บทที่ 4

ผลของการไล่ด้วย องค์ประกอบดูดซับได้ดี

การไล่ด้วยองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีทำได้โดย การเพิ่มขั้นตอนการไล่แบบไหลตามด้วยส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ เข้าไประหว่างขั้นตอนการผลิต และขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ที่ความดันเท่ากับในขั้นตอนการผลิต ผลของการไล่ด้วยองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ ที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับ ภายใต้การดำเนินการในลักษณะต่างๆ ต่อสมรรถนะของอุปกรณ์ในลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์เคมี หรือเครื่องแยกสารผสม ได้วิจารณ์ได้บทนี้ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ขั้นตอนดังกล่าวในการพัฒนาสมรรถนะของกระบวนการ

4.1 ระบบปฏิกิริยาเคมีแบบความดันสลับ

ระบบปฏิกิริยาเคมีแบบความดันสลับ เป็นระบบที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากกัน และออกจากสารตั้งต้น ด้วยการดูดซับแบบความดันสลับ ระบบดังกล่าวจึงต้องกำหนดด้วยพารามิเตอร์ของปฏิริยาเคมี และลักษณะการดำเนินการแบบความดันสลับ รวมทั้งเกณฑ์การประเมินสมรรถนะของระบบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.1 ปฏิกิริยาเคมี

ปฏิกิริยาสำหรับงานวิจัยนี้คือ ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับน้ำ (water-gas shift reaction) ซึ่งเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

$$CO + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2 \quad , \Delta H = -41.1 \ \frac{kJ}{mol} \tag{4.1}$$

ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยานี้ คือ ก๊าซไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนสารตั้งต้น คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และไอน้ำ ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน สำหรับกระบวนการผลิตแอมโมเนียของฮาเบอร์ (Lloyd, Ridler and Twigg, 1989) วัตถุดิบสำหรับกระบวนการสังเคราะห์แอมโมเนีย จำเป็นต้องมีคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่น้อยมาก และเนื่องจากการแยกคาร์บอนมอนอกไซด์โดยหอดูดซึม เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขนาดใหญ่ จึงจำเป็นต้องควบคุมปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จากเครื่องปฏิกรณ์เคมีให้เหลือน้อยที่สุด หรือให้เกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นปฏิกิริยาอาจเกิดได้โดยสมบูรณ์ ณ อุณหภูมิต่ำ แต่อุณหภูมิของวัตถุดิบถูกกำหนดด้วยสภาวะอิ่มตัวของไอน้ำ ณ ความดันที่เลือกไว้ ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงมักดำเนินการใน 2 ขั้นตอนเป็นอย่างน้อย คือ ขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาเคมี ซึ่งดำเนินการที่อุณหภูมิสูง ประมาณ 350-500 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก และขั้นตอนการเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเคมี (conversion) ซึ่งดำเนินการ ณ อุณหภูมิต่ำ ประมาณ 200-250 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบสำคัญ (Lloyd, Ridler, and Twigg,1989)

4.1.2 สภาวะดำเนินการแบบความดันสลับ

เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์เคมีทั่วไปใช้ไอน้ำความดันสูงในสายป้อน เพื่อให้เกินสัดส่วนปริมาณสารสัมพันธ์มากๆ และใช้อุณหภูมิต่ำในเครื่องปฏิกรณ์ขั้นสุดท้าย โดยวิธีการนี้ ทำให้เหลือสารตั้งต้นคาร์บอนมอนอกไซด์เพียงร้อยละ 0.3 ในสายผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสม สำหรับการเปรียบเทียบการเพิ่มของสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา ฉะนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่เลือกศึกษาที่อุณหภูมิ และองค์ประกอบในสายป้อนดังกล่าว แต่จะใช้สายป้อนตามสัดส่วนปริมาณสารสัมพันธ์ กล่าวคือประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำอย่างละร้อยละ 50 และเลือกใช้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จากการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดย Podolski และ Kim (1974) พบว่าที่อุณหภูมิดังกล่าว ความต้านทานการถ่ายเทมวลรอบๆ ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีน้อยมาก ถ้าขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็กกว่า 500 μm ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกขนาดอนุภาคเล็ก (250 μm) เพื่อให้สอดคล้องสมมติฐานที่ว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นในวัฏภาคก๊าซ และเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็ก จึงเลือกใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลระหว่างวัฏภาคการดูดซับกับของ

ตารางที่ 4.1: ข้อมูลทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

ข้อมูลทอบรรจุ		
พื้นที่หน้าตัด	3.14	cm^2
ความยาวเบด	150	cm
ขนาดอนุภาคที่บรรจุ	250	μm
สัดส่วนที่ว่างในเบด	0.4	
สัดส่วนที่ว่างรวม	0.7	
ความหนาแน่นเบด	685	kg/m^3
สัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา	0.615	
สัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวดูดซับ	0.385	
l_{CO_2}	5×10^{-7}	Pa^{-1}
$n^*_{CO_2}$	1×10^{-2}	$kmol/kg$

ไหลค่อนข้างสูงคือ 1.0 s^{-1} ข้อมูลทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์แสดงในตารางที่ 4.1 ค่า l_{CO_2} และ $n^*_{CO_2}$ คือ ค่าคงที่ในแบบจำลองสมดุลการดูดซับแบบ Langmuir สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์ (ดังสมการ 3.9) ส่วนองค์ประกอบอื่นถือว่าไม่เกิดการดูดซับ

ความดันของระบบเลือกให้แตกต่างกันค่อนข้างมากระหว่างความดันต่ำและความดันสูง เพื่อให้เกิดการดูดซับและการคายการดูดซับได้มากในแต่ละรอบดำเนินการ โดยเลือกความดันต่ำเท่ากับ 1 บาร์ และความดันสูงเท่ากับ 5 บาร์ กำหนดความหนืดของก๊าซ และสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ความดันอ้างอิง (D_{MO} ที่ 5 บาร์) คงที่ตามสายป้อน เท่ากับ 3×10^{-5} $kgm^{-1}s^{-1}$ และ 1.3^{-5} m^2/s ตามลำดับ (Bird et al., 1960) อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะดังกล่าวแสดงในสมการ 4.2 (Podolski and Kim, 1974)

$$
\begin{aligned}
-r_{CO} &= \frac{k_1 \left[P_{CO} P_{H_2O} - P_{CO_2} P_{H_2} / K_{eq}\right]}{\left[1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{H_2O} + k_4 P_{H_2}\right]^2} \\
k_1 &= 6.042 \times 10^{-13} \quad \frac{kmol \times Pa^{-2}}{kg - cat \times s} \\
k_2 &= 3.283 \times 10^{-6} \quad Pa^{-1} \\
k_3 &= 5.844 \times 10^{-5} \quad Pa^{-1} \\
k_4 &= 1.084 \times 10^{-5} \quad Pa^{-1} \\
K_{eq} &= 11.72
\end{aligned}
\tag{4.2}
$$

4.1.3 เกณฑ์สำหรับพิจารณาเปรียบเทียบ

สมรรถนะของกระบวนการที่ศึกษาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ สมรรถนะในลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาเคมี การแยกสาร และอัตราการผลิต สมรรถนะเหล่านี้จะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยในแต่ละรอบดำเนินการ ณ สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบ

สมรรถนะในลักษณะการเกิดปฏิกิริยา พิจารณาโดยรวมจาก สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้น A (X_A) ซึ่งกำหนดโดย

$$X_A = \frac{\text{ปริมาณ A ในสายป้อน - ปริมาณ A ที่เหลือในผลิตภัณฑ์}}{\text{ปริมาณ A ในสายป้อน}}$$

เนื่องจากความเข้มข้นในสายป้อน รวมทั้งสัมประสิทธิ์ในปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาจึงเท่ากันไม่ว่าจะพิจารณาจากสารตั้งต้นใด สำหรับการพิจารณาแยกในแต่ละสายผลิตภัณฑ์จะพิจารณาจากปริมาณสารตั้งต้นที่เหลืออยู่ในแต่ละสาย

สมรรถนะในลักษณะของการแยกสาร พิจารณาจากความเข้มข้นขององค์ประกอบที่สนใจ ในแต่ละสายผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังพิจารณาจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ โดยกำหนดสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ C ที่แยกได้ในสายผลิตภัณฑ์ P (C/P recovery) ดังนี้

$$\text{C/P recovery} = \frac{\text{ปริมาณ C ในสาย P}}{\text{ปริมาณ C ในทุกสายผลิตภัณฑ์}}$$

สมรรถนะในลักษณะของอัตราการผลิต อัตราการผลิตกำหนดจาก ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละรอบดำเนินการต่อคาบของการดำเนินการ เนื่องจากลักษณะของกระบวนการต้องมีการคายการดูดซับ จึงไม่สามารถผลิตได้ตลอดช่วงดำเนินการ ทำให้อัตราการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับมักจะมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งที่มีขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากัน ดังนั้น ในการเปรียบเทียบสมรรถนะในลักษณะของนี้จะใช้อัตราการผลิตสัมพัทธ์ (relative productivity) เป็นหลัก โดย

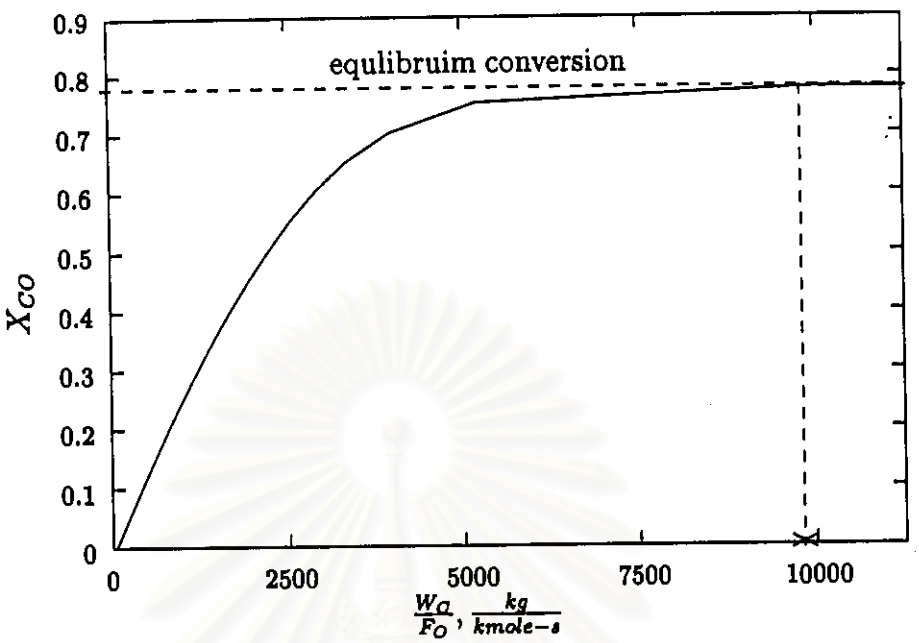
$$\text{อัตราการผลิตสัมพัทธ์} = \frac{\text{อัตราการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับ}}{\text{อัตราการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์เคมีปกติที่สภาวะอ้างอิง}}$$

สมรรถนะข้างต้นจะมีการเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่ง เพื่อศึกษาการพัฒนาสมรรถนะ เนื่องจากปฏิกิริยามีจำนวนโมลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เท่ากันตามสมการเคมี สมดุลของปฏิกิริยาจึงไม่ขึ้นกับความดัน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 11.72 (Twigg, 1989) สารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำอย่างละร้อยละ 50 จะให้ผลิตภัณฑ์ที่สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสมดุลที่ประกอบด้วย คาร์บอนมอนนอกไซด์ร้อยละ 11.3 น้ำร้อยละ 11.3 คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 38.7 และไฮโดรเจนร้อยละ 38.7 คิดเป็นสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสมดุลเท่ากับร้อยละ 77.4 สำหรับลักษณะของของอัตราการผลิต พิจารณาสมการ 4.3 ซึ่งใช้ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งที่มี A เป็นสารตั้งต้น (Fogler, 1992)

$$W_C = F_O y_A' \int_0^{X_A} \frac{1}{(-r_A)} dX_A \tag{4.3}$$

โดย W_C คือ น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ F_O คือ อัตราการไหลเชิงโมลในสายป้อน y_A' คือ สัดส่วนโมลของสารตั้งต้น A ในสายป้อน และ X_A คือ สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาของ A จากสมการข้างต้น ที่ความดันของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 5 บาร์ (เท่ากับความดันสูงของเครื่องปฏิกรณ์แบบความดันสลับ) ซึ่งเป็นสภาวะที่ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวเกิดได้เร็วที่สุด และจากสมการ 4.2 ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{W_C}{F_O}$ และ X_{CO} ดังรูปที่ 4.1

สำหรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่กำหนดไว้ สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาจะลู่เข้าสู่ค่าสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสมดุลเมื่อลดอัตราการป้อน และมีค่าเท่ากับสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสมดุลที่ค่า $\frac{W_C}{F_O}$ ประมาณ 9.9×10^3 kg/[kmole-s] โดยการแทน W_C เท่ากับน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้บรรจุเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับ ค่า F_O ที่ได้จะเป็นค่าอัตราการผลิตอ้างอิงที่ใช้เปรียบเทียบ นั่นคือ อัตราการผลิตสัมพัทธ์เป็นการเปรียบเทียบอัตราการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับ กับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งที่บรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณเท่ากัน จึงอาจพิจารณาได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบการใช้ประโยชน์ตัวเร่งปฏิกิริยาของทั้งสองกระบวนการ เนื่องจากที่สภาวะคงตัวของเครื่องปฏิกรณ์ปกติ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงการกระจายความดันย่อย ขององค์ประกอบต่างๆ และเมื่อมีการเพิ่มตัวดูดซับเข้าไป วัฏภาคการดูดซับก็จะอยู่ในสภาวะที่สมดุลกับวัฏภาคก๊าซจึงเสมือนไม่มีการดูดซับ ดังนั้นที่สภาวะคงตัว การเพิ่มตัวดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์โดยคงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไว้จึงไม่ส่งผลต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา ถ้าดำเนินการแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีทั่วไป



รูปที่ 4.1: ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{W_C}{F_O}$ และ X_{CO}
ตามสมการ 4.3

การเปรียบเทียบโดยใช้อัตราการผลิตสัมพัทธ์จึงสามารถพิจารณา เสมือนการเปรียบเทียบอัตราการผลิตกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งที่มีเบดเหมือนกัน คือบรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับในปริมาณเท่ากัน

4.2 การใช้ขั้นตอนการไล่แบบไหลตามกับขั้นตอนแบบ Skarstrom

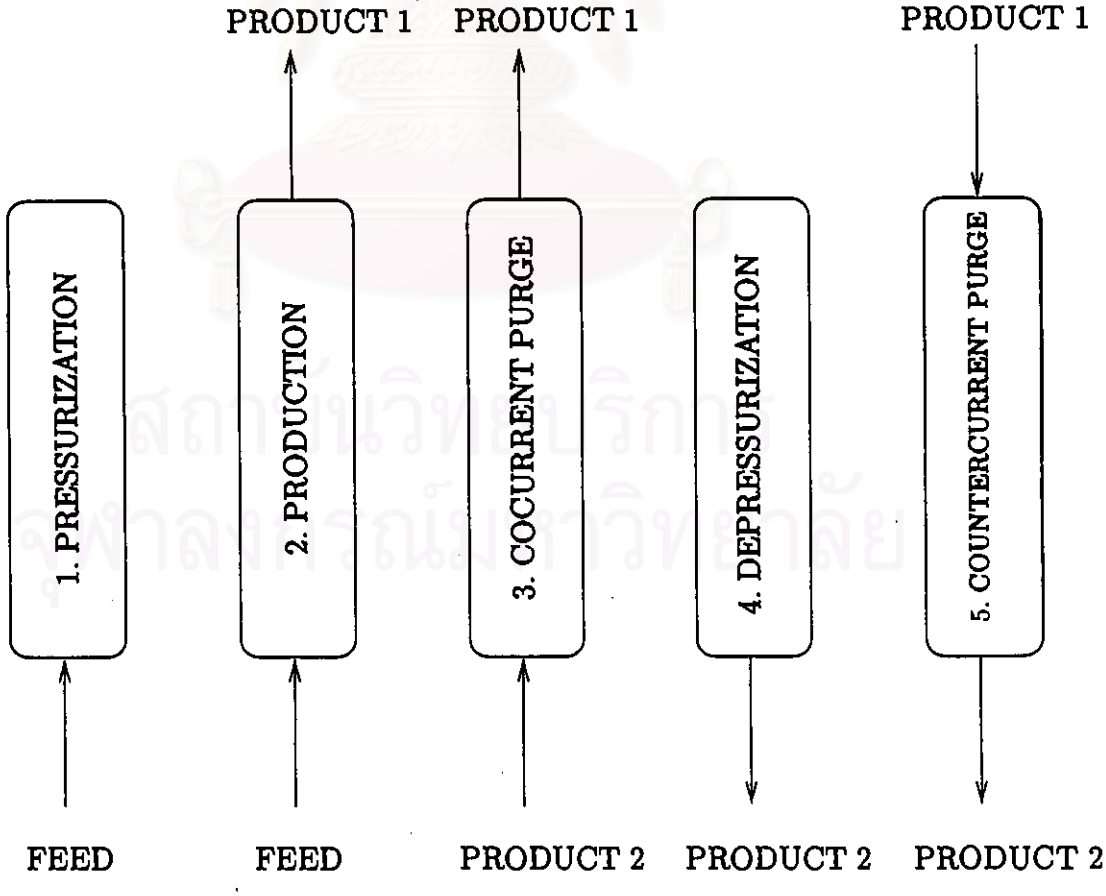
ลักษณะการดำเนินการของการศึกษาวิจัยนี้ เลือกใช้ขั้นตอนแบบ Skarstrom เป็นพื้นฐาน (case 3 ในรูป 4.2) ลักษณะดำเนินการอื่นๆ ได้แก่ ลักษณะการดำเนินการแบบไม่มีขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง (case 1 ในรูป 4.2) ส่วนลักษณะดำเนินการที่มีขั้นตอนการไล่แบบไหลตามเป็นขั้นตอนเพิ่มเติมระหว่างขั้นตอนการผลิต (PRD) กับขั้นตอนการลดความดัน (DP) ได้แก่ case 2 และ 4 ในรูป 4.2 ซึ่งแตกต่างกันที่ case 2 ไม่มีขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง รูป 4.3 แสดงขั้นตอนดำเนินการของ case 4 ซึ่งมีครบทั้ง 5 ขั้นตอน

สำหรับสภาวะขอบเขตของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองนี้ กำหนดจากตัวแปรที่ทำการควบคุมที่ต้นและปลายหอบรรจุในรอบดำเนินการ ตัวแปรที่ทำการควบคุมในแต่ลดขั้นตอนสรุปในตาราง 4.2 กำหนดสภาวะขอบเขตดังกล่าวโดยวิธีของ Danckwerts ได้ดังตาราง 4.3

	10 s	7.5 s	7.5 s	10 s	7.5 s
Case 1	PS	PRD		DP	
Case 2	PS	PRD	COP	DP	
Case 3	PS	PRD		DP	CTP
Case 4	PS	PRD	COP	DP	CTP

PS - Pressurization
PRD - Production
COP - Cocurrent Purge
DP - Depressurization
CTP - Countercurrent Purge

รูปที่ 4.2: ขั้นตอนดำเนินการของกระบวนการที่ต้องการเปรียบเทียบ 4 กระบวนการ



รูปที่ 4.3: ขั้นตอนดำเนินการเมื่อเพิ่มการไล่แบบไหลตามในรอบดำเนินการแบบ Skarstrom

ตารางที่ 4.2: ขั้นตอนดำเนินการเมื่อเพิ่มขั้นตอนการไล่แบบไหลตามในขั้นตอนแบบ Skarstrom

ขั้นตอน	*ต้นหอบรรจุ*	*ปลายหอบรรจุ*
การเพิ่มความดัน	ป้อนสารตั้งต้นองค์ประกอบ y_j^f ที่ความดันสูง ϕ_h	ปิด
การผลิต	เหมือนขั้นตอนที่แล้ว	ดึงผลิตภัณฑ์ออกด้วยอัตรา Q_D
การไล่แบบไหลตาม	ไล่ด้วยผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ	เหมือนขั้นตอนที่แล้ว
การลดความดัน	สลับมาที่ความดันต่ำเพื่อให้เกิดการไหลย้อนกลับ	ปิด
การไล่แบบสวนทาง	คงความดันไว้เหมือนขั้นตอนที่แล้ว	ไล่ด้วยผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุในอัตรา Q_P

ตารางที่ 4.3: สภาวะขอบเขตเมื่อเพิ่มขั้นตอนการไล่แบบไหลตามในขั้นตอนแบบ Skarstrom

	$\lambda = 0$	$\lambda = 1$
Step 1	$\phi = \phi_h$	$Q = 0$
	$\frac{\varepsilon_b D_{gas}}{L^2}\frac{\partial y_j}{\partial \lambda} = Q(y_j - y_j^f)$	$\frac{\partial y_j}{\partial \lambda} = 0$
Step 2	$\phi = \phi_h$	$Q = Q_D$
	$\frac{\varepsilon_b D_{gas}}{L^2}\frac{\partial y_j}{\partial \lambda} = Q(y_j - y_j^f)$	$\frac{\partial y_j}{\partial \lambda} = 0$
Step 3	$\phi = \phi_h$	$Q = Q_D$
	$\frac{\varepsilon_b D_{gas}}{L^2}\frac{\partial y_j}{\partial \lambda} = Q(y_j - y_j^{p2})$	$\frac{\partial y_j}{\partial \lambda} = 0$
Step 4	$\phi = \phi_l$	$Q = 0$
	$\frac{\partial y_j}{\partial \lambda} = 0$	$\frac{\partial y_j}{\partial \lambda} = 0$
Step 5	$\phi = \phi_l$	$Q = Q_P$
	$\frac{\partial y_j}{\partial \lambda} = 0$	$\frac{\varepsilon_b D_{gas}}{L^2}\frac{\partial y_j}{\partial \lambda} = Q(y_j - y_j^{p1})$

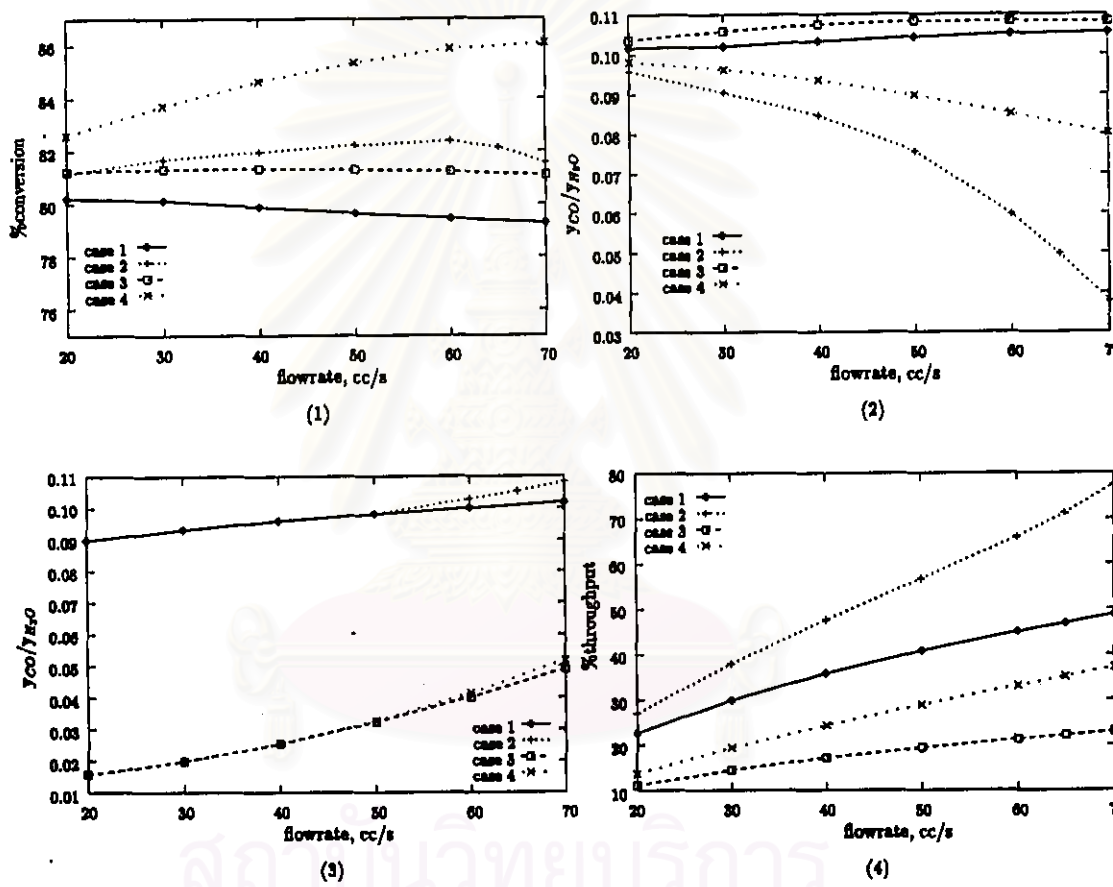
ช่วงอัตราการไหลในการศึกษาวิจัยนี้ คือ 20-70 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (อัตราการไหลพิจารณาที่ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ตลอดงานวิจัยนี้) ลักษณะดำเนินการที่ 1 และ 2 จะเป็นการเปรียบเทียบผลจากขั้นตอนการไล่แบบไหลตามในกระบวนการที่ไม่มีการไล่แบบสวนทาง ส่วนในลักษณะดำเนินการที่ 3 และ 4 จะเป็นการเปรียบเทียบผลจากการไล่แบบในกรณีที่มีการไล่แบบสวนทางด้วย ช่วงเวลาในขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน (10 วินาที) พบว่า นานเพียงพอสำหรับการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดทั้งหอบรรจุ ผลของเวลาในขั้นตอนต่างๆ ได้แก่ การเพิ่มและการลดความดัน การไล่แบบไหลตาม และการไล่แบบสวนทาง จะมีการศึกษาภายหลัง

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาคำตอบของแบบจำลอง ยังคงเป็นเช่นเดียวกับที่ใช้ในการตรวจสอบคำตอบของแบบจำลอง ในหัวข้อ 3.4 ยกเว้นค่า *err* ใช้เท่ากับ 10^{-6} เนื่องจาก การพัฒนาการกระจายของความเข้มข้นสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบเร็วกว่า กรณีดำเนินการแบบความดันสลับแบบคาบสั้นมาก ในการจำลองแบบ เลือกสภาวะเริ่มต้นเป็นสภาวะคงตัวแบบเป็นคาบของกรณีใกล้เคียง เพื่อลดเวลาในการคำนวณ โดยทั่วไปการจำลองแบบใช้ไม่เกิน 40 รอบดำเนินการในการเข้าสู่สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบ สำหรับช่วงย่อยในการหาคำตอบ โดยทั่วไปใช้ 12 ช่วง โดยอาจเพิ่มขึ้นในบางกรณีที่พบความไม่เสถียรเชิงตัวเลข ผลของสมรรถนะในลักษณะต่าง ๆ มีดังนี้

4.2.1 สมรรถนะในลักษณะของการเกิดปฏิกิริยา

รูปที่ 4.4 (1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดปฏิกิริยากับอัตราการไหลของลักษณะการดำเนินการทั้งสี่กรณี ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้มากที่สุดเมื่อเลือกใช้ลักษณะการดำเนินการที่มีการไล่ทั้งสองแบบ (สูงสุดประมาณร้อยละ 86.1) รองลงมาคือการไล่แบบไหลตาม การไล่แบบสวนทาง และไม่มีการไล่เลยตามลำดับ ลักษณะดำเนินการทั้งสี่ลักษณะทำให้เครื่องปฏิกรณ์เคมีนี้มีสมรรถนะสูงกว่าภาวะการดำเนินการ ณ สมดุลเคมี และทั้งขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม และแบบสวนทางมีผลต่อการเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา

พิจารณาปริมาณสารตั้งต้นคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ทั้งสองสาย (รูปที่ 4.4 (2) และ 4.4 (3)) รอบดำเนินการที่มีการไล่แบบไหลตามทำให้เหลือสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุน้อยลง และเช่นเดียวกัน การไล่แบบสวนทางก็ทำให้เหลือสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบรอบดำเนินการที่มีเพียงขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม



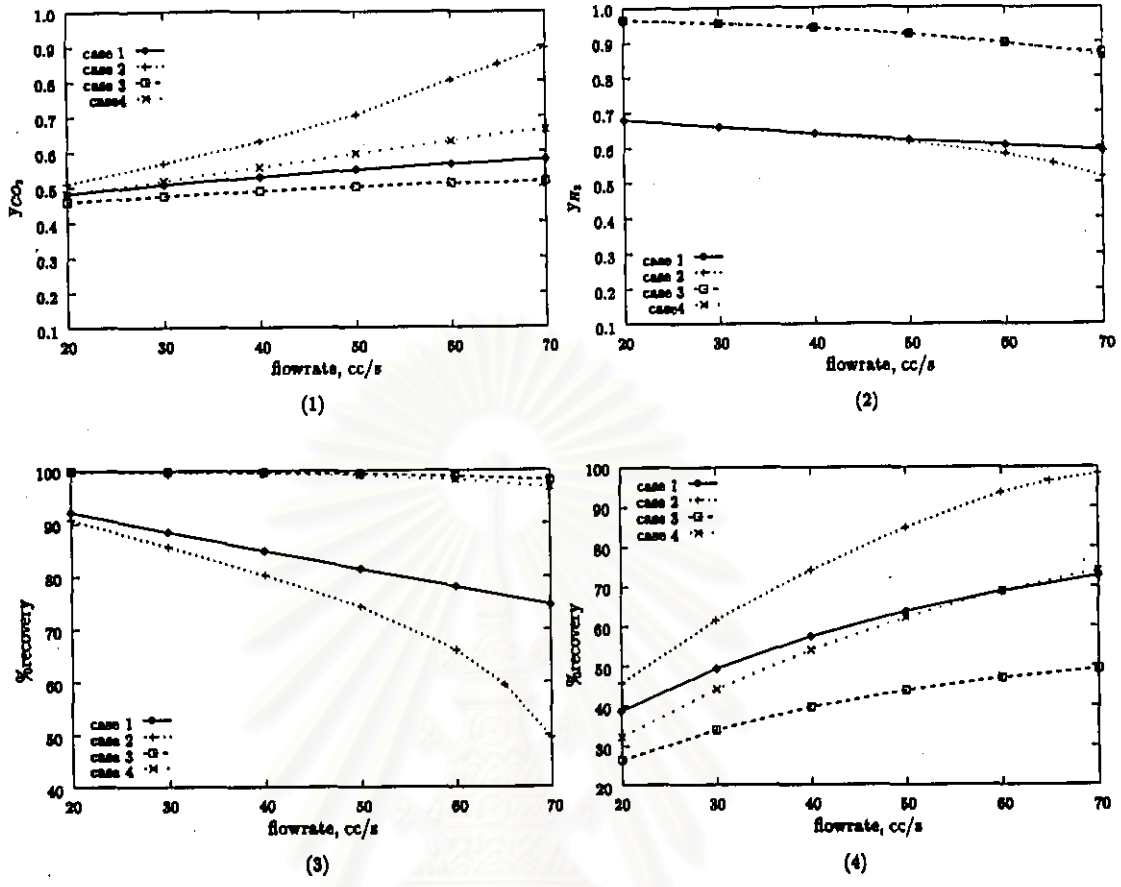
รูปที่ 4.4: ผลของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุต่อสมรรถนะในลักษณะของการเกิดปฏิกิริยา และสัดส่วนการไหลผ่าน ในรอบดำเนินการแบบต่าง ๆ (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (2) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ (3) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ (4) สัดส่วนการไหลผ่าน

กับที่มีการไล่ทั้งสองแบบ การไล่แบบสวนทางทำให้เหลือสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุมากขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราการไหลสูง ๆ แต่เมื่อพิจารณากรณีรอบดำเนินการที่มีเพียงการไล่แบบสวนทาง และที่มีทั้งสองแบบกลับไม่พบลักษณะดังกล่าว คือปริมาณสารตั้งต้นที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุไม่เปลี่ยนแปลงมาก เมื่อรอบดำเนินการมีขั้นตอนการไล่แบบไหลตามด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากการดูดซับผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ทำให้องค์ประกอบดังกล่าวไปถึงปลายหอบรรจุอีกด้าน ได้น้อยกว่ากรณีของไฮโดรเจนที่ใช้ในการไล่แบบสวนทางซึ่งไม่ถูกดูดซับ และการที่มีองค์ประกอบที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาในความเข้มข้นมากขึ้นที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งของหอบรรจุ ทำให้สมดุลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปลายด้านนั้นเป็นไปในทางที่มีองค์ประกอบที่มีสารตั้งต้นมากขึ้น การแยกระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนในสายผลิตภัณฑ์ ส่งผลสำคัญต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์

สำหรับผลจากอัตราไหล ต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาของรอบดำเนินการทั้งสี่แบบ ในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ พิจารณาจากสารตั้งต้นที่เหลือพบว่า ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลงเมื่ออัตราการไหลมากขึ้นไม่ว่าจะใช้ขั้นตอนดำเนินการแบบใด ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุให้ผลแตกต่างไป ในกรณีรอบดำเนินการที่มีไม่มีการไล่แบบไหลตาม ปริมาณสารตั้งต้นที่เหลือในสายผลิตภัณฑ์แทบไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหล ส่วนกรณีที่มีการไล่แบบไหลตาม สารตั้งต้นที่เหลือมีปริมาณน้อยลงถ้าอัตราการไหลมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการไหลทำให้ใช้ปริมาณก๊าซในการไล่มากขึ้น ในรอบดำเนินการที่มีขั้นตอนการไล่ไม่ว่าแบบใดพบว่า มีอัตราการไหลที่ให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาในสองสายผลิตภัณฑ์ และสัดส่วนการไหลผ่านซึ่งมีค่ามากขึ้นตามอัตราการไหล (รูปที่ 4.4 (4)) ส่วนรอบดำเนินการที่ไม่มีขั้นตอนการไล่เลย พบว่าสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหล

4.2.2 สมรรถนะในลักษณะของการแยกสาร

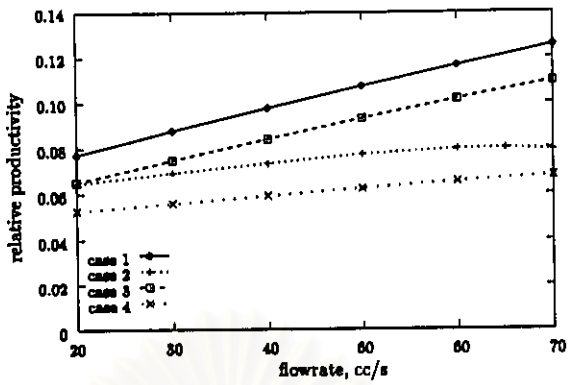
รูปที่ 4.5 (1) และ 4.5 (2) แสดงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุและไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุตามลำดับ รอบดำเนินการที่มีเพียงการไล่แบบไหลตามให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุมากที่สุด รองลงมาคือกรณีที่มีการไล่ทั้งสองแบบ กรณีที่ไม่มีการไล่เลย และกรณีที่มีการไล่แบบสวนทาง ตามลำดับ การไล่แบบสวนทางมี



รูปที่ 4.5: ผลของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุต่อสมรรถนะในลักษณะของการแยกสารในรอบดำเนินการแบบต่าง ๆ (1) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ (2) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน (3) สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้ (4) สัดส่วนการแยกได้ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน

ส่วนทำให้ได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ผลของการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์โดยการไล่แบบไหลตามจะมีมากขึ้นที่อัตราการไหลสูงขึ้นซึ่งใช้ปริมาณก๊าซในการไล่มากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ในทุกลักษณะดำเนินการที่ศึกษา ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหล สำหรับสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้ในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ (รูปที่ 4.5 (3)) มีค่าสูงมากในรอบดำเนินการที่มีการไล่แบบสวนทาง โดยไม่แตกต่างกันไม่ว่าจะมีการไล่แบบไหลตามหรือไม่ โดยมีค่าสูงกว่าร้อยละ 98 ตลอดช่วงที่ศึกษา ส่วนกรณีที่ไม่มีการไล่แบบสวนทางพบว่า กรณีที่มีการไล่แบบไหลตามจะมีสัดส่วนการแยกได้ต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีการไล่เลย โดยเฉพาะถ้าอัตราการไหลมีค่ามาก ทั้งนี้เนื่องมาจากการไล่แบบไหลตามทำให้มีสัดส่วนการไหลผ่านเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6: ผลของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุต่ออัตราการผลิตสัมพัทธ์ ในรอบดำเนินการแบบต่าง ๆ

สำหรับผลของอัตราการไหลต่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ ต่างจากของคาร์บอนไดออกไซด์คือ ในทุกลักษณะดำเนินการ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนจะลดลงเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ส่วนผลจากการไล่แบบสวนทางมีส่วนสำคัญอย่างมากในการเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน อย่างไรก็ตาม การไล่แบบไหลตามไม่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนลดลงไปมาก ซึ่งจะเห็นความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนของรอบดำเนินการที่มีการไล่แบบไหลตามอย่างเดียวกับการไม่มีการไล่เลยที่อัตราการไหลสูงกว่า 60 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาทีเท่านั้น ส่วนสัดส่วนไฮโดรเจนที่แยกได้ (รูปที่ 4.5 (4)) มีค่ามากที่สุดในกรณีที่มีเพียงการไล่แบบไหลตามซึ่งมีสัดส่วนการไหลผ่านมากที่สุด และน้อยที่สุดในกรณีที่มีเพียงการไล่แบบสวนทางซึ่งมีสัดส่วนการไหลผ่านน้อยที่สุด ส่วนกรณีที่มีการไล่ทั้งสองแบบและไม่มีการไล่เลยพบว่าใกล้เคียงกัน และขึ้นอยู่กับอัตราการไหล โดยกรณีที่ไม่มีการไล่เลยจะได้สัดส่วนที่แยกได้สูงกว่าที่อัตราการไหลต่ำ ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่แยกได้กับอัตราการไหล เป็นเช่นเดียวกับค่าการไหลผ่านคือ สัดส่วนที่แยกได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราการไหลสูงขึ้น

4.2.3 สมรรถนะในลักษณะของอัตราการผลิต

ผลของอัตราการไหลต่ออัตราการผลิตสัมพัทธ์แสดงในรูป 4.6 อัตราการผลิตเพิ่มเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงที่ศึกษา ยกเว้นกรณีที่ใช้การไล่แบบไหลตามโดยไม่มีแบบสวนทาง ในกรณีดังกล่าว อัตราการผลิตลดลงที่อัตราการไหลมากกว่า 65 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลทำให้ใช้ก๊าซในขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่

ในปริมาณมากขึ้นด้วย และทำให้มีคาร์บอนไดออกไซด์เหลืออยู่ในวัฏภาคการดูดซับมากขึ้นภายหลังขั้นตอนการคายการดูดซับ โดยเฉพาะกรณีที่มีเพียงการไล่แบบไหลตามอย่างเดียวที่อัตราการไหลมาก ซึ่งได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุสูง ผลดังกล่าวทำให้ปริมาณก๊าซที่ใช้ป้อนในการเพิ่มความดันลดลง

จากการเปรียบเทียบอัตราการผลิตในขั้นตอนแบบต่างๆ รอบดำเนินการที่ไม่มีการไล่เลยให้อัตราการผลิตสูงสุด รองลงมา คือ รอบดำเนินการที่ใช้การไล่แบบสวนทางอย่างเดียว รอบดำเนินการที่ใช้การไล่แบบไหลตามอย่างเดียว และที่ใช้การไล่ทั้งสองอย่าง ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์ต่อรอบดำเนินการแล้ว พบว่า มีค่าระดับเดียวกันในกรณีไม่มีการไล่ทั้งสองแบบและมีการไล่แบบสวนทางอย่างเดียว ส่วนกรณีที่มีเพียงการไล่แบบไหลตามและการไล่ทั้งสองทางก็ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ต่อรอบดำเนินการในระดับเดียวกัน แต่ที่มีอัตราการผลิตไม่เท่ากันเพราะคาบของการดำเนินการไม่เท่ากัน สาเหตุที่รอบดำเนินการที่ไม่มีการไล่แบบไหลตามได้อัตราการผลิตสูงกว่าเนื่องมาจาก ในการศึกษาใช้ขั้นตอนการไล่แบบไหลตามแทนที่ครึ่งหนึ่งของขั้นตอนการผลิต ซึ่งป้อนด้วยสายป้อน (รอบดำเนินการที่ใช้ปริมาณก๊าซในสายป้อนน้อยกว่าให้ผลิตภัณฑ์ได้น้อยกว่า) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับที่สภาวะอ้างอิงของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งที่ใช้หอบรรจุเดียวกัน เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับให้อัตราการผลิตน้อยกว่ามาก โดยในช่วงที่ศึกษาพบว่าได้สูงสุดประมาณร้อยละ 12.5 ของสภาวะอ้างอิงสำหรับกรณีไม่มีการไล่เลย และสำหรับกรณีที่มีการไล่ทั้งสองทางได้ประมาณร้อยละ 6.8

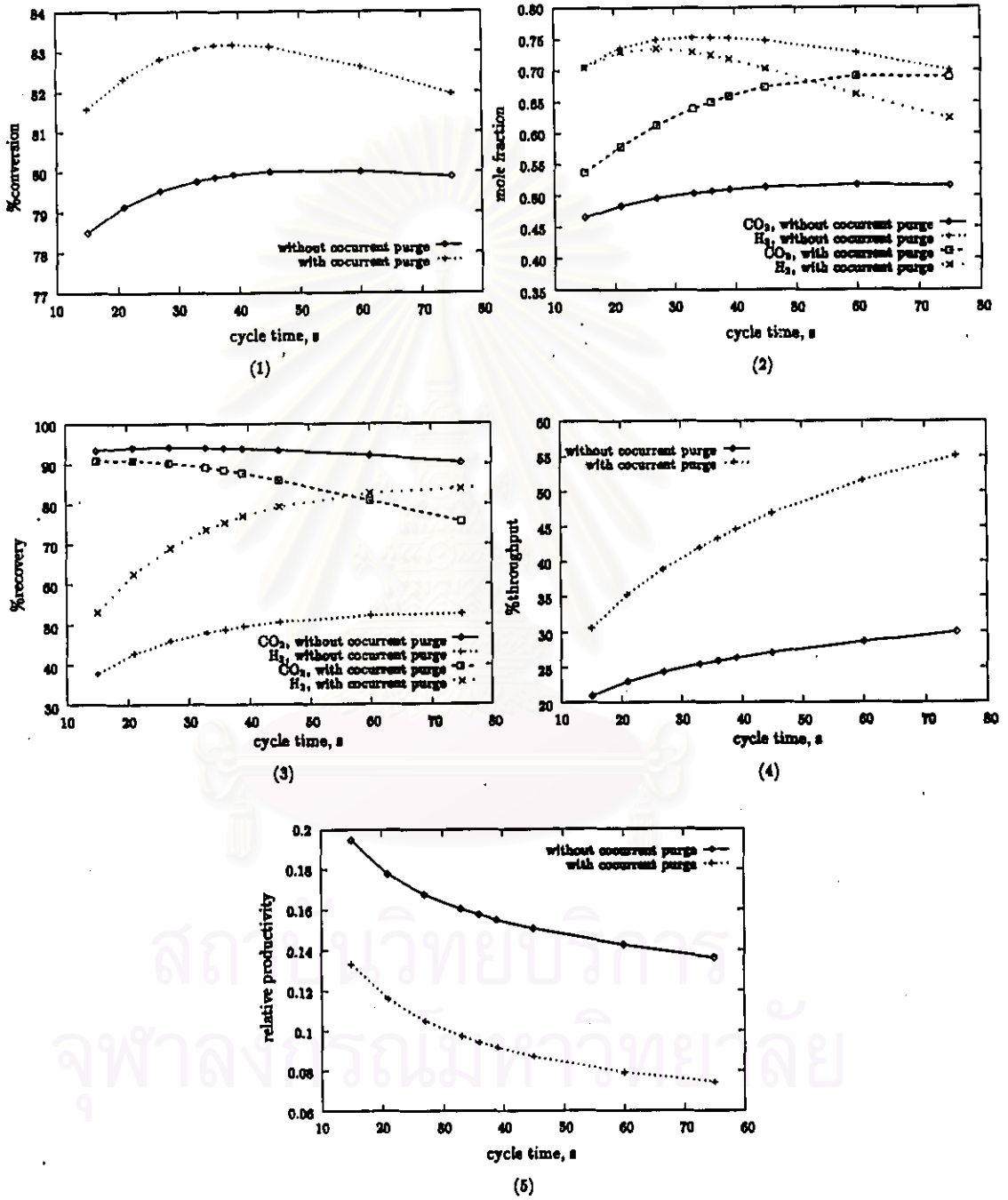
4.3 การใช้ขั้นตอนการไล่แบบไหลตามเมื่อลดขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน

จากหัวข้อที่แล้ว การใช้ขั้นตอนการไล่แบบไหลตามสามารถพัฒนาสมรรถนะทั้งในลักษณะของการเกิดปฏิกิริยา และการแยกสาร อย่างไรก็ตาม ในลักษณะของอัตราการผลิต วิธีดำเนินการแบบความดันสลับซึ่งประกอบด้วยหลายขั้นตอน ทำให้ไม่สามารถทำการป้อนและดึงผลิตภัณฑ์ได้ตลอดช่วงดำเนินการ อัตราการผลิตจึงน้อยกว่าการดำเนินการแบบสภาวะคงตัวในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่ง เพื่อศึกษาถึงการเพิ่มอัตราการผลิต ในหัวข้อนี้จะเป็นการเสนอการลดคาบของการดำเนินการ โดยตัดขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน นั่นคือ ในหนึ่งรอบดำเนินการจะประกอบด้วย

ขั้นตอนการผลิต (ความดันสูง) ขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม (ความดันสูง) แลดขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง (ความดันต่ำ) โดยการเปลี่ยนแปลงระหว่างความดันสูงและต่ำจะเกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนความดันที่ดันหอบรรจุเพื่อป้อน หรือดึงผลิตภัณฑ์ออก ลักษณะของรอบดำเนินการนี้คล้ายคลึงกับที่มีการศึกษาโดย Lu และ Rodrigues (1993) (หน้า 18) แต่ไม่มีขั้นตอนการลดความดันแบบไหลตามและเพิ่มขั้นตอนการไล่แบบไหลตามแทน ลักษณะดำเนินการที่ศึกษาใช้รอบดำเนินการ 2 แบบ คือ แบบที่มีและไม่มีขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม เพื่อเปรียบเทียบผลของขั้นตอนดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบกับรอบดำเนินการในหัวข้อที่แล้ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความดันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน เมื่อไม่มีขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน การเปลี่ยนแปลงความดันขึ้นอยู่กับทั้งเวลาของขั้นตอนดำเนินการ และอัตราการไหล ดังนั้น นอกเหนือจากการศึกษาผลของอัตราการไหล จึงทำการศึกษาผลจากเวลาในขั้นตอนดำเนินการด้วย

4.3.1 ผลของคาบของการดำเนินการ

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของคาบของการดำเนินการ ลักษณะดำเนินการใช้สภาวะอื่นๆ เช่นเดียวกับหัวข้อที่แล้ว ส่วนอัตราการไหลกำหนดให้คงที่ที่ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ในกรณีที่รอบดำเนินการมีการไล่แบบไหลตาม กำหนดเวลาของแต่ลดขั้นตอนในแต่ละรอบดำเนินการเท่ากัน คือ เท่ากับ 1/3 ของคาบของการดำเนินการ ส่วนกรณีที่ไม่มีการไล่แบบไหลตาม ขั้นตอนดังกล่าวจะถูกแทนที่ด้วยขั้นตอนการผลิต ดังนั้น เวลาของขั้นตอนการผลิตจะเท่ากับ 2/3 ของทั้งหมด สมรรถนะในลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาแสดงในความสัมพันธ์ระหว่างคาบของการดำเนินการกับสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 4.7 (1)) ซึ่งเห็นว่า ในทั้งสองวิธีดำเนินการ สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงสุดที่คาบของการดำเนินการค่าหนึ่ง ลักษณะดังกล่าวเหมือนกับที่พบในเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่ดำเนินการแบบเป็นคาบอื่นๆ เช่น การเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการสลับสายป้อน (Lynch, 1984) การเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาจากการสลับสายป้อน (Li, Zhang, and Inui, 1997) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การแปรคาบของการดำเนินการไม่ได้ส่งผลมากต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่มีและไม่มีการไล่แบบไหลตาม การไล่แบบไหลตามมีส่วนช่วยให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยได้สูงสุดประมาณร้อยละ 83.2 ส่วนกรณีที่ไม่มีการไล่แบบไหลตามได้สูงสุดประมาณร้อยละ 80.0



รูปที่ 4.7: ผลของคาบของการดำเนินการต่อสมรรถนะต่างๆ และสัดส่วนการไหลผ่าน เมื่อลดขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (2) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ (3) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ (4) สัดส่วนการไหลผ่าน (5) อัตราการผลิตสัมพัทธ์

ในลักษณะของการแยกสาร ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน แสดงในรูป 4.7 (2) และสัดส่วนที่แยกได้แสดงในรูป 4.7 (3) เช่นเดียวกับในการดูดซับแบบความดันสลับคาบสั้นซึ่งไม่มีการไล่แบบไหลตาม (หน้า 12) มีคาบของการดำเนินการที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีค่าสูงสุด (ประมาณร้อยละ 75) แต่เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า ในช่วงที่ทำการจำลองแบบ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มคาบของการดำเนินการ การที่ได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น และได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนต่ำลงเมื่อเพิ่มคาบของการดำเนินการ ในช่วงที่รอบดำเนินการมีเวลายาวเพียงพอเป็นผลจากสัดส่วนการไหลผ่านที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.7 (4)) ส่วนที่รอบดำเนินการสั้นมาก ซึ่งความเข้มข้นของไฮโดรเจนได้สูงขึ้นในขณะที่สัดส่วนการไหลผ่านเพิ่มขึ้นด้วย เพราะรอบดำเนินการสั้นนั้นเกินกว่าที่จะทำให้เกิดการแยกได้ เนื่องจาก องค์ประกอบที่ถูกดูดซับต่างกันมีเวลาสั้นเกินไปที่จะแยกกันแบบโครมาโตกราฟีก่อนขั้นตอนการคายการดูดซับ ส่วนสัดส่วนที่แยกได้สอดคล้องกับสัดส่วนการไหลผ่าน คือ เพิ่มขึ้นตามคาบของการดำเนินการสำหรับไฮโดรเจน และลดลงเมื่อเพิ่มคาบของการดำเนินการสำหรับคาร์บอนไดออกไซด์

ในลักษณะของอัตราการผลิต พิจารณาผลของคาบของการดำเนินการต่ออัตราการผลิตสัมพัทธ์ (รูปที่ 4.7 (5)) รอบดำเนินการสั้นทำให้ได้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้น และได้สูงกว่ากรณีที่ใช้เวลาสำหรับการเพิ่มและลดความดันขั้นตอนละ 10 วินาทีในหัวข้อที่แล้ว โดยได้สูงสุดประมาณร้อยละ 19.5 และร้อยละ 13.3 ในกรณีที่ไม่มีและมีการไล่แบบไหลตาม ตามลำดับ

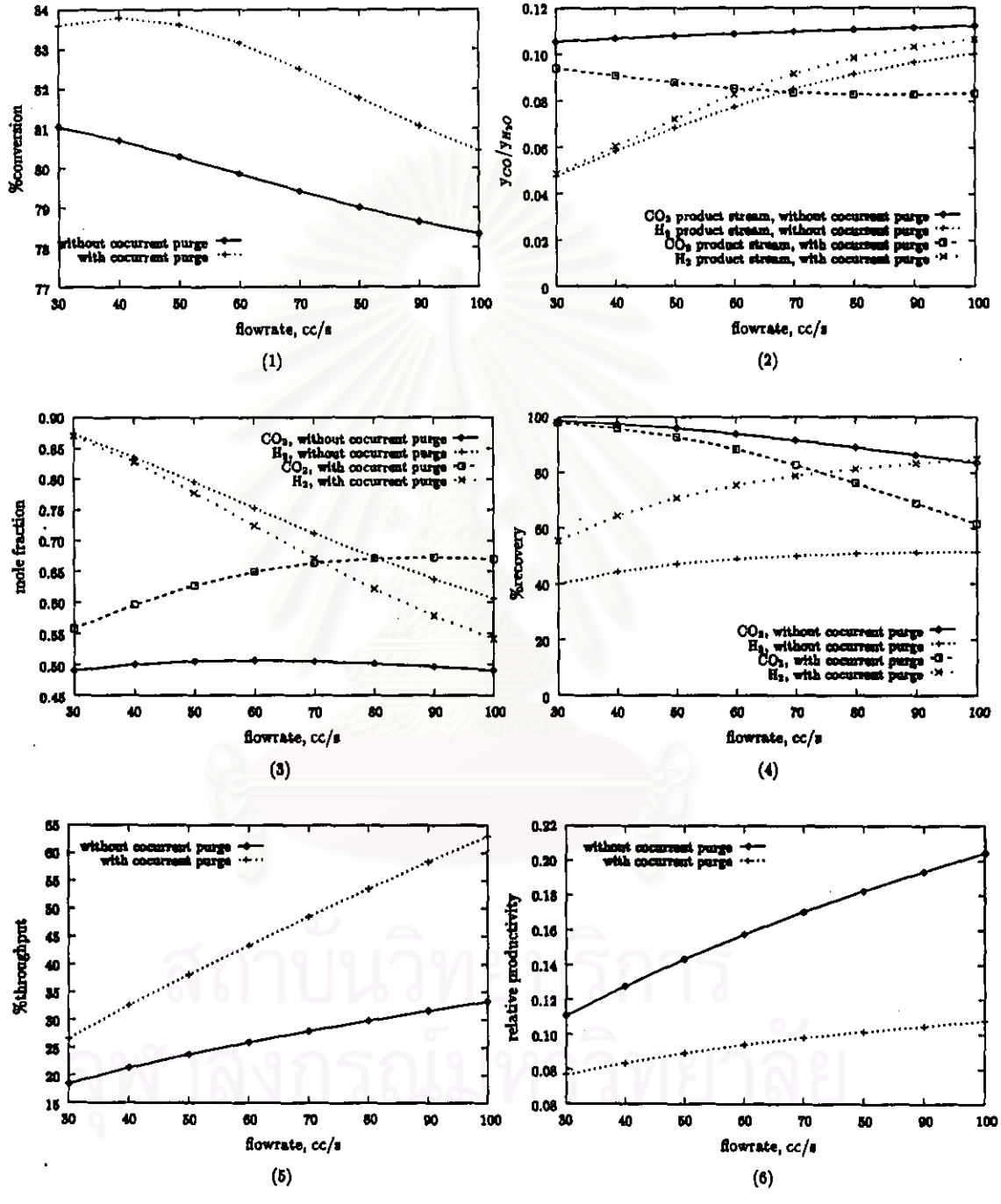
4.3.2 ผลของอัตราการไหล

ลักษณะดำเนินการเป็นการเปรียบเทียบกระบวนการที่มี และไม่มีขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม คาบของการดำเนินการที่ศึกษาเท่ากับ 36 วินาที สำหรับทั้งสองกระบวนการ กรณีที่มีขั้นตอนการไล่แบบไหลตามใช้เวลาในแต่ลดขั้นตอน 12 วินาที ส่วนกรณีที่ไม่มีใช้เวลาในขั้นตอนการผลิต 24 วินาที และการไล่แบบสวนทาง 12 วินาที ตัวแปรที่ศึกษาคืออัตราการไหล ผลของอัตราการไหลต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาแสดงในรูป 4.8 (1) และต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหลือในสายผลิตภัณฑ์ในรูป 4.8 (2) เมื่อเพิ่มอัตราการไหล ในทั้งสองกระบวนการ สารตั้งต้นที่เหลือในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุมีมากขึ้น ส่วนในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุพบว่า สารตั้งต้นเหลือน้อยลงถ้ามีขั้นตอนการไล่แบบ

ไหลตาม แต่มากขึ้นถ้าไม่มีขั้นตอนนี้ จึงทำให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลงเมื่อไม่มีการไล่แบบไหลตาม (เหลือสารตั้งต้นมากขึ้น) ในขณะที่กรณีที่มีการไล่แบบไหลตาม มีค่าอัตราการไหลที่ให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด (เหลือสารตั้งต้นน้อยที่สุด) คือ ร้อยละ 83.8 ที่อัตราการไหล 40 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

ผลของอัตราการไหลต่อความเข้มข้น และสัดส่วนที่แยกได้ของผลิตภัณฑ์แสดงในรูปที่ 4.8 (3) และ 4.8 (4) ตามลำดับ เช่นเดียวกับกรณีที่มีขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหล ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นในกรณีที่มีการไล่แบบไล่ตาม ส่วนกรณีไม่มีการไล่แบบไหล อัตราการไหลไม่ส่งผลมากต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจาก แม้การเพิ่มอัตราการไหลทำให้ไฮโดรเจนถูกแยกออกไปทางปลายหอบรรจุมากขึ้น แต่ทำให้เหลือสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ด้นหอบรรจุมากขึ้นด้วย ในลักษณะของสัดส่วนที่แยกได้ พบว่าสอดคล้องกับสัดส่วนการไหลผ่าน (รูปที่ 4.8 (5)) คือ อัตราการไหลเพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนการไหลผ่านเพิ่มขึ้น (ผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุมากขึ้น) ทำให้สัดส่วนไฮโดรเจนที่แยกได้ในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุเพิ่มขึ้น และสัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้ในผลิตภัณฑ์ด้นหอบรรจุลดลง

รูปที่ 4.8 (6) แสดงผลของอัตราการไหลต่ออัตราการผลิตสัมพัทธ์ การเพิ่มอัตราการไหลทำให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้นได้มากในรอบดำเนินการที่ไม่มีการไล่แบบไหลตาม ส่วนกรณีที่มีการไล่แบบไหลตามด้วยมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (เปลี่ยนแปลงประมาณร้อยละ 3 ตลอดช่วงที่ศึกษา) ทั้งนี้เนื่องจาก อัตราการผลิตอาจพิจารณาจากปริมาณก๊าซในการป้อน ซึ่งกรณีที่ไม่มีการไล่แบบไหลตามมีเวลาสำหรับการป้อน 24 วินาทีต่อรอบดำเนินการ ในขณะที่ขั้นตอนที่มีการไล่แบบไหลตามมีเวลาสำหรับการป้อนเพียง 12 วินาที การเพิ่มอัตราการไหลจึงส่งผลต่อการเพิ่มของอัตราการผลิตในรอบดำเนินการที่ไม่มีขั้นตอนการไล่แบบไหลตามมากกว่าเมื่อมีการไล่



รูปที่ 4.8: ผลของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ ต่อสมรรถนะต่างๆ และสัดส่วนการไหลผ่าน เมื่อลดขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (2) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้นที่เหลือ (3) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ (4) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ (5) สัดส่วนการไหลผ่าน (6) อัตราการผลิตสัมพัทธ์

4.4 การใช้ขั้นตอนการไล่แบบไหลตามในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับคาบสั้น

รอบดำเนินการของเครื่องปฏิกรณ์แบบความดันสลับคาบสั้นประกอบด้วยอย่างน้อย 2 ขั้นตอน คือ การผลิต และการคายการดูดซับ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบคือบริเวณต้นหอบรรจุในขณะที่ทำการดึงผลิตภัณฑ์ออกอย่างต่อเนื่องที่ปลายหอบรรจุ ในขั้นตอนการผลิตก็จะทำการป้อนด้วยสายป้อนที่ต้นหอบรรจุที่ความดันสูง ส่วนในการคายการดูดซับ ความดันที่ต้นหอบรรจุจะสลับไปที่ความดันต่ำ จึงเกิดการไหลย้อนกลับและได้ผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุพร้อมๆ กับผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ ระหว่าง 2 ขั้นตอนดังกล่าวอาจเพิ่มขั้นตอนการลดความดันแบบไหลตาม (การชะล้าง) ได้ มีการศึกษารอบดำเนินการเช่นนี้ในการเสนอเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับเป็นครั้งแรก โดย Vaporciyan และ Kadlec (หน้า 17) สำหรับหัวข้อนี้จะศึกษาผลจากการเพิ่มขั้นตอนการไล่แบบไหลตามในรอบดำเนินการดังกล่าว โดยไม่มีขั้นตอนการชะล้าง ขั้นตอนดำเนินการแสดงในรูป 2.4 แม้กระบวนการดูดซับแบบความดันสลับคาบสั้นมักไม่เหมาะสมในการแยกให้ได้ความเข้มข้นสูง แต่เนื่องจากได้อัตราการผลิตสูงจึงนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ด้วย

เช่นเดียวกับในหัวข้อที่แล้ว ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ คาบของการดำเนินการ และอัตราการไหล การจำลองแบบใช้ข้อมูลของเครื่องปฏิกรณ์ ความดัน และอุณหภูมิเดียวกับกรณีที่ผ่านมา นอกจากนี้ จากการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับคาบสั้นพบว่า ปริมาตรเปล่าซึ่งไม่มีการบรรจุตัวดูดซับที่ปลายหอบรรจุมีส่วนทำให้การแยกเกิดได้ดีขึ้น (Kowler and Kadlec, 1972) เนื่องจากสามารถเกิดการไหลกลับจากปริมาตรเปล่าสู่เบดในช่วงการลดความดันต้นหอบรรจุเพื่อคายการดูดซับ ซึ่งเป็นเสมือนการไล่แบบสวนทาง ดังนั้น จึงศึกษาเพิ่มในกรณีที่หอบรรจุมีปริมาตรเปล่าด้วย หัวข้อที่ 4.4.3 เป็นการศึกษาผลของขนาดของปริมาตรเปล่าต่อสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์

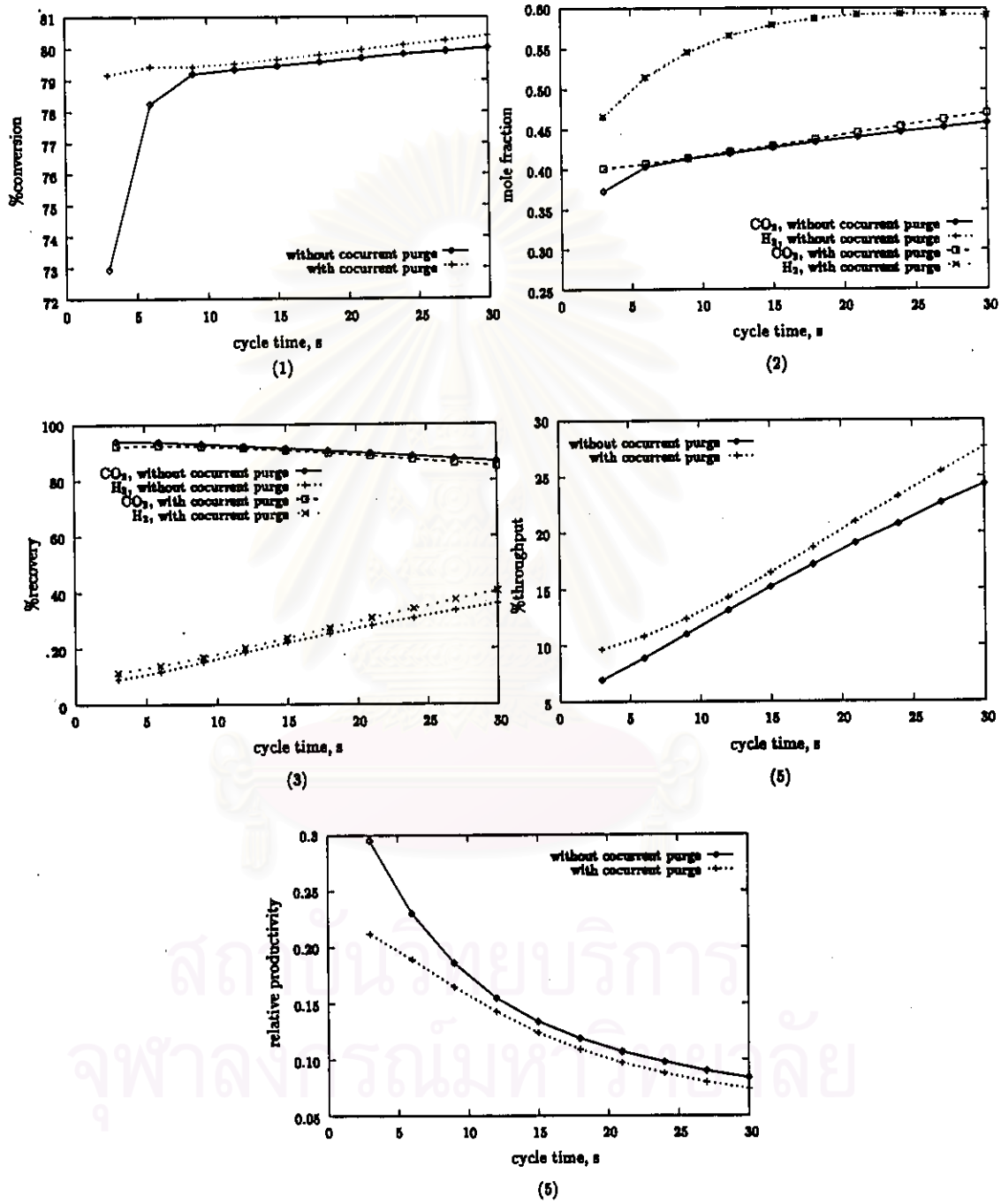
4.4.1 ผลของคาบของการดำเนินการ

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลจากคาบของการดำเนินการ โดยเปรียบเทียบรอบดำเนินการที่มี และไม่มีการไล่แบบไหลตาม กรณีที่มีการไล่แบบไหลตาม แต่ลดขั้นตอนจะใช้เวลา 1/3 ของรอบดำเนิน

การ ส่วนกรณีที่ไม่มีการไล่ ขั้นตอนแรกจะใช้เวลา 2/3 ของรอบดำเนินการ คือ แทนที่การไล่แบบไหลตามด้วยขั้นตอนการผลิต อัตราการไหลที่ปลายหอบรรจุกำหนดคงที่เท่ากับ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบกับหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นว่าใช้อัตราการไหลต่ำมาก ทั้งนี้เป็นข้อจำกัดของรอบดำเนินการแบบคาบสั้น ซึ่งไม่สามารถดึงผลิตภัณฑ์ออกจากปลายหอบรรจุได้มาก เมื่อทำการลดความดันต้นหอบรรจุในขั้นตอนการคายการดูดซับ

ผลของคาบของการดำเนินการต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาแสดงในรูป 4.9 (1) รอบดำเนินการแบบคาบสั้นไม่สามารถเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา ให้สูงกว่าสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสมดุลได้มาก โดยสัดส่วนสูงสุดประมาณร้อยละ 80.4 และในกรณีไม่มีการไล่แบบไหลตาม ที่คาบของการดำเนินการสั้นมาก ได้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสมดุล ทั้งนี้เนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ได้จากต้นหอบรรจุ (ด้านป้อน) ซึ่งจะมีเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยถ้ารอบดำเนินการสั้น ตลอดช่วงที่ศึกษา สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มคาบของการดำเนินการ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มคาบของการดำเนินการมีข้อจำกัด เพราะการใช้เวลาในขั้นตอนการคายการดูดซับนานเกินไป ทำให้เหลือก๊าซภายในหอบรรจุน้อยเกินกว่าที่จะสามารถดึงผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ ตามอัตราการไหลที่ต้องการได้ และแม้จะทำการเพิ่มเวลาเฉพาะขั้นตอนการผลิต และการไล่แบบไหลตาม แต่คาดว่าการเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยายังคงมีค่าจำกัด เช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบคาบสั้นอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบรอบดำเนินการที่มีและไม่มีการไล่แบบไหลตาม การไล่แบบไหลตามทำให้ได้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นแต่เล็กน้อยเท่านั้น

สำหรับผลต่อสมรรถนะในการแยกสาร รูปที่ 4.9 (2) และ 4.9 (3) แสดงผลต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์และสัดส่วนที่แยกได้ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขั้นตอนการไล่แบบไหลตามส่งผลน้อยมากต่อสมรรถนะในด้านนี้ โดยทั้งในลักษณะของความเข้มข้นและสัดส่วนที่แยกได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ยกเว้นสัดส่วนการแยกได้ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่คาบของการดำเนินการยาวๆ เท่านั้น ซึ่งการเพิ่มการไล่แบบไหลตามทำให้ได้สัดส่วนที่แยกได้ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนการไหลผ่าน (รูปที่ 4.9 (4)) ของรอบดำเนินการแบบคาบสั้นมีค่าน้อยมาก (ไม่เกินร้อยละ 30 ตลอดช่วงที่ศึกษา) เพราะข้อจำกัดในเรื่องอัตราการไหล ทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ การป้อนเวียนผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเพียงเล็กน้อย (เนื่องจากอัตราการไหลน้อย) จึงส่งผลต่อสมรรถนะโดย



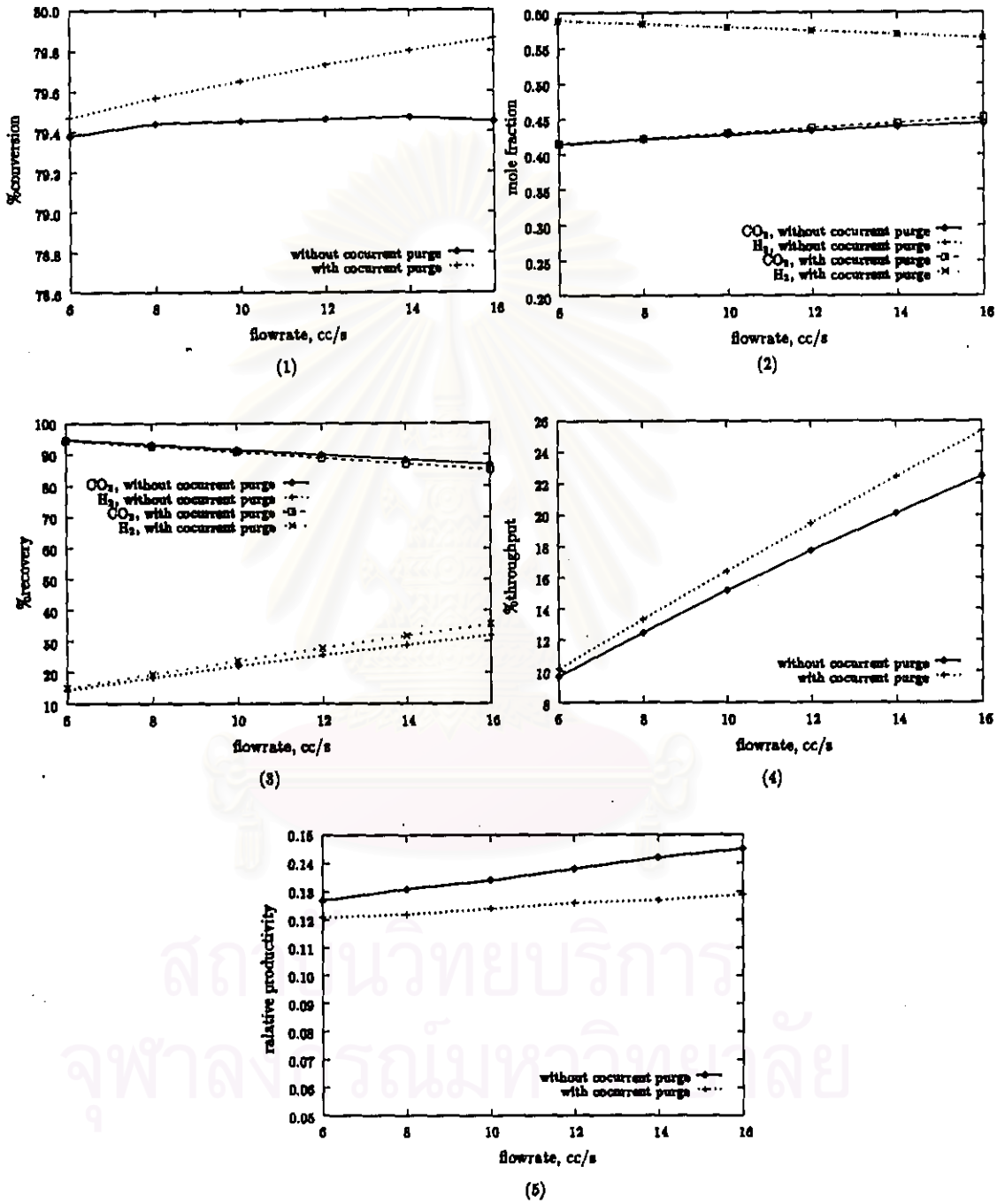
รูปที่ 4.9: ผลของคาบของการดำเนินการต่อสมรรถนะต่างๆ และสัดส่วนการไหลผ่าน ในกระบวนการแบบความดันสลับคาบสั้น (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (2) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ (3) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ (4) สัดส่วนการไหลผ่าน (5) อัตราการผลิตสัมพัทธ์

รวมน้อยมาก นอกจากนี้ การที่สัดส่วนการไหลผ่านน้อยยังส่งผลให้สัดส่วนที่แยกได้ของไฮโดรเจนมีค่าน้อยด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับหัวข้อที่ผ่านมา ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าน้อยกว่ามาก โดยได้คาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นที่สุดประมาณร้อยละ 47.1 และไฮโดรเจนประมาณร้อยละ 59.2 ส่วนอัตราการผลิต (รูปที่ 4.9 (5)) รอบดำเนินการแบบคาบสั้นให้อัตราการผลิตค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับหัวข้อที่ผ่านมา โดยเฉพาะที่คาบของการดำเนินการสั้นมาก ซึ่งได้สูงถึงประมาณร้อยละ 29.5 ในกรณีที่ไม่มีการไล่ และ ร้อยละ 21.2 ในกรณีที่มีการไล่แบบไหลตาม

4.4.2 ผลของอัตราการไหล

ตัวแปรที่ศึกษาคืออัตราการไหลที่ปลายหอบรรจุ คาบของการดำเนินการที่ทำการจำลองแบบเท่ากับ 15 วินาที ในกรณีที่มีการไล่แบบไหลตาม เวลาของแต่ลดขั้นตอนเท่ากับ 5 วินาที ส่วนกรณีที่ไม่มีการไล่ เวลาของขั้นตอนแรกเท่ากับ 10 วินาที อัตราการไหลที่ศึกษามีค่าตั้งแต่ 6-16 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที การเพิ่มอัตราการไหลมากกว่านี้มีข้อจำกัดในช่วงการคายการดูดซับ ดังเช่นในหัวข้อที่แล้ว รูปที่ 4.10 (1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาทั้งรอบดำเนินการที่มีและไม่มีการไล่แบบไหลตามพบว่า อัตราการไหลส่งผลน้อยมากต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะกรณีที่ไม่มีการไล่แบบไหลตาม สำหรับกรณีที่มีการไล่แบบไหลตาม สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น (เพียงประมาณร้อยละ 0.4 ในช่วงที่ศึกษา) เป็นผลมาจากปริมาณก๊าซที่ใช้ในการไล่เพิ่มขึ้น

ผลของอัตราการไหลต่อความเข้มข้น และสัดส่วนที่แยกได้ของผลิตภัณฑ์แสดงในรูป 4.10 (2) และ 4.10 (3) ตามลำดับ ขั้นตอนการไล่แบบไหลตามแทบไม่มีผลต่อความเข้มข้นและสัดส่วนที่แยกได้ของผลิตภัณฑ์ เช่นเดียวกับหัวข้อที่แล้ว พิจารณาผลจากอัตราการไหลต่อความเข้มข้น อัตราการไหลเพิ่มขึ้นทำให้ได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนลดลง และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่วนผลต่อสัดส่วนที่แยกได้สอดคล้องกับสัดส่วนการไหลผ่าน (รูปที่ 4.10 (4)) คือ การเพิ่มอัตราการไหลทำให้ได้สัดส่วนการไหลผ่านเพิ่มขึ้น สัดส่วนที่แยกได้ของไฮโดรเจนจึงเพิ่มขึ้น และสัดส่วนที่แยกได้ของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ผลต่ออัตราการผลิตสัมพัทธ์แสดงในรูปที่ 4.10 (5) อัตราการไหลเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบรอบดำเนินการสองแบบ รอบดำเนินการที่ไม่มีการไล่แบบไหลตามให้อัตราการผลิตสูงกว่า เนื่องจากมีเวลาในการป้อนมากกว่า



รูปที่ 4.10: ผลของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ ต่อสมรรถนะต่างๆ และสัดส่วนการไหลผ่าน ในกระบวนการแบบความดันสลับคาบสั้น (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (2) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ (3) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ (4) สัดส่วนการไหลผ่าน (5) อัตราการผลิตสัมพัทธ์

ตารางที่ 4.4: ผลของขนาดของปริมาตรเปล่าปลายหอบรรจุต่อสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์

ขนาดของ ปริมาตรเปล่า, cm^3	%การเกิด ปฏิกิริยา	สัดส่วนโมล		%ที่แยกได้	
		CO_2	H_2	CO_2	H_2
0	79.65	0.4293	0.5791	90.83	23.71
20	79.57	0.4293	0.5464	89.78	22.68
40	79.54	0.4293	0.5349	89.42	22.31
60	79.54	0.4293	0.5319	89.32	22.22
80	79.53	0.4293	0.5308	89.29	22.18
100	79.53	0.4293	0.5304	89.28	22.17

4.4.3 ผลของขนาดของปริมาตรเปล่า

ศึกษาเฉพาะกรณีที่มีการไล่แบบไหลตาม คาบของการดำเนินการเท่ากับ 15 วินาที ขั้นตอนละ 5 วินาที อัตราการไหล 10 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตัวแปรที่ศึกษาคือขนาดของปริมาตรเปล่าที่ปลายหอบรรจุ ตั้งแต่ 0 ถึง 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผลของขนาดของปริมาตรเปล่าต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา และสัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนในทั้งสองสายผลิตภัณฑ์ สรุปในตาราง 4.4

ตลอดช่วงที่ศึกษา ขนาดของปริมาตรเปล่าไม่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ และส่งผลองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุเพียงเล็กน้อย สำหรับสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาลดลงน้อยมาก สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุมีค่าสูง ทั้งที่สัดส่วนการไหลผ่านมีค่าน้อย (สัดส่วนการไหลผ่านมีค่าประมาณร้อยละ 16.4 ตลอดช่วงที่ศึกษา) ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ออกมาทางต้นหอบรรจุ ลักษณะของรอบดำเนินการเช่นนี้ไม่สามารถทำให้เกิดการคายการดูดซับที่ดี องค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ (คาร์บอนไดออกไซด์) จึงสะสมไปถึงปลายหอบรรจุได้มาก นอกจากนี้ การที่สารตั้งต้นที่ไม่ถูกดูดซับสามารถทำปฏิกิริยาเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ยังทำให้การสะสมของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลายหอบรรจุมีมากกว่ากรณีที่ไม่มีปฏิกิริยา และการไหลย้อนกลับจากปริมาตรเปล่าซึ่งมีไฮโดรเจนอยู่มากจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ผลต่อสมรรถนะในการแยกจึงไม่เพิ่มขึ้นเหมือนกรณีที่ไม่มีปฏิกิริยา ส่วนอัตราการผลิตไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของปริมาตรเปล่า (ประมาณ 0.124)

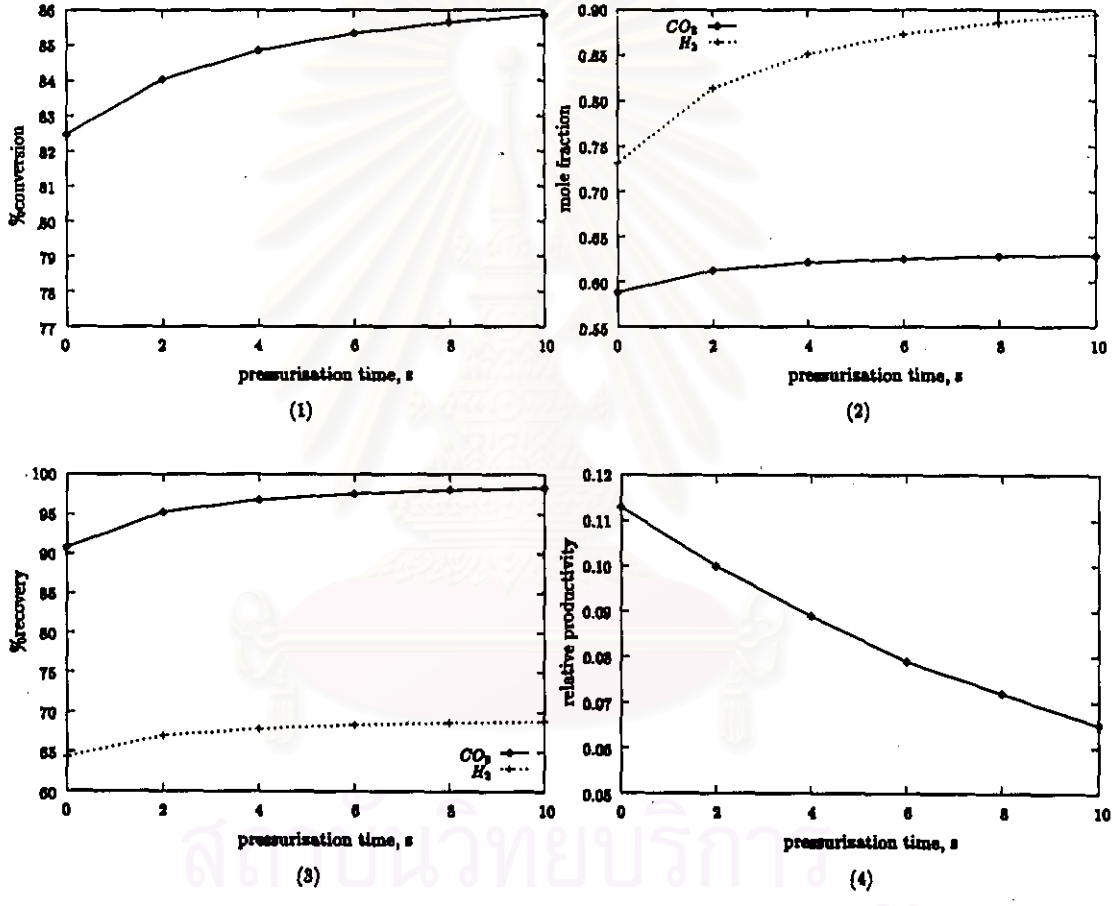
พิจารณาสัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันจึงควรมีการเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกันที่ปลายหอบรรจุ แต่กลับพบว่า เมื่อเพิ่มขนาดของปริมาตรเปล่า ซึ่งทำให้สัดส่วนโมลของไฮโดรเจนลดลง กลับทำให้สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อทำการตรวจสอบจากสมดุลมวลสาร พบว่า ปริมาณผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนที่ได้ มีความแตกต่างกันเพียงประมาณร้อยละ 1 เท่านั้น แม้จะเห็นความแตกต่างในสัดส่วนโมลค่อนข้างมาก แต่สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุมีค่าน้อยจึงไม่พบว่าสมดุลมวลสารผิดพลาดไปมาก

4.5 ผลของเวลาในขั้นตอนต่างๆ ต่อสมรรถนะของกระบวนการ

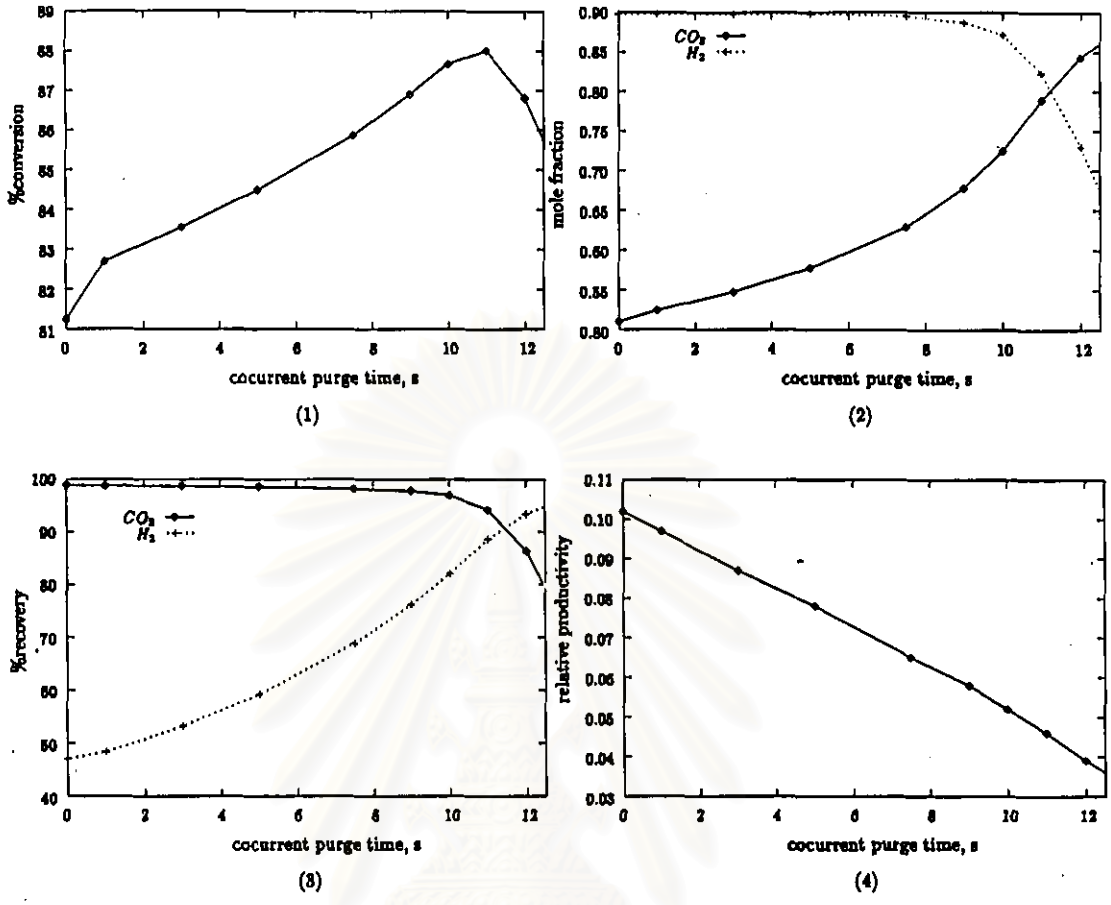
หัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของเวลาของขั้นตอนต่างๆ ต่อสมรรถนะของเครื่องปฏิกรณ์ ที่ดำเนินการลักษณะเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.2 ในลักษณะดำเนินการที่ 4 โดยใช้อัตราการไหล 60 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ขั้นตอนที่ทำการศึกษามีดังนี้

4.5.1 ขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน

ตัวแปรที่ศึกษาคือเวลาในขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน โดยกำหนดให้เวลาในทั้งสองขั้นตอนเท่ากัน เวลาที่ศึกษาคือตั้งแต่ 0 ถึง 10 วินาที รูปที่ 4.11 (1) แสดงผลของเวลาในขั้นตอนการเพิ่มและลดความดันต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากในช่วงแรก และเพิ่มน้อยลงเมื่อเวลาของขั้นตอนดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 1.0 เมื่อเพิ่มเวลาจาก 4 เป็น 10 วินาที ถ้าหากเลยจากช่วงที่ศึกษาก็มีแนวโน้มว่าจะคงที่ พิจารณาผลต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 4.11) (2) และสัดส่วนที่แยกได้ (รูปที่ 4.11 (3)) เวลาในการเพิ่มและลดความดันส่งผลในช่วงแรกเท่านั้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเวลาของขั้นดอนดังกล่าวเกินกว่า 4 วินาที เมื่อพิจารณาในลักษณะของอัตราการผลิตสัมพัทธ์ (รูปที่ 4.11 (4)) อัตราการผลิตลดลงเร็วมากในช่วงแรก และลดลงน้อยลงในช่วงต่อมา กรณีที่ไม่มีขั้นตอนการเพิ่มและลดความดันได้อัตราการผลิตประมาณ 1.7 เท่าของกรณีที่ใช้เวลาสำหรับการเพิ่มและลดความดันขั้นตอนละ 10 วินาที จะเห็นว่าการเลือกเวลาที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนดังกล่าวทำให้ได้อัตราการ



รูปที่ 4.11: ผลของเวลาในขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน ต่อสมรรถนะต่างๆ เมื่อลดขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (2) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ (3) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ (4) อัตราการผลิตสัมพัทธ์



รูปที่ 4.12: ผลของเวลาในขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม ต่อสมรรถนะต่างๆ เมื่อลดขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (2) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ (3) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ (4) อัตราการผลิตสัมพัทธ์

ผลิตเพิ่มขึ้นโดยสมรรถนะไม่ลดลงไปมาก อย่างไรก็ตาม ลักษณะดำเนินการที่ศึกษาใช้ค่าการถ่ายเทมวลระหว่างวัฏภาคค่อนข้างสูง ในกรณีที่การต้านทานการถ่ายเทมวลมีค่ามาก ผลการจำลองแบบอาจแตกต่างไป และความสำคัญของเวลาในขั้นตอนการเพิ่มและลดความดันอาจมีมากขึ้น

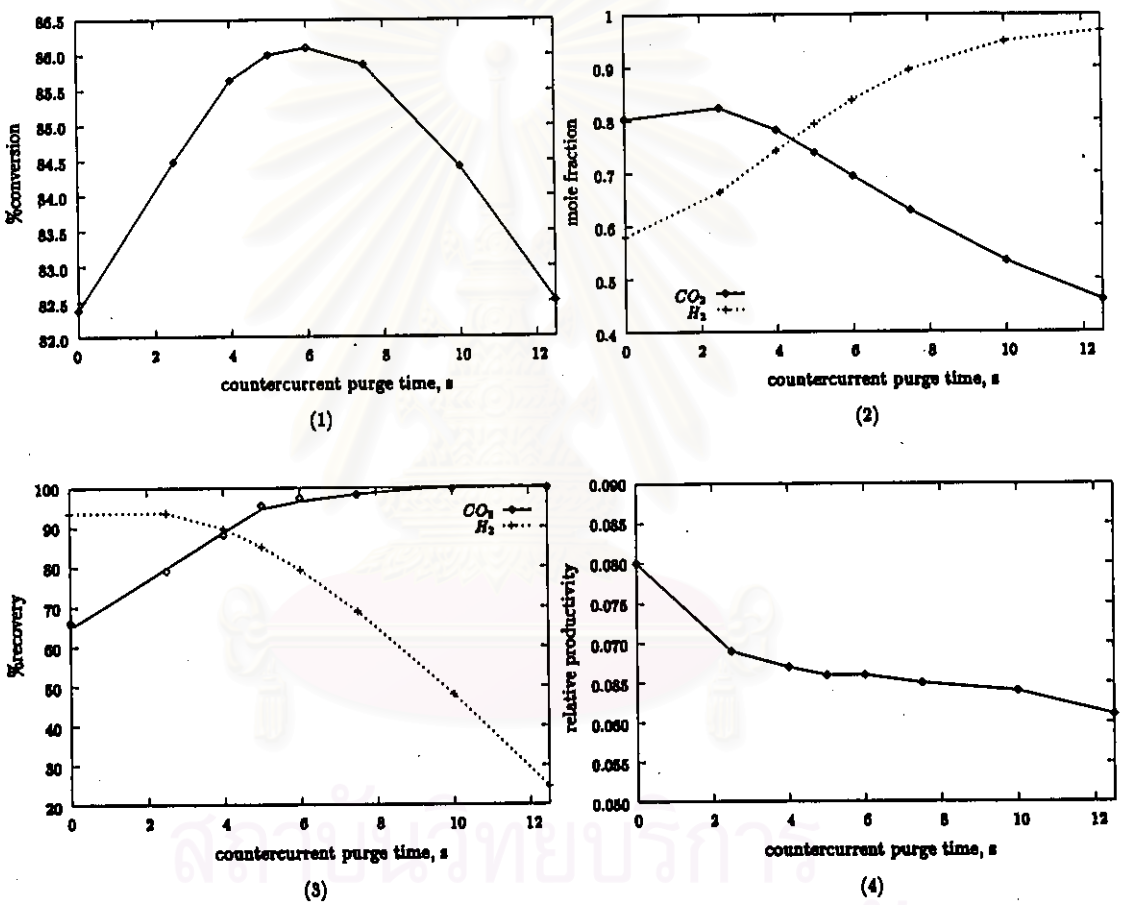
4.5.2 ขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม

ลักษณะดำเนินการมีการแปรเวลาสำหรับการผลิตพร้อมกับการไล่แบบไหลตาม โดยกำหนดเวลารวมสำหรับสองขั้นตอนคงที่เท่ากับ 15 วินาที เนื่องจากทั้งสองขั้นตอนมีสภาวะต่างๆ เหมือนกัน ยกเว้นองค์ประกอบที่ป้อนทางต้นหอบรรจุ รูปที่ 4.12 (1) แสดงผลของเวลาในขั้นตอนการไล่แบบไหลตามต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา รูปที่ 4.12 (2) แสดงผลต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ และรูปที่ 4.12 (3) แสดงผลต่อสัดส่วนที่แยกได้ พิจารณาผลต่อความเข้มข้นเห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการไล่แบบไหลตามทำให้ได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่วนความ

เข้มข้นของไฮโดรเจนเริ่มลดลงที่เวลามากกว่า 9 วินาที การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวชัดเจนขึ้นในช่วงที่เวลาในการไล่แบบไหลตามมีค่ามากขึ้น แต่ก็มีแนวโน้มว่าค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะคงที่เมื่อเพิ่มเวลาในการไล่ เมื่อพิจารณาสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา มีค่าเวลาในการไล่แบบไหลตามที่ให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด คือ ร้อยละ 88.0 ที่เวลา 11 วินาที ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจาก คาร์บอนไดออกไซด์ที่ไปถึงปลายหอบรรจุเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับกับไฮโดรเจน สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาจึงลดลงเมื่อใช้เวลาในการไล่แบบไหลตามมากเกินไป พิจารณาสัดส่วนที่แยกได้ เนื่องจากการไล่แบบไหลตามทำให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุเพิ่มขึ้น สัดส่วนที่แยกได้ของไฮโดรเจนในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุจึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม สัดส่วนที่แยกได้ของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุมีค่าลดลงมากเมื่อเวลาในการไล่แบบไหลตามมีค่ามากเท่านั้น ส่วนอัตราการผลิตสัมพัทธ์ (รูปที่ 4.12 (4)) มีค่าลดลงเป็นเชิงเส้นโดยประมาณเมื่อเพิ่มเวลาในการไล่แบบไหลตาม ทั้งนี้เนื่องจากใช้การไล่แบบไหลตามแทนการป้อนด้วยสายป้อน (เวลาการป้อนลดลงเป็นเชิงเส้นเมื่อเพิ่มเวลาในการไล่แบบไหลตาม)

4.5.3 ขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง

การศึกษาทำโดยแปรเวลาของการไล่แบบสวนทางจาก 0 ถึง 12.5 วินาที โดยไม่มีการเปลี่ยนเวลาของขั้นตอนอื่น ผลที่ได้คล้ายกับกรณีการแปรเวลาในการไล่แบบไหลตาม ในลักษณะของการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 4.13 (1)) มีเวลาในการไล่แบบสวนทางที่ให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาได้สูงสุด ส่วนความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 4.13 (2)) การเพิ่มเวลาในการไล่แบบสวนทางทำให้ได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่คาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และเนื่องจากการไล่แบบสวนทางทำให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุลดลง สัดส่วนของไฮโดรเจนที่แยกได้ในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุจึงลดลง แต่สัดส่วนที่แยกได้ของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.13 (3)) ในลักษณะของอัตราการผลิตสัมพัทธ์ (รูปที่ 4.13 (4)) มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มเวลาในการไล่แบบสวนทาง ทั้งนี้เนื่องจากไม่ได้ลดเวลาในการป้อน (ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาควบคู่กับการดูดซับ) ดังเช่นลักษณะดำเนินการในหัวข้อที่แล้ว ปริมาณผลิตภัณฑ์ต่อรอบดำเนินการจึงไม่เปลี่ยนแปลงมาก ส่วนที่อัตราการผลิตลดลงเนื่องมาจากการเพิ่มเวลาในการไล่แบบสวนทางทำให้รอบดำเนินการยาวขึ้น



รูปที่ 4.13: ผลของเวลาในขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง ต่อสมรรถนะต่างๆ เมื่อลดขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน (1) สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา (2) สัดส่วนโมลของผลิตภัณฑ์ (3) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่แยกได้ (4) อัตราการผลิตสัมพัทธ์

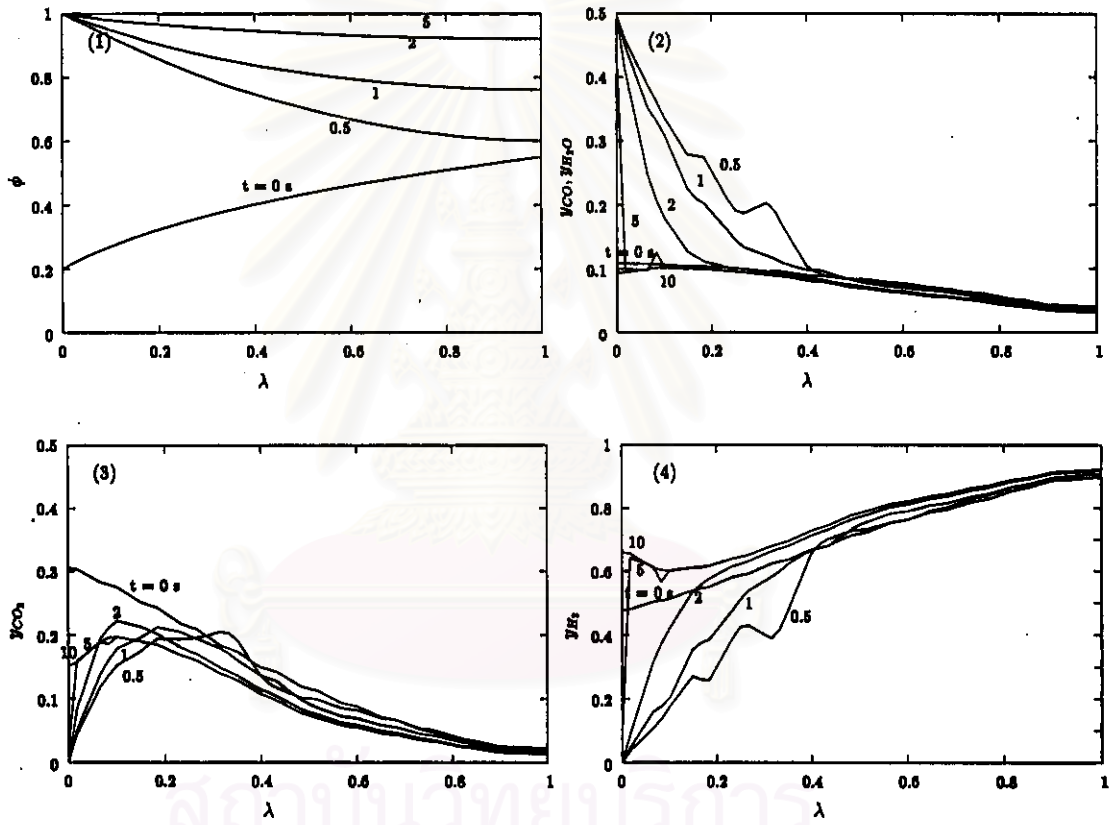
4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นภายในหอบรรจุที่สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบ

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นภายในหอบรรจุ ที่สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบ เพื่ออธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นภายในหอบรรจุ โดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงการกระจายความดันและสัดส่วนโมล รอบดำเนินการที่พิจารณาเป็นพื้นฐาน คือ รอบดำเนินการที่มี 5 ขั้นตอน (มีการไล่ทั้งสองแบบ) โดยขั้นตอนและเวลาในแต่ลดขั้นตอนเหมือนกับที่ศึกษาในหัวข้อ 4.2 กรณีที่ 4 อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุเท่ากับ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนกรณีรอบดำเนินการแบบอื่นจะอธิบายโดยเปรียบเทียบกับขั้นตอนพื้นฐาน เนื่องจากลักษณะดำเนินการกำหนดสัดส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำเท่ากันในสายป้อน และทั้งสององค์ประกอบมีสัมประสิทธิ์ในสมการเคมีเท่ากัน การแสดงการเปลี่ยนแปลงการกระจายความเข้มข้นของสารตั้งต้นทั้งสองจึงเป็นรูปเดียวกัน

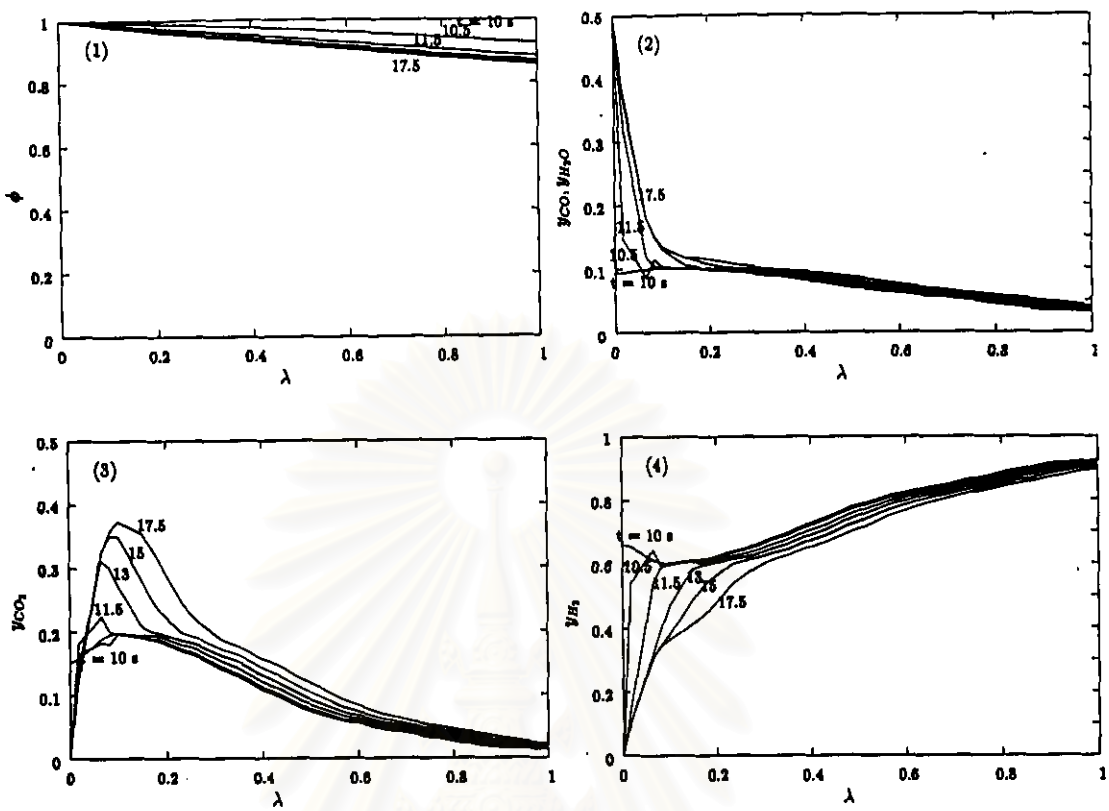
4.6.1 รอบดำเนินการที่มีการไล่ทั้งสองแบบ

ขั้นตอนการเพิ่มความดัน

กระบวนการเข้าสู่ขั้นตอนการเพิ่มความดันหลังจากสิ้นสุดการไล่แบบสวนทาง ในขั้นตอนการไล่แบบสวนทางหอบรรจุอยู่ในสภาวะความดันต่ำ โดยการควบคุมความดันที่ต้นหอบรรจุ และในขั้นตอนการเพิ่มความดัน ความดันที่ต้นหอบรรจุจะถูกสลับไปที่ความดันสูงโดยการป้อนสายป้อนที่ความดันสูง พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความดันเชิงไร้มิติ (ϕ) ในรูปที่ 4.14 (1) การเปลี่ยนแปลงความดันเกิดขึ้นเร็วมากในช่วงต้นของขั้นตอน หลังจาก 5 วินาทีแล้ว การกระจายความดันโดยประมาณไม่มีการเปลี่ยนแปลง ที่ตำแหน่งป้อน ในรูปที่ 4.14 (2) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้นเท่ากับสัดส่วนโมลในสายป้อน และลดลงเมื่อเข้าสู่หอบรรจุเนื่องจากปฏิกิริยา ลักษณะการกระจายสัดส่วนโมลของสารตั้งต้นชันขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการป้อนช้าลง (ความดันภายในหอบรรจุสูงขึ้น) เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นจนป้อนได้น้อยมาก หอบรรจุจึงมีลักษณะเกือบเป็นระบบปิด ท้ายสุดสัดส่วนโมลของแต่ละองค์ประกอบที่ตำแหน่งหอบรรจุจึงแตกต่างจากองค์ประกอบในสายป้อน (สภาวะขอบเขตแบบ Danckwarts, ตาราง 4.3) พิจารณาสัดส่วนโมลที่ลดลงของคาร์บอนไดออกไซด์ (รูปที่ 4.14 (3)) เกิดจากการดูดซับที่เพิ่มขึ้นตามความดัน ซึ่งมีส่วนทำให้สัดส่วนโมลของไฮโดรเจน



รูปที่ 4.14: การเปลี่ยนแปลงภายในหอบรรจุในขั้นตอนการเพิ่มความดันที่สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบ (1) ความดันเชิงไร้มิติ (2) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้น (3) สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ (4) สัดส่วนโมลของไฮโดรเจน



รูปที่ 4.15: การเปลี่ยนแปลงภายในหอบรรจุในขั้นตอนการผลิตที่สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบ (1) ความดันเชิงไร้มิติ (2) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้น (3) สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ (4) สัดส่วนโมลของไฮโดรเจน

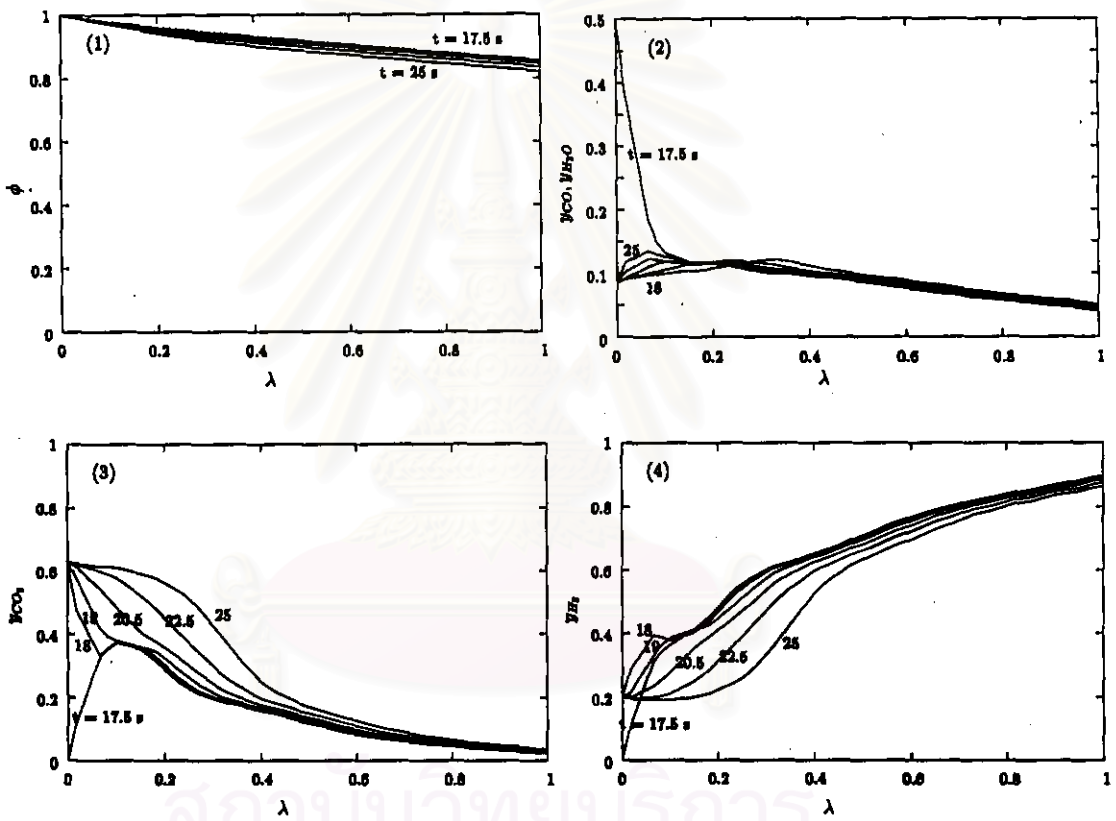
เพิ่มขึ้นด้วย (รูปที่ 4.14 (4))

ขั้นตอนการผลิต

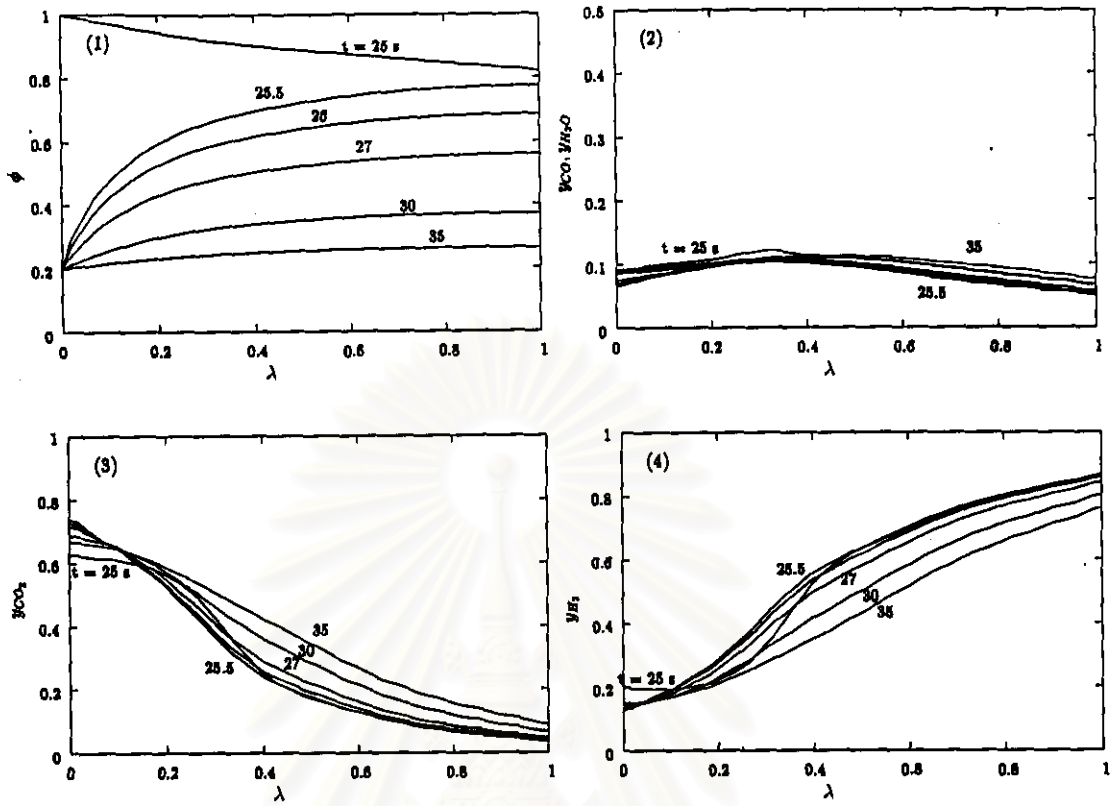
ในขั้นตอนนี้เริ่มมีการดึงผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุออก พิจารณารูป 4.15 (1) ความดันลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการไหลผ่านหอบรรจุเพื่อเป็นแรงขับในการไหล ค่าความดันที่ลดลงขึ้นอยู่กับอัตราการไหลที่กำหนดที่ปลายหอบรรจุ หน้าของการกระจายสัดส่วนโมลของทุกองค์ประกอบ (รูปที่ 4.15 (2-4)) มีการเคลื่อนที่ไปสู่ปลายหอบรรจุ โดยการกระจายของสารตั้งต้นและคาร์บอนไดออกไซด์มีการลดลงตามระยะทาง เนื่องจากปฏิกิริยาและการดูดซับตามลำดับ ส่วนไฮโดรเจนมีลักษณะเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยา

ขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม

การกระจายความดัน (รูปที่ 4.16 (1)) ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากจากขั้นตอนการผลิต การกระจายสัดส่วนโมลของสารตั้งต้น (รูปที่ 4.16 (2)) มีลักษณะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก่อนลดลงเนื่องจาก



รูปที่ 4.16: การเปลี่ยนแปลงภายในหอบรรจุในขั้นตอนการไล่แบบไหลตามที่สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบ (1) ความดันเชิงไร้มิติ (2) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้น (3) สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ (4) สัดส่วนโมลของไฮโดรเจน

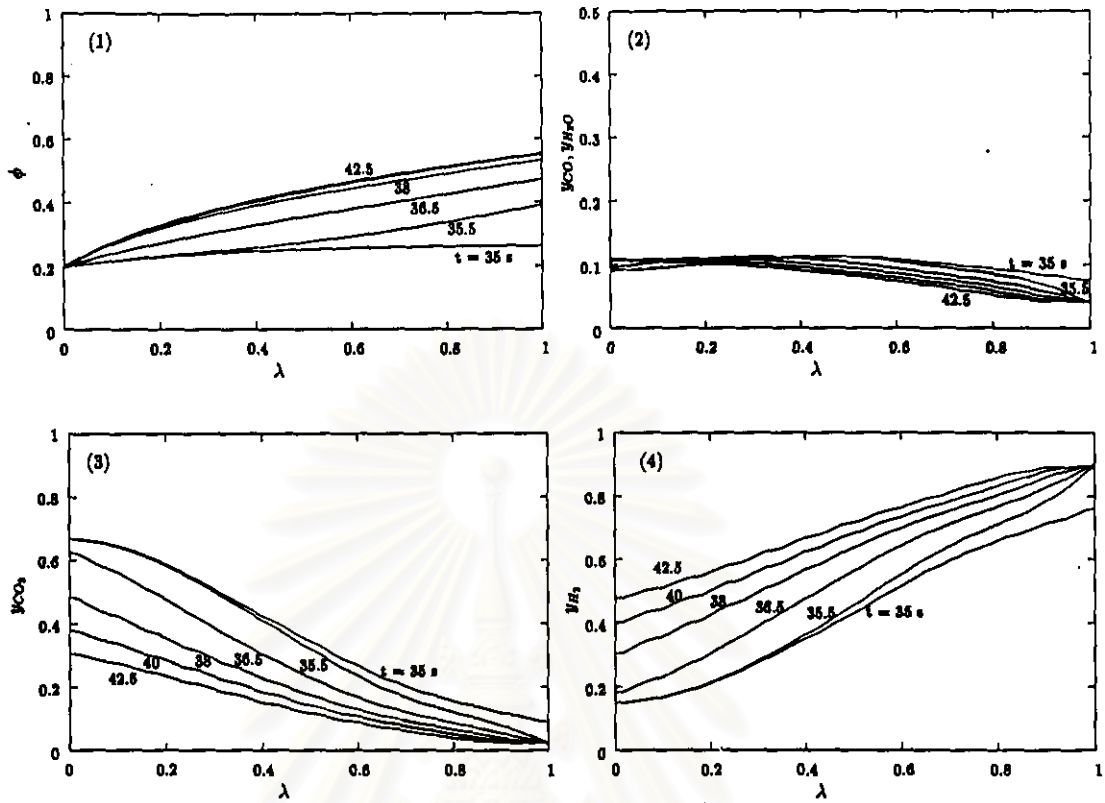


รูปที่ 4.17: การเปลี่ยนแปลงภายในหอบรรจุในขั้นตอนการลดความดันที่สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบ (1) ความดันเชิงไร้มิติ (2) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้น (3) สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ (4) สัดส่วนโมลของไฮโดรเจน

ถูกใช้ในปฏิกิริยา ส่วนที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็นผลจากลักษณะการกระจายในปลายขั้นตอนที่แล้ว และยังอาจเป็นผลจาก การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเมื่อไล่ด้วยสายต้นหอบรรจุ ที่มีสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์อยู่มาก ลักษณะการกระจายของคาร์บอนไดออกไซด์ (รูปที่ 4.16 (3)) มีการเคลื่อนสู่ปลายหอบรรจุคล้ายในหอดูดซับ ความชันของการกระจายของคาร์บอนไดออกไซด์อาจน้อยกว่ากรณีหอดูดซับ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และสารตั้งต้น ซึ่งองค์ประกอบที่ไม่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ในหอบรรจุได้เร็วกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ ลักษณะเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของไฮโดรเจน (รูปที่ 4.16 (4)) คล้ายกับขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้น้อยกว่าในกรณีหอดูดซับเช่นกัน

การลดความดันแบบสวนทาง

ขั้นตอนนี้เป็นการปิดปลายหอบรรจุ และสลับความดันต้นหอบรรจุมาที่ความดันต่ำ ทำให้เกิดการไหลย้อนกลับออกมาทางต้นหอบรรจุ ความดันลดลงเร็วมากในช่วงต้นของขั้นตอน (รูปที่ 4.17



รูปที่ 4.18: การเปลี่ยนแปลงภายในหอบรรจุในขั้นตอนการไล่แบบสวนทางที่สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบ (1) ความดันเชิงไร้มิติ (2) สัดส่วนโมลของสารตั้งต้น (3) สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ (4) สัดส่วนโมลของไฮโดรเจน

(1)) สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ (รูปที่ 4.17 (3)) ภายในหอบรรจุมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการคายการดูดซับ แต่ที่ทางออก (ต้นหอบรรจุ) มีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการไหลย้อนกลับจากภายในหอบรรจุ ซึ่งมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า การคายการดูดซับของคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้สัดส่วนของไฮโดรเจนภายในหอบรรจุ (รูปที่ 4.17 (4)) ลดลง ส่วนที่บริเวณต้นหอบรรจุไม่ลดลงเนื่องจากการไหลย้อนกลับ นอกจากนี้การลดลงของไฮโดรเจนยังเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับด้วย เพราะสัดส่วนของสารตั้งต้น (รูปที่ 4.17 (4)) มีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วงสิ้นสุดขั้นตอนสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้นหอบรรจุ (สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุ) ยังคงมีค่าค่อนข้างสูง

ขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง

การเพิ่มของความดันที่ปลายหอบรรจุ (รูปที่ 4.18 (1)) ทำให้เกิดแรงขับในการไหล การกระจายของสัดส่วนของสารตั้งต้นและคาร์บอนไดออกไซด์ (รูปที่ 4.18 (2) และ

(3)) มีการเคลื่อนกลับมาที่ต้นหอบรรจุ เนื่องจากการไล่ด้วยผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม การกระจายสัดส่วนของไฮโดรเจน (รูปที่ 4.18 (4)) เคลื่อนที่สู่ต้นหอบรรจุเร็วกว่ามาก ทั้งนี้เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่ไม่ถูกดูดซับ และขั้นตอนนี้ดำเนินการที่ความดันต่ำ

4.6.2 รอบดำเนินการที่มีเพียงการไล่แบบสวนทาง

พิจารณารอบดำเนินการในหัวข้อ 4.2 กรณีที่ 3 โดยอัตราการไหลเท่ากับ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันเชิงไร้มิติ และสัดส่วนโมลขององค์ประกอบต่างๆ แสดงในภาคผนวก ก ลักษณะการเปลี่ยนแปลงยังคงคล้ายคลึงกับกรณีที่มีการไล่ทั้งสองแบบ เมื่อเปรียบเทียบรอบดำเนินการทั้งสองแบบ ขั้นตอนการไล่แบบไหลตามทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในบริเวณต้นหอบรรจุเท่านั้น สัดส่วนของไฮโดรเจนยังคงมีค่าสูงที่ปลายหอบรรจุในตลอดรอบดำเนินการ

4.6.3 รอบดำเนินการที่มีเพียงการไล่แบบไหลตาม

พิจารณารอบดำเนินการในหัวข้อ 4.2 กรณีที่ 2 โดยอัตราการไหลเท่ากับ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันเชิงไร้มิติ และสัดส่วนโมลขององค์ประกอบต่างๆ แสดงในภาคผนวก ก ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสามารถยังคงคล้ายคลึงกับกรณีที่มีการไล่ทั้งสองแบบ แต่ในช่วงการลดความดันแบบสวนทาง การกระจายสัดส่วนโมลของไฮโดรเจนลดลงมากกว่า และการกระจายสัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า โดยเฉพาะที่บริเวณปลายหอบรรจุ ทั้งนี้เกิดจากการคายการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งไม่มีในกรณีที่มีการไล่แบบสวนทางเพราะคาร์บอนไดออกไซด์เคลื่อนที่ไปไม่ถึงปลายหอบรรจุ หลังจากสิ้นสุดรอบดำเนินการแล้ว มีการสะสมของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภายในหอบรรจุมากกว่ากรณีที่มีการไล่แบบสวนทาง

4.6.4 รอบดำเนินการที่ไม่มีขั้นตอนการไล่

พิจารณารอบดำเนินการในหัวข้อ 4.2 กรณีที่ 1 โดยอัตราการไหลเท่ากับ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันเชิงไร้มิติ และสัดส่วนโมลขององค์ประกอบต่างๆ แสดงในภาคผนวก ก เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกับกรณีที่มีเพียงการไล่แบบ

ไหลตามพบว่า มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยการไล่แบบไหลตามทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณต้นหอบรรจุเท่านั้น

4.6.5 รอบดำเนินการที่ไม่มีขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน

พิจารณารอบดำเนินการที่ใช้การคายการดูดซับโดยการไล่แบบสวนทาง (หัวข้อ 4.3) ทั้งกรณีที่มีและไม่มีการไล่แบบไหลตาม อัตราการไหลเท่ากับ 60 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที และรอบดำเนินการแบบคาบสั้น (หัวข้อ 4.4) ทั้งกรณีที่มีและไม่มีการไล่แบบไหลตาม อัตราการไหลเท่ากับ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันเชิงไร้มิติ และสัดส่วนโมลขององค์ประกอบต่างๆ แสดงในภาคผนวก ก

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีในหัวข้อ 4.2 การเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนการป้อนที่ความดันสูงมีลักษณะคล้ายกับขั้นตอนการเพิ่มความดันมากกว่าขั้นตอนการผลิต ส่วนในการคายการดูดซับที่ความดันต่ำ ในรอบดำเนินการที่มีการไล่แบบสวนทางมีลักษณะคล้ายคลึงกับในขั้นตอนการลดความดันแบบสวนทางในรอบดำเนินการที่มีการไล่แบบสวนทาง และในรอบดำเนินการแบบคาบสั้น มีลักษณะคล้ายคลึงกับในขั้นตอนการลดความดันแบบสวนทาง ในรอบดำเนินการที่ไม่มีการไล่แบบสวนทาง (กรณีรอบดำเนินการแบบคาบสั้น) ส่วนผลจากการไล่แบบไหลตาม ในกรณีที่มีการไล่แบบสวนทางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะบริเวณต้นหอบรรจุ ส่วนกรณีรอบดำเนินการแบบคาบสั้นมีการเปลี่ยนแปลงการกระจายของตัวแปรต่างๆ น้อยมาก สมรรถนะของกระบวนการจึงไม่มีการพัฒนาเมื่อเพิ่มขั้นตอนดังกล่าว

4.7 ข้อสรุป

ในรอบดำเนินการที่มีพื้นฐานมาจากกระบวนการของ Skarstrom การเพิ่มขั้นตอนการไล่แบบไหลตามทำให้ได้สมรรถนะเพิ่มขึ้นทั้งในด้านการทำปฏิกิริยา และการแยกผลิตภัณฑ์ โดยเหลือสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุน้อยลง และได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ส่วนผลจากขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง แม้ทำให้เหลือสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุน้อยลง และทำให้ได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนสูงขึ้น แต่ก็มีส่วนทำให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุลดลงด้วย ผลของ

สมรรถนะที่เพิ่มขึ้น ในกรณีที่รอบดำเนินการไม่มีขั้นตอนการเพิ่ม และลดความดันยังคงคล้ายคลึงกับกรณีแรก ส่วนกรณีรอบดำเนินการแบบคาบสั้น สมรรถนะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก เมื่อมีการเพิ่มขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของกระบวนการที่คายการดูดซับได้ไม่ดี รวมทั้งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ (สัดส่วนการไหลผ่าน) ที่น้อยมาก การศึกษาการใช้ปริมาตรเปล่าเพื่อให้เกิดการไหลกลับที่ปลายหอบรรจุ ไม่ทำให้เกิดการพัฒนาสมรรถนะของกระบวนการ ดังที่พบในกรณีที่ไม่มีปฏิกิริยา

อัตราการผลิตของกระบวนการที่มีพื้นฐานมาจากกระบวนการของ Skarstrom เพิ่มเป็นเชิงเส้นตามอัตราการไหล ยกเว้นกรณีที่มีเพียงการไล่แบบไหลตาม เมื่อเปรียบเทียบอัตราการผลิตกรณีที่ไม่มีการไล่ให้อัตราการผลิตสูงสุด รองลงมา คือ กรณีที่มีเพียงการไล่แบบไหลตาม กรณีที่มีเพียงการไล่แบบสวนทาง และกรณีที่มีการไล่ทั้งสองแบบ เปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งพบว่า ได้อัตราการผลิตน้อยกว่ามาก กรณีที่ไม่มีขั้นตอนการเพิ่มและลดความดันทำให้ได้อัตราการผลิตเพิ่มขึ้น และรอบดำเนินการแบบคาบสั้นให้อัตราการผลิตสูงที่สุด

สำหรับผลของการเพิ่มและลดความดัน การเพิ่มเวลาของขั้นตอนทำให้สมรรถนะเพิ่มขึ้นในช่วงหนึ่งเท่านั้น ทั้งสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ และสัดส่วนที่แยกได้ โดยสมรรถนะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเพิ่มเวลาของขั้นตอนเกินกว่า 4 วินาที อัตราการผลิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อลดเวลาของขั้นตอนดังกล่าว โดยกรณีที่ไม่มีขั้นตอนการเพิ่มและลดความดันได้อัตราการผลิตประมาณ 1.7 เท่าของกรณีที่ใช้เวลาในการเพิ่มและลดความดันขั้นตอนละ 10 วินาที ผลของสมรรถนะอาจแตกต่างไปหากแบบจำลองมีความต้านทานการถ่ายเทมวลสูงขึ้น

ผลของการเพิ่มเวลาในขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม ทำให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนลดลง สำหรับสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงสุดที่ค่าเวลาหนึ่ง เช่นเดียวกับการเพิ่มเวลาในการไล่แบบสวนทาง ซึ่งทำให้ได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง อัตราการผลิตลดลงโดยประมาณเป็นเชิงเส้นเมื่อเพิ่มเวลาในการไล่แบบไหลตาม เนื่องมาจากใช้ขั้นตอนดังกล่าวแทนขั้นตอนการผลิต ส่วนการเพิ่มเวลาในการไล่แบบสวนทางทำให้อัตราการผลิตลดลง เนื่องจากคาบของการดำเนินการยาวขึ้น

ท้ายสุดเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบ ในรอบดำเนินการที่มีทั้ง 5 ขั้นตอน ลักษณะการกระจายสัดส่วนโมลตามระยะทางของสารตั้งต้น และคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยา และการดูดซับ ตามลำดับ ส่วนไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยา ความชันของการกระจายสัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์อาจน้อยกว่าในหอดูดซับที่ไม่มีปฏิกิริยา ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เกิดจากปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นที่ไม่ถูกดูดซับ ในขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนไดออกไซด์คล้ายกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีในหอดูดซับ และไฮโดรเจนคล้ายกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้น้อย ในขั้นตอนการลดความดัน การคายการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับกับไฮโดรเจน เนื่องจากเกิดสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น สัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้นหอบรรจุยังคงมีค่าสูงเมื่อสิ้นสุดขั้นตอนนี้

ในการศึกษาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการไล่แบบไหลตาม ขั้นตอนการไล่แบบไหลตามมีผลในบริเวณต้นหอบรรจุเท่านั้น ในกรณีที่ไม่มีการไล่แบบสวนทาง การกระจายสัดส่วนโมลของไฮโดรเจนลดลงมากขึ้น เนื่องจาก การคายการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมอยู่ในวัฏภาคการดูดซับมีมากกว่า

ในกรณีที่รอบดำเนินการไม่มีขั้นตอนการเพิ่มและลดความดัน การเปลี่ยนแปลงความดันในขั้นตอนการผลิตทำให้การเปลี่ยนแปลงมีลักษณะคล้ายขั้นตอนการเพิ่มความดัน ในรอบดำเนินการที่มี 5 ขั้นตอน ส่วนในขั้นตอนการคายการดูดซับ รอบดำเนินการที่ใช้การไล่แบบสวนทางในการคายดูดซับ มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายขั้นตอนการลดความดันในกรณีที่มีการไล่แบบสวนทาง และในรอบดำเนินการแบบคาบสั้น มีการเปลี่ยนแปลงคล้ายขั้นตอนการลดความดันในกรณีที่ไม่มีการไล่แบบสวนทาง