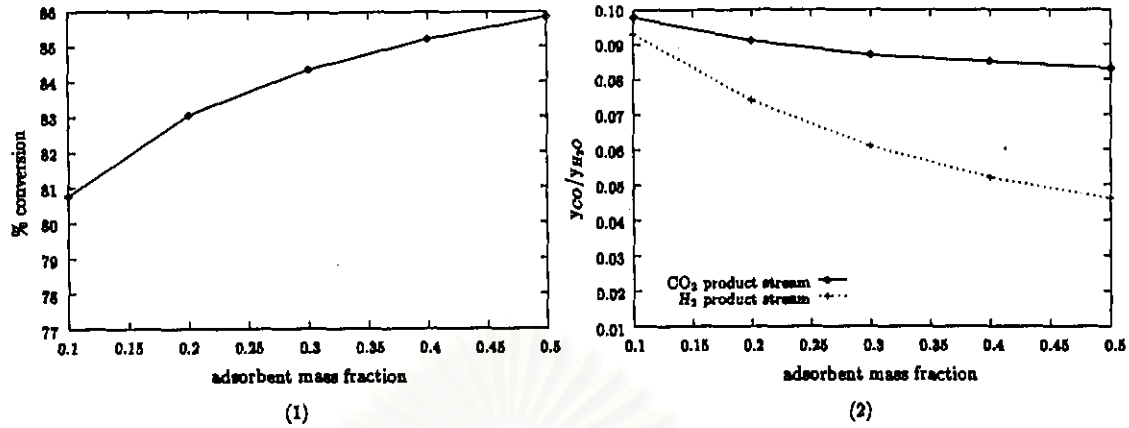
รูปที่ 5.4: ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาในวัสดุบรรจุ ต่อสมรรถนะในลักษณะการแยกสาร (1) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ (2) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้



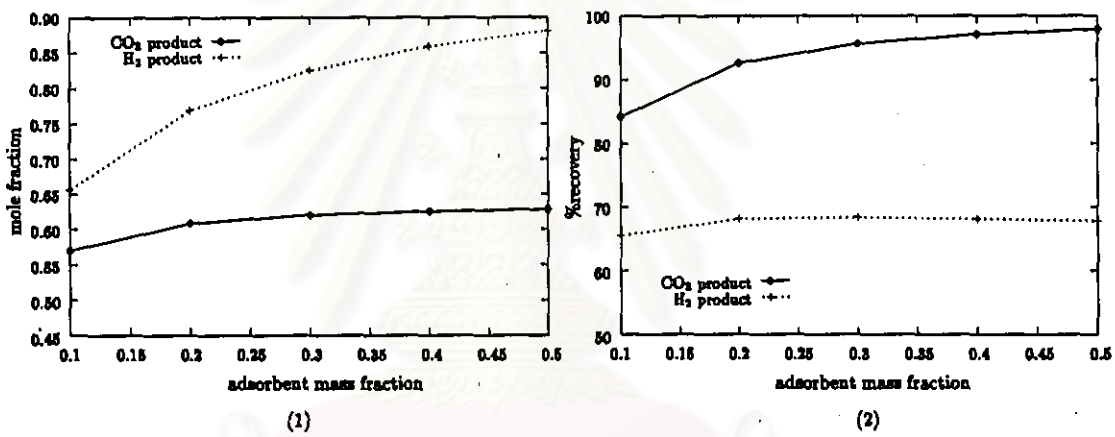
รูปที่ 5.5: ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาในวัสดุบรรจุต่ออัตราการผลิตสัมพัทธ์

ส่วนสมรรถนะในลักษณะของการแยกสาร พบว่า ตั้งแต่สัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.2 ขึ้นไป การเพิ่มสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้บรรจุส่งผลน้อยมากต่อการแยกทั้งในด้านความเข้มข้น (รูปที่ 5.4 (1)) และสัดส่วนที่แยกได้ (รูปที่ 5.4 (2)) โดยเฉพาะความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ การที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่ได้สูงขึ้นในช่วงการเพิ่มสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.05 ถึง 0.2 เป็นเพราะปฏิกิริยาเกิดได้ช้า ทำให้มีเวลาในการแยกระหว่างสองผลิตภัณฑ์น้อย (สารตั้งต้นเข้าไปใกล้ปลายทางออกของหอบรรจุได้มากก่อนเกิดปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์)

สำหรับอัตราการผลิตสัมพัทธ์ (รูปที่ 5.5) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาลง โดยเฉพาะที่สัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อยมาก ทั้งนี้อาจพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งที่บรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากัน ซึ่งจะเห็นว่า การลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ค่าอัตราการผลิตต่อน้ำหนักบรรจุของตัวเร่งปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบความดันสลับมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สัดส่วนดังกล่าวเป็นค่าคงที่ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่ง (หน้า 46) หรืออาจพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งที่ใช้เบดเดียวกัน ในกรณีดังกล่าว การลดสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาในหอบรรจุ (เพิ่มสัดส่วนของตัวดูดซับและวัสดุบรรจุที่ไม่มีผลต่อปฏิกิริยาและการดูดซับ) ทำให้อัตราการผลิตต่อวัสดุบรรจุของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งมีค่าลดลง คือ ต้องใช้หอบรรจุขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ได้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาและอัตราการผลิตคงเดิม ซึ่งทำให้อัตราการผลิตสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.6: ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวตัวดูดซับในวัสดุบรรจุ ต่อสมรรถนะในลักษณะการเกิดปฏิกิริยา (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (2) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้นที่เหลือ

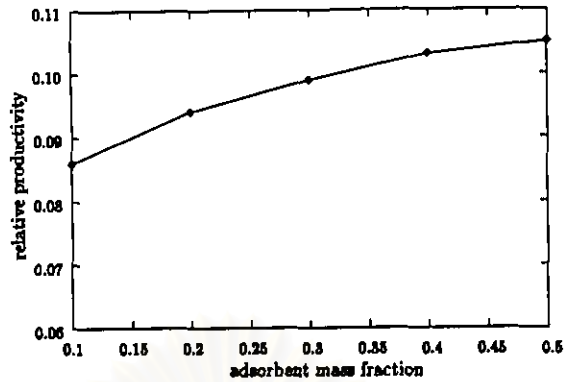


รูปที่ 5.7: ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในวัสดุบรรจุ ต่อสมรรถนะในลักษณะการแยกสาร (1) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ (2) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้

5.2.2 ผลของความสามารถในการดูดซับของหอบรรจุ

การจำลองแบบทำเช่นเดียวกับหัวข้อที่แล้ว คือ ทำการแปรสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในวัสดุบรรจุ แต่สัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ รูปที่ 5.6 (1) แสดงผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวดูดซับต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา จะเห็นว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับในหอบรรจุมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น และเห็นผลดังกล่าวชัดเจนกว่ากรณีการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามาก

พิจารณาสารตั้งต้นที่เหลือในแต่ละสายผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 5.6 (2)) ปริมาณของตัวดูดซับส่งผลให้สารตั้งต้นที่เหลือในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุลดลงมากกว่าในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ ทั้งนี้สอดคล้องกับผลต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 5.7 (1)) ซึ่งปริมาณตัวดูดซับส่งผลต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ มากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ต้น



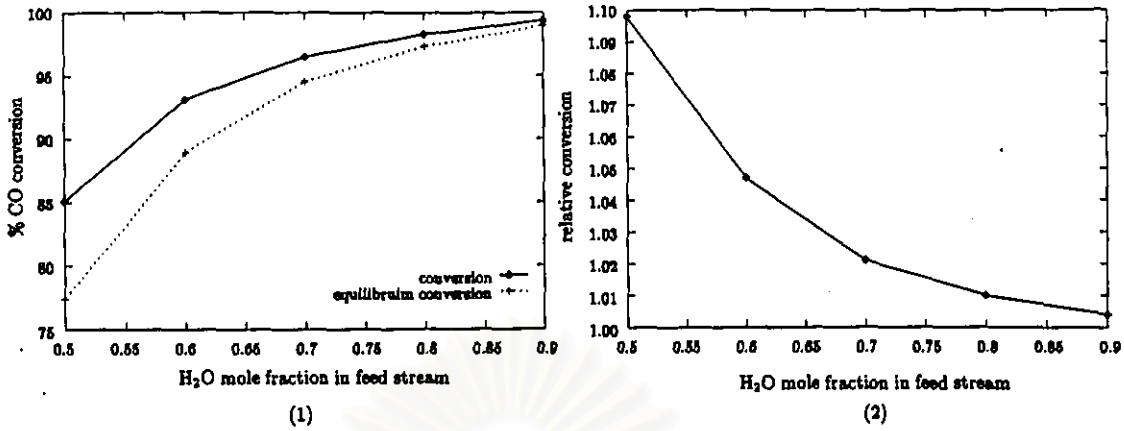
รูปที่ 5.8: ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวดูดซับต่ออัตราการผลิตสัมพัทธ์

หอบรรจุ จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุมีน้อยกว่า ส่วนผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ (รูปที่ 5.7 (2)) พบว่า การเพิ่มสัดส่วนของตัวดูดซับทำให้สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้ทางต้นหอบรรจุเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลต่อสัดส่วนของไฮโดรเจนที่แยกได้ทางปลายหอบรรจุเล็กน้อย (ร้อยละ 65 ถึง 68 ในช่วงที่ศึกษา) สำหรับผลต่ออัตราการผลิตสัมพัทธ์พบว่าการเพิ่มสัดส่วนของตัวดูดซับทำให้อัตราการผลิตสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คือ ประมาณร้อยละ 2 (รูปที่ 5.8) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการดูดซับทำให้สามารถป้อนได้มากขึ้น

5.3 สมรรถนะเมื่อมีการป้อนไอน้ำมากเกินพอ

การใช้สายป้อนที่มีสัดส่วนของไอน้ำมากเกินพอ เป็นวิธีการที่ใช้ในการเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นคาร์บอนมอนอกไซด์ ในเครื่องปฏิกรณ์ปกติสำหรับปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และน้ำ เนื่องจากเป็นการเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาที่สมดุลเคมี แม้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าลดลง เพราะน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาเคมีมากขึ้น แต่เนื่องจากการแยกไอน้ำออกจากก๊าซผสมอื่นสามารถทำได้ง่าย จึงเปรียบเทียบสัดส่วนโมลภายหลังการแยกน้ำออกด้วย (dry basis)

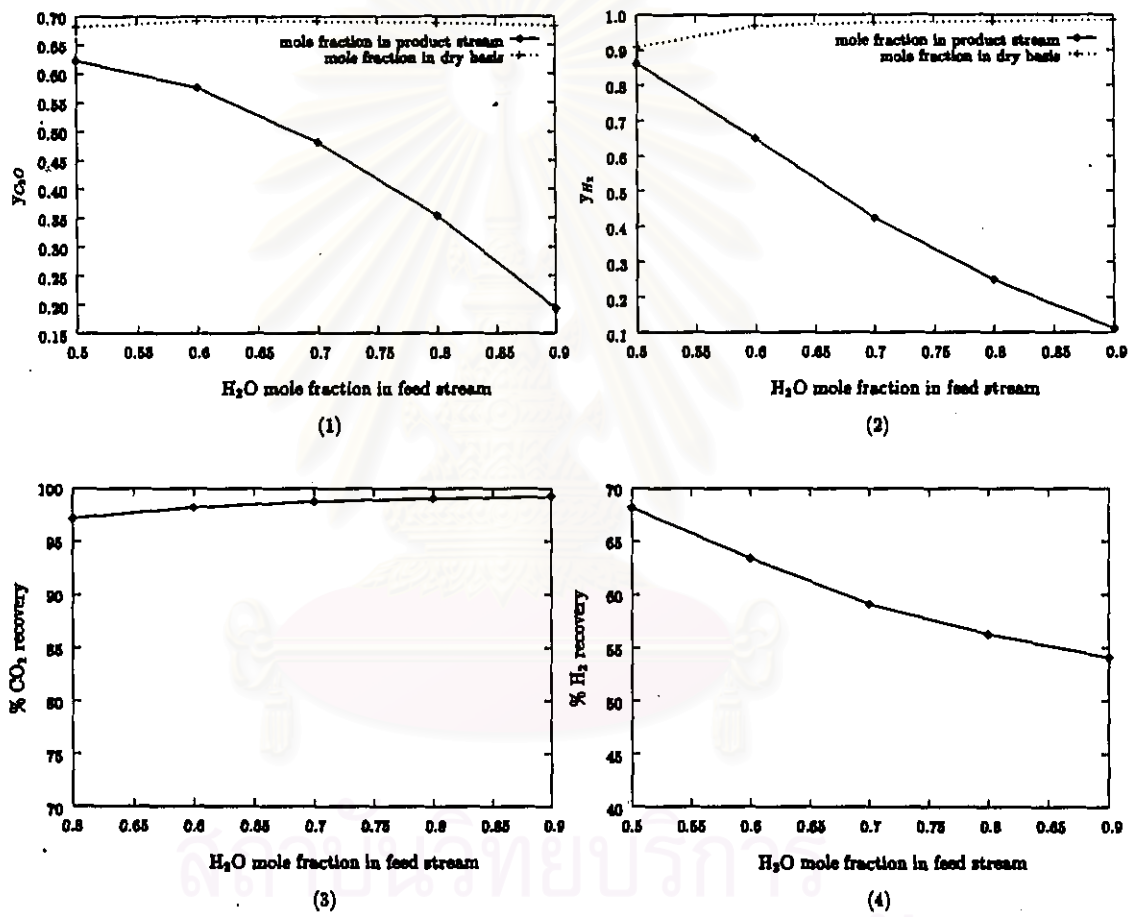
ขั้นตอนดำเนินการที่ศึกษายังคงเป็นเช่นเดียวกับขั้นตอนที่แล้ว และกำหนดลักษณะทางกายภาพของหอบรรจุดังตาราง 4.1 รูปที่ 5.9 (1) แสดงสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์เปรียบเทียบกับสัดส่วนที่สมดุลเคมี สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาที่ได้ยังคงมีค่าสูงกว่าสัดส่วนที่สมดุลเคมีตลอดช่วงที่ศึกษา เมื่อสายป้อนประกอบด้วยไอน้ำร้อยละ 90 สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสูงถึงร้อย



รูปที่ 5.9: ผลของสัดส่วนโมลของไอน้ำในสายป้อน ต่อสมรรถนะในลักษณะการเกิดปฏิกิริยา (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา และสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาที่สมดุล (2) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสัมพัทธ์

ละ 99.3 รูปที่ 5.9 (2) แสดงสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสัดส่วนที่สมดุลเคมี สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยามีค่าเกินกว่าสัดส่วนที่สมดุลประมาณร้อยละ 9.8 และมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนที่สมดุลมีค่าสูงขึ้น โดยกรณีที่สายป้อนประกอบด้วยไอน้ำร้อยละ 90 ได้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเกินกว่าสัดส่วนที่สมดุลเพียงร้อยละ 0.4

รูปที่ 5.10 (1) แสดงความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ และความเข้มข้นเมื่อมีการแยกไอน้ำออก แม้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มสัดส่วนของไอน้ำในสายป้อน แต่ความเข้มข้นเมื่อมีการแยกไอน้ำออกกลับเพิ่มขึ้น จนสัดส่วนของไอน้ำเกินร้อยละ 60 (ซึ่งได้สัดส่วนโมลเท่ากับ 0.693) จึงมีค่าลดลง รูปที่ 5.10 (2) แสดงความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน และความเข้มข้นเมื่อมีการแยกไอน้ำออก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของไอน้ำในสายป้อนเช่นกัน แต่ความเข้มข้นเมื่อมีการแยกไอน้ำออกกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงที่ศึกษา โดยมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 98.6 ความเข้มข้นเมื่อมีการแยกไอน้ำออกที่เพิ่มขึ้นนี้ ส่วนหนึ่งเกิดจากสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น และจากการที่ผลิตภัณฑ์เกิดได้น้อยลง ตามสัดส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์ในสายป้อนที่ลดลง ผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งถูกดูดซับได้ดี จึงมีการผ่านทะลุน้อยลง ส่งผลให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของไอน้ำในสายป้อนมากขึ้น สำหรับสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ (5.10 (2) และ (3)) มีค่าสูงมากสำหรับผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ (สูงกว่าร้อยละ 97 ตลอดช่วงที่ศึกษา) และมีค่าลดลงสำหรับผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน



รูปที่ 5.10: ผลของสัดส่วนโมลของไอน้ำในสายป้อน ต่อสมรรถนะในลักษณะการแยกสาร (1) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ (2) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน (3) สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้ (4) สัดส่วนของไฮโดรเจนที่แยกได้

ตารางที่ 5.1: เปรียบเทียบสมรรถนะในลักษณะต่างๆ เมื่อมีตัวถูกดูดซับมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ

	ตัวถูกดูดซับ			
	CO_2	CO_2/CO	CO_2/H_2O	CO_2/H_2
ร้อยละการเกิดปฏิกิริยา	85.11	83.14	83.49	82.03
ความเข้มข้นของ CO_2				
• ในสายผลิตภัณฑ์	0.623	0.605	0.609	0.535
• หลังแยกน้ำออก	0.682	0.654	0.683	0.593
ความเข้มข้นของ H_2				
• ในสายผลิตภัณฑ์	0.863	0.825	0.833	0.788
• หลังแยกน้ำออก	0.909	0.921	0.859	0.847
ร้อยละ CO_2 ที่แยกได้	97.22	96.80	97.04	95.25
ร้อยละ H_2 ที่แยกได้	68.20	66.56	66.77	51.96

5.4 สมรรถนะเมื่อมีตัวถูกดูดซับมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ

ในการดำเนินการจริง การดูดซับอาจเกิดขึ้นได้มากกว่าองค์ประกอบเดียว ซึ่งลักษณะดังกล่าวอาจทำให้สมรรถนะเปลี่ยนไป ในหัวข้อนี้จึงเป็นการศึกษาผลดังกล่าว ลักษณะทางกายภาพอื่นๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ และขั้นตอนการดำเนินการยังคงเป็นเช่นเดียวกับหัวข้อที่แล้ว แต่สมดุลการดูดซับที่ใช้เปลี่ยนเป็นแบบ Langmuir สำหรับการดูดซับหลายองค์ประกอบ ดังนี้

$$n_j^* = \frac{n_j^s l_j P y_j}{1 + \sum_{j=1}^{NC} l_j P y_j} \tag{5.1}$$

กรณีที่ศึกษาได้แก่ มีอีกองค์ประกอบถูกดูดซับด้วย โดยค่า l_j ยังเป็นค่าเดิม แต่ $n^s_{CO_2}$ มีค่าลดลงร้อยละ 10 คือ เท่ากับ 0.9×10^{-2} kmol/kg และค่า n^s ของอีกองค์ประกอบที่ถูกดูดซับด้วยมีค่าเท่ากับ 0.1×10^{-2} kmol/kg ผลต่อสมรรถนะในกรณีต่างๆ แสดงดังตาราง 5.1

สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลง เมื่อมีองค์ประกอบอื่นในระบบถูกดูดซับด้วย โดยเฉพาะเมื่อองค์ประกอบที่ถูกดูดซับเป็นผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน ซึ่งกรณีดังกล่าวมีสมรรถนะในด้านการแยกสารน้อยที่สุด ทั้งด้านความเข้มข้น และสัดส่วนที่แยกได้ของทั้งสองผลิตภัณฑ์ พิจารณาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เมื่อมีการแยกน้ำออก กรณีที่คาร์บอนมอนอกไซด์ถูกดูดซับ ได้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนสูงขึ้น เนื่องจากการดูดซับคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้มีไอน้ำออกทางปลายหอบรรจุมากขึ้น และกรณีที่ไอน้ำถูกดูดซับซึ่งได้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ก็เนื่องมาจาก

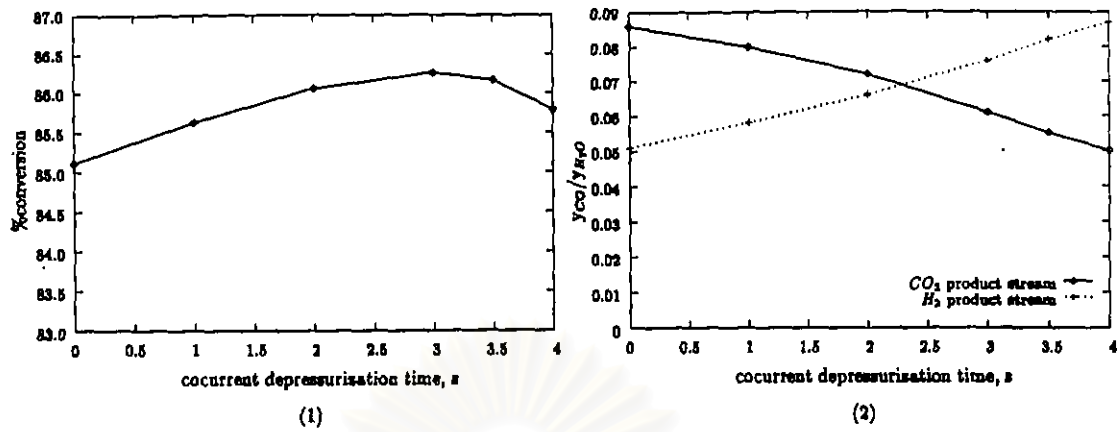
การดูดซับทำให้ไอน้ำออกมาทางตันหอบรรจุมากขึ้น

5.5 ผลของขั้นตอนการลดความดันแบบไหลตาม

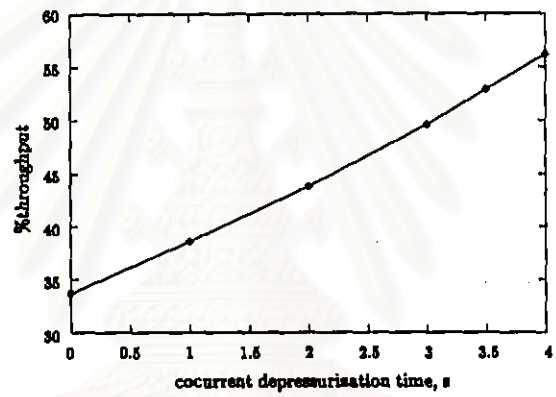
ขั้นตอนการลดความดันแบบไหลตาม เป็นขั้นตอนหนึ่งที่อาจมีในกระบวนการแยกด้วยการดูดซับแบบความดันสลับ (ดูหน้า 10) ขั้นตอนนี้จะเริ่มหลังขั้นตอนการดูดซับและก่อนการลดความดันแบบสวนทาง ขั้นตอนนี้จะเป็นการดึงผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุต่อจากขั้นตอนการดูดซับ ส่วนด้านป้อนจะปิดไว้ เนื่องจากองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้น้อยจะออกมามากในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ ดังนั้นสัดส่วนขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีในหอบรรจุจึงเพิ่มขึ้น และทำให้ผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุในขั้นตอนถัดไปได้องค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีที่ความเข้มข้นสูงขึ้น สำหรับกรณีของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับ สมรรถนะในลักษณะต่างๆ ได้แก่

รูปที่ 5.11 (1) แสดงสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีการแปรเวลาในขั้นตอนลดความดันแบบไหลตาม ส่วนรูปที่ 5.11 (2) แสดงผลต่อสัดส่วนโมลคาร์บอนมอนอกไซด์ในทั้งสองสายผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณารูปดังกล่าว และสัดส่วนการไหลผ่าน (รูปที่ 5.12) จะเห็นว่า การเพิ่มเวลาในการลดความดันแบบไหลตามทำให้สัดส่วนโมลของสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุน้อยลง แต่ในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุมากขึ้น ในขณะที่สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุต่อผลิตภัณฑ์ทั้งหมดก็เพิ่มขึ้น ปริมาณสารตั้งต้นที่เหลือโดยรวมจึงลดลงในช่วงแรก (สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น) เนื่องจากสารตั้งต้นที่ลดลงในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุมีมากกว่า และที่เพิ่มขึ้นในช่วงหลังเนื่องจาก สัดส่วนการไหลผ่านที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลจากสารตั้งต้นที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุมีมากขึ้น จากรูป 5.11 (1) จึงเห็นว่ามีจุดที่ให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด คือ ร้อยละ 86.3 ที่เวลา 3 วินาที อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขั้นตอนนี้ไม่ได้ส่งผลสำคัญต่อสมรรถนะในลักษณะการทำปฏิกิริยา

การลดความดันแบบไหลตามจะส่งผลมากต่อสมรรถนะในการแยก สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 19 เมื่อเปรียบเทียบรอบดำเนินการที่ใช้เวลา 4 วินาทีกับที่ไม่มีขั้นตอนนี้ (รูปที่ 5.13 (1)) แต่สัดส่วนโมลของไฮโดรเจนก็ลดลงมากเช่นเดียวกันคือประมาณร้อยละ 17 ถึงแม้สัดส่วนโมลของสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุไม่ได้เพิ่มขึ้นมาก แต่พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์สายนี้กลับเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากถึงประมาณร้อยละ 20 ตลอด



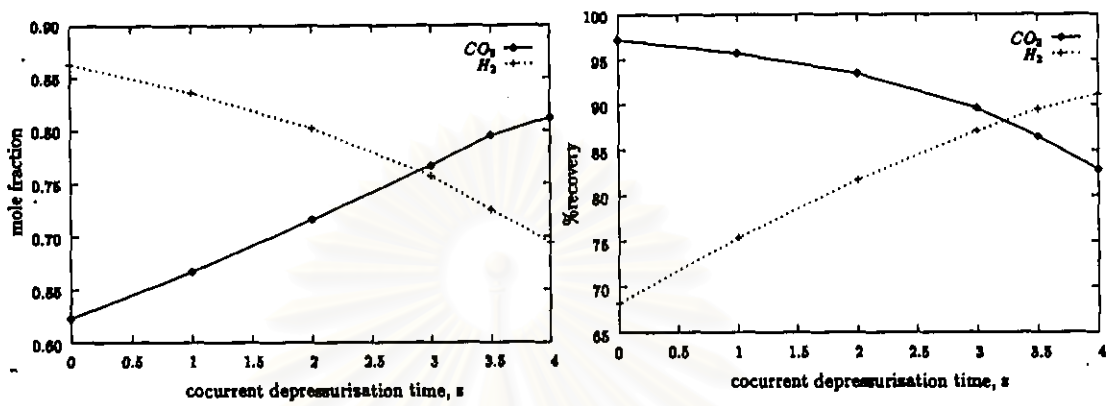
รูปที่ 5.11: ผลของเวลาในการลดความดันแบบไหลตาม ต่อสมรรถนะในลักษณะการเกิดปฏิกิริยา (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (2) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้นที่เหลือ



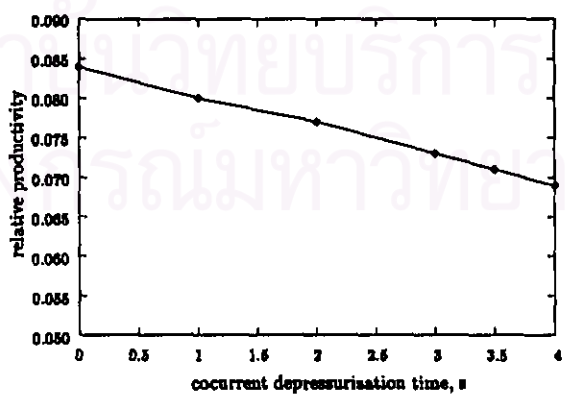
รูปที่ 5.12: ผลของเวลาของขั้นตอนการลดความดันแบบไหลตามต่อสัดส่วนการไหลผ่าน

ช่วงที่ศึกษา สิ่งหนึ่งที่ควรคำนึงถึงในหอดูดซับที่มีและไม่มีปฏิกิริยาเกิดร่วม คือ องค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีจะออกมาทางปลายหอบรรจุได้น้อยกว่าถ้าไม่มีปฏิกิริยาร่วม ทั้งนี้เพราะสารตั้งต้นที่ไม่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วและเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับได้ภายหลัง เมื่อพิจารณาสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ (รูปที่ 5.13 (2)) จะเห็นว่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการลดความดันแบบไหลตาม อย่างไรก็ตาม สัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้ก็ยังมีค่ามากแม้แต่ในรอบดำเนินการที่ใช้เวลาในขั้นตอนดังกล่าวถึง 4 วินาที คือประมาณร้อยละ 83

ถ้าหากเพิ่มเวลาในการลดความดันแบบไหลตามมากกว่านี้ คาดว่าจะทำให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น แต่ยังคงมีข้อจำกัดของการเพิ่มเวลาในขั้นตอนนี้เนื่องจาก ขั้นตอนดังกล่าวทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุจึงลดลง ในขณะที่ เมื่อความ



รูปที่ 5.13: ผลของเวลาในการลดความดันแบบไหลตาม ต่อสมรรถนะในลักษณะการแยกสาร (1) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ (2) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้



รูปที่ 5.14: ผลของเวลาของขั้นตอนการลดความดันแบบไหลตามต่ออัตราการผลิตสัมพัทธ์

เข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเพิ่มขึ้นต้องใช้ก๊าซในการไล่แบบไหลตามมากขึ้น เพราะมีองค์ประกอบที่ถูกดูดซับอยู่มาก ดังนั้นการเพิ่มเวลาในขั้นตอนนี้จึงมีข้อจำกัดเมื่อผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุมีไม่เพียงพอที่จะใช้ในการไล่แบบไหลตาม

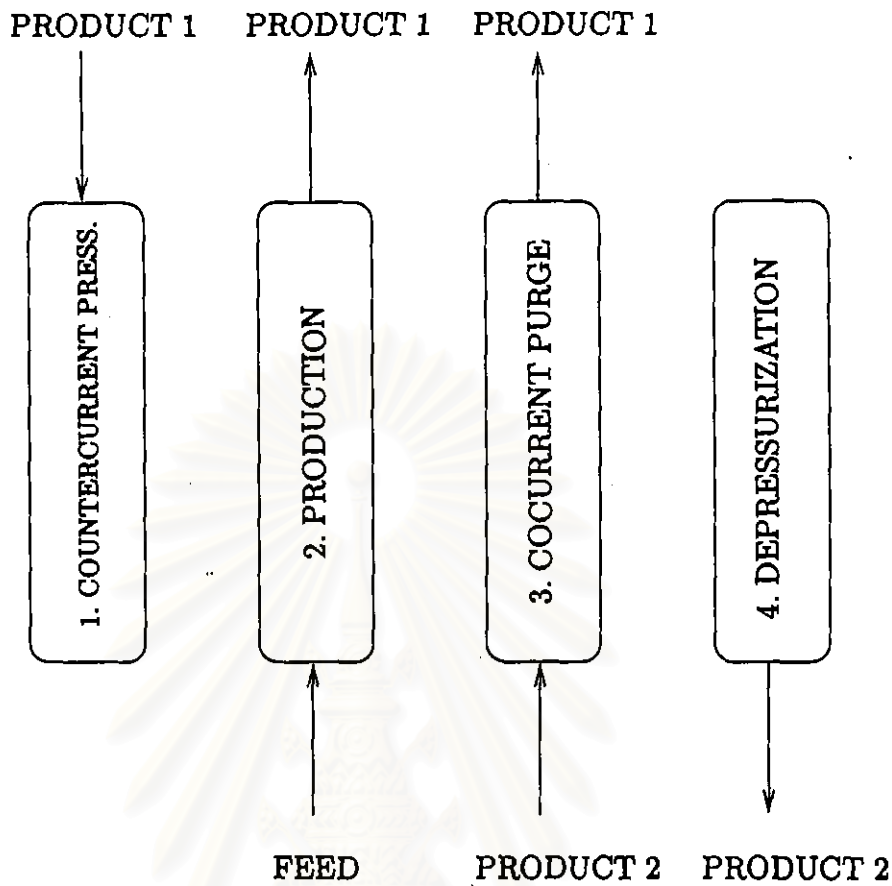
ในแง่ของอัตราการผลิต ซึ่งอาจพิจารณาได้จากปริมาณก๊าซในสายป้อน (ขั้นตอนการเพิ่มความดันและขั้นตอนการผลิต) ต่อคาบของการดำเนินการ จะเห็นว่า ขั้นตอนการลดความดันแบบไหลตามไม่มีผลสำคัญต่อปริมาณก๊าซในสายป้อน แต่ทำให้คาบของการดำเนินการสูงขึ้น จึงเห็นว่าค่าอัตราการผลิตสัมพัทธ์ลดลงเป็นเชิงเส้นโดยประมาณ เมื่อมีการเพิ่มเวลาในขั้นตอนการลดความดันแบบไหลตาม (รูปที่ 5.14)

5.6 ผลของการเพิ่มความดันแบบสวนทางและการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ

จากหัวข้อ 4.2 และ 4.6 จะเห็นว่า ในรอบดำเนินการที่มีการไล่แบบไหลตาม การไล่แบบสวนทางทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนความเข้มข้นสูง แต่ทำให้ได้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ โดยในขั้นตอนการลดความดันแบบสวนทาง ผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุจะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง ส่วนไฮโดรเจนจะออกมาทางต้นหอบรรจุได้มากในขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง และปนอยู่ในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ ในหัวข้อนี้เป็นการเสนอขั้นตอนซึ่งคาดว่าจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ความเข้มข้นสูงในทั้งสองสายผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุจะได้จากขั้นตอนการลดความดันแบบสวนทางเท่านั้น และยังคงมีการไล่แบบสวนทางที่ปลายหอบรรจุ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นสูงด้วย

การเพิ่มความดันแบบสวนทาง (รูปที่ 5.15) ทำโดยใช้ผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นสูง ในการเพิ่มความดันจากปลายหอบรรจุ แทนการเพิ่มความดันจากสายป้อนทางต้นหอบรรจุ ซึ่งเสมือนว่าเกิดการไล่แบบสวนทางที่ความดันสูงที่ปลายหอบรรจุ ดังนั้นขั้นตอนการไล่แบบสวนทางจึงถูกตัดออก ทำให้ผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุได้จากขั้นตอนการลดความดันเท่านั้น จึงคาดว่าจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง พร้อมกับผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน

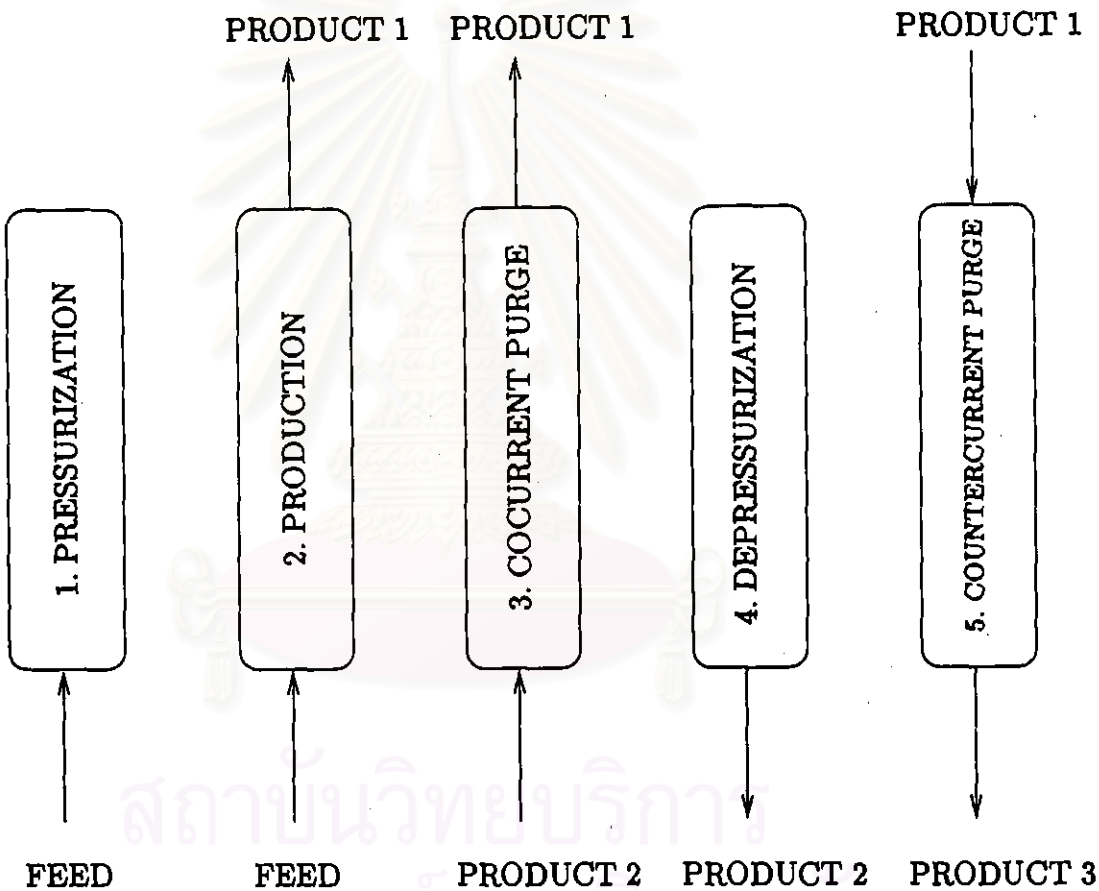
ส่วนการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสาย (รูปที่ 5.16) เป็นการคงขั้นตอนการไล่แบบไหลตามไว้ แต่เนื่องจากในขั้นตอนนี้ผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุที่ได้มีไฮโดรเจนออกมาในปริมาณ



รูปที่ 5.15: ขั้นตอนดำเนินการเมื่อมีการเพิ่มความดันแบบสวนทาง

มาก จึงแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุในขั้นตอนนี้ออกจากที่ได้ในขั้นตอนการลดความดันแบบสวนทาง ผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุจึงมีสองสาย โดยคาดว่าสายที่ได้จากขั้นตอนการลดความดันจะมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูง และใช้สายนี้สำหรับการไล่แบบไหลตาม ส่วนผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุก็ยังคงได้ไฮโดรเจนความเข้มข้นสูงเนื่องจากยังมีขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาทั้งสองวิธีดังกล่าว โดยเปรียบเทียบสมรรถนะในลักษณะต่างๆ กับกรณีที่มีและไม่มีการไล่แบบสวนทาง อย่างไรก็ตาม ทั้งสองวิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดเนื่องจากได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุน้อยซึ่งทำให้ไม่เพียงพอในการไล่แบบไหลตาม ในการจำลองแบบจึงได้เปรียบเทียบ 2 กรณี คือ เมื่อใช้เวลาในการเพิ่มและลดความดันขั้นตอนละ 5 วินาทีซึ่งใช้อัตราการไหล 40 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที และเมื่อใช้เวลาในการเพิ่มและลดความดันขั้นตอนละ 10 วินาทีซึ่งใช้อัตราการไหล 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที การจำลองแบบจะศึกษาทั้งสองวิธีที่เสนอข้างต้น และเปรียบเทียบสมรรถนะกับกรณีอ้างอิงซึ่งได้แก่ กรณีที่มีการไล่แบบไหลตามเพียงอย่างเดียวและกรณีที่มีการไล่ทั้งสองแบบ ผลเปรียบเทียบรอบดำเนินการแบบต่างๆ จากการจำลอง



รูปที่ 5.16: ขั้นตอนดำเนินการเมื่อมีการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสาย

แบบแสดงในตาราง 5.2 ในกรณีการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสาย ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และสัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้ในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ เป็นค่าของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการลดความดัน และการไล่แบบสวนทาง ตามลำดับ

พิจารณาสมรรถนะในลักษณะการทำปฏิกิริยาจะเห็นว่า รอบดำเนินการที่มีการไล่แบบไหลตามอย่างเดียวให้สมรรถนะในด้านนี้น้อยกว่ากรณีที่มีการไล่แบบสวนทางด้วย สำหรับสมรรถนะของกรณีอ้างอิงที่มีการไล่แบบสวนทาง การเพิ่มความดันแบบสวนทาง และการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสายไม่ได้ให้ผลแตกต่างกันมาก จะเห็นว่า ผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุในรอบดำเนินการที่มีการแยกผลิตภัณฑ์เป็นสองสายมีสารตั้งต้นเหลืออยู่น้อยที่สุด (ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการลดความดัน) ส่วนผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุมีสารตั้งต้นน้อยที่สุดเมื่อใช้การเพิ่มความดันแบบสวนทาง เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ใช้เวลาในการเพิ่มและลดความดันเป็น 5 และ 10 วินาทีพบว่า รอบดำเนินการที่ใช้เวลา 10 วินาทีในกรณีที่มีการไล่แบบสวนทาง (ทั้งที่มีและไม่มีการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ) ให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าเล็กน้อย แต่ในกรณีของการเพิ่มความดันแบบสวนทางให้ผลสูงกว่าค่อนข้างมาก คือ ได้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาถึงประมาณร้อยละ 88 ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้อัตราการไหลสูงขึ้นทำให้ได้สัดส่วนการไหลผ่านสูงขึ้น และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุซึ่งเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่ามากขึ้น

ในแง่ของการแยกสาร รอบดำเนินการที่ใช้การเพิ่มความดันแบบสวนทาง ได้ผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุที่ความเข้มข้นสูงมากกว่ากรณีอื่นๆ คือ ประมาณร้อยละ 97.5 และร้อยละ 95.0 ในกรณีของการเพิ่มและลดความดัน 5 และ 10 วินาทีตามลำดับ โดยสาเหตุที่กรณีหลังได้ความเข้มข้นน้อยกว่าก็น่าจะเนื่องมาจากอัตราการไหลที่มากขึ้น ส่วนความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุกลับลดลงน้อยกว่ากรณีอ้างอิง เมื่อเพิ่มและลดความดัน 5 วินาที และมากกว่ากรณีอ้างอิงที่มีการไล่แบบสวนทาง แต่น้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการไล่แบบสวนทาง ถ้าใช้เวลาในการเพิ่มและลดความดัน 10 วินาที ทั้งนี้จะเห็นว่า ปริมาณก๊าซที่ต้องใช้ในขั้นตอนการเพิ่มความดันแบบสวนทางมากกว่าที่ใช้ในการไล่แบบสวนทาง รอบดำเนินการที่มีการเพิ่มความดันแบบสวนทางจึงอาจได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่ากรณีอ้างอิงที่มีการไล่แบบสวนทาง แม้จะไม่มีการดึงผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุออกในขั้นตอนการเพิ่มความดันแบบสวนทาง ส่วนกรณีที่ใช้เวลาในการเพิ่มและลดความดัน

ตารางที่ 5.2: เปรียบเทียบสมรรถนะในลักษณะต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์เคมีเมื่อมีเพิ่มความดันแบบสวนทาง และการแยกผลิตภัณฑ์ต้นทอบรรจุเป็นสองสาย

	กรณีที่มีการไล่แบบไหลตาม	กรณีที่มีการไล่ทั้งสองแบบ	การแยกผลิตภัณฑ์ต้นทอบรรจุ	การเพิ่มความดันแบบสวนทาง
• *กรณี 1*				
% การเกิดปฏิกิริยา	81.32	84.31	84.11	84.62
สัดส่วนโมล CO ในผลิตภัณฑ์ต้นทอบรรจุ	0.084	0.094	0.079/0.107	0.090
สัดส่วนโมล CO ในผลิตภัณฑ์ปลายทอบรรจุ	0.102	0.032	0.033	0.012
สัดส่วนโมล CO_2	0.627	0.555	0.664/0.467	0.513
สัดส่วนโมล H_2	0.586	0.922	0.920	0.975
สัดส่วน CO_2 ที่แยกได้	72.95	99.22	52.33/46.86	99.94
สัดส่วน H_2 ที่แยกได้	75.89	53.85	53.97	39.83
% การไหลผ่าน	53.55	24.64	24.69	17.18
อัตราการผลิตสัมพัทธ์	0.093	0.076	0.076	0.037
• *กรณี 2*				
% การเกิดปฏิกิริยา	82.23	85.35	85.60	88.37
สัดส่วนโมล CO ในผลิตภัณฑ์ต้นทอบรรจุ	0.076	0.090	0.060/0.105	0.078
สัดส่วนโมล CO ในผลิตภัณฑ์ปลายทอบรรจุ	0.099	0.033	0.036	0.021
สัดส่วนโมล CO_2	0.705	0.593	0.799/0.463	0.683
สัดส่วนโมล H_2	0.615	0.921	0.911	0.951
สัดส่วน CO_2 ที่แยกได้	74.25	99.08	53.11/43.57	99.55
สัดส่วน H_2 ที่แยกได้	84.86	62.24	62.47	76.29
% การไหลผ่าน	56.65	28.90	29.08	35.19
อัตราการผลิตสัมพัทธ์	0.077	0.062	0.062	0.033

10 วินาทีที่พบว่าได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการไหล ทำให้ใช้ปริมาณก๊าซในขั้นตอนการไล่แบบไหลตามมากขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ทางปลายหอบรรจุเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจาก การเพิ่มสัดส่วนการไหลผ่านมีส่วนทำให้ได้เข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น นอกจากการเพิ่มอัตราการไหล การเพิ่มเวลาในขั้นตอนการผลิตจึงอาจมีผลให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

ส่วนกรณีที่มีการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสาย พบว่าเป็นไปได้ที่จะให้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยในกรณีที่ใช้เวลาในการเพิ่มและลดความดัน 10 วินาที ได้คาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 79.9 และไฮโดรเจนร้อยละ 91.1

สำหรับสัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้ ถ้าพิจารณารอบดำเนินการที่มีการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสาย โดยรวมที่แยกได้ในผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการลดความดันและการไล่แบบสวนทางเข้าด้วยกัน จะเห็นว่าสัดส่วนที่แยกได้มีค่าสูงมาก และเมื่อพิจารณากรณีที่มีการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสายเฉพาะผลิตภัณฑ์จากการลดความดัน จะเห็นว่าได้สัดส่วนที่แยกได้น้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการไล่แบบสวนทาง แต่สัดส่วนที่แยกได้ก็ยังคงมากพอสมควร คือมากกว่าร้อยละ 50 ในทั้งรอบดำเนินการที่ใช้เวลาเพิ่มและลดความดันเท่ากับ 5 และ 10 วินาที

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้การเพิ่มความดันแบบสวนทาง แต่ในกรณีที่ 1 สัดส่วนที่แยกได้เมื่อใช้การเพิ่มความดันแบบสวนทางมีค่าน้อยมากเพียงร้อยละ 39.8 ส่วนกรณีรอบดำเนินการแบบ Skarstrom ที่มีการไล่แบบสวนทาง และกรณีแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสาย พบว่าได้สมรรถนะในการแยกไฮโดรเจนในระดับเดียวกัน ทั้งในความเข้มข้นและสัดส่วนที่แยกได้

พิจารณาค่าอัตราการผลิตสัมพัทธ์จะเห็นว่า กรณีที่ใช้การเพิ่มความดันแบบสวนทางมีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากค่าอัตราการผลิตอาจพิจารณาจากอัตราการป้อน ดังนั้น การเพิ่มความดันด้วยสายป้อน จึงทำให้รอบดำเนินการมีอัตราการผลิตสูงกว่าการเพิ่มความดันด้วยผลิตภัณฑ์ ส่วนการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสาย พบว่าให้อัตราการผลิตเท่ากับกรณีที่ไม่แยกที่มีการไล่แบบสวนทางเหมือนกัน

5.7 ข้อสรุป

การเพิ่มผลต่างความดันทำให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่ก็มีข้อจำกัดของความดันสูง ทั้งนี้คาดว่าขึ้นอยู่กับสมดุลการดูดซับ การเพิ่มผลต่างความดันไม่ส่งผลสำคัญต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ ยกเว้นเมื่อความดันดำเนินการมีค่าต่ำ แต่มีผลทำให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น สัดส่วนการไหลผ่านแปรผันตามส่วนกลับของผลต่างของความดัน และสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนที่แยกได้สามารถพิจารณาได้จากสัดส่วนการไหลผ่าน ส่วนอัตราการผลิตอาจประมาณได้ว่าเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นตามผลต่างความดัน

ในการศึกษาสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาในหอบรรจุ พบว่าเมื่อลดสัดส่วนดังกล่าวจาก 0.5-0.1 ซึ่งเพิ่มอัตราการผลิตสัมพัทธ์ประมาณ 4.3 เท่า สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาลดลงเพียงประมาณร้อยละ 1.2 และพบว่ามีผลน้อยมากต่อสมรรถนะการแยกเมื่อสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่า 0.2 ขึ้นไป ในขณะที่พบว่าสัดส่วนของตัวดูดซับมีผลต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยามากกว่า รวมทั้งสมรรถนะในการแยก โดยเฉพาะความเข้มข้นของไฮโดรเจน

จากการศึกษาผลขององค์ประกอบในสายป้อน การป้อนไอน้ำมากเกินพอสามารถเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการ ทั้งในลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังเช่นในเครื่องปฏิกรณ์ปกติ และในลักษณะการแยกสารด้วย กรณีที่ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนถูกดูดซับด้วย ส่งผลให้สมรรถนะของกระบวนการลดลงมากกว่ากรณีที่สารตั้งต้นชนิดใดชนิดหนึ่งถูกดูดซับ

การศึกษาผลจากการใช้ขั้นตอนอื่นร่วมด้วยพบว่า การลดความดันแบบไหลตามทำให้ได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนลดลง และไม่ส่งผลต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยามาก สำหรับอัตราการผลิตลดลงเนื่องจากรอบดำเนินการยาวขึ้น ท้ายสุดเป็นการเปรียบเทียบรอบดำเนินการที่มีเพียงการไล่แบบไหลตาม รอบดำเนินการที่มีการไล่ทั้งสองแบบ การเพิ่มความดันแบบสวนทาง และการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสาย พบว่าสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาในสองกรณีหลังอยู่ในระดับเดียวกับกรณีที่มีการไล่ทั้งสองแบบ และมากกว่ากรณีแรก ส่วนสมรรถนะในการแยกพบว่า การแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสายเป็นไปได้ ที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เข้มข้นทั้งสองผลิตภัณฑ์ ส่วนการเพิ่มความดันแบบสวนทาง พบว่าได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับเดียวกับรอบดำเนินการที่มีการไล่ทั้งสองแบบ อย่างไรก็ตาม คาดว่าขั้น

ตอนดังกล่าวอาจใช้เพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถ้าปรับสภาวะดำเนินการอื่นเพิ่ม เช่น เวลาในขั้นตอนการผลิต ส่วนอัตราการผลิตพบว่าการเพิ่มความดันแบบสวนทางให้อัตราการผลิตน้อยที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย