บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

แม้วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยจะเป็นการศึกษาผลของการไล่แบบไหลตาม แต่เนื่องจากสมรรถนะของกระบวนการ ขึ้นอยู่กับขั้นตอนอื่นในรอบดำเนินการด้วย การศึกษาจึงจำเป็นต้องพิจารณารอบดำเนินการแบบต่างๆ ในรอบดำเนินการที่มีพื้นฐานมาจากกระบวนการของ Skarstrom การเพิ่มขั้นตอนการไล่แบบไหลตามทำให้ได้สมรรถนะเพิ่มขึ้นทั้งในด้านการทำปฏิกิริยา และการแยกสาร โดยพบว่า เหลือสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุน้อยลง และได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ส่วนผลจากขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง แม้พบว่าทำให้เหลือสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุน้อยลง และทำให้ได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนสูงขึ้น แต่ก็มีส่วนทำให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุลดลงด้วย ผลของสมรรถนะที่เพิ่มขึ้น ในกรณีที่รอบดำเนินการไม่มีขั้นตอนการเพิ่มและลดความดันยังคงคล้ายคลึงกับกรณีแรก ส่วนกรณีรอบดำเนินการแบบคาบสั้นพบว่าสมรรถนะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเมื่อมีการเพิ่มขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของกระบวนการที่ตายการดูดซับได้ไม่ดี รวมทั้งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ (สัดส่วนการไหลผ่าน) ที่น้อยมาก การศึกษาการใช้ปริมาตรเปล่าเพื่อให้เกิดการไหลกลับที่ปลายหอบรรจุไม่พบว่าทำให้เกิดการพัฒนาสมรรถนะของกระบวนการ ดังเช่นในกรณีที่ไม่มีปฏิกิริยา

พิจารณาสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา แม้พบว่า สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไม่ได้เพิ่มขึ้นมากจากสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสมดุล (สูงสุดประมาณร้อยละ 14) ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งมาจากสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสมดุลมีค่าค่อนข้างสูง คือ ร้อยละ 77.4 ซึ่งถ้าเลือกปฏิกิริยา หรือสภาวะที่มีสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาสมดุลน้อยกว่านี้ อาจพบว่าได้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นได้มาก อย่างไรก็ตาม เมื่อ

เหลือสารตั้งต้นมากขึ้น (สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง) อาจพบว่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้น้อยลง และความเป็นไปได้ที่จะได้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นทั้งสองชนิดก็น้อยลงด้วย

จากการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับพบว่า อัตราการผลิตของกระบวนการมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ปกติ นั่นคือ เมื่อกำหนดอัตราการผลิตเท่ากัน เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับจะต้องมีขนาดของหอบรรจุใหญ่กว่า ถึงแม้จะเปรียบเทียบเฉพาะปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ไม่รวมตัวดูดซับ) ก็ตาม อย่างไรก็ตาม ผลจากสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายบางส่วนของกระบวนการได้ เช่น ลดการแลกเปลี่ยนความร้อน ลดการใช้พลังงาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังควรพิจารณาเปรียบเทียบขนาดอุปกรณ์ที่ใหญ่ขึ้นกับสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นด้วย

นอกจากสมรรถนะในแง่การทำปฏิกิริยาและการแยกสาร อัตราการผลิตจึงเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง รอบดำเนินการควรมีช่วงเวลาของการป้อนสายป้อนมาก เพราะเป็นช่วงของการผลิตจริง (ปริมาณป้อนเท่ากับปริมาณผลิตภัณฑ์) ส่วนช่วงเวลาที่ไม่มีการป้อน แม้จะมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการ หรือเพื่อคายการดูดซับ แต่ทำให้คาบของการดำเนินการนานขึ้นโดยไม่เพิ่มผลิตภัณฑ์ที่ได้ ช่วงนี้จึงอาจพิจารณาเสมือนเป็นช่วงระบบมีสมรรถนะในแง่ของเครื่องปฏิกรณ์เคมีน้อย เนื่องจากการใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาน้อย แต่จำเป็นในแง่ของกระบวนการแยกสารด้วยการดูดซับ ดังนั้น การศึกษาผลจากเวลาของแต่ลดขั้นตอนดำเนินการเป็นสิ่งจำเป็นต่อการพัฒนาสมรรถนะของกระบวนการ

การศึกษาเวลาของการเพิ่มและลดความดันพบว่า การเพิ่มเวลาของขั้นตอนทำให้สมรรถนะเพิ่มขึ้นในช่วงหนึ่งเท่านั้น ทั้งสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ และสัดส่วนที่แยกได้ โดยสมรรถนะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเพิ่มเวลาของขั้นตอนเกินกว่า 4 วินาที เปรียบเทียบอัตราการผลิตพบว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อลดเวลาของขั้นตอนดังกล่าว โดยกรณีที่ไม่มีขั้นตอนการเพิ่มและลดความดันได้อัตราการผลิตประมาณ 1.7 เท่าของกรณีที่ใช้เวลาในการเพิ่มและลดความดันขั้นตอนละ 10 วินาที

ผลจากการเพิ่มเวลาของขั้นตอนการไล่แบบไหลตามพบว่า ทำให้ความเข้มข้นในสายผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนลดลง สำหรับสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาพบ

ว่ามีค่าสูงสุดที่ค่าเวลาหนึ่ง เช่นเดียวกับการเพิ่มเวลาในการไล่แบบสวนทาง ซึ่งทำให้ได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง อัตราการผลิตลดลงโดยประมาณเป็นเชิงเส้นเมื่อเพิ่มเวลาในการไล่แบบไหลตาม เนื่องมาจากใช้ขั้นตอนดังกล่าวแทนขั้นตอนการผลิต ส่วนการเพิ่มเวลาในการไล่แบบสวนทางทำให้อัตราการผลิตลดลง เนื่องจากคาบของการดำเนินการยาวขึ้น

จากนั้นงานวิจัยได้ศึกษาสภาวะดำเนินการ รวมถึงตัวแปรต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากจำเป็นต่อการพัฒนาสมรรถนะเช่นกัน การศึกษาพบว่า การเพิ่มผลต่างความดันทำให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังประมาณได้ว่าอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นตามผลต่างความดัน อย่างไรก็ตาม เมื่อสัดส่วนของความดันสูงและต่ำมีค่ามากอาจทำให้เกิดปัญหาอื่นเมื่อดำเนินการจริง เช่น การควบคุมอุณหภูมิเมื่อก๊าซมีการอัดและขยายมาก เป็นต้น

ในการศึกษาสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาในหอบรรจุ พบว่าเมื่อลดสัดส่วนดังกล่าวจาก 0.5-0.1 ซึ่งเพิ่มอัตราการผลิตสัมพัทธ์ (การใช้ประโยชน์ตัวเร่งปฏิกิริยา) ประมาณ 4.3 เท่า โดยที่สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาลดลงเพียงประมาณร้อยละ 1.2 และพบว่ามีผลน้อยมากต่อสมรรถนะการแยกเมื่อสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่า 0.2 ขึ้นไป ในขณะที่พบว่าสัดส่วนของตัวดูดซับมีผลต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยามากกว่า รวมทั้งสมรรถนะในการแยก โดยเฉพาะความเข้มข้นของไฮโดรเจน จะเห็นว่าการศึกษาผลจากสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับเป็นประโยชน์มากในการออกแบบ เนื่องจากสมรรถนะของหอบรรจุขึ้นอยู่กับสัดส่วนของของผสมที่ใช้ นอกจากผลต่อการพัฒนาสมรรถนะแล้วยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายตั้งต้นของกระบวนการได้ด้วย

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ความพยายามทำให้ระบบมีสมรรถนะในการแยกผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอาจทำให้การใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง อย่างไรก็ตาม จากหลักการของ Le Chatelier อาจกล่าวได้ว่าการแยกระหว่างผลิตภัณฑ์ได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น ดังนั้นจึงมีการศึกษากรณีการเพิ่ม หรือเปลี่ยนแปลงบางขั้นตอน โดยคาดว่าจะสามารถเพิ่มสมรรถนะในการแยกสาร รวมถึงสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา

การศึกษาการลดความดันแบบไหลตามพบว่า ทำให้ได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนลดลง และไม่ส่งผลต่อสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยามาก สำหรับอัตราการผลิตลดลงเนื่องจากรอบดำเนินการยาวขึ้น ในการศึกษาการเพิ่มความดันแบบสวนทาง และการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสายพบว่า สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาที่ได้อยู่ในระดับเดียวกับกรณีที่มีการไล่ทั้งสองแบบ พิจารณาสมรรถนะในการแยกผลิตภัณฑ์พบว่า การแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสายเป็นไปได้ที่จะทำให้ได้ความเข้มข้นสูงในทั้งสองผลิตภัณฑ์ ส่วนการเพิ่มความดันแบบสวนทางพบว่า ได้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับเดียวกับรอบดำเนินการที่มีการไล่ทั้งสองแบบ แต่คาดว่าอาจเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ถ้าปรับสภาวะดำเนินการอื่นเพิ่ม เช่น เวลาในขั้นตอนการผลิต ส่วนอัตราการผลิตพบว่าการเพิ่มความดันแบบสวนทางให้อัตราการผลิตน้อยที่สุด

จากผลการศึกษาทั้งหมด เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับสามารถเพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาขึ้นจากเครื่องปฏิกรณ์เคมีปกติ และยังพบว่าสามารถแยกผลิตภัณฑ์ได้เข้มข้น สมรรถนะจากการจำลองแบบนี้ไม่ใช่สมรรถนะจากสภาวะที่ดีที่สุด เนื่องจากการหาสภาวะดังกล่าว (การทำ optimization) อยู่นอกเหนือจากขอบเขตของงานวิจัย การปรับตัวแปรของดำเนินการ และการใช้ขั้นตอนดำเนินการที่เหมาะสมอาจทำให้ได้สมรรถนะสูงกว่านี้ อัตราการผลิตของกระบวนการซึ่งพบว่า มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ปกติ อาจพิจารณาได้ว่าเป็นผลมาจากการใช้เครื่องปฏิกรณ์เคมีที่เป็นเบดนิ่ง คือ เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับไม่สามารถแยกจากกัน การใช้ประโยชน์ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเสียไปในช่วงการทำให้ตัวดูดซับคายการดูดซับ อย่างไรก็ตาม การใช้เบดนิ่งยังคงให้ข้อดีในแง่การลดความซับซ้อนของดำเนินการ ทั้งการขนถ่ายอนุภาคและการแยกตัวดูดซับจากตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้เบดเคลื่อนที่ โดยเฉพาะเมื่อไม่มีการแยกตัวดูดซับจากตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการคายการดูดซับ อาจไม่ส่งผลให้การใช้ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับ แม้กระบวนการดังกล่าวจะสามารถทำการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากยังจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวนมากเพื่อหมุนเวียนในระบบการทำปฏิกิริยา และการคายการดูดซับ

นอกจากวิธีการที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ยังมีวิธีการอื่น ที่อาจใช้ในการพัฒนาสมรรถนะของกระบวนการได้ โดยใช้ผลจากการศึกษานี้เป็นแนวทาง ตัวแปรตามที่สามารถควบคุมได้ค่อนข้าง

ง่าย และส่งผลต่อการแยกอย่างมาก คือ สัดส่วนการไหลผ่าน ในทุกการจำลองแบบ จะเห็นว่า สัดส่วนที่แยกได้ของผลิตภัณฑ์สามารถพิจารณาได้จากสัดส่วนการไหลผ่าน และความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ก็เกี่ยวข้องกับสัดส่วนที่แยกได้เช่นกัน การควบคุมสัดส่วนการไหลผ่านอาจทำได้โดยการปรับอัตราการไหล หรือเวลาในบางขั้นตอน เช่น ขั้นตอนการผลิต หรืออาจใช้การเพิ่มขั้นตอน เช่น การลดความดันแบบไหลตาม เป็นต้น

ตัวอย่างที่คาดว่าการเพิ่มสัดส่วนการไหลผ่านจะทำให้สมรรถนะเพิ่มขึ้น ได้แก่ ในกรณีการเพิ่มความดันแบบสวนทางหรือการแยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสาย ซึ่งพบว่ากรณีที่ใช้อัตราการไหล 50 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีให้สมรรถนะดีกว่ากรณีที่ใช้อัตราการไหล 40 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที แต่การเพิ่มอัตราการไหลมากกว่านี้ทำให้มีผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุไม่เพียงพอในขั้นตอนการไล่แบบไหลตาม ดังนั้น วิธีการที่น่าจะเพิ่มสมรรถนะได้ คือ การเพิ่มเวลาในขั้นตอนการผลิตแทนการเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งการเพิ่มสัดส่วนการไหลผ่านนี้อาจทำให้ รอบดำเนินการที่ใช้การเพิ่มความดันแบบสวนทางสามารถผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงได้

จากการศึกษาผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ปฏิกิริยาส่วนใหญ่ควรจะเกิดขึ้นในช่วงต้นหอบรรจุเพื่อให้มีเวลาในการแยกในหอบรรจุเพียงพอ แต่การบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวนมากทำให้ค่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำ แนวทางหนึ่งที่อาจทำให้ปฏิกิริยาและการแยกเกิดได้ดีโดยที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ต่ำมาก คือ การแปรการกระจายของสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับในหอบรรจุ โดยการพิจารณาแนวทางดังกล่าวอาจใช้ประโยชน์จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะคงตัวแบบเป็นคาบร่วมด้วย

การเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับขั้นตอนดำเนินการที่อาจส่งผล ในการพัฒนาสมรรถนะของกระบวนการ เช่น กรณีที่ใช้การลดความดันแบบไหลตาม ซึ่งพบว่าทำให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นขึ้น แต่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนลดลง อาจใช้การแยกผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุเป็นสองสาย ในระหว่างช่วงการผลิต และการลดความดันแบบไหลตาม นอกจากนี้ยังอาจใช้ขั้นตอนที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ร่วมกัน เช่น การลดความดันแบบไหลตามเพื่อเพิ่มสัดส่วนการไหลผ่าน และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในรอบดำเนินการที่ใช้การเพิ่มความดันแบบสวนทาง หรือการใช้การเพิ่มความดันทั้งแบบไหลตามและแบบสวนทางร่วมกัน เป็นต้น

การเลือกใช้ขั้นตอนดำเนินการขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นหลัก เนื่องจากสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไม่แตกต่างกันมากในลักษณะดำเนินการต่างๆ การเพิ่มความดันแบบสวนทางให้ผลคล้ายกับการไล่แบบสวนทาง จากกรณีพื้นฐานที่มีการไล่ทั้งสองแบบ เมื่อต้องการความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีเพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดย

1. เพิ่มสัดส่วนการไหลผ่าน โดยลดเวลาในขั้นตอนการไล่แบบสวนทาง หรือเพิ่มขั้นตอนการลดความดันแบบไหลตาม ซึ่งทำให้ได้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุเจนลดลง
2. แยกผลิตภัณฑ์ต้นหอบรรจุเป็นสองสาย ซึ่งมีผลน้อยต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ปลายหอบรรจุ แต่สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับได้ดีที่แยกได้ในสายผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอาจลดลงมาก

ปัจจัยแรกในการพิจารณาความเป็นไปได้ ในการนำเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบความดันสลับมาใช้แทนเครื่องปฏิกรณ์ปกติ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในกรณีของปฏิกิริยาที่ศึกษา การใช้ไอน้ำมากเกินพอในสายป้อน ทำให้ผลิตภัณฑ์จากเครื่องปฏิกรณ์แบบความดันสลับเหลือปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยเพียงพอ ที่จะใช้เป็นวัตถุดิบของกระบวนการสังเคราะห์แอมโมเนียได้ โดยอาจใช้ปริมาณไอน้ำน้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์ปกติ เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เกินสัดส่วนที่สมดุลเคมี นอกจากนี้ การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบความดันสลับสามารถให้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจน ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อยมาก จึงอาจลดการใช้อุปกรณ์ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจำเป็นในกระบวนการปกติได้ การเปรียบเทียบความเหมาะสม อาจพิจารณาระหว่างอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (เนื่องจากอัตราการผลิตต่อขนาดอุปกรณ์ลดลง) กับจำนวนอุปกรณ์ในระบบที่อาจลดลง เช่น กรณีการใช้สัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.1 ซึ่งได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนประมาณร้อยละ 75 และต้องใช้ขนาดของอุปกรณ์เป็น 2.2 เท่า ของเครื่องปฏิกรณ์ปกติ โดยใช้ไอน้ำมากเกินพอ ซึ่งทำให้เพิ่มสัดส่วนการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของไฮโดรเจนได้