บทที่ 2

ความรู้เกี่ยวกับชนิดการควบคุมหอกลั่น

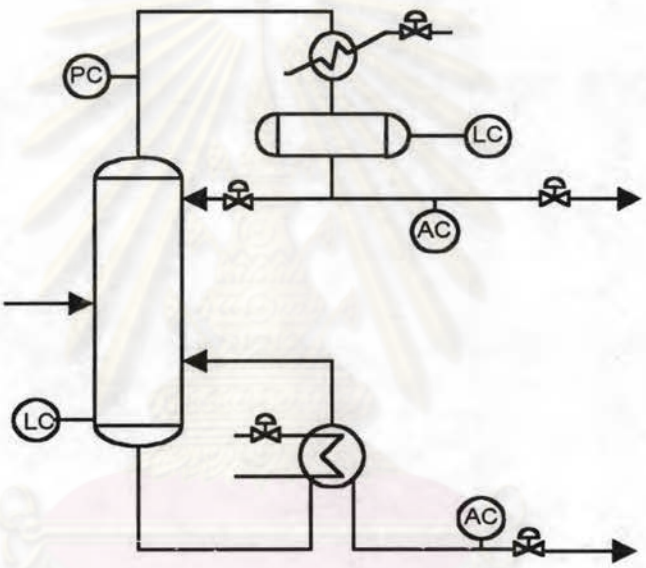
2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงส่วนทฤษฎีที่ใช้ในการเลือกชนิดของการควบคุมหอกลั่น โดยแบ่งเป็น 3 กรณีตามชนิดการควบคุมว่าเป็นการควบคุมองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แบบเดี่ยว แบบคู่ หรือแบบดึงผลิตภัณฑ์ออกด้านข้างคอลัมน์ กรณีที่เป็นการควบคุมองค์ประกอบแบบเดี่ยว จะแสดงถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีควบคุมแบบสมดุลมวลสารโดยตรง, แบบสมดุลมวลสารโดยอ้อม, แบบสมดุลพลังงานที่เป็นกรณีที่ใช้กับคอลัมน์ที่แยกยากๆ และแบบไม่ทั่วไปที่นำมาใช้แทนในกรณีที่เกิดปัญหา กับแบบสมดุลมวลสารโดยตรง และแบบไม่ทั่วไปที่นำมาใช้แทนในกรณีที่เกิดปัญหากับแบบสมดุลมวลสารโดยตรง กรณีที่สองที่เป็นการควบคุมองค์ประกอบแบบคู่ จะพิจารณาถึงผลกระทบระหว่างลูพควบคุมองค์ประกอบเป็นสำคัญ โดยแบ่งเป็น 2 กรณีตามการทราบค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการของผู้ใช้ กรณีที่สามเป็นการควบคุมแบบดึงผลิตภัณฑ์ออกด้านข้างคอลัมน์ จะแบ่งเป็นคลาสได้ 3 คลาส ตามหน้าที่ในการใช้งาน และกล่าวถึงความรู้ในการเลือกชนิดการควบคุมความดัน และเครื่องควบแน่น ต่อจากนั้นกล่าวถึงความรู้ในการเลือกชนิดการควบคุมรีบอยเลอร์ และท้ายสุดเป็นความรู้ในการเลือกชนิดของร

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บอยเลอร์และเครื่องควบแน่น และความรู้ในการเลือกจุดวัดตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์

2.2 ความรู้ในการเลือกชนิดการควบคุมองค์ประกอบแบบเดี่ยว (One-point control)



รูปที่ 2.1 แบบจำลองหอกลั่น

จากรูป 2.1 แสดงตัวแปรควบคุม 5 ตัว และสตรีมที่ใช้ปรับ 5 สตรีม ซึ่งเป็นการควบคุมความดัน 1 ตัว ที่จะกล่าวถึงความรู้ในการเลือกวิธีการควบคุมความดันในหัวข้อถัดไป เมื่อพิจารณาเพียงการควบคุมองค์ประกอบและการควบคุมระดับ จะเหลือตัวแปรควบคุมสำคัญ 4 ตัว คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (X_D) ความเข้มข้นขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ล่างหอ (X_B) ระดับของเหลวในรีฟลักซ์ดรัม (L_r) และ ระดับของเหลวล่าวหอ (L_b) และมีตัวแปรปรับ 4 ตัว คือ อัตราการไหลของดิสทิลเลต (D) อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ล่าง

หอ (B) อัตราการไหลของรีฟลักซ์ (L) และอัตราการไหลของบอยล์อัพ (V) ดังนั้นจึงมีหนทางการจับคู่ของตัวแปรปรับได้ 4! หรือ 24 หนทาง สำหรับการควบคุมแบบเดี่ยวนี้จะมีตัวแปรควบคุมเพียง 3 ตัว ที่จับคู่กับตัวแปรปรับ 3 ตัว ส่วนตัวแปรปรับตัวที่เหลือจะไม่นำมาใช้ปรับ (ปล่อยอิสระ หรือใช้เป็นตัวการควบคุมการไหล) ซึ่งการจับคู่ทั้ง 24 แบบ แสดงดังตารางที่ 2.1 แบ่งเป็นแบบการปรับโดยใช้สตรีมสมดุลมวลสาร คือ D หรือ B เป็นตัวแปรปรับเพื่อควบคุมลูพองค์ประกอบได้ 8 คู่ เรียกเป็นประเภทการควบคุมแบบสมดุลมวลสาร ส่วนการใช้สตรีมสมดุลพลังงาน คือ L หรือ V เป็นตัวแปรปรับเพื่อควบคุมลูพองค์ประกอบได้ 8 คู่ เรียกเป็นประเภทการควบคุมแบบสมดุลพลังงาน และได้อีก 4 คู่เป็นประเภทการควบคุมแบบสมดุลมวลสารโดยอ้อม (indirect-material-balance schemes) ซึ่งเป็นการใช้สตรีมสมดุลมวล D หรือ B เป็นตัวแปรปรับเพื่อควบคุมระดับของเหลว L_r และ L_b ซึ่งเป็นการควบคุมปริมาณอินเวนทอรีของคอลัมน์ และสุดท้ายจะได้ 4 คู่ที่เป็นประเภทการควบคุมแบบภายใน (internal schemes) หรือแบบผสมที่ควบคุมองค์ประกอบด้วยการปรับจากสตรีมสมดุลมวลตัวหนึ่ง ส่วนสตรีมสมดุลมวลอีกตัวหนึ่งจะเป็นการปล่อยอิสระ

ดังนั้นจาก 24 คู่ตัวแปรควบคุม-ตัวแปรปรับที่ได้ นำมาหาประเภทการควบคุมที่เหมาะสม โดยมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณา 2 ข้อ ดังนี้

1. พิจารณาจากค่าเกนที่สภาวะคงที่ โดยวัดได้จากความไว (how sensitive) ของเอาท์พุทต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุทที่เลือกปรับ (มักใช้การซิมูเลตคอลัมน์, McCune, 1973)

2. พิจารณาจากผลตอบสนองไดนามิค โดยวัดจากความเร็ว (how quickly) ในการตอบสนองของเอาท์พุทต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุทที่ใส่เข้าไป (Pradeep B., 1985)

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวแปรปรับที่ใช้ควบคุมองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แบบเดี่ยว

วิธีที่	ตัวแปรปรับเพื่อควบคุมระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์	ตัวแปรปรับเพื่อควบคุมระดับของเหลวก้นหอ	ตัวแปรปรับเพื่อควบคุมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์	ตัวแปรที่ไม่ได้ใช้ในการปรับ	ประเภทของวิธีการควบคุม
1	D	L	B	V	สมดุลมวลสาร
2	D	V	B	L	สมดุลมวลสาร
3	L	D	B	V	สมดุลมวลสาร
4	L	B	D	V	สมดุลมวลสาร
5	B	L	D	V	สมดุลมวลสาร
6	B	V	D	L	สมดุลมวลสาร
7	V	D	B	L	สมดุลมวลสาร
8	V	B	D	L	สมดุลมวลสาร
9	D	L	V	B	สมดุลพลังงาน
10	D	V	L	B	สมดุลพลังงาน
11	L	D	V	B	สมดุลพลังงาน
12	L	B	V	D	สมดุลพลังงาน
13	B	L	V	D	สมดุลพลังงาน
14	B	V	L	D	สมดุลพลังงาน
15	V	D	L	B	สมดุลพลังงาน
16	V	B	L	D	สมดุลพลังงาน
17	D	B	V	L	สมดุลมวลสารทางอ้อม
18	D	B	L	V	สมดุลมวลสารทางอ้อม
19	B	D	L	V	สมดุลมวลสารทางอ้อม
20	B	D	V	L	สมดุลมวลสารทางอ้อม
21	L	V	D	B	แบบผสม
22	L	V	B	D	แบบผสม
23	V	L	B	D	แบบผสม
24	V	L	D	B	แบบผสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพิจารณาจากหลักเกณฑ์ดังกล่าวแล้ว จะพบวิธีการควบคุมที่ไม่เหมาะสม ดังนี้

ตัดวิธีการควบคุม 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 19, 20, 23 และ 24 ซึ่งเป็นการควบคุมระดับของเหลวล่างหอด้วยรีฟลักซ์ หรือดิสทิเลต (เป็นไปตามการพิจารณาข้อ 2)

ตัดวิธีการควบคุม 6 และ 4 เนื่องจากเป็นการใช้ B เพื่อควบคุมระดับของเหลวในรีฟลักซ์ดรัม (เป็นไปตามการพิจารณาข้อ 2)

ตัดวิธีการควบคุม 8 และ 16 เนื่องจาก เป็นการใช้ V (หรือบอยล์อัพ หรือความร้อนจากรีบอยเลอร์) เพื่อควบคุมระดับของเหลวในรีฟลักซ์ดรัม (เป็นไปตามการพิจารณาข้อ 2)

ตัดวิธีการควบคุม 21 และ 22 เนื่องจาก เป็นวิธีที่ไม่สัมพันธ์กับสมดุลมวลสาร

ดังนั้นจะเหลือเพียง 6 วิธีการควบคุม คือ วิธีที่ 2,4,17,18,10 และ 12 วิธีการควบคุม 4 วิธีแรกเป็นประเภทการควบคุมสมดุลมวลสาร (เป็นวิธีโดยตรง 2 วิธี และเป็นวิธีโดยอ้อม 2 วิธี) และ 2 วิธีหลังเป็นประเภทการควบคุมสมดุลพลังงาน ซึ่งเป็นวิธีควบคุมที่ต่างจากวิธีการควบคุม 2 กรณีแรก กล่าวคือจะมีสตรีมผลิตภัณฑ์ตัวใดตัวหนึ่ง ตั้งค่าให้เป็นตัวแปรอิสระ ส่วนสตรีมผลิตภัณฑ์ที่เหลือจะถูกใช้เป็นการควบคุมระดับเพื่อรักษาสมดุลมวลสารของทั้งคอลัมน์ การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะทำได้โดยการปรับอัตราการไหลภายในโดยรวม (internal bulk flow rate) ของคอลัมน์ (L หรือ V) หรือเรียกว่าเป็นการควบคุมโดยการปรับสตรีมสมดุลพลังงาน เนื่องจาก L หรือ V ส่งผลต่อความร้อนเข้า-ออก หรือการเดือดของคอลัมน์โดยตรง ซึ่งขณะที่อัตราการไหลดังกล่าวเพิ่มขึ้น การแยกจะดีขึ้น เช่น วิธีควบคุมที่ 12 VD เมื่อองค์ประกอบสารเบาในสารป้อนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิในส่วนล่างหอจะตกลง และตัวควบคุมอุณหภูมิจะทำการเพิ่ม

การเดือด ทำให้ความดันของคอลัมน์เพิ่มขึ้น ตัวควบคุมความดันก็จะไปเพิ่มอัตราการควบแน่น ส่งผลให้ระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์เพิ่มขึ้น ตัวควบคุมระดับก็จะเทรีฟลักซ์เข้าคอลัมน์มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิเทรย์ลดลง และตัวควบคุมอุณหภูมิจะเพิ่มการเดือดอีกครั้ง ลักษณะเช่นนี้จะเกิดไปเรื่อย ๆ จนกว่ารีฟลักซ์ และการเดือดที่เพิ่มขึ้นจะรักษาอุณหภูมิของส่วนล่างหอได้ หรืออีกนัยหนึ่ง การสะสมขององค์ประกอบเบาในคอลัมน์จะทำให้รีฟลักซ์ และการเดือดเพิ่มขึ้น และถ้าอัตราการไหลรีฟลักซ์ และเดือดมากเกินอัตราที่ต้องการ โอเปอเรเตอร์จะต้องปล่อยผลิตภัณฑ์มากขึ้น เพื่อหยุดการเพิ่มรีฟลักซ์ และการเดือด นั่นคือ ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะคล้ายเป็นกึ่งแบทช์ (semibatch)

จาก 6 วิธีการควบคุมที่เหลือเป็นวิธีควบคุมองค์ประกอบแบบธรรมดา (conventioanl) จะใช้หลักเกณฑ์การพิจารณาข้อ 1 ที่ใช้ความว่องไวมาพิจารณา ซึ่งเป็นการหาความอ่อนไหวในการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ต่อตัวแปรปรับที่เลือกอย่างไร โดยเปรียบเทียบเป็นความว่องไวของตัวแปรควบคุม (ในที่นี้คือ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์) เพื่อตัดสินใจเลือกตัวแปรปรับที่ใช้ควบคุมองค์ประกอบ

สำหรับวิธีเปรียบเทียบความว่องไว ดังกล่าว ใช้วิธีการชิมูเลตระหว่างวิธีควบคุมวิธีที่ 4 (*DV* หรือใช้ *D* หรือ *D/F* เป็นตัวแปรปรับ) กับวิธีที่ 10 (*LB*, รูปที่ 2.3ฉ หรือใช้ *L* เป็นตัวแปรปรับ) และวิธีที่ 12 (*VD*, รูปที่ 2.3จ หรือใช้ *V* หรือ *V/F* เป็นตัวแปรปรับ) คำนวณเป็นค่าความไวสัมพันธ์ (Relative sensitivity) $\left(\frac{\Delta X_D}{\Delta M/M} \text{ และ } \frac{\Delta X_B}{\Delta M/M} \right)$ พบว่าองค์ประกอบผลิตภัณฑ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสตรีมสมดุลมวล (D) มากกว่าการเปลี่ยนแปลงของสตรีมสม-

ดุลพลังงาน (*L* หรือ *V*) นั่นคือ ถ้าต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบผลิตภัณฑ์จะต้องทำการปรับรีฟลักซ์ (*L*) และอัตราบอยล์อัพ (*V*) มากกว่าการปรับโดยอัตราการไหลของดิสทิลเลต (*D*) หรืออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ล่างหอ (*B*) ซึ่งการปรับสตรีมสมดุลพลังงานมาก ๆ จะเป็นโอกาสทำให้เกิดสภาวะท่วม (flooding) และความไม่เสถียร และยังต้องการการปรับอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ต่อเนื่องจากโอเปอเรเตอร์ด้วย จากผลดังกล่าวจึงพิจารณาวิธีควบคุมแบบภายในนี้ (วิธีที่ 10, *LB* และวิธีที่ 12, *VD*) นี้ไว้เป็นทางเลือกสุดท้ายที่วิธีควบคุมสมดุลมวลสารไม่สามารถอิมพลีเมนต์ได้ หรือไม่สามารถใช้กับการควบคุมที่ใช้คอมพิวเตอร์ได้ แต่วิธีควบคุมแบบภายในนี้มีข้อดี คือในกรณีที่มีการรบกวน เนื่องจากตัวกลางให้ความเย็น (cooling-medium) เป็นตัวรบกวนแบบสมดุลพลังงานของคอลัมน์ การใช้วิธีการควบคุมแบบนี้จะไม่มีการอัพเซ็ท (upset) จากตัวรบกวนดังกล่าวต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และเหมาะกับคอลัมน์ที่เป็นประเภทแยกยากๆ (superfractionator) ที่มีอัตราส่วนรีฟลักซ์สูงๆ ($L/D \geq 10$) เช่น การแยกโพรเพน-โพรพิลีน (propylene-propane splitter)

ดังนั้นจะเหลือ 4 วิธีที่เป็นวิธีควบคุมสมดุลมวลสารโดยตรง 2 วิธี (ควบคุมองค์ประกอบโดยการปรับจากสตรีมสมดุลมวลสาร) และวิธีควบคุมสมดุลมวลสารโดยอ้อม 2 วิธี (ควบคุมองค์ประกอบโดยการปรับสตรีมสมดุลพลังงาน) ข้อเปรียบเทียบวิธีการควบคุมแสดงในตารางที่ 2.2 ในขณะเดียวกันสตรีมสมดุลมวลจะใช้ควบคุมปริมาณอินเวนทอรี (inventory) คือระดับของเหลวในรีฟลักซ์ดรัม และระดับของเหลวล่างหอ การประยุกต์ใช้ของแต่ละวิธี พอสรุปได้ดังนี้

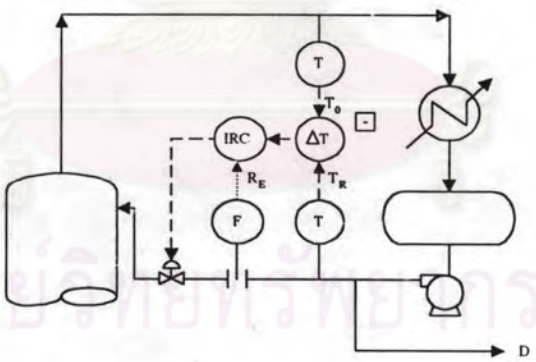
วิธีควบคุมสมดุลมวลสารโดยตรง -วิธีที่ 4 *DV* (รูปที่ 2.3ค)

วิธีนี้ใช้สำหรับควบคุมองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ โดยที่ระดับของเหลวในรีฟลักซ์ดรัมควบคุมโดยปรับจากการไหลของรีฟลักซ์, วิธีนี้ต้องการการควบคุมแบบรีฟลักซ์ภายใน (automatic internal reflux control) เมื่อมีการใช้เครื่องควบแน่นทั้งแบบใช้อากาศหรือน้ำเป็นสารตัวกลางให้ความเย็น เนื่องจากในกรณีที่รีฟลักซ์เย็นต่ำ (subcooled reflux) เข้าคอลัมน์ที่เทรย์บนสุด (เนื่องจากมีการรบกวนที่สารตัวกลางให้ความเย็น เช่น มีพายุ) ซึ่งเป็นการรบกวนแบบสมดุลพลังงาน(รบกวนต่อความร้อนออกจากระบบ) นั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายนอก จะส่งผลกระทบรุนแรงต่ออุณหภูมิของรีฟลักซ์ภายนอก เป็นการเพิ่มความเย็นที่ผนังคอลัมน์ ทำให้มีการควบแน่นเกิดขึ้นภายในคอลัมน์ ความดันจะตกลงอย่างรวดเร็ว และระดับของเหลวล่างหอจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตัวควบคุมความดัน (ในที่นี้ปรับจากอัตราการไหลของสารทำความเย็น) จะทำการลดการควบแน่นในทันที ซึ่งจะทำให้ระดับของเหลวในดรัมลดลง ตัวควบคุมระดับในดรัม (ในที่นี้ปรับจากอัตราการไหลของรีฟลักซ์) จะลดการการไหลรีฟลักซ์ จากการกระทำดังกล่าวจะส่งผลทำให้ตัวควบคุมอุณหภูมิ (ในที่นี้ปรับจากอัตราการไหลของดิสทิลเลต) ไปเพิ่มการไหลของดิสทิเลต นั่นเป็นผลมาจากการลดลงของระดับของเหลวในดรัมและการลดลงของการไหลรีฟลักซ์

สำหรับวิธีการควบคุมแบบ *BL* (วิธีที่ 2, รูปที่ 2.3ง) ผลจากการเกิดการรบกวนที่ตัวกลางให้ความเย็นนั้น จะเกิดการควบแน่นมากขึ้น ทำให้ของเหลวลงไปล่างหอมากขึ้น เมื่อระดับของเหลวล่างหอตัวควบคุม (ในวิธีนี้คือปรับจากอัตราบอยล์อัพ) จะไปเพิ่มอัตราการเดือด ซึ่ง

จะทำให้ผลตรงกันข้ามในการเพิ่มอัตราการควบแน่น นั่นคือจะส่งผลต่อทำให้ตัวควบคุมอุณหภูมิ (ในที่นี้ปรับจากอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ล่างหอ) ไปเป็นการเดือด

อธิบายผลเมื่อเกิดการรบกวนจากตัวกลางให้ความเย็นต่อวิธีการควบคุมทั้งแบบ *DV* ปริมาณไอที่ควบแน่นในคอลัมน์จะถูกเปลี่ยนแปลง ณ. จุดที่รีฟลักซ์เข้า ทำให้ระดับของเหลวในรีฟลักซ์ดรัมตกลง เป็นสาเหตุให้ตัวควบคุมระดับปิดวาล์วรีฟลักซ์ ในขณะที่ของเหลวที่ไหลออกจากเทรย์บนสุดยังคงไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ รีฟลักซ์เย็นต่ำจะไม่ไหลลงเข้าไปในคอลัมน์ จึงต้องใช้ตัวควบคุมแบบรีฟลักซ์ภายใน เพื่อชดเชยต่อการอัพเซ็ทดังกล่าว จะทำงานโดยรักษาการไหลภายในไม่ให้อัพเซ็ทต่ออุณหภูมิรีฟลักซ์ภายนอก การไหลของรีฟลักซ์ภายในจะสัมพันธ์กับการไหล อุณหภูมิของรีฟลักซ์ภายนอก และอุณหภูมิที่เทรย์บนสุดด้วย



รูปที่ 2.2 แสดงการควบคุมแบบรีฟลักซ์ภายใน

สมการแสดงการคำนวณค่ารีฟลักซ์ภายใน เป็นดังนี้

$$R_{int} = R_{ext}\left[1+\frac{C_p}{r}\left(T_i - T_R\right)\right]$$

เมื่อ R_{int} = ค่ารีฟลักซ์ภายใน

R_{ext} = ค่ารีฟลักซ์ภายนอก

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (heat capacity) ของของเหลว

r = ค่าความร้อนแฝง (latent heat) ของของเหลว

T_i = อุณหภูมิของยอดหอ

T_R = อุณหภูมิของรีฟลักซ์เย็นต่ำ

จากสมการข้างต้นเป็นการประมาณการรวมสมดุลพลังงาน และสมดุลมวลที่เทรย์บนสุด ค่าอุณหภูมิ T_i และ T_R เป็นค่าที่วัดได้ และ R_{ext} เป็นค่าที่ถูกเปลี่ยนไปเพื่อรักษารีฟลักซ์ภายในให้คงที่

การทำงานของวิธีการควบคุมแบบ *DV* นี้ สมมติว่าความเข้มข้นขององค์ประกอบเบาเพิ่มขึ้นในสารป้อน จะทำให้อุณหภูมิของคอลัมน์ตกลง ส่งผลต่อตัวควบคุมอุณหภูมิให้ไปเพิ่มการไหลของดิสทิเลต ระดับของเหลวในถังรองรับคอนเดนเสดจะตกลง ส่งผลต่อตัวควบคุมระดับการไหลของรีฟลักซ์ นั่นคือระดับของเหลวล่างหอจะต่ำลง และตัวควบคุมระดับล่างหอจะลดการไหลของผลิตภัณฑ์ล่างหอ ในทางกลับกันถ้าองค์ประกอบหนักมากขึ้นในสารป้อนจะทำให้อุณหภูมิของคอลัมน์เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อตัวควบคุมอุณหภูมิให้ไปลดการไหลของดิสทิเลต ทำให้ในดิสทิเลตมีส่วนองค์ประกอบเบามากขึ้น (หรือบริสุทธิ์มากขึ้น) ซึ่งส่วนองค์ประกอบหนักที่ลดลงในดิสทิเลตจะไปเพิ่มในส่วนล่างหอ ทำให้ในส่วนล่างหอมีส่วนองค์ประกอบหนักมากกว่าส่วนองค์ประกอบเบา นั่นคือทำให้ส่วนล่างหอลดความบริสุทธิ์ลง และยังเป็นการทำให้ปริมาณดิสทิเลตที่ขายลดลงด้วย

วิธีควบคุมสมดุลมวลสารโดยตรง - วิธีที่ 2 *BL* (รูปที่ 2.3ง)

มีการทำงานคล้ายวิธี *DV* ที่ตัวควบคุมองค์ประกอบ (หรืออุณหภูมิ) จะปรับโดยตรงที่สตรีมมวลสาร (ได้แก่ อัตราการไหลของดิสทิเลต หรืออัตราการไหลของส่วนล่างหอ) เพียงแต่เป็นการควบคุมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ล่างหอ โดยปรับจากอัตราการไหลของส่วนล่างหอ

วิธีนี้ใช้สำหรับควบคุมองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ล่างหอ โดยที่ระดับของเหลวล่างหอควบคุมโดยปรับจากอัตราการไหลของสารตัวกลางให้ความร้อน ซึ่งเป็นวิธีนี้มักจะเกิดปัญหาดังนี้

เมื่อมีการใช้งานกับรีบอยเลอร์แบบการไหลเวียนด้วยแรงธรรมชาติ (natural circulation) หรือแบบเทอร์โมไซฟอน อาจจะเกิดปรากฏการณ์ตอบสนองแบบผกผัน (inverse response) (Niserfeld & Seemann , 1981; Buckley , 1975)

การเกิดผลตอบสนองแบบผกผันของวิธีควบคุมแบบ *BL* นั้นในสภาวะที่เกิดฟอง (froth regime) ในคอลัมน์ การเพิ่มอัตราการไหลของไอ (*V*) จะช่วยลดความหนาแน่นของฟองในเทรย์ได้ ฟองจะอยู่สูงกว่าระดับเวียร์มากขึ้น และของเหลวในเทรย์บางส่วนจะล้นเวียร์ลงสู่เทรย์ล่างลงไปเรื่อยๆ เป็นการทำให้ของเหลวไปอยู่ล่างหอมากขึ้น ระดับของล่างหอจะเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องเพิ่มอัตราการเดือดมากขึ้นไปเรื่อยๆ ไม่มีการหยุด ซึ่งผลการตอบสนองดังกล่าวตรงข้ามกับที่ต้องการ นั่นคือเกิดผลตอบสนองแบบผกผัน

ในส่วนของรีบอยเลอร์ที่เกิดผลตอบสนองแบบผกผัน คือ ในกรณีที่เกิดการบวมตัวของรีบอยเลอร์ (reboiler swell) การเพิ่มความร้อนเข้ารีบอยเลอร์ อาจจะเพิ่มปริมาตรของไอในรี-

บอยเลอร์ หรือเพิ่มความดันตกคร่อมในรีบอยเลอร์ และความดันในท่อขาออกจากรีบอยเลอร์ ซึ่งเป็นการทำให้ของเหลวไหลย้อนกลับเข้าไปในส่วนล่างหอชั่วคราว เป็นสาเหตุให้ระดับของเหลวล่างหอเพิ่มขึ้น ส่วนวิธีควบคุมแบบ *LV* และ *DV* นั้นไม่มีผลของผลตอบสนองแบบผกผัน เนื่องจากวิธีควบคุมดังกล่าวนั้นตัวแปร *V* มีการควบคุมการไหลให้คงที่ ส่วนวิธีควบคุมแบบ *VL* อาจจะมีผลจากผลตอบสนองแบบผกผันบ้าง โดยทำให้ความเข้มข้นขององค์ประกอบเบาเพิ่มขึ้นชั่วคราวในผลิตภัณฑ์ล่างหอ และทำให้อุณหภูมิของเทรย์ที่ควบคุมต่ำลงชั่วขณะ ซึ่งเป็นผลให้ความร้อนเข้าคอลัมน์เพิ่มขึ้น แต่จากประสบการณ์ของ Kister (1990) พบว่าไม่มีผลของผลตอบสนองแบบผกผันมากนัก ตราบใดที่วิธีนี้ยังสามารถใช้ได้กว้างขวาง เนื่องจากการจูนตัวควบคุมของวิธีนี้เพียงพอที่จะป้องกันการเกิดผลตอบสนองแบบผกผันได้ และโอกาสการเกิดผลตอบสนองแบบผกผันของวิธีนี้แทบจะไม่เกิดขึ้น

ผลของผลตอบสนองแบบผกผันจะทำให้การควบคุมด้วยวิธี *BL* นี้สูญเสียความเสถียร และเกิดความเสียหายต่อระบบควบคุมได้ สมมติว่ามีส่วนองค์ประกอบเบาเพิ่มขึ้นในสารป้อน ตัวควบคุมอุณหภูมิ (ในที่นี้ปรับจากอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ล่างหอ) จะลดลง และปรับให้อัตราการไหลของส่วนล่างหอลดลง ดังนั้นระดับของเหลวล่างหอจะเพิ่มขึ้น ตัวควบคุมระดับล่างหอ (ในที่นี้ปรับจากอัตราการเดือด) จะเพิ่มความร้อนเข้า และเพิ่มการไหลของไอเข้าคอลัมน์มากขึ้น เมื่อเกิดผลตอบสนองแบบผกผันไม่ว่ากับคอลัมน์หรือกับรีบอยเลอร์นั้น การเพิ่มความร้อนเข้าหรือเพิ่มการไหลของไอ จะส่งผลต่อการเพิ่มระดับของเหลวล่างหอ ทำให้ต้องเพิ่มความร้อน และการไหลของไอไปเรื่อย ๆ เพื่อลดระดับของเหลว ทำให้ผลการตอบสนองไม่เสถียร

การเกิดผลตอบสนองแบบผกผันขึ้นอยู่กับลักษณะภายในคอลัมน์ และอัตราการไหลของไอ Shinkey (1987) และ Buckley (1975) ได้แนะนำว่าถ้าใช้วาล์วเทรย์ (valve trays) ที่ทุกๆ อัตราการเดือดของไอ จะเกิดผลตอบสนองแบบผกผันที่อัตราการเดือดของไอต่ำ โดยที่อัตราการเดือดของไอสูงในเทรย์แบบเจาะรู (seive trays) จะให้ผลตอบสนองโดยตรง และให้เดดไทม์ที่มีอัตราการไหลช่วงอินเตอร์มิเดียต สำหรับคอลัมน์แบบสเปรย์ (spray columns)ไม่เกิดผลตอบสนองแบบผกผัน เนื่องจากของเหลวสะสมในเทรย์ของคอลัมน์แบบสเปรย์นี้ไม่มีผลกระทบจากอัตราการไหลของไอ ส่วนคอลัมน์แบบแพค (packed columns) ไม่ทำให้เกิดผลตอบสนองแบบผกผัน เพียงแต่จะเกิดปัญหาขึ้น คือเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไอจะเป็นการเพิ่มของเหลวสะสมในคอลัมน์มากขึ้น ซึ่งถ้ามีการควบคุมที่ดีพอปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้น

วิธีควบคุมสมดุลมวลสารโดยอ้อม-วิธีที่ 17 (*VL*) และ 18 (*LV*)

วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบรีฟลักซ์ภายในเพิ่มอีก โดยที่วิธีควบคุมแบบ *VL* (รูปที่ 2.3ก) ใช้สำหรับควบคุมองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ล่างหอ และวิธีควบคุมแบบ *LV* (รูปที่ 2.3 ข) ใช้สำหรับควบคุมองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ วิธีเหล่านี้สตรีมสมดุลพลังงานจะต้องปรับก่อนที่สตรีมสมดุลมวลจะส่งผลกระทบ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดเวลาในการเซ็ทเทิลนาน (Nisenfeld & Seemann, 1981)

การทำงานของวิธีนี้จะคุมความเข้มข้นขององค์ประกอบ โดยการปรับอัตราการไหลรีไซเคิลภายใน (internal recycle flow) ได้แก่ อัตราการไหลรีฟลักซ์ หรืออัตราการไหลของบอยล์อัพ) ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงอัตราการเดือด หลังจากนั้นจะเป็นการควบคุมลูพอื่นที่ส่งผลต่อสมดุลมวลรวมของคอลัมน์ สำหรับวิธีควบคุมแบบ *VL* นั้นเมื่อความเข้มข้นของส่วนองค์

ประกอบเบาเพิ่มขึ้นในสารป้อน จะทำให้อุณหภูมิตกลง ส่งผลให้ตัวควบคุมอุณหภูมิไปเพิ่มอัตราการเดือด (เพิ่ม *V*) นั่นคือเป็นการเพิ่มความดันของคอลัมน์ ตัวควบคุมความดันจะไปเพิ่มการควบแน่นทำให้ระดับของเหลวในถังรองรับคอนเดนเสดเพิ่มขึ้น ตัวควบคุมระดับจะไปเพิ่มการไหลของดิสทิเลตเพื่อลดระดับ และผลกระทบอีกด้านหนึ่งคือการเพิ่มอัตราการเดือดข้างต้นจะเป็นการลดปริมาณของเหลวในส่วนล่างหอ ดังนั้นตัวควบคุมระดับล่างหอจะไปลดการไหลของส่วนล่างหอลง นั่นคือจะมีส่วนองค์ประกอบหนักเพิ่มขึ้นในส่วนล่างหอ (หรือผลิตภัณฑ์ล่างหอบริสุทธิ์ขึ้น) แต่การควบคุมแบบสมดุลแบบสมดุลมวลสารโดยอ้อมนี้ อาจจะว่องไวต่อการรบกวนต่างๆ ในคอลัมน์เมื่อใช้งานที่อัตราส่วนที่รีฟลักซ์สูงๆ

ข้อพิจารณาอื่นๆ ในการเลือกวิธีควบคุมองค์ประกอบแบบเดี่ยว ดังแสดงในไว้ในตารางที่ 2.2 โดยจะแสดงคำอธิบายในบางกรณีใช้งาน บางปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนี้

- ปัญหาความปั่นป่วน (fluctuation) ในระดับล่างหอทำให้เกิดแกว่ง (swing) ในการไหลของส่วนล่างหอ ปัญหานี้มักเกิดขึ้นกับในวิธีควบคุมแบบ *VL* , *LV* และ *DV* โดยสาเหตุมาจากการไหลของส่วนล่างหอไปยังหน่วยถัดไปที่ต้องการสารป้อน (อาจเป็นเตาเผา เครื่องปฏิกรณ์ หรือคอลัมน์อื่น) ที่อัตราการไหลคงที่ หรือมีสาเหตุมาจากการนำการไหลของส่วนล่างหอไปเป็นพรีฮีตเตอร์ เช่น นำไปพรีฮีตของสารป้อน และถ้าการควบคุมการพรีอีตช้าหรือไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ

การเพิ่มเวลาเรซิเด็นท์ (residence time) ในส่วนล่างหอ หรือเพิ่มขีดความสามารถของการปล่อย (surge) ระหว่างคอลัมน์กับหน่วยดาวน์สตรีม จะช่วยลดการปัญหาความปั่นป่วนของ

การไหลได้ แต่อาจจะเสียค่าใช้จ่ายสูง และถ้าสารที่อยู่ในล่างหอมีพิษ หรือมีความไม่เสถียรเนื่องจากความร้อน การเพิ่มปริมาตรการปล่อยที่อุณหภูมิสูงไม่สามารถทำได้

การแกว่งของการไหลล่างหอจะเกิดรุนแรง เมื่อสตรีมล่างหอมีของเหลวเพียงบางส่วนที่ออกมาจากก้นหอ ระดับของเหลวจะเกิดปัญหาความปั่นป่วนของการไหล เป็นสาเหตุเริ่มต้นให้เกิดเป็นตัวรบกวนต่อการไหลของเหลวของคอลัมน์ และจะเกิดผลมากขึ้นเมื่อเกิดรบกวนที่การไหลของผลิตภัณฑ์ล่างหอ สำหรับการรบกวนการไหลของเหลวของคอลัมน์เพียง 5% จะส่งผลรบกวนต่อการไหลล่างหอถึง 50% เมื่อการไหลของเหลวของคอลัมน์มากกว่าการไหลล่างหอ 10 เท่า ภายใต้สภาวะนี้ไม่เพียงแต่จะทำให้เกิดการแกว่งมากขึ้น และการเปลี่ยนแปลงการไหลล่างหอจะไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะควบคุมระดับล่างหอได้

เมื่อสตรีมล่างหอใช้เป็นพรีฮีตเตอร์แก่คอลัมน์ทั้งหมด การแกว่งของการไหลล่างหออาจจะทำให้เกิดปัญหาความปั่นป่วนของการไหลในเอนทาลปีของสารป้อนได้ ถ้าตัวควบคุมอุณหภูมิของสารป้อนไม่สามารถจะคุมได้รวดเร็ว และไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ตัวรบกวนจะส่งผลต่อคอลัมน์ และส่งผลกระทบต่อตัวควบคุมองค์ประกอบ ซึ่งคอลัมน์ที่ควบคุมแบบ *VL* จะมีผลทำให้เกิดการแกว่งของระบบควบคุมองค์ประกอบ

เมื่อพิจารณาถึงความต้องการให้ได้อัตราการไหลล่างหอคงที่แล้ว ถือเป็นข้อดีที่สำคัญของวิธีควบคุมแบบ *BL* และนิยมใช้ แม้ว่าจะมีการตอบสนองตรงกันข้าม แต่ถ้าพิจารณาถึงปัญหาการตอบสนองตรงกันข้ามเป็นสำคัญแล้ว วิธีควบคุมแบบไม่ทั่วไป (unconventional direct MB) แบบ *BV* (วิธีที่ 1, รูปที่ 2.3ช) สามารถใช้แก้ปัญหาได้ ซึ่งมีรายงานกล่าวไว้ถึงสมรรถนะของวิธีควบคุมนี้ ในคอลัมน์หนึ่งที่การควบคุมแบบ *BL* เกิดปัญหาการตอบสนองตรงกันข้าม

โดยที่แบบ *BV* นี้ การไหลล่างหอจะเล็กพอที่จะควบคุมระดับล่างหอ และโฮลด์อัพ (holdup) ของล่างหอจะรักษาไว้ที่ระดับต่ำสุด เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความเสียหายต่อสารในคอลัมน์ (ซึ่งวิธี *VL* , *LV* , *DV* นั้นไม่เหมาะสม)

สำหรับวิธีควบคุมแบบ *BV* นั้นมีข้อเสียคล้ายกับวิธี *LV* ยกเว้นปัญหาเรื่องการแกว่งของอัตราการไหลล่างหอดังกล่าวข้างต้น แต่จะมีปัญหาเรื่องดีเลย์ของการเปลี่ยนแปลงระดับล่างหอจากการควบคุมที่รีฟลักซ์ ที่ใช้เวลามากกว่าที่จะส่งผลมายังล่างหอได้ ซึ่งในคอลัมน์ที่มีจำนวนเทรย์มาก ๆ (100 เทรย์) Buckley (1975) ได้แสดงไว้ว่ามีดีเลย์เกิดขึ้นถึง 3 นาที ซึ่งถึงแม้ว่าจะใช้เวลาไม่เหมาะสมแต่คอลัมน์ก็สามารถทำงานได้ โดยที่ตัวควบคุมระดับล่างหอต้องจูนแบบหลวม (loosely) เพื่อป้องกันความไม่เสถียรที่ระดับของเหลวล่างหอ และระดับของเหลวที่ถังรองรับรีฟลักซ์

- สำหรับวิธี *BV* นั้นมีปัญหาเมื่อสารป้อนของคอลัมน์ส่วนใหญ่นั้นเป็นของเหลว และการไหลของสารป้อนนั้นมากกว่าการไหลของรีฟลักซ์ (F >> L) ระดับล่างหอจะเพิ่มขึ้น หรือลดลงอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงความปั่นป่วนการไหลของสารป้อน การใช้ปริมาตรของการปล่อยที่มากพอที่ล่างหอนั้นสามารถลดการแปร-ปรวนของระดับล่างหอได้ แต่ต้องทำให้การปล่อยนี้เพียงพอที่จะกำจัดปัญหานี้ได้ ความแปรปรวนระดับล่างหอจะทำลายการควบคุมอุณหภูมิได้ โดยเมื่อการไหลของสารป้อนลดลง จะทำให้ต้องเพิ่มการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งจะทำให้วาล์วที่ล่างหอเปิดส่งผลให้ระดับล่างหอลดลง จากเหตุผลดังกล่าวแสดงว่าวิธี *VL* นี้ ควรหลีกเลี่ยงเมื่อคอลัมน์มีการไหลสารป้อนมากกว่าการไหลของรี-

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฟลักซ์ ($F >> L$) ในกรณีนี้ต้องใช้วิธีการควบคุมแบบรักษาการไหลผลิตภัณฑ์คงที่ (demand product) มาพิจารณา

- วิธีการควบคุมด้วยวิธีสมดุลมวลสารอาจจะยุ่งยาก เมื่อสตรีมดิสทิเลตเล็กกว่าสตรีมรีฟลักซ์ ($D << L$ หรือ อัตราส่วนรีฟลักซ์สูง) ถ้ามีการแกว่งในอัตราการไหลของดิสทิเลตมากเกินการยอมรับได้ การเปลี่ยนแปลงการไหลของดิสทิเลตเพียงเล็กน้อยจะส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์ และวิธีควบคุมแบบ *VL* , *LV* และ *BL* จะไม่สามารถรักษาระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์ให้คงที่ได้ ในกรณีส่วนใหญ่ระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์จะถูกปรับจากการเปลี่ยนแปลงของรีฟลักซ์ การเดือด หรืออัตราการควบแน่นอย่างไรก็ตาม การควบคุมดังกล่าวจะรักษาสมดุลมวลสารของคอลัมน์ได้เล็กน้อย และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้เกิดการสะสมหรือลดลงของสารองค์ประกอบเบา ซึ่งวิธี *DV* จะไม่เกิดปัญหาดังกล่าวข้างต้น และนิยมใช้กับกรณีที่การไหลของดิสทิเลตมีน้อย
- ถ้าปัญหาหลักของตัวรบกวนในคอลัมน์ เป็นการรบกวนจากตัวกลางให้ความร้อน ตัวรบกวนจะส่งผลกระทบต่อการควบคุมระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์ วิธีควบคุมแบบ *DV* อาจจะทำให้เกิดปัญหาความปั่นป่วนที่การไหลของรีฟลักซ์ได้ ถ้าใช้วิธี *DL* (รูปที่ 2.3 ซ) อาจจะแก้ปัญหาตัวรบกวนดังกล่าวได้ มีรายงานจากประสบการณ์ว่า (Lupfer, 1974) วิธี *DL* นี้เหมาะกับกรณีที่การไหลดิสทิเลตเล็ก ๆ แต่จะมีปัญหาเช่นเดียวกับวิธี *BV* ที่เป็นการควบคุมแบบไม่ทั่วไปเหมือนกัน คือวิธี *DL* นี้ไม่เหมาะกับกรณีที่คอลัมน์มีการไหลสารป้อนมากกว่าการไหลของบอยลุอัพ ($F >> V$) เนื่องมาจากผลกระทบต่อกันของการควบคุมระดับ และความดัน (Nisenfeld, 1981)

ทั้งวิธี *DV* และ *DL* มีข้อเสียตรงที่จะต้องควบคุมองค์ประกอบแบบหลวม เมื่อการไหลของดิสทิเลตเล็กๆ ถ้าใช้การควบคุมแบบแน่นอน (tight control) หรือถ้ามีตัวรบกวนที่สตรีมสารป้อนแล้ววิธี *VL* , *LV* , *BL* อาจจะดีกว่าแต่จะมีปัญหาการสะสมสารเกิดขึ้น ทางเลือกอื่น คือ ใช้วิธีควบคุมแบบซับซ้อนขึ้น (เช่น การใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ หรือใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม) มีอยู่กรณีหนึ่ง (Mcneill, 1969) ที่มีการใช้อัตราส่วนรีฟลักซ์สูงมาก (*L/D*) เป็น 70 : 1 การควบคุมองค์ประกอบด้วย *DV* จะสามารถควบคุมได้แน่นอนมากขึ้น โดยการปรับดิสทิเลตแบบแมนวล

- เมื่อการไหลรีฟลักซ์เล็กกว่าการไหลของดิสทิเลต ($L << D$ หรืออัตรารีฟลักซ์ต่ำ) วิธี *VL* (และวิธี *BL* ที่ไม่เกิดผลสนองแบบผกผัน) จะเหมาะสมมากที่สุด ในขณะที่วิธี *DV* จะเหมาะสมน้อยที่สุด เนื่องจากวิธี *DV* นั้นตัวควบคุมระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์(ในที่นี้ปรับจากอัตราการไหลรีฟลักซ์) จะขยายตัวรบกวนจากการไหลของไอที่รบกวนเพียงเล็กน้อย ไปสู่การแกว่งที่มากในการไหลรีฟลักซ์ นั่นคือในคอลัมน์ที่ปฏิบัติงานที่อัตราส่วนรีฟลักซ์เป็น 1 : 4 เมื่อมีตัวรบกวนในการไหลของไอเพียง 5 % จะสามารถส่งผลรบกวน 5 % ต่อของเหลวที่ควบแน่นทั้งหมดได้ ซึ่งวิธี *DV* นั้นทุกๆ ตัวรบกวนจะสามารถส่งผ่านไปยังการไหลรีฟลักซ์ได้ แม้ว่าอัตราการไหลของดิสทิเลตจะไม่ส่งผลต่อระดับของเหลวในดรัมส่วนอัตราการไหลรีฟลักซ์เพียง 1 ใน 5 ส่วนของการไหลของเหลวทั้งหมด ตัวรบกวนจะยังส่งผลรบกวนถึง 25% ต่อการเปลี่ยนแปลงการไหลรีฟลักซ์ได้ มีกรณีตัวอย่างที่ใช้รีฟลักซ์ควบคุมระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์ และใช้อัตราส่วนรีฟลักซ์ = 0.43 (Bojnowski,

1976) ที่แสดงว่าการไหลรีฟลักซ์มีการแกว่งอย่างมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่ความร้อนเข้าคอลัมน์ และการแกว่งจะลดลงต่ำสุดเมื่อมีการใช้เทรย์เปียก

- เมื่อต้องการรักษาอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ให้คงที่ที่ส่งไปยังหน่วยถัดไป แล้วไม่สามารถรักษาอัตราการไหลไม่ให้มีปัญหาความปั่นป่วนโดยวิธีควบคุมแบบธรรมดาได้ หรือโดยการเพิ่มขีดความสามารถของการปล่อยที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ จึงใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้ามาช่วย (feed-forward control) ซึ่งปกติแล้วการไหลของสารป้อนจะเป็นส่วนขาเข้าของคอลัมน์ และใช้เพียงควบคุมการไหลเท่านั้น แต่วิธีการควบคุมแบบป้อยกลับนี้จะนำอัตราการไหลของสารป้อนมาสัมพันธ์กับการควบคุมของคอลัมน์ด้วย

ดังรูป 2.3ฌ เป็นวิธีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ล่างหอให้มีอัตราการไหลคงที่ของวิธี *VL* ในทำนองเดียวกันวิธี *BL* และถ้าเป็นการต้องการอัตราการไหลคงที่ของผลิตภัณฑ์ยอดหอจะเป็นวิธี *LV* , *DV* โดยที่จะใช้การควบคุมแบบสัดส่วน (ratio control) กับสตรีมที่ปล่อยอิสระ ดังเช่นอัตราส่วนรีฟลักซ์ต่อสารป้อน (*L/F*) ในรูป 2.3ฌ เพื่อลดผลกระทบจากความแปรปรวนของสารป้อนต่อคอลัมน์ ซึ่ง Buckley (1985) ได้เสนอวิธีควบคุมแบบอัตราส่วนหลายๆ วิธีสำหรับความต้องการอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์คงที่

วิธีต้องการอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์คงที่นี้มีความซับซ้อน และเสียค่าใช้สูงกว่าวิธีทั่วไป จึงควรจะหลีกเลี่ยงถ้าเป็นไปได้ ความแปรปรวนของสารป้อนส่งผลกระทบต่อตัวแปรควบคุมอื่น ๆ และนำไปสู่ความไม่เสถียรของคอลัมน์ แต่อย่างไรก็ดีถ้าความต้องการอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่คงที่ไปยังหน่วยถัดไปเป็นข้อพิจารณาที่สำคัญ และไม่สามารถหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายต่างๆ ได้ วิธีดังกล่าวก็จำเป็นนำมาใช้ ส่วนการลดการรบกวนในหน่วยอัพสตรีม ควรใช้

การปล่อยที่สารป้อน อีกทั้งต้องลดปัญหาความปั่นป่วนของการไหลของสารป้อนให้เหมาะสมกับความต้องการในหน่วยดาวน์สตรีม ซึ่งวิธีการปล่อยที่สารป้อนนี้มีปัญหาเรื่องการสูญเสียความร้อนน้อยกว่าวิธีการปล่อยที่กระแสล่างหอ เนื่องจากที่กระแสสารป้อนมีอุณหภูมิเย็นกว่าที่อาจจะเหมาะสมกว่าวิธีการปล่อยที่กระแสส่วนล่างหอด้วย

จากข้ออธิบายดังกล่าวข้างต้นอาจจะนำไปสู่การตัดสินใจเลือกในการใช้งานแต่ละประเภทได้ แต่ถ้าจะให้ดีควรใช้การวิเคราะห์เปรียบเทียบความว่องไว โดยทางไดนามิคซิมูเลชัน เพื่อการตัดสินใจสุดท้าย

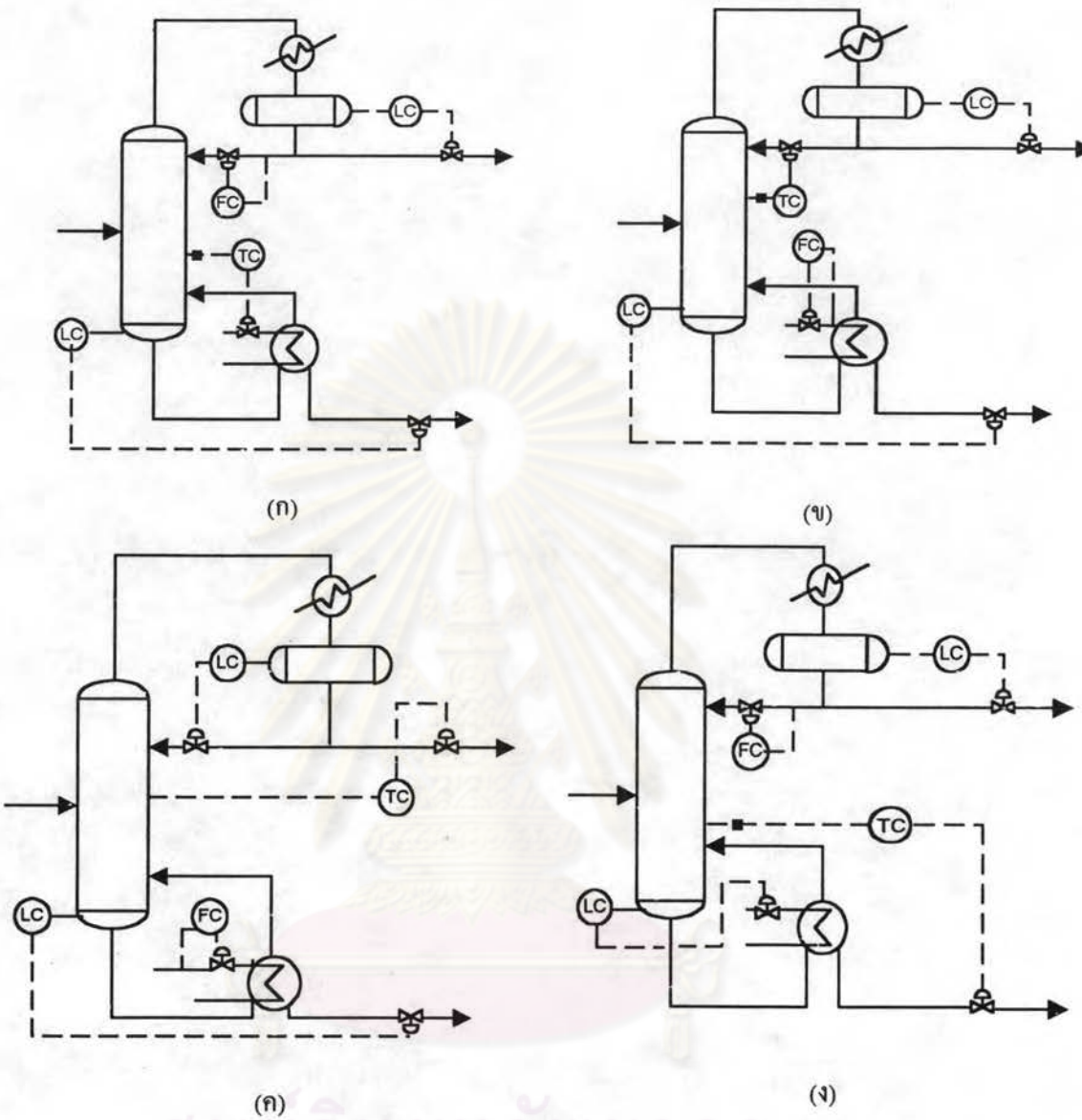
จาก 8 วิธีดังกล่าวข้างต้น (มี 6 วิธีแบบทั่วไป และมี 2 วิธีแบบไม่ทั่วไป) มี 2 ลูพคุมระดับ , มี 1 ลูพควบคุมการไหล , และมี 1 ลูพควบคุมองค์ประกอบ สำหรับลูพควบคุมองค์ประกอบอาจจะใช้ตัววิเคราะห์องค์ประกอบ (analyzer) หรือตัวเลือกอื่นที่เป็นอุณหภูมิที่ใช้เทียบกับองค์ประกอบได้ ลูพควบคุมทั้ง 4 ลูพ สามารถปรับโดยใช้วิธีควบคุมแบบลูพเดี่ยว โดยไม่มีปัญหาจากการกระทบกันระหว่างลูพ องค์ประกอบที่ไม่ได้ถูกควบคุมจะต้องแน่ใจว่าจะต้องไม่ส่งผลกระทบใด ๆ ไม่เช่นนั้นจะต้องใช้วิธีการควบคุมองค์ประกอบแบบคู่ (dual composition)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการควบคุมองค์ประกอบเดี่ยวแบบวิธีธรรมดา

วิธีการควบคุม	VL (รูป 2.3ก)	LV (รูป 2.3ข)	DV (รูป 2.3ค)	BL (รูป 2.3ง)
ประเภทการควบคุม	สมดุลมวลสารโดยอ้อม	สมดุลมวลสารโดยอ้อม	สมดุลมวลสารโดยตรง	สมดุลมวลสารโดยตรง
สตรีมที่ใช้ควบคุมองค์ประกอบ	อัตราการเดือด	อัตราการไหลของรีฟลักซ์	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ล่างหอ
ชนิดของผลิตภัณฑ์ยอดหอ ที่สามารถใช้วิธีควบคุมนั้น	ของเหลว หรือไอ	ของเหลว หรือไอ	ของเหลวเท่านั้น	ของเหลว หรือไอ
ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ	ล่างหอ	ยอดหอ	ยอดหอ	ล่างหอ
อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่เล็ก	ล่างหอ	ยอดหอ	ยอดหอ	ล่างหอ
เทรย์ที่เหมาะกับการควบคุมอุณหภูมิ	ล่างหอ	ยอดหอ	ยอดหอ	ล่างหอ
ความเร็วในการตอบสนองในคอลัมน์ขนาดใหญ่	เร็ว	ช้า	ช้า	ค่อนข้างช้า
ความเหมาะสมในการใช้งานกับคอลัมน์ไล่สาร	ดีมาก	ไม่เหมาะสม	ไม่เหมาะสม	ดี
การตอบสนองต่อการรบกวนในระบบสารทำความเย็น	ไม่เหมาะสม	พอใช้	ดีมาก	ไม่เหมาะสม
การตอบสนองต่อการรบกวนในระบบสารให้ความร้อน	พอใช้	ไม่เหมาะสม	ไม่เหมาะสม	ดีมาก
การตอบสนองต่อการรบกวนต่างๆในคอลัมน์ขนาดเล็ก	--	ด้อยกว่า	เด่นกว่า	--
สมรรถนะการควบคุมต่อการเกิดการตอบสนองแบบผกผัน	กระทบ แต่ยังคงเสถียร	ไม่กระทบ	ไม่กระทบ	ไม่เสถียร
ความปั่นป่วนในอัตราการไหลของกระแสล่างหอ เมื่ออัตราการไหลของกระแสล่างหอและปริมาตรการปล่อยมีขนาดเล็ก	ไม่ราบเรียบ	ไม่ราบเรียบ	ไม่ราบเรียบ	ราบเรียบ
ผลกระทบเมื่ออัตราการไหลของดิสทิลเลตต่ำ หรืออัตราส่วนรีฟลักซ์สูง	ส่งผลต่อระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์ ทำให้เสียสมดุลมวลสาร	ส่งผลต่อระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์ ทำให้เสียสมดุลมวลสาร	ต้องใช้การควบคุมแบบหลวม	ส่งผลต่อระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์ ทำให้เสียสมดุลมวลสาร
ความเหมะสมเมื่อมีการใช้งานที่อัตราส่วนรีฟลักซ์ต่ำ	ดีมาก	ดี	ไม่ดี เนื่องจากปัญหาความปั่นป่วนที่รีฟลักซ์	ดีมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 แสดงวิธีการควบคุมองค์ประกอบแบบเดี่ยว

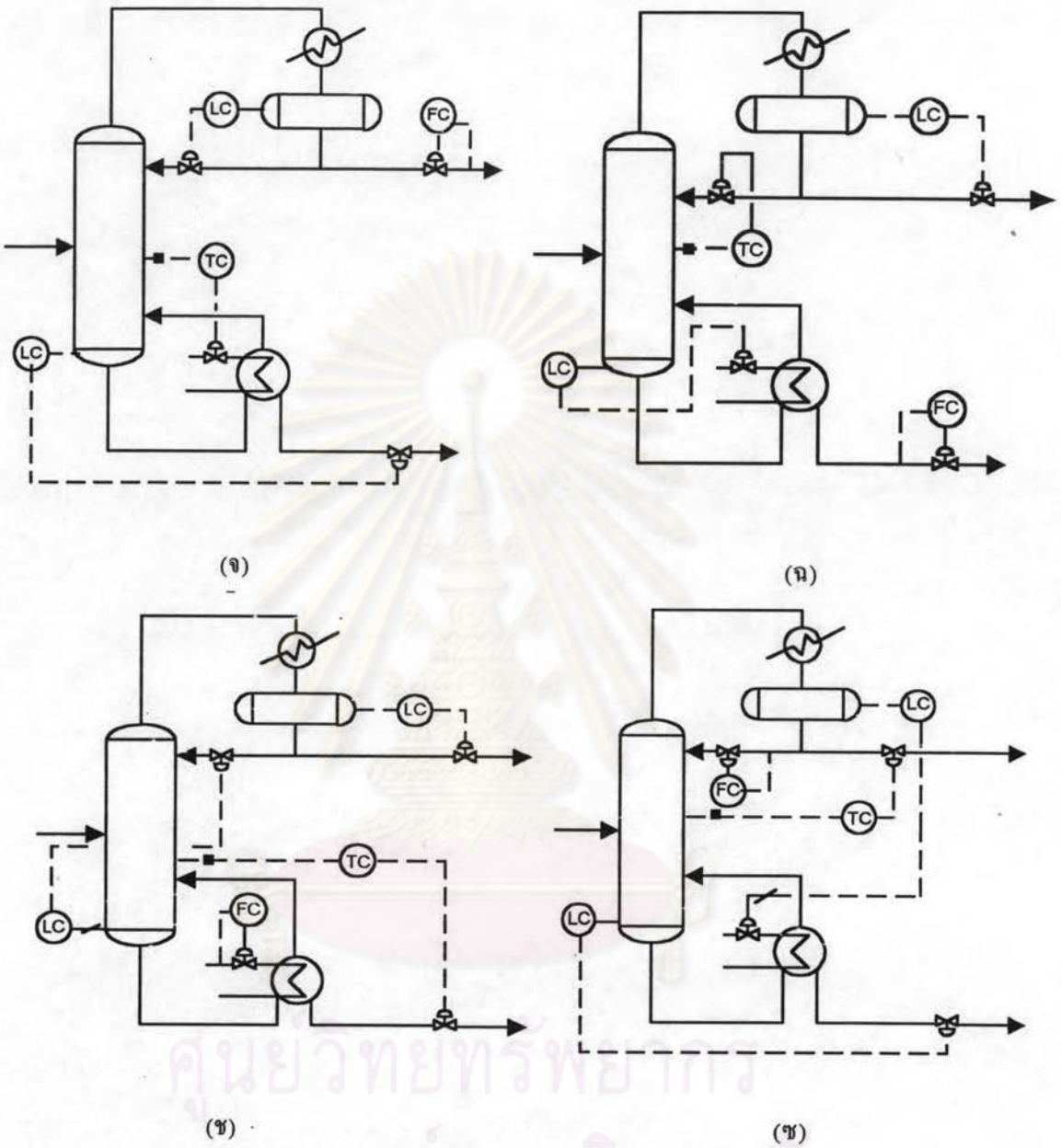
(ก) วิธี *VL* , ประเภทสมดุลมวลสารโดยอ้อม

(ข) วิธี *LV* , ประเภทสมดุลมวลสารโดยอ้อม

(ค) วิธี *DV* , ประเภทสมดุลมวลสารโดยตรง

(ง) วิธี *BL* , ประเภทสมดุลมวลสารโดยตรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 (ต่อ) แสดงวิธีการควบคุมองค์ประกอบแบบเดี่ยว

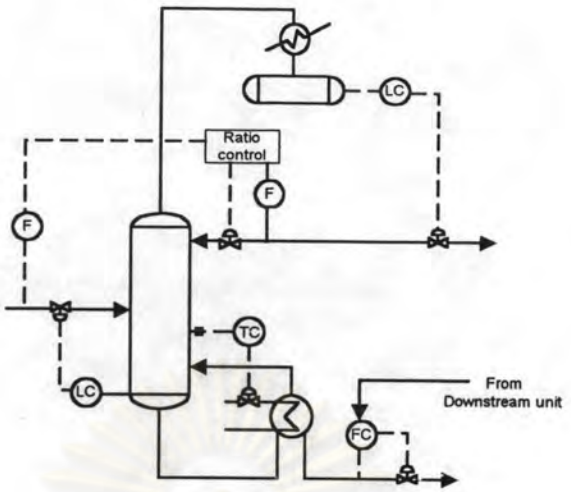
(จ) วิธี *VD* , ประเภทสมดุลพลังงาน

(ฉ) วิธี *LB* , ประเภทสมดุลพลังงาน

(ช) วิธี *BV* , ประเภทไม่ทั่วไป

(ซ) วิธี *DL* , ประเภทไม่ทั่วไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ฌ)

รูปที่ 2.3 (ต่อ) แสดงวิธีการควบคุมองค์ประกอบแบบเดี่ยว

(ฌ) วิธี VL , เมื่อต้องการอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ล่างหอคงที่

2.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการเลือกชนิดการควบคุมองค์ประกอบแบบคู่ (Two-point control)

กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับหอกลั่นในที่นี้ได้แบ่งเป็น 2 กรณีที่ผู้ใช้ไม่ทราบค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ และกรณีที่ผู้ใช้ทราบค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ

2.3.1 กรณีที่ผู้ใช้ไม่ทราบค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ

สำหรับการควบคุมองค์ประกอบแบบคู่จะพิจารณาถึงการมีผลกระทบต่อกันระหว่างลูพควบคุมทั้งด้านบนและด้านล่าง และพิจารณาถึงผลกระทบจากสิ่งรบกวนภายนอกที่มีต่อระบบควบคุม ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงปัญหาของการควบคุมหอกลั่น เนื่องมาจากเหตุผลหลายๆ อย่าง เช่นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง และมีหลายตัวแปร ลักษณะเฉพาะของแต่ละหอกลั่นในการประยุกต์ใช้งานแต่ละแบบ และจุดประสงค์ของแต่ละหอกลั่น เป็นต้น ดังนั้นระบบควบคุมหนึ่งๆ อาจเหมาะสมกับเพียงหอกลั่นเดียว แต่ไม่เหมาะสมกับหอกลั่นอื่น ปัญหาเหล่านี้จะได้ทำการแก้ไขดังในหัวข้อที่จะกล่าวต่อไป

ก. แบบจำลองของกระบวนการ

ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ และอัตราการไหลของสตรีมที่เข้าและออกจากหอกลั่นสามารถแสดงได้จากสมดุลมวลสารภายใน และสมดุลมวลสารภายนอกของแต่ละองค์ประกอบโดยอาศัยความสัมพันธ์สมดุลไอ-ของเหลว เพื่อให้ได้มาซึ่งแบบจำลองของกระบวนการ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความซับซ้อน มีหลายตัวแปร และมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น และอาจจะมีตัวแปรบางตัวที่ไม่ทราบค่า ทำให้เป็นการยากที่จะได้แบบจำลองในรูปแบบที่ง่ายต่อการควบคุม

การสร้างแบบจำลองเริ่มจากสมดุลมวลสารทั้งหมด (Overall Material Balance)

$$F = D + B \tag{2.1}$$

เมื่อ F = อัตราการไหลของสารป้อน (โมลต่อชั่วโมง)

D = อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ในส่วนบนของหอกลั่น (โมลต่อชั่วโมง)

B = อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ในส่วนล่างของหอกลั่น (โมลต่อชั่วโมง)

เช่นเดียวกัน สามารถเขียนสมดุลมวลสารของแต่ละองค์ประกอบ i (Component Balance) ได้ดังนี้

$$Fz_i = Dy_i + Bx_i \tag{2.2}$$

เมื่อ z_i, y_i, x_i เป็นเศษส่วนโมลขององค์ประกอบ i ในสายป้อน, สายผลิตภัณฑ์ส่วนบน, สายผลิตภัณฑ์ส่วนล่าง ตามลำดับ จากสมการดังกล่าวนำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์และอัตราส่วนอัตราการไหลได้ดังนี้

โดยแทนค่า $B = F - D$ ในสมการ (2.2)

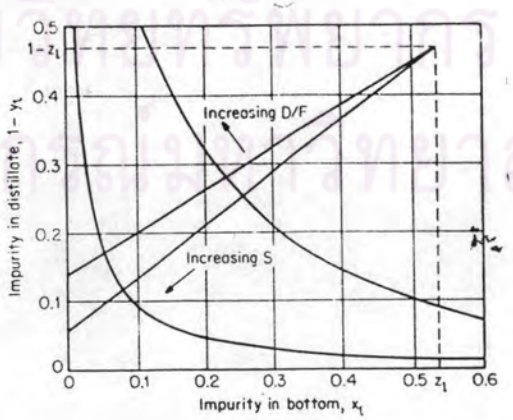
$$Fz_i = Dy_i + (F - D)x_i$$

จะได้

$$\frac{D}{F} = \frac{z_i - x_i}{y_i - x_i} \tag{2.3}$$

$$\frac{B}{F} = \frac{y_i - z_i}{y_i - x_i}$$

อธิบายสมการคร่าวๆ ได้โดยยกตัวอย่างในกรณีที่เป็นระบบการแยกของผสมสององค์ประกอบ (binary system) ซึ่งสารป้อนจะประกอบด้วยสารเพียง 2 ตัวเท่านั้น (สำหรับสารป้อนที่มีสารมากกว่า 2 ตัวขึ้นไป ได้อธิบายไว้ตอนหลัง) สมการ (2.3) จะแสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่าง y กับ x เมื่อ i แทนเศษส่วนโมลของสารองค์ประกอบเบา(light key) ที่แสดงถึงสารที่อยู่ด้านบนของหอกลั่น หรืออีกนัยหนึ่งก็เป็นสารปนเปื้อนในสารที่อยู่ล่างหอ ดังรูปที่ 2.4 ส่วน $1 - y_i$ แทนสารองค์ประกอบหนัก (heavy key) หรือสารปนเปื้อนในสารที่อยู่ยอดหอ ในขณะที่จุดเริ่มต้น 0 (origin) แสดงถึงว่าไม่มีสิ่งเจือปนในผลิตภัณฑ์ทั้งสองเลย



รูป 2.4 แสดงจุดปฏิบัติการ เมื่อเส้นแสดงสมดุลมวลสารตัดกับเส้นโค้งการแยก

สมการสมดุลมวลสารที่แสดงในสมการ (2.3) นั้นเป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรงที่มีความชันที่ขึ้นกับองค์ประกอบของสารป้อน (z_i) ค่าหนึ่งๆ ดังนั้นความชันที่ได้จึงเป็นอัตราส่วนของอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์

$$\left.\frac{\partial y_i}{\partial x_i}\right|_{D/F} = -\frac{y_i - z_i}{z_i - x_i} = -\frac{B}{D} \tag{2.4}$$

จะเห็นได้ว่าสมการสมดุลมวลสารที่ได้นั้นไม่เป็นสมการที่เป็นอิสระต่อกัน (unindependent) ซึ่งจะต้องมีตัวแปรที่ไม่รู้ค่า 2 ตัว ใน 1 สมการ เช่น ไม่ทราบค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ จึงต้องมีสมการเพิ่มเติมเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยอาศัยสมการจากสมดุลไอ-ของเหลว ขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ (สมการของ Fenske, 1932)

$$\frac{y_i / y_j}{x_i / x_j} = \alpha_{ij}^{nE} \tag{2.5}$$

เมื่อ i,j เป็นองค์ประกอบ 2 ตัวใดๆ ที่ต้องการแยก

$_{ij}$ เป็นค่าการระเหยสัมพันธ์ของทุกองค์ประกอบ

n เป็นจำนวนเทรย์

E เป็นประสิทธิภาพของเทรย์

สมการของ Fenske (1932) ได้ถูกนำมาอธิบายถึงการหาจำนวนเทรย์ที่น้อยที่สุดสำหรับการแยกแบบรีฟลักซ์ทั้งหมด (total reflux) และสำหรับในแง่ของการควบคุมจะอธิบายครอบคลุมถึงกรณีที่ใช้กับทุกสภาวะ จึงได้ใช้ค่า S แทนแฟกเตอร์การแยก ที่เป็นฟังก์ชันกับ α, n, E และพลังงานที่ใส่เข้าไปในคอลัมน์ (heat input)

$$\frac{y_i / y_j}{x_i / x_j} = S \tag{2.6}$$

ในกรณีที่เป็นระบบแยกของผสมสององค์ประกอบนั่น เศษส่วนโมลสารองค์ประกอบหนักรวมกับเศษส่วนโมลสารองค์ประกอบเบา มีค่าเท่ากับ 1 หรือ $y_j = 1 - y_i$ และ $x_j = 1 - x_i$ จะได้

$$S = \frac{y_i(1-x_i)}{x_i(1-y_i)} \tag{2.7}$$

สามารถคำนวณหาค่า y_i ในเทอมของ x_i ได้ดังนี้

$$y_i = \frac{Sx_i}{1+x_i(S-1)} \tag{2.8}$$

ซึ่งค่า S และ y_i หาได้เมื่อทราบค่า x_i จากกราฟที่มีลักษณะเป็นไฮเพอร์โบลา ที่มีแอสซิมโธดเป็นแกนตั้งและแกนนอน ซึ่งจากกราฟจะพบว่า ถ้าเพิ่มค่า S เส้นโค้ง จะยิ่งเข้าไปใกล้กับจุดเริ่มต้น นั่นคือเป็นการลดค่าความไม่บริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ทั้งสอง และที่จุดของเส้นโค้งของการแยกคงที่ (S) ตัดกับเส้นโค้งสมดุลมวลสารคงที่ (D/F) จุดนั้นจะเป็นจุดปฏิบัติการ (operating point) ที่เหมาะสมในการแยก

สำหรับการแยกของเพิ่มในระบบที่มีหลายองค์ประกอบ (multicomponent) จะเป็นการแยกระหว่างส่วนองค์ประกอบเบา (light key) และส่วนองค์ประกอบหนัก (heavy key) ดังนั้นสามารถเขียนแฟกเตอร์การแยกได้ดังนี้

$$S = \frac{y_l / y_h}{x_l / x_h} \tag{2.9}$$

ทั้งนี้โดยมีสมมติฐานว่าองค์ประกอบที่เบากว่า (lighter than light key or light nonkey or ll)ออกไปพร้อมกับส่วนผลิตภัณฑ์ยอดหอ (หรือค่า $y_{hh} = 0$) และส่วนองค์ประกอบที่หนักกว่า (heavier than heavy key or heavy nonkey or hh) ออกไปพร้อมกับส่วนผลิตภัณฑ์ล่างหอ (หรือค่า $x_{ll} = 0$)

แทนสมการ (2.3) ในสมการ (2.9) จะสามารถหาค่า y_h ในรูปของสมการ พีชคณิตกำลังสอง (quadratic) ดังนี้

$$y_h = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \qquad (2.10)$$

เมื่อ $a = \frac{D}{F}(S-1)$

$$b = Sz_l - (S-1)(\frac{D}{F} - z_{ll}) + z_h$$

$$c = -z_h(1 - \frac{z_{ll}}{D/F})$$

จากสมการ (2.10) จะสามารถหาค่า y_h ได้ ดังนั้นเราจึงสามารถหาค่าของ x_h ได้โดยการแทนค่า D/F และค่า z_h และจัดสมการ (2.11) ใหม่

$$x_h = \frac{z_h - y_h\, D/F}{1 - D/F} \qquad (2.11)$$

และในทำนองเดียวกัน ค่า y_{ll} ก็สามารถหาค่าได้ภายใต้สมมติฐานที่ว่า $x_{ll} = 0$

$$y_{ll} = \frac{z_{ll}}{D/F} \qquad (2.12)$$

สำหรับค่า y_l สามารถหาได้จากสมดุลที่ดิสทิลเลต เมื่อผลรวมของเศษส่วนโมลของสารองค์ประกอบเบา และสารองค์ประกอบเบากว่า และสารองค์ประกอบหนัก มีค่าเป็น 1

$$y_l = 1 - y_h - y_{ll} \qquad (2.13)$$

ดังนั้นเมื่อทราบค่า y_h, x_h และ y_l จะสามารถหาค่า x_l ได้โดย

$$x_l = \frac{x_h y_l}{S y_h} \qquad (2.14)$$

นั่นคือค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดสามารถหาได้เมื่อทราบค่า D/F และค่า S หนึ่งๆ

และมีค่าเป็น 1 เมื่อสารป้อนเป็นไออิ่มตัว (saturated vapor) ซึ่งในกรณีที่ $q_F = 0$ นั้น จะได้ความสัมพันธ์เป็นไปดังสมการ (2.15)

แต่ในกรณีที่ $q_F \neq 0$ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (2.16)

$$S = \left[\bar{\alpha} \sqrt{1 - \frac{1 - q_F + L/D}{\left(1 + L/D\right)\left(1 - q_F + Z\, L/D\right)}} \right]^{nE} \tag{2.16}$$

สำหรับค่าการระเหยสัมพัทธ์เฉลี่ยหาได้จาก

$$\bar{\alpha} = \left[\frac{\alpha_N + \alpha_1}{2} + \sqrt{\alpha_N \times \alpha_1} \right] / 2 \tag{2.17}$$

เมื่อ α_N = ค่าการระเหยสัมพัทธ์ของสารที่ออกในเทรย์บนสุด

α_1 = ค่าการระเหยสัมพัทธ์ของสารที่ออกในเทรย์ล่างสุด

ในกรณีที่ทราบค่าผลิตภัณฑ์ และ $q_F = 0$ จะสามารถหาค่าอัตราส่วนรีฟลักซ์ได้

$$\frac{D}{L} = z \left[\left(\frac{\bar{\alpha}}{S^{1/nE}} \right)^2 - 1 \right] \tag{2.18}$$

ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นที่รีบอยเลอร์ จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการไหลของไอ (V)

$$V = \frac{Q_i}{H_D} \qquad \text{xxx} \qquad \text{xx} \tag{2.19}$$

เมื่อ H_D เป็นความร้อนในการระเหยของดิสทิลเลต ส่วนของไอที่ควบแน่น (ไม่ว่าจะเป็นแบบทั้งหมด หรือแบบบางส่วน) จะมีการแยกส่วนที่ควบแน่นออกเป็นรีฟลักซ์ และส่วนดิสทิลเลต ดังนั้นจะได้สมดุลมวลสารด้านยอดหอเป็น

y_l = 1-0.00728-0.00106 = 0.9917

$$x_l = \frac{0.959(0.9917)}{23{,}579(0.00728)} = 0.00554$$

x_{hh} = 1-0.00554-0.959 = 0.03546

สรุปองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป ดังนี้

	ผลิตภัณฑ์ยอดหอ y, %	ผลิตภัณฑ์ก้นหอ x, %
มีเธน (ll)	0.10	-
เอธิลีน (l)	99.71	0.55
อีเธน (h)	0.73	95.90
สารองค์ประกอบหนัก (hh)	-	3.55

ต่อมา Douglas และคณะได้ขยายสมการ Fenske (1979) ที่แสดงความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์การแยก (S) กับตัวแปรอัตราส่วนรีฟลักซ์ (L/D) ไว้ดังนี้

$$S = \left(\frac{\overline{\alpha}}{\sqrt{1 + D/Lz}} \right)^{nE} \qquad (2.15)$$

เมื่อ $\overline{\alpha}$ = ค่าการระเหยสัมพัทธ์เฉลี่ย

L = รีฟลักซ์

$z = z_l + z_{ll}$

จากสมการ (2.15) นั้นความสัมพันธ์ของ S กับ L/D นั้นขึ้นอยู่กับค่า q_F หรือเปอร์เซนต์ไอที่อยู่ในสารป้อน โดยที่ค่า q_F จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อสารป้อนเป็นของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid)

I17288548

ตัวอย่าง 2.1 ในคอลัมน์หนึ่งที่ใช้แยกเอธิลีนหนึ่งมีองค์ประกอบของสารป้อน และผลิตภัณฑ์ ดังนี้

	สารป้อน z, %	ดิสทิเลต y, %	ผลิตภัณฑ์ล่างหอ x, %
มีเธน (*ll*)	0.05	0.1	-
เอธิลีน (*l*)	47.0	99.7	2.0
อีเธน (*h*)	51.1	0.2	94.6
สารองค์ประกอบหนัก (*hh*)	1.8	-	3.4

ให้คำนวณค่า D/F และ S เมื่อมีการเพิ่มค่า D/F อีก 0.01 และคำนวณผลขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนไป โดยใช้สมการ (2.10) ถึง (2.14)

$$\frac{D}{F} = \frac{0.47-0.02}{0.997-0.02} = 0.461 \qquad S = \frac{0.997/\ 0.002}{0.02/\ 0.946} = 23,579$$

ค่า D/F ใหม่ มีค่าเพิ่มอีก 0.01 เป็น 0.471 :

$$a = 0.471(23,578) = 11,105$$

$$b = 23,579(0.47) - (23,578)(0.471-0.0005) + 0.511$$

$$= -10.81$$

$$c = -0.511\left(1-\frac{0.0005}{0.471}\right) = -0.510$$

$$y_h = \frac{10.81+\sqrt{(10.81)^2+4(11,105)0.510}}{2(11,105)} = 0.00728$$

$$x_h = \frac{0.511-0.00728(0.471)}{1-0.471} = 0.9590$$

$$y_u = \frac{0.0005}{0.471} = 0.00106$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$V = L + D \tag{2.20}$$

สมการได้ครอบคลุมถึงดิสทิลเลตที่อาจจะอยู่ในเฟสไอ ดังนั้นจากสมการ (2.20) จะสามารถหาค่าอัตราส่วนการไหลในรูปของอัตราส่วนรีฟลักซ์ได้

$$\frac{D}{V} = \frac{1}{1 + L/D} \tag{2.20a}$$

$$\frac{L}{V} = \frac{L/D}{1 + L/D} \tag{2.20b}$$

ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า แฟกเตอร์การแยกจะคงที่ก็ต่อเมื่ออัตราส่วนข้างต้นนี้คงที่ หรืออีกนัยหนึ่งคือเส้นโค้งคงที่ S จะมีลักษณะเดียวกันกับเส้นโค้งคงที่ L/D, D/V หรือ L/V

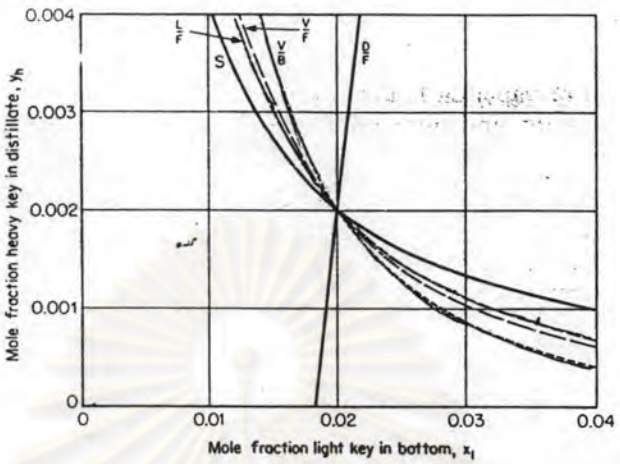
ถ้าอัตราส่วนรีฟลักซ์ต่อสารป้อน (L/F) มีค่าคงที่ และอัตราส่วนดิสทิลเลตต่อสารป้อน (D/F) เพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นขององค์ประกอบจะเคลื่อนจากจุดปฏิบัติการในทิศตามเข็มนาฬิกา และแยกจากเส้นโค้งการแแยก (S) ไปในแนวตั้งมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการที่อัตราส่วนรีฟลักซ์ลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกลดลงด้วย ในทางกลับกันถ้าลด D/F โดยที่ L/F คงที่จะทำให้การแยกดีขึ้น เส้นโค้งในรูป 2.5 แสดงถึงเมื่ออัตราส่วน L/F คงที่ จะมีความชันของเส้นโค้งชันกว่าเส้นโค้งเมื่อ S คงที่

ถ้าอัตราส่วนความร้อนเข้าต่อสารป้อนมีค่าคงที่ การเพิ่ม D จะทำให้ L ลดลงเมื่อ V คงที่ และทำให้อัตราส่วน L/D ยิ่งลดลงมากขึ้น จากผลดังกล่าวนั้นเส้นโค้งเมื่อ V/F คงที่จะแยกออกจากเส้นโค้งเมื่อ S คงที่มากขึ้น ทำให้เส้นโค้งเมื่อ V/F คงที่อยู่ในแนวตั้งกว่า (ชันกว่า) เส้นโค้งเมื่อ L/F คงที่ และจะยิ่งชันมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนการเดือด (V/B) มีค่าคงที่

สำหรับเส้นทางของเส้นโค้ง *V/B* นั้นมีความสำคัญที่แสดงถึงความสามารถในการควบคุมองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ล่างหอได้ดีที่สุด ถ้า *V/B* คงที่แล้วองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงกว้างขึ้น โดยการปรับ *L* หรือ *D* โดยที่ไม่กระทบต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ล่างหอ

เส้นโค้งในรูป 2.5 เริ่มพล็อตจากจุดปฏิบัติการที่ได้จากตัวอย่างที่ 2.1 เมื่อแต่ละพารามิเตอร์คงที่, อัตราส่วน *D/F* จะเพิ่มตามการเปลี่ยนแปลงของ *L/D* ซึ่งจะนำไปคำนวณการแยกที่เปลี่ยนแปลงไป ดังวิธีการที่อธิบายในตัวอย่างที่ 2.1 นั้นเป็นการหาค่า y_h และ x_l เมื่อคอลัมน์มีจำนวนเทรย์เท่ากับ 100 เทรย์ (แบบ actual) และมีค่าการระเหยสัมพัทธ์ ($\overline{\alpha}$) เท่ากับ 1.4 อัตราส่วนรีฟลักซ์ *L/D* ที่จุดปฏิบัติการมีค่า 4.0 และให้ประสิทธิภาพในการแยกของเทรย์เท่ากับ 81.6 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาเส้นโค้งปฏิบัติการอื่นๆ (นอกเหนือจากรูป 2.5) แล้วพบว่าเส้นโค้งเมื่อ *L/B* คงที่จะตกอยู่ระหว่างเส้นโค้งเมื่อ *V/F* คงที่ และ *V/B* คงที่ นั่นแสดงว่าเส้นโค้งเมื่อรีฟลักซ์คงที่และการเดือด คงที่จะมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นกรณีที่มักพบได้บ่อยๆ แม้ว่าการที่อัตราส่วนรีฟลักซ์ และอัตราส่วนการเดือดมีค่าคงที่จะมีความแตกต่างกัน ถือได้ว่าเป็นกรณีที่พบเสมอ ๆ ในทุกๆเส้นโค้งปฏิบัติการ



รูป 2.5 แสดงเส้นโค้งปฏิบัติการสำหรับคอลัมน์ที่อธิบายในตัวอย่างที่ 2.1

ข. การวิเคราะห์ค่าเกนสัมพันธ์ (Relative Gain Analysis)

ในระบบการกลั่นที่มีค่า RGA แบบ 5*5 (5 ตัวแปรปรับ และ 5 ตัวแปรควบคุม) นั้นเป็นแก้ปัญหาที่ยาก ซึ่งในระบบคงตัวนั้นถ้าทุกลูพเป็นลูพเปิดทั้งหมด การเปลี่ยนอัตราการไหลตัวใดตัวหนึ่งก็จะทำให้ระบบออกจากการเป็นระบบคงตัว และยังเป็นการทำให้ระดับของเหลวในถังรองรับรีฟลักซ์ และในรีบอยเลอร์มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงจนเกินขีดจำกัดได้

อย่างไรก็ตาม ตัวแปรควบคุมทั้ง 5 ตัวนั้นไม่ได้มีความเร็วและความสำคัญเท่ากัน โดยปกติแล้วตัวแปรควบคุมที่สำคัญเป็นการควบคุมความเข้มข้น แต่ลูพการควบคุมนี้จะมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลช้ากว่าลูพการควบคุมระดับของเหลว แม้ว่าลูพควบคุมความเข้มข้นจะส่งผลกระทบต่อลูพอื่นๆ ได้ แต่เนื่องจากผลการตอบสนองที่ช้าจึงถือว่าส่งผลกระทบต่อลูพระดับของเหลวและความดันน้อยมาก เราจึงมักให้ระดับของเหลวและความดันนั้นถูกควบคุมอยู่แล้ว ดังนั้นจึงเป็นการลด RGA จาก 5*5 มาเป็น 2*2 อะเรย์ เป็นคู่ตัวแปรปรับเลือกในการควบคุมความเข้มข้นทั้งสอง จาก 24 คู่ควบคุมที่เป็นไปได้ เมื่อพิจารณาวิธีการควบ

คุมแบบอัตราส่วนด้วย จะได้การควบคุมทั้งหมดเพิ่มเป็น 30 วิธี (โดยตัดคู่ควบคุม *D_B* เนื่องจากไม่สามารถให้สมดุลมวลสารที่ถูกต้องได้) จะเหลือเป็นคู่ควบคุมดังตารางที่ 2.3 โดยที่ S อาจจะเป็น *D/V* (หรือ *D/L+D*) หรือ *L/V* หรือ *L/D*

ตารางที่ 2.3 แสดงวิธีการควบคุมองค์ประกอบแบบคู่ที่เป็นไปได้

ตัวแปรปรับลูพ / ยอดหอ ลูพล่างหอ	D	L	L/B	S	V	V/B
B	X	✓	✓	✓	✓	✓
L	✓	X	✓	✓	✓	✓
L/B	✓	✓	X	✓	✓	✓
S	✓	✓	✓	X	✓	✓
V	✓	✓	✓	✓	X	✓
V/B	✓	✓	✓	✓	✓	X

สมมติให้ระดับของเหลวทั้งสองอยู่ในระดับคงที่ โดยที่การเปลี่ยนแปลงใดๆของอัตราการไหลที่ถังรองรับรีฟลักซ์ และที่ก้นหอจะเป็นตัวควบคุมระดับนั้น ดังนั้นตัวเลือกตัวแปรปรับในการควบคุมความเข้มข้นองค์ประกอบจึงถูกกำหนดเป็นส่วนหนึ่งของการควบคุมระดับของเหลวข้อจำกัดของการเลือกนั้นจะถูกกำหนดตามเส้นโค้งปฏิบัติการ(unique operating curve) ได้แก่ *L/F*, *V/F*, *V/B*, *D/F*, *L/D* และ *L/B* (จากเหตุผลที่ได้อธิบายข้างต้นแล้วว่า เส้นโค้ง *L/V* และ *D/V* เป็นเส้นโค้งที่มีลักษณะเดียวกับเส้นโค้ง *L/D* และในทำนองเดียวกันเส้นโค้ง

B/F และ D/B เป็นเส้นโค้งที่มีลักษณะเดียวกับเส้นโค้ง D/F) ส่วนความร้อนที่ออกจากเครื่องควบแน่นนั้นไม่ได้นำมาพิจารณาในการควบคุมความเข้มข้นองค์ประกอบ เนื่องจากว่าเป็นส่วนที่วัดได้ยาก, มีการรบกวนได้ง่าย และส่วนใหญ่นิยมใช้ในการควบคุมความดัน

วิธีที่เลือกใช้ในการหาค่าเกนสัมพันธ์ หรือค่าแลมดา (λ) สำหรับหอกลั่นคือ วิธีหาความชันของเส้นโค้งปฏิบัติการ ซึ่งได้อธิบายไว้ตามสมการ (2.21) ของการแยกสาร 2 ชนิด อ้างถึงสมการดังกล่าวสำหรับลูพควบคุมองค์ประกอบ ค่าเกนสัมพันธ์ของการควบคุมองค์ประกอบยอดหอด้วยตัวแปรปรับ m_1 มีค่าเป็น

$$\lambda_{y1}(\Lambda_{12}) = \frac{1}{1-[(\partial y/\partial x)]_1/[(\partial y/\partial x)]_2} \qquad (2.21)$$

เมื่อค่า Λ_{12} แสดงสับเซทที่มีขนาด 2*2 และ '1'แทนตัวแปรปรับตัวที่ 1 '2'แทนตัวแปรปรับตัวที่ 2 ที่ใช้ในการควบคุมความเข้มข้น และเนื่องจากคุณสมบัติของ 2*2 RGA จะได้ $\lambda_{x2} = \lambda y1, \lambda_{y2} = 1 - \lambda_{y1}$ นั่นคือ λ_{y1} จึงสามารถแทนได้ด้วย Λ_{12}

ตัวอย่างการหาค่าแลมดาของวิธีควบคุมแบบต่างๆ

$$\lambda_{D-V} = \frac{1}{1-\dfrac{slope\ at\ const.D/F}{slope\ at\ const.V/F}}$$; ความชันเส้นโค้งได้จากตารางที่ 2.3

หรือ $$\lambda_{S-V/B} = \frac{1}{1-\dfrac{\left(L/D\right)_{slope}}{\left(V/B\right)_{slope}}}$$

ความชันที่ใช้ในสมการ (2.21) นั้นสามารถหาได้โดยการเพิ่มค่า D/F ทีละน้อยในการพล็อตเส้นโค้งปฏิบัติการ การเพิ่มทีละน้อยจะทำให้ผลการตอบสนองทางบวกและลบสามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเพิ่มความถูกต้อง อย่างไรก็ดีความชันดังกล่าวอาจสามารถหาได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากวิธีเชิงวิเคราะห์ โดยการทำอนุพันธ์บางส่วน (partial differential) จากความสัมพันธ์ของโมเดล ได้เป็นสูตรตามตารางที่ 2.4 จากตารางความชันสองอันแรกหาจากความสัมพันธ์ของความเข้มข้นเพียงอย่างเดียว โดย δ (แทนถึงเมื่อ D คงที่) และ σ (แทนถึงเมื่อ S คงที่) ซึ่งจะปรากฏในทุกๆความชันถัดไป ส่วนแฟกเตอร์ที่สาม (ε) จะเป็นความสัมพันธ์ของจำนวนเทรย์, อัตราส่วนรีฟลักซ์ รวมถึงความเข้มข้น

ตารางที่ 2.4 ความชันของเส้นโค้งปฏิบัติการ

ตัวที่คงที่	สูตร(ความชันเมื่อค่าทางซ้ายมือคงที่)
$D/F,\ B/F,\ D/B$	$-\dfrac{y_i - z_i}{z_i - x_i} = -\dfrac{B}{D} = \delta$
$L/D,\ L/V,\ D/V$	$\dfrac{(1-x_{hh})y_h y_l}{(1-y_{ll})x_h x_l} = \sigma$
L/F	$\dfrac{\sigma - \delta\varepsilon}{1-\varepsilon}$
V/F	$\dfrac{\sigma - \delta\varepsilon(1+D/L)}{1-\varepsilon(1+D/L)}$
L/B	$\dfrac{\sigma - \delta\varepsilon(\delta-1)}{1-\varepsilon(\delta-1)/\delta}$
V/B	$\dfrac{\sigma - \delta\varepsilon(1+D/L)(\delta-1)}{1-\varepsilon(1+D/L)(\delta-1)/\delta}$

where $\varepsilon = \dfrac{nEy_l y_h}{2[1+(z_l+z_{ll})\,L/D](y_l - x_l)}$

L/D หาได้จากความสัมพันธ์ในสมการ (2.15) (เมื่อ $q_F = 0$) หรือสมการ (2.16) (เมื่อ $q_F \neq 0$)

วิธีการโดยสรุปก็คือหาความชันจากกราฟที่วาดในรูปที่ 2.5 และแทนค่าความชันที่ได้นั้นในสมการที่ (2.21) โดยที่เส้นสมดุลมวลสาร (D/F) มักให้ความชันในทางตรงกันข้ามกับ

เส้นอื่นๆ ดังนั้นถ้าเลือก D/F นี้ในการควบคุมความเข้มข้นตัวใดตัวหนึ่ง ผลจากเครื่องหมายลบเนื่องจากทิศของความชันจะหักล้างกับเครื่องหมายลบในสมการ (2.21) ส่งผลให้ค่าเกนสัมพันธ์ที่ได้จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเลือก L เพื่อควบคุม y และเลือก V ควบคุม x อัตราส่วนความชันเหล่านั้น (หรือ$(\partial y/\partial x)_1 / (\partial y/\partial x)_2$)จะมีค่าน้อยกว่า 1 เพียงเล็กน้อย ทำให้ค่าเกนสัมพันธ์มีค่าเป็นตัวเลขที่มาก แต่ถ้าเลือกให้เส้นโค้งทั้งสองใกล้กันมากขึ้น จะทำให้ค่าเกนสัมพันธ์ที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้น

สำหรับการอธิบายให้ชัดเจนยิ่งขึ้นในการหาค่าเกนสัมพันธ์จากเส้นโค้งในรูปที่ 2.5 และที่แสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งแต่ละค่าในตารางที่ 2.5 แทนไว้สำหรับระบบ 2*2 RGA นั่นคือเราสามารถหาค่า λ_{y1}(= λ_{x2}) เพียงเท่านั้น และในทางปฏิบัติจะใช้ตัวแปรปรับเพียง 3 ตัว (L, V, D or B) ในการควบคุมแต่ละความเข้มข้น เนื่องจาก D และ B นั้นให้เส้นโค้งปฏิบัติการเดียวกัน จึงถือได้ว่าเป็นตัวแปรปรับที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน

จากการทำนายสำหรับการรวมอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นตัวแปรปรับนั้น จะให้ค่าเกนสัมพันธ์ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ส่วนในกรณีของ L_V จะให้ค่าเกนสัมพันธ์ที่มีค่ามากที่สุด และในกรณี S_V/B จะให้ค่าเกนสัมพันธ์ที่มีค่าน้อยที่สุดในกลุ่มที่มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นในตารางที่ 2.5 จะเป็นส่วนแนะนำในการตัดโครงสร้างการควบคุมที่ไม่เหมาะสม แต่ว่าก็ยังไม่ถือเป็นการให้โครงสร้างการควบคุมที่ดีที่สุดได้เลย เพราะว่าการเลือกค่าเกนสัมพันธ์ที่ใกล้ 1 มากที่สุดระหว่าง 0.919 กับค่า 2.11 ทั้งสองค่าถือได้ว่าเป็นค่าที่ใช้ได้ จึงจำเป็นที่จะต้องมีเกณฑ์อื่นมาใช้ในการพิจารณา ซึ่งค่าเกนที่มากกว่า 1 จะให้ผลการตอบสนองชั่วขณะ ที่เร็วกว่ากรณีที่ค่าเกนน้อยกว่า 1

ตารางที่ 2.5 ค่าเกนสัมพันธ์สำหรับคอลัมน์ตามรูปที่ 2.2

ตัวแปรที่ใช้ควบคุม x	ตัวแปรบ่รับที่ใช้ควบคุม y		
	D	L	S
B	-	0.893	0.919
V	0.113	15.2	3.13
V/B	0.141	3.61	2.11

ค. การขับสิ่งรบกวน (Disturbance Rejection)

เป็นเกณฑ์ที่ใช้ช่วยในการพิจารณาการเลือกตัวแปรปรับอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งตัวแปรปรับบางตัวจะแสดงการต่อภาระการรบกวน (load disturbance) ซึ่งถือเป็นแฟกเตอร์ที่ใช้ช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบโครงสร้างเพื่อใช้ในการควบคุม ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์และค่า D/F ในสมการ (2.13) แสดงให้เห็นว่าไม่มีผลเนื่องจากอัตราการไหลของความร้อน

ยกตัวอย่าง เช่น การเปลี่ยนแปลง D/F เมื่อรักษาการควบคุมองค์ประกอบนั้น ไม่ต้องการการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของการไหลความร้อน

$$\left.\frac{\partial (D/F)}{\partial Q}\right|_{y,x} = 0$$

ข้อความที่แสดงจาก Shinskey (1985) แสดงถึงผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับแต่

ละตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวน ในที่นี้เป็นการไหลของความร้อนเข้า (Q_i), การไหลของความร้อนออก (Q_o), การไหลสารป้อน (F) และองค์ประกอบสารป้อน (Z), ความว่องไว (sensitibity) ของตัวแปรปรับคำนวณในหน่วยเดียวกันได้ ดังนี้

$$\mu = \left.\frac{\partial m / m}{\partial Q / Q}\right|_{y,x} \qquad (2.22)$$

ตารางที่ 2.6 แสดงความว่องไวของตัวแปรปรับต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระการรบกวน

ตัวแปรปรับ	ภาระการรบกวน			
	Q_i	Q_o	F	Z
D	0	0	1	$\frac{1}{1-x/z}$
B	0	0	1	$\frac{1}{1-y/z}$
L	0	-1	1	$\frac{1}{1-x/z}-1$
V	-1	0	1	$\frac{1}{1-x/z}-\frac{1}{1+D/L}$
L/D	0	-1	0	-1
$D(L+D)$	0	-1	0	$\frac{1}{1+D/L}$
V/B	-1	0	0	$\frac{1}{1-x/z}-\frac{1}{1-y/z}-\frac{1}{1+D/L}$
L/B	0	-1	0	$\frac{1}{1-x/z}-1-\frac{1}{1-y/z}$
L/V	-1	-1	0	$\frac{1}{1-D/L}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ m เป็นตัวแปรปรับที่เลือก และ q เป็นตัวแปรรบกวนที่เลือก ตารางที่ 2.6 แสดงแฟกเตอร์ความว่องไวของทุก ๆ องค์ประกอบ ในที่นี้แสดงในรูปขององค์ประกอบเบา

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ไม่ว่า D หรือ B ก็จะไม่เปลี่ยนแปลงผลการตอบสนองต่อตัวรบกวนประเภทความร้อน (heat-balance disturbance) แต่จะเปลี่ยนแปลงต่อการรบกวนประเภทของสารป้อน (feed-composition disturbance) จะมีค่าไม่เกิน 1 แต่จะใกล้เคียง ส่วนรีฟลักซ์นั้นจะว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารป้อนเพียวเล็กน้อย และจะยังน้อย ถ้า x (องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ล่างหอ) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่วนการเดือดจะมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ถ้าอัตราส่วนรีฟลักซ์ (L/D) สูง ๆ จากตารางแสดงตัวแปรปรับเดียวทุก ๆ ตัวจะมีความว่องไวเป็น 1 ต่อการเปลี่ยนแปลงการไหลของสารป้อน ซึ่งความว่องไวดังกล่าว จะถูกกำจัดไปเมื่อใช้ตัวแปรปรับแบบอัตราส่วนการไหล

เมื่อพิจารณาถึงค่าความผิดพลาดรวม (Intergrated error,IE) ของตัวควบคุมแบบป้อนกลับใด ๆ แล้ว ไม่เพียงแต่จะเป็นฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงผล และตอบสนองของเอ้าท์พุทต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวน (Δm) แต่ยังหมายรวมถึง ผลคูณของแบนด์สัดส่วน (proportional band) และเวลาอินทีกรัล (integral time, I) ด้วย ดังสมการ

$$IE = \Delta m \frac{PI}{100}$$

จากที่ค่าเกนที่สภาวะคงที่ของการกระบวนการสำหรับลูพคุมองค์ประกอบ เป็นฟังก์ชันของแต่ละรูปแบบโครงสร้างการควบคุมของลูพควบคุมอื่น ๆ ดังนั้น ค่าแบนด์สัดส่วน ของตัวควบคุมสามารถหามาได้

ตัวอย่างการควบคุม x ด้วย V และควบคุม y ด้วย L จากคำจำกัดความของค่าเกนสัมพันธ์

$$\lambda_{xV} = \lambda_{yL} = \frac{\left.\frac{\partial x}{\partial V}\right|_L}{\left.\frac{\partial x}{\partial V}\right|_y} = 15.2$$

และเมื่อพิจารณาเปลี่ยนการควบคุมยอดหอเป็นควบคุม y ด้วยอัตราส่วนรีฟลักซ์ ค่าเกนสัมพันธ์จะเปลี่ยนแปลงเป็น

$$\lambda_{xV} = \lambda_{yS} = \frac{\left.\frac{\partial x}{\partial V}\right|_S}{\left.\frac{\partial x}{\partial V}\right|_y} = 3.13$$

ถ้านำสองสมการสุดท้ายนี้มาหารกัน ตัวแปรแต่ละสมการจะตัดทิ้งไป และอัตราส่วนค่าเกนที่สภาวะคงที่ของกระบวนการ จะแสดงเป็นอัตราส่วนของค่าเกนสัมพันธ์

$$\frac{\left.\frac{\partial x}{\partial V}\right|_L}{\left.\frac{\partial x}{\partial V}\right|_S} = \frac{\lambda_{xV}(\Lambda_{LV})}{\lambda_{xV}(\Lambda_{SV})} = \frac{15.2}{3.13} = 4.86$$

ในความหมายที่ได้ แสดงว่าค่าเกนของลูพควบคุมองค์ประกอบล่างหอ สามารถลดลงเกือบ 5 เท่า โดยการเปลี่ยนแปลงลูพควบคุมองค์ประกอบยอดหอจากรีฟลักซ์เป็นอัตราส่วนแทน ซึ่งเป็นการลด แบนด์สัดส่วน ของลูพควบคุมองค์ประกอบล่างหอ และลด IE ด้วย

ในทำนองเดียวกันกับลูพควบคุมองค์ประกอบยอดหอ ก็ควรจะใช้ตัวแปรปรับ V/B แทน V เพื่อควบคุมตัวควบคุมองค์ประกอบล่างหอ ยกเว้นตัวอย่างที่กล่าวมาที่มีการลดค่าเกน

เพียงแฟกเตอร์ 2.11/3.13 การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถทำได้ในหลายๆ คอลัมน์ เพียงแต่อัตราส่วนจะเปลี่ยนแปลงไปแล้วแต่คอลัมน์

ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบออกมาเป็นค่า IE ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างลูพควบคุมองค์ประกอบกับการเปลี่ยนแปลงตัวรบกวน เมื่อรูปแบบโครงสร้างการควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นค่าความผิดพลาดรวมสัมพันธ์ (relative integrated error, RIE) ประมาณได้ดังนี้

$$\text{RIE} = \left(|\mu_1| + |\mu_2|\right)\lambda_{y\,1} \qquad (2.23)$$

เมื่อตัวห้อย 1 และ 2 แสดงถึงตัวแปรปรับเพื่อควบคุมลูพยอดหอ และลูพล่างหอตามลำดับ

ตัวอย่าง 2.2 จากคอลัมน์ในตัวอย่าง 2.1 ให้ประมาณค่า IE ของ รูปแบบโครงสร้างการควบคุม แบบ *L/D_V* และ *L/D_V/B* เปรียบเทียบกับ รูปแบบโครงสร้างการควบคุม แบบ *L_V* เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวรบกวนแบบองค์ประกอบของสารป้อน

$$\text{RIE} = \left(\left|\frac{1}{1-0.02/0.47} - 1\right| + \left|\frac{1}{1-0.02/0.47} - \frac{1}{1+1/4}\right|\right)15.2$$

$$= (0.044+0.244)15.2 = \underline{4.38}$$

ถ้าเราเปลี่ยนการควบคุมลูพยอดหอ ด้วยการปรับ *L/D* แทนจะได้

$$\text{RIE} = \left(|-1| + \left|\frac{1}{1-0.02/0.47} - \frac{1}{1+1/4}\right|\right)3.13$$

$$= (1+0.244)3.13 = \underline{3.89}$$

ถ้าเราเปลี่ยนการควบคุมลูพล่างหอ ด้วยการปรับ *V/B* แทนจะได้

$$\text{RIE} = \left(|-1| + \left|\frac{1}{1-0.02/0.47} - \frac{1}{1-0.997/0.47} - \frac{1}{1+1/4}\right|\right)2.1$$

$$= (1+1.136)2.11 = \underline{4.51}$$

ผลจากตัวอย่าง 2.2 แสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลง IE เพียงเล็กน้อยใน 3 รูปแบบโครงสร้างการควบคุมดังกล่าว แม้ว่าค่าเกนสัมพันธ์จะมีความแตกต่างกันชัดเจน แต่แฟกเตอร์ความว่องไวต่อตัวรบกวนแบบองค์ประกอบของสารป้อน กลับชดเชยความแตกต่างของรูปแบบโครงสร้างการควบคุม ทั้งสามนั้น อย่างไรก็ดีถ้าความร้อนที่เข้า หรือออกมีการเปลี่ยนแปลงค่าแฟกเตอร์ความว่องไวต่อตัวรบกวนแบบความร้อนของทั้ง 3 รูปแบบโครงสร้างการควบคุม จะไม่เหมือนกัน นั่นคือ ค่า IE จะเป็นสัดส่วนกับค่าเกนสัมพันธ์เหล่านั้น และสังเกตได้อีกว่าทั้งสองตัวรบกวนจะให้การชิมูเลชั่นแบบไม่เป็นเส้นตรง

ขยายความของคอนเซ็ปท์นี้ในเรื่องค่าเกนสัมพันธ์ต่ำกว่า 1 , การเปลี่ยน รูปแบบโครงสร้างการควบคุม จาก *L_V* เป็น *D_V* ยกตัวอย่าง เช่น การเปลี่ยนตัวควบคุมระดับในถังรองรับรีฟลักซ์จาก *D* เป็น *L* การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ต่อ *D* จะส่งผลทำให้เปลี่ยนแปลง *L* ในปริมาณที่เท่ากันในทิศทางตรงกันข้าม อย่างไรก็ตามค่าเกนของกระบวนการจะเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันกับอัตราส่วนรีฟลักซ์ การไหลที่น้อยกว่าจะถูกปรับด้วยแบนด์สัดส่วนที่แคบกว่า ค่าเกนสัมพันธ์ในช่วง 0 ถึง 1 ก็ยังต้องการการจูนตัวควบคุมทั้งค่าแบนด์สัดส่วนและค่าเวลาอินทีกรัล ดังสมการ $C = 0.22 + 0.78\lambda$ ซึ่งเป็นแฟกเตอร์แก้ไข (correction factor) ที่ต้องนำไปหารทุก ๆ ลูพเดียวของการตั้งค่า PID เพื่อให้ได้การทำงานที่เหมาะสมที่สุด (optimum) เมื่อทั้ง

2 ลูพเป็นลูพปิด ดังนั้นสมการสำหรับรูปแบบโครงสร้างการควบคุมแบบ D_V (ที่มี RGA = 0.113 ซึ่งอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.5) จะมีค่า RIE เป็นดังนี้

$$\mathrm{RIE}_{D-V} = \frac{\left|\mu_D \lambda_{yL} D/L\right| + \left|\mu_V \lambda_{yD}\right|}{(0.22 + 0.78\lambda_{yD})^2} \qquad (2.24)$$

เมื่อตัวหารแสดงถึงแฟกเตอร์แก้ไขสำหรับค่าแบนด์สัดส่วนและค่าเวลาอินทีกรัล

ทำนองเดียวกัน , การปรับ B เพื่อควบคุมองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ล่างหอ จะต้องการ V เพื่อควบคุมระดับของเหลวล่างหอ เพื่อลดค่าเกนของลูพควบคุมองค์ประกอบล่างหอ ดังนั้น สำหรับ รูปแบบโครงสร้างการควบคุม แบบ L_B (ที่มี RGA = 0.893 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1) จะมีค่า RIE ดังนี้

$$\mathrm{RIE}_{L-B} = \frac{\left|\mu_L \lambda_{xB}\right| + \left|\mu_B \lambda_{xV} B/V\right|}{(0.22 + 078\lambda_{xB})^2} \qquad (2.25)$$

ตัวอย่าง 2.3 ให้ประมาณค่า RIE ของระบบโครงสร้างการควบคุมแบบ L_B ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวนแบบองค์ประกอบของสารป้อน และแบบความร้อนออกจาระบบของตัวอย่างคอลัมน์ข้างต้น

สำหรับตัวรบกวนแบบองค์ประกอบสารป้อน

$$\mathrm{RIE}_{L\text{-}B} = \frac{\left|(0.044)0.893\right| + \left|\left(\frac{1}{1 - 0.997/0.47}\right)15.2\left(\frac{0.997 - 0.47}{0.47 - 0.02}\right)\Big/5\right|}{\left[0.22 + 0.78(0.893)\right]^2}$$

เมื่อ $\dfrac{B}{V} = \dfrac{F-D}{L+D} = \dfrac{\left(F/D - 1\right)}{\left(L/D + 1\right)}$

$$= \left[\left(\frac{Y_i - X_i}{Z_i - X_i}\right) - 1\right]\cdot\left[\frac{1}{L/D + 1}\right]$$

$$= \frac{0.039 + 3.175}{0.840} = \underline{3.83}$$

และสำหรับตัวรบกวนแบบความร้อนที่ออกจากระบบ

$$\text{RIE} = \frac{|(-1)0.893| + 0}{0.840} = \underline{1.06}$$

สำหรับตัวรบกวนแบบความร้อนสมดุล (energy balance upset) นั่นหมายรวมถึงทั้งความร้อนเข้า และความร้อนออก จะได้ค่า RIE ดังนี้

$$RIE = \left(|\mu_1| + |\mu_2|\right) \lambda_{y\,1} \qquad (2.26)$$

เมื่อ μ_1 คิดจากความว่องไวของตัวแปรปรับลูพยอดหอ ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวนความร้อนออก (Q_0) หรือระบบทำความเย็นที่เครื่องควบแน่น

μ_2 คิดจากความว่องไวของตัวแปรปรับลูพล่างหอ ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวนความร้อนเข้า (Q_i) หรือระบบให้ความร้อนจากรีบอยเลอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าของ RIE จากค่า RGA ในตารางที่ 2.5

ค่า RIE สำหรับการรบกวนจากแบบองค์ประกอบสารป้อน			
ตัวแปรปรับ	ตัวแปรปรับลูพยอดหอ		
ลูพล่างหอ	*D*	*L*	*S*
B	-	3.83	4.77
V	42.1	4.38	3.89
V/B	37.9	4.26	4.51
ค่า RIE สำหรับการรบกวนแบบความร้อนสมดุล			
ตัวแปรปรับ	ตัวแปรปรับลูพยอดหอ		
ลูพล่างหอ	*D*	*L*	*S*
B	-	1.06	1.04
V	1.19	30.4	6.26
V/B	1.30	7.22	4.22

จากตาราง 2.7 พบว่า สำหรับระบบควบคุมใด ๆ ที่ไม่ได้ใช้การไหลของผลิตภัณฑ์เป็นตัวแปรปรับแล้ว ค่า RIE จะเป็น 2 เท่าของค่า RGA ซึ่งจากตารางดังกล่าวพบว่ารูปแบบโครงสร้างการควบคุม แบบ *L_B* จะให้การควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับคอลัมน์นี้ เมื่อพิจารณาจากการรบกวนจากตัวรบกวนเป็นสำคัญ

สำหรับตัวรบกวนแบบการไหลของสารป้อนนั้นมีสิ่งที่ควรมองข้ามไป คือ การรบกวนดังกล่าวสามารถลดได้โดยใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (feed forward control) มา

ช่วย นั่นคือ จากตัวอย่างดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าควรใช้อัตราการไหลเป็นอัตราส่วนกับการไหลของสารป้อนเป็นตัวแปรปรับมากกว่า ซึ่งจะให้ข้อดี ดังเช่น การเลือกอัตราส่วนการไหลแบบ *L/D* หรือ *V/B* เพื่อควบคุมองค์ประกอบ ซึ่งเป็นแบบที่ไม่ว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงแบบการไหลของสารป้อน โดยที่แบบ *L/D* หรือ *V/B* นี้ไม่ต้องการเพิ่มลูพป้อนไปข้างหน้าเพิ่มเติมเพื่อชดเชยไดนามิคของการควบคุม

2.3.2 กรณีที่ผู้ใช้ทราบค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ

เริ่มจากการเลือกตัวแปรปรับที่เป็นไปได้จากค่าดัชนีความยืดหยุ่นของ Morari (Morari Resilience Index, MRI) และกำจัดคู่การควบคุมที่ไม่เหมาะสมด้วยค่าเกนสัมพันธ์ (RGA) ค่าดัชนีของ Neiderlinski (Neiderlinski Index,NI) และค่าการวิเคราะห์ค่าซิงกูลาร์ (Singular Value Analysis, SVA) และกล่าวถึงผลกระทบของตัวรบกวนต่อการควบคุมรูปแบบต่างๆ จากนั้นจะนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาหาความเป็นไปได้ของรูปแบบโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสม โดยการอินเทอร์เซค (intersect) กัน เพื่อให้ได้รูปแบบโครงสร้างการควบคุมหอกลั่นที่ดีที่สุด

ก. ดัชนีความยืดหยุ่นของ Morari (Morari resilence Index, MRI)

ความยืดหยุ่น (Resiliency) หรือความง่ายในการควบคุม ขึ้นอยู่กับการเลือกตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม สำหรับการเลือกตัวแปรควบคุมนั้นจะพิจารณาจากเงื่อนไขและความต้องการของกระบวนการ ดังนั้นการเลือกตัวแปรปรับจึงถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อความยากง่ายในการควบคุม ซึ่งจะไม่ขึ้นกับการจับคู่ตัวแปรหรือการปรับชุดการควบคุม Morari (1983) ได้เสนอวิธีนี้เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกตัวแปรปรับของกระบวนการ

ค่า MRI เป็นค่าที่แสดงถึงซิงกูลาร์ที่น้อยที่สุดของแมทริกซ์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันแบบลูพเปิดของกระบวนการ (minimum singular value of the process openloop tranfer function matrix) แสดงได้ดังนี้

$$MRI = \sigma^{\min}\left[G_{M(i\omega)}\right] = \sigma^{\min}\left[K_{proc}\right] = \min\sqrt{\lambda_{i\left[K_P^T K_P\right]}} \qquad (2.27)$$

เมื่อ K_p หรือ K_{proc} คือแมทริกซ์ของค่าเกนของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการที่สภาวะคงตัว

σ คือค่าซิงกูลาร์ ซึ่งก็คือค่ารากที่สองของค่าไอเกนของแมทริกซ์

นั่นคือ จะต้องนำค่าแมทริกซ์ของค่าเกนของกระบวนการมาหาค่าไอเกนก่อน แล้วเปรียบเทียบค่ารากที่สองของค่าไอเกน แล้วเลือกค่าที่น้อยที่สุดจะเป็นค่า MRI

การหาค่าไอเกน หาได้จาก ค่าดีเทอร์มิแนนต์ของแมทริกซ์ค่าเกน $\mathbf{K^T_P K_P}$

ตัวอย่างเช่น

$$\mathbf{K^T_P\, K_P} = \begin{bmatrix} 12.8 & 6.6 \\ -18.9 & -19.4 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 12.8 & -18.9 \\ 6.6 & -19.4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 207.4 & -369.96 \\ -369.96 & 733.57 \end{bmatrix}$$

หาค่าไอเกนโดย

$$Det\begin{bmatrix} (\lambda - 207.4) & 369.96 \\ 369.96 & (\lambda - 733.57) \end{bmatrix} = \lambda^2 - 940.97\lambda + 15272 = 0$$

ค่าไอเกน = 916.19, 16.52

ดังนั้นค่า MRI ที่ได้ของแมทริกซ์เกน $\mathbf{K_P}$ คือ $\sqrt{16.52} = 4.06$

ค่าที่มากของ MRI จะแสดงถึงความง่ายในการควบคุม มากกว่าค่า MRI ที่น้อยกว่า นั่นคือควรเลือกตัวแปรปรับควรจะเลือกจากตัวแปรปรับที่ทำให้ค่าเกนของกระบวนการที่ให้ค่า

MRI ที่มากที่สุด สิ่งที่ต้องระวังในการคำนวณคือ หน่วยของค่าเกนของกระบวนการที่ใช้ในการคำนวณนั้นต้องไม่มีหน่วย

ข. การวิเคราะห์ค่าเกนสัมพันธ์ (Relative Gain Analysis, RGA)

การพิจารณาผลกระทบซึ่งกันและกัน (interaction) ของแต่ละลูพการควบคุมองค์ประกอบในระบบหลายตัวแปรที่มีโครงสร้างแบบเส้นทแยงมุม ได้แก่วิธีของ Bristol's Relative gain array (RGA) จะใช้ค่าเกนของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการที่สภาวะคงตัวมาคำนวณ แสดงดังนี้

$$\text{ค่าเกนสัมพันธ์ } = \lambda_{ij} = \frac{\left(\partial C_i / \partial M_j\right)_M}{\left(\partial C_i / \partial M_j\right)_C} = \frac{open-loop-gain}{closed-loop-gain} \qquad (2.28)$$

เมื่อ $i = 1, 2, ..., n$ และ $j = 1, 2, ..., n$

เมื่อ C_i เป็นจำนวนตัวแปรควบคุม, M_j เป็นจำนวนตัวแปรปรับ

$$\text{อะเรย์ของค่าเกนสัมพันธ์ (RGA) } = \Lambda = \begin{array}{c} \\ C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} M_1 & M_2 & \dots & M_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \dots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \dots & \lambda_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \dots & \lambda_{nn} \end{bmatrix} \end{array}$$

ลักษณะที่สำคัญ 2 ประการของค่า RGA คือ

1. ผลบวกของค่า λ ในแต่ละแถว และแต่ละหลักจะต้องมีค่าเท่ากับ 1

2. ค่า RGA เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย นั่นคือค่าเกนที่นำมาใช้จะต้องไม่มีหน่วย

ตัวอย่างการคำนวณ สำหรับระบบ 2x2 ตัวแปร ที่มีแบบจำลองของกระบวนการที่สภาวะคงตัว และสมมติว่าแบบจำลองนั้นสามารถทำให้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงได้ และ

แสดงในเทอมของตัวแปรปรับ (manipulated variable, M) และตัวแปรควบคุม (controlled variable, C)

$$C_1 = K_{11}M_1 + K_{12}M_2 \tag{2.29}$$

$$C_2 = K_{21}M_1 + K_{22}M_2 \tag{2.30}$$

เมื่อ K_{ij} เป็นค่าเกนที่สภาวะคงตัวหว่าง C_i กับ M_j โดยสามารถเขียนแบบจำลองนี้ในรูปของแมทริกซ์ดังนี้

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{KM}$$

ซึ่งค่าแมทริกซ์ $\boldsymbol{K}$ นั้นหาได้จากแบบจำลองที่สภาวะไม่คงตัว

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{G_p(0)} = \lim_{s\to 0} \boldsymbol{G_p(s)}$$

คำนวณค่า λ_{11} จากสมการ

$$\left(\frac{\partial C_1}{\partial M_1}\right)_{M_2} = K_{11} \tag{2.31}$$

ก่อนที่จะคำนวณหาค่า $\left(\frac{\partial C_1}{\partial M_1}\right)_{M_2}$ จะต้องกำจัด M_2 ก่อน ส่วนสมการ (2.29) ใช้สำหรับการคำนวณเมื่อ C_2 คงที่ จะได้

$$M_2 = -\frac{K_{21}}{K_{22}}M_1$$

แทนค่า M_2 ในสมการ(2.28) จะได้

$$C_1 = K_{11}\left(1-\frac{K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22}}\right)M_1$$

$$\left(\frac{\partial C_1}{\partial M_1}\right)_{C2} = K_{11}\left(1-\frac{K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22}}\right) \tag{2.32}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แทนสมการ (2.30) และ (2.31) ในสมการ (2.28)

$$\lambda_{11} = \frac{1}{1-\frac{K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22}}} \tag{2.33}$$

จากคุณสมบัติของค่า RGA ที่ผลรวมในแต่ละแถวแต่ละหลักจะมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น

$$\lambda_{12} = \lambda_{21} = 1 - \lambda_{11} \quad , \quad \lambda_{22} = \lambda_{11} \tag{2.34}$$

ดังนั้นจะได้ RGA สำหรับระบบ 2x2

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda & 1-\lambda \\ 1-\lambda & \lambda \end{bmatrix}$$

ในที่นี้ λ หมายถึง λ_{11}

ค่า λ แสดงถึงผลการกระทบระหว่างลูพควบคุมองค์ประกอบ ดังนี้

1. $\lambda = 1$ หมายถึง ลูพการควบคุมทั้ง 2 ลูพมีผลกระทบต่อกันแต่ไม่สมบูรณ์

2. $\lambda = 0$ หมายถึง มีเพียงลูพการควบคุมลูพเดียวที่ส่งผลกระทบต่อลูพหลัก

3. $0 < \lambda < 1$ หมายถึงมีผลกระทบต่อกันระหว่างลูพควบคุม และจะมีผลกระทบต่อกันมากที่สุดเมื่อค่า λ มีค่าเท่ากับ 0.5

4. $\lambda > 1$ หมายถึงการที่ลูพมีการส่งผลกระทบต่อกันทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพลดลง

5. $\lambda < 0$ หมายถึง เกนลูพเปิด และเกนลูพปิด มีเครื่องหมายต่างกัน นั่นคือลูพที่ส่งผล

กระทบจะมีอิทธิพลมากกว่าลูพควบคุมหลัก

โดยสรุป การจับคู่ที่ดีควรจะเลือกค่า λ ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และควรจะมีค่าเข้าใกล้ 1

ค. ค่าดัชนีของ Niederlinski (Neiderlinski Index, NI)

เป็นค่าดัชนีที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของระบบซึ่งใช้เป็นตัวกำจัดคู่ควบคุมที่ไม่สามารถทำงานได้ (unworkable pairing) ในช่วงแรกของการออกแบบการคำนวณจะใช้เมทริกซ์ของค่าเกนของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการแท่านั้น แสดงได้ดังนี้

$$Niederlinski\ \ index\ \ =\ \ NI\ =\ \frac{Det\left[K_P\right]}{\prod_{j=1}^{N} K_{P_{jj}}} \qquad (2.35)$$

เมื่อค่า $\mathbf{K_p}$ = $\mathbf{G_{M(0)}}$ = แมทริกซ์ค่าเกนของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่สภาวะคงตัวของกระบวนการ

K_{pjj} = ค่าเกนในแนวเส้นทะแยงมุมของแมทริกซ์ $\mathbf{K_P}$

สมมติฐานของวิธีนี้มีอยู่ 3 ข้อ คือ

1. แมทริกซ์ของค่าเกนของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ (K_{Pjj}) จะต้องเสถียร ถ้าเป็นเศษส่วนจะต้องมีอันดับ (order) ของเศษน้อยกว่าส่วน
2. ในชุดควบคุมแบบป้อนกลับจะต้องมีเทอมอินทิกรัล
3. ลูพควบคุมแต่ละลูพจะต้องมีความเสถียร เมื่อให้ลูพควบคุมที่เหลือเป็นลูพเปิด

ถ้าค่าดัชนี NI มีค่าเป็นลบ แสดงว่าลูพการควบคุมแบบปิดที่ใช้คู่การควบคุมดังกล่าว จะไม่มีความเสถียร ดังนั้นจึงไม่ควรพิจารณาเลือกคู่การควบคุมดังกล่าว

ถ้าค่าดัชนี NI มีค่าเป็นบวก ไม่สามารถระบุได้แน่นอนว่าลูพการควบคุมของการใช้คู่ควบคุมดังกล่าวจะมีความเสถียรหรือไม่

ง. การวิเคราะห์ค่าซิงกูลาร์ (Singular Value Analysis, SVA)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ช่วยในการแก้ปัญหาที่สำคัญของระบบการควบคุมดังนี้

1. ปัญหาในการเลือกตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับ

2. การประเมินค่าความรอบัสต์ (robustness) ของการควบคุม

3. การหารูปแบบโครงสร้างการควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับการควบคุมแบบหลายลูพ

ค่า SVA นี้เป็นการวิเคราะห์ที่อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองกระบวนการที่สภาวะคงตัว โดยพิจารณากระบวนการที่มีตัวแปรควบคุม n ตัว และมีตัวแปรปรับ n ตัว และสมมติว่าทราบค่าแบบจำลองกระบวนการที่สภาวะคงตัว

$$C = KM \tag{2.36}$$

เมื่อ **C** เป็นเวกเตอร์ n ของตัวแปรควบคุม, **M** เป็นเวกเตอร์n ของตัวแปรปรับ และ **K** เป็นค่าแมทริกซ์เกนที่สภาวะคงตัว โดยที่แมทริกซ์ **K** จะต้องเป็นตัวแปรอิสระเชิงเส้น พิจารณาจากค่าไอเกนของแมทริกซ์ **K**

$$|K - \alpha I| = 0 \tag{2.37}$$

ถ้าได้ค่า $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n$ ที่ไม่มีค่าใดเป็น 0 เลย แสดงว่าแมทริกซ์เกน มีคุณสมบัติเป็นซิงกูลาร์

จากนั้นจะทำการหาค่าเงื่อนไข (Condition Number, CN) จาก

$$|K^T K - \alpha I| = 0$$

$$\sigma = \sqrt{\alpha}$$

$$CN = \frac{\sigma_1}{\sigma_r} \tag{2.38}$$

ค่า *CN* จะแสดงถึงความสามารถในการควบคุม ถ้าค่า *CN* มีค่ามากกว่าจะแสดงถึงสภาวะไม่เหมาะสมในการควบคุม และทำให้เกิดความว่องไวต่อสิ่งรบกวนได้มากกว่าค่าแมทริกซ์ **K** ที่ให้ค่า *CN* ที่น้อยกว่า

จ. ค่าความว่องไวต่อตัวรบกวน (Disturbance Sensitivity, DS)

ในระบบการควบคุมหอกลั่นนั้น การพิจารณาถึงผลกระทบต่อกันระหว่างลูพควบคุมองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ และการพิจารณาถึงความว่องไวของระบบต่อตัวแปรรบกวนนั้นมีความสำคัญต่อการควบคุมของหอกลั่น ซึ่งจะมีค่าแตกต่างไปตามแต่ละรูปแบบโครงสร้างการควบคุม Luyben (1988) ได้แสดงว่าในการเลือกชนิดรูปแบบโครงสร้างการควบคุมนั้น คุณสมบัติในเรื่องความว่องไวของระบบต่อตัวแปรรบกวนนั้นมีความสำคัญมากกว่าคุณสมบัติผลกระทบต่อกันระหว่างลูพควบคุมองค์ประกอบ

วิธีการวัดความว่องไวต่อตัวแปรรบกวนมีหลายวิธี ตัวอย่างเช่น Stanley และคณะ (1985) ได้แสดงเป็นค่าแฟกเตอร์ความว่องไวต่อภาระรบกวน (load-sensibility factor) Skogestad (1988) ใช้พิจารณาความว่องไวของอัตราส่วน *D/B* ข้อเสียของการวัดความว่องไวของระบบต่อตัวแปรรบกวนที่กล่าวมานี้ คือ เป็นพิจารณาที่สภาวะคงตัวของกระบวนการ แม้ว่าค่าเกนที่สภาวะคงตัวระหว่างเอาท์พุทและตัวรบกวน จะเป็นพารามิเตอร์สำคัญของความว่องไวต่อตัวแปรรบกวนก็ตาม แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงของเอาท์พุท (ซึ่งเป็นสภาวะไดนามิค) นั้นมีความสำคัญมากกว่า Haggblom K.E. (1991) ได้แสดงวิธีการหาค่าความว่องไวต่อตัว

แปรรบกวนในสภาวะไดนามิค โดยประมาณฟังก์ชันการรบกวนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันอันดับหนึ่งของลูพแบบป้อนกลับได้ดังนี้

$$y = G_{eq} \frac{K_w}{T_w S + 1} w$$

เมื่อ G_{eq} เป็นค่าการจูนลูพป้อนกลับ (equivalently tuned feed back loops) ที่มีค่าเกนรบกวน K_w และเวลาคงตัวเป็น T_w ดังนั้นจะได้พารามิเตอร์ที่ง่ายที่สุดที่แสดงผลความว่องไวต่อตัวแปรรบกวนดังนี้

$$DS = \left| \frac{g_w}{T_w} \right| = \left| \frac{load\ gain}{holding\ time} \right| \qquad (2.39)$$

การพิจารณาผลความว่องไวดังกล่าว จะเลือกรูปแบบโครงสร้างที่ให้ผลความว่องไวต่อตัวแปรรบกวนน้อยที่สุด ซึ่งพิจารณาทั้งผลการรบกวนต่อลูพยอดหอ และลูพล่างหอต่อตัวรบกวนชนิดต่าง ๆ (ตัวอย่างเช่น ตัวรบกวนเนื่องจากการไหลของสารป้อน ตัวรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารป้อน ตัวรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงความร้อนเข้าและออกจากระบบ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 ความรู้ในการเลือกชนิดการควบคุมองค์ประกอบแบบดึงผลิตภัณฑ์ออกด้านข้างคอลัมน์ (Sidestream column control)

สำหรับคอลัมน์ที่มีสายดึงผลิตภัณฑ์ออกด้านข้าง จะมีตัวแปรปรับเพิ่มอีก 1 ตัว คือ อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ไหลออกโดยตรงจากเทรย์ใดๆ สตรีมที่ดึงออกนี้อาจจะเป็นเฟสของเหลว เมื่อมีการดึงออกที่เทรย์สูงกว่าเทรย์สารป้อน และอาจจะเป็นเฟสไอ เมื่อมีการดึงออกที่เทรย์ต่ำกว่าเทรย์สารป้อน สำหรับสตรีมของเหลวที่ดึงออกนั้นอาจจะเป็นการไหลของของเหลวทั้งหมด ณ เทรย์ที่ดึงออกนั้น ทำให้ต้องมีการควบคุมระดับของเหลวในเทรย์นั้นด้วย โดยทั่วไปแล้ว สตรีมที่ดึงออกนั้นควรอยู่ต่ำกว่าเวียร์ ที่จะรักษาสมดุลของของเหลวที่โอเวอร์โฟลว์กับเทรย์ที่ต่ำกว่า ในส่วนของสตรีมด้านข้างนั้นจะต้องควบคุมบริสุทธิ์ทั้งสารองค์ประกอบเบาและสารองค์ประกอบหนัก วิธีการควบคุมองค์ประกอบของสตรีมที่ดึงออกด้านข้างคอลัมน์ที่เป็นการเพิ่มตัวแปรควบคุมอีกหนึ่งตัว ทำให้ปัญหาการควบคุมมีความซับซ้อนมากขึ้น เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวจึงแบ่งคอลัมน์แบบดึงผลิตภัณฑ์ออกด้านข้างคอลัมน์นี้ เป็น 3 คลาส ตามอัตราการไหลของสตรีมที่เล็กที่สุด

2.4.1 คลาส 1

เมื่ออัตราการไหลของดิสทิลเลตเป็นสตรีมที่เล็กที่สุด บางครั้งเรียกคอลัมน์แบบนี้ว่าเป็น "pasteurizing columns" สตรีมด้านข้างถูกดึงออกในสถานะของเหลว ณ เทรย์เหนือเทรย์สารป้อน เป็นคอลัมน์ที่ควบคุมสารองค์ประกอบเบา (light key) ของสตรีมด้านข้างด้วยอัตราการไหลของดิสทิลเลต ได้แก่คอลัมน์แยกเอธิลีน ที่มีเอธิลีนบริสุทธิ์สูงเป็นสตรีมด้านข้าง

และมีอีเทนเป็นผลิตภัณฑ์ล่างหอที่มีการนำกลับมาใช้อีก และมีเทนเป็นสารปนเปื้อนในเอธิลีนที่ถูกกำจัดออกจากเครื่องควบแน่น ดังนั้นจะเหลือการควบคุมองค์ประกอบของสารองค์ประกอบหนัก (heavy key) ของสตรีมด้านข้าง และสารองค์ประกอบกลาง (middle key) ของผลิตภัณฑ์ล่างหอ ซึ่งควรจะเลือกวิธีการควบคุมจากการวิเคราะห์ค่าเกนสัมพันธ์ เพราะระบบการควบคุมที่เหลือนี้มีผลกระทบระหว่างลูพควบคุมมาก อย่างไรก็ตามการควบคุมปริมาณมีเทนในผลิตภัณฑ์เอธิลีนนั้นโดยการปรับดิสทิลเลต

2.4.2 คลาส 2

เมื่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ล่างหอเป็นสตรีมที่เล็กที่สุด และสตรีมด้านข้างเป็นการเอาไอออก ณ เทรย์ต่ำกว่าเทรย์สารป้อน และเช่นเดียวกัน การควบคุมแต่ละคีย์ ก็ใช้แบบเดียวกับคอลัมน์แบบธรรมดา เป็นคอลัมน์ที่ควบคุมสารองค์ประกอบหนักกว่า (heavier than heavy key) ของสตรีมด้านข้างด้วยอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ล่างหอ และจะเหลือการควบคุมองค์ประกอบของสารองค์ประกอบเบา (light key) ของสตรีมด้านข้าง และสารองค์ประกอบกลาง (middle key) ของผลิตภัณฑ์ยอดหอ เช่นเดียวกันควรจะเลือกวิธีการควบคุมจากการวิเคราะห์ค่าเกนสัมพันธ์ แต่ในกรณีที่อัตราการไหลของดิสทิลเลตเล็กกว่าอัตราการไหลของสตรีมด้านข้างแล้ว ควรจะควบคุมระดับของเหลวล่างหอด้วยการปรับอัตราการไหลของบอยล์อัพ ซึ่งในกรณีนี้อาจจะไม่ตรงกับผลที่ได้จากการคำนวณค่าเกนสัมพันธ์

2.4.3 คลาส 3

เมื่ออัตราการไหลของสตรีมด้านข้างเป็นสตรีมที่เล็กที่สุด และสตรีมด้านข้างเป็นการเอาของเหลวหรือไอออกที่เทรย์เหนือหรือต่ำกว่าเทรย์สารป้อน ขึ้นอยู่กับจุดเดือดของสารองค์

ประกอบกลางในสตรีมด้านข้าง ถ้าไม่มีการดึงสตรีมด้านข้างออก สารองค์ประกอบกลางที่เดือดจะสะสมในคอลัมน์ จนกระทั่งส่งผลกระทบต่อการแยกผลิตภัณฑ์หลักได้ เช่นในกรณีของการกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิงนั้น ขีดจำกัดของการละลายและความดันไอจะถูกรบกวนเฟสของเหลวของสารองค์ประกอบกลาง และเช่นเดียวกัน การควบคุมแต่ละดีย์ก็ใช้แบบเดียวกับคอลัมน์แบบธรรมดา เป็นคอลัมน์ที่ควบคุมสารองค์ประกอบกลางของสตรีมด้านข้างด้วยอัตราการไหลของสตรีมด้านข้าง และเหลือการควบคุมองค์ประกอบของสารองค์ประกอบเบาของผลิตภัณฑ์ยอดหอ และสารองค์ประกอบหนักของผลิตภัณฑ์ก้นหอ เช่นเดียวกันควรจะเลือกวิธีการควบคุมจากการวิเคราะห์ค่าเกนสัมพันธ์

2.5 การเลือกชนิดการควบคุมความดัน และเครื่องควบแน่น (Condenser and pressure control)

การควบคุมความดันของคอลัมน์ถือได้ว่าเป็นการปรับที่ยากที่สุด และมีความซับซ้อนมากในการควบคุมหอกลั่น สำหรับวิธีการควบคุมความดันนี้ได้นำมาจากประสบการณ์ของหลายๆ ท่าน ซึ่งหวังว่าข้อแนะนำนี้จะเป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าต่อไป และช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกวิธีและประมาณค่าที่เหมาะสม อีกทั้งยังช่วยในการคำนวณเพื่อการออกแบบได้อีกด้วย

สำหรับพื้นฐานการควบคุมความดัน (P) นั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรอุณหภูมิ (T), ปริมาตร(V) หรือมวล (M) ได้เป็นความสัมพันธ์สมการสถานะ (eqaution of state)

$$P = f(V, T, M)$$

เราวัดความดันในรูปปริมาตรของไอ (V), อุณหภูมิของไอ (T) ไม่ได้ (สำหรับหอกลั่น) ดังนั้นจึงวัดในรูปมวลของไอแทน (M) ซึ่งก็คือปริมาณของไอที่มีอยู่ โดยที่ส่งผลกระทบต่อการควบคุมความดันในกระบวนการต่อเนื่องได้ 2 ทางคือ การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเข้าของไอ (rate of vapor inflow) หรืออัตราการเกิดขึ้นของไอ (rate of generation) และการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลออกของไอ (rate of vapor outflow) หรืออัตราการควบแน่นของไอ (rate of condensation)

นั่นคือสามารถแบ่งวิธีการควบคุมตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของไอรวม ได้เป็น 3 กรณี

กรณี 1 : เมื่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของไอรวมเป็นบวกตลอดเวลา หรือผลิตภัณฑ์ส่วนบนของคอลัมน์เป็นไอทั้งหมด ซึ่งกรณีนี้ยอดหอ (overhead) มักจะเป็นการควบแน่นแบบบางส่วน (partially condensed)

กรณี 2 : เมื่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของไอรวมเป็นศูนย์ที่สภาวะคงตัว และเป็นลบในระหว่างสภาวะที่ไม่คงตัว หรือผลิตภัณฑ์ส่วนบนของคอลัมน์เป็นของเหลวทั้งหมด ซึ่งกรณีนี้ยอดหอมักจะเป็นการควบแน่นแบบทั้งหมด (totally condensed)

กรณี 3 : เมื่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของไอรวม บางครั้งเป็นบวกหรือศูนย์ที่สภาวะคงตัว แต่เป็นลบในระหว่างสภาวะที่ไม่คงตัว หรือผลิตภัณฑ์ส่วนบนของคอลัมน์เป็นทั้งไอและของเหลว

(ในกรณีที่ 3 นั้นมักจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการควบแน่นสูงกว่าผลบวกของอัตราการเกิดขึ้นของไอ และอัตราการป้อนสารของไอ ถ้าการเติมแกสไม่ส่งผลต่ออัตราการควบแน่นแล้ว ความดันของคอลัมน์จะสามารถลดลงได้)

ข้อจำกัดของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของไอทั้งสอง ได้แก่

- การวัดการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเข้าของไอนั้นทำได้ยาก ไม่มีประสบการณ์พอ เนื่องจากการวัดนั้นต้องมีการเติมแกส เพื่อช่วยในการวัดด้วย

การวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวพิจารณาเฉพาะระบบที่เกี่ยวกับปิโตรเลียม หรืออุตสาหกรรมปิโตรเคมี จึงไม่สามารถใช้กับระบบอื่น หรือในอุตสาหกรรมอื่นได้

ไม่ได้ใช้อธิบายสภาวะที่ความดันบรรยากาศ เนื่องจากการควบคุมความดันไม่สามารถทำได้ภายใต้สภาวะนี้

ดังนั้นวิธีการควบคุมความดันที่จะกล่าวต่อไปจึงพิจารณาที่อัตราการเปลี่ยนแปลงการควบแน่น อธิบายไว้โดย Rademaker และคณะ (1975) นั่นคือการควบคุมความดัน กับการควบแน่นจึงสัมพันธ์กัน ซึ่งการตัวแปรปรับนั้นอาจจะทำได้ด้วยอุณหภูมิของรีฟลักซ์ และระดับของเหลวในรีฟลักซ์ดรัม

ในที่นี้จะแบ่งวิธีการควบคุมของหอกลั่นตามเฟสของผลิตภัณฑ์ยอดหอได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอมีเฟสเดียว (เป็นไอ หรือของเหลว) และกรณีที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอมีสองเฟส (เป็นไอ และของเหลว)

2.5.1 กรณีที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอมีเฟสเดียว (Single-Phase Product)

ความดันของคอลัมน์ถือได้ว่าเป็นตัวแปรควบคุมที่สำคัญที่สุดของหอกลั่น ซึ่งผลของความดันต่อคอลัมน์นั้นมีผลหลาย ๆ ด้าน ทั้งการควบแน่น, การกลายเป็นไอ, อุณหภูมิ, ความเข้มข้นองค์ประกอบ ความสามารถในการระเหย (volatilities) และกระบวนการอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ จากประสบการณ์ของ Kister (1990) พบว่า ถึงแม้ว่าจะรักษาความดันให้คงที่ได้แต่สภาวะการปฏิบัติงานก็ไม่คงที่ ดังนั้นในการควบคุมความดันนี้จะไม่พิจารณาถึงการแปรปรวนของความดัน โดยถือว่ามักจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆและค่อนข้างคงที่

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการควบคุมความดันของคอลัมน์นั้นส่งผลโดยรวม (integrated) ต่อระบบการควบแน่น ดังนั้นการควบคุมความดันและการควบแน่นจึงต้องพิจารณาไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งได้มีผลงานของ Chin (1979) ที่แสดงไว้อย่างดีเยี่ยม และยังมีคำแนะนำอื่น ๆ ของ Buckley (1985), Boyd (1979), Rademaker และคณะ.(1975) และ Shinsky (1984) โดยงานวิจัยนี้จะแสดงถึงวิธีการควบคุมความดัน ที่ประกอบไปด้วยเทคนิคและข้อแนะนำของวิธีควบคุม

ข้อแนะนำทั่วไปของการควบคุมความดันและการควบแน่น (Chin,1979)

1. กระแสที่เซ็ทรีฟลักซ์ดรัม จะต้องมีความเร็วต่ำพอที่การรบกวนผิวสัมผัสของของเหลวในรีฟลักซ์ดรัม

2. ท่อ (pipe) ของบายพาส และเส้นรักษาความดันให้เท่ากัน (pressure-equalizing line) จะต้องออกแบบให้มีการไหลได้สะดวก โดยไม่มีจุดต่ำ (low point) ที่จะทำให้เกิดการสะสมของคอนเดนเสด

3. ถ้าอุณหภูมิของการควบแน่นสูงกว่าภายนอกและช่วงการควบแน่นแคบ จะเกิดการควบแน่นที่ผนังของรัฟลักซ์ดรัม ส่งผลต่อการควบคุมความดันหรือการควบคุมการควบแน่นได้ จึงต้องมีการหุ้มฉนวนที่บริเวณที่มีไอของรีฟลักซ์ดรัมด้วย

4. เส้นรักษาความดันให้เท่ากันที่แสดงถึงความดันที่มีค่าเท่ากันระหว่างเส้น เป็นสิ่งที่บอกว่าจะไม่มีความดันลด (pressure drop) เกิดขึ้น Chin (1979) พบว่าขนาดของเส้นรักษาความดันให้เท่ากันต้องมีขนาดอย่างน้อย 20% ของพื้นที่หน้าตัดของเส้นไอยอดหอของคอลัมน์

ในคอลัมน์แบบความดันบรรยากาศนั้น (Atmospheric columns) ซึ่งเป็นกรณีที่มักจะเกิดเมื่อผลิตภัณฑ์ยอดหอเป็นสองเฟส ความดันจะถูกควบคุมโดยเปิดคอลัมน์สู่ความดันบรรยากาศ เช่น โดยการเปลี่ยนแปลงการไหลเข้าของอากาศและการปล่อยแกสออกจากคอลัมน์ทางระบาย (vent) ("breathing") นั่นคือ ไม่พิจารณาถึงอากาศที่ทางเข้าของระบบและมีการปล่อยแกสเฉื่อยที่เติมเข้ามาโดยทางระบาย หรือคอลัมน์มีความดันปฏิบัติการในช่วง 1-3 ความดันบรรยากาศ และถือเป็นการปฏิบัติงานแบบใช้ความดันเมื่อคอลัมน์มีการเปิดสู่บรรยา-กาศ อัตราการควบแน่นสามารถควบคุมได้โดยระดับของเหลว หรืออุณหภูมิในรีฟลักซ์ดรัม ซึ่งแสดงไว้เป็นกรณีผลิตภัณฑ์มี 2 เฟส ดังจะกล่าวต่อไป

เทคนิคของการควบคุม จะแบ่งออกได้เป็น 4 วิธีการปรับเปลี่ยน ได้แก่ การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ไอ, การใช้เครื่องควบแน่นแบบท่วม, การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำความเย็น (coolant), และวิธีอื่น ๆ (Miscelleneous) ดังจะกล่าวต่อไป

ก. การปรับเปลี่ยนการไหลของผลิตภัณฑ์ไอ

วิธี A-1 (รูป 2.6ก) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดและควบคุมโดยตรงสำหรับคอลัมน์ที่มีเพียง

ผลิตภัณฑ์เป็นเฟสไอ ตัวควบคุมจะปรับที่ปริมาณไอโดยตรงเพื่อควบคุมความดันของคอลัมน์ (ตัวอย่างเช่น ในคอลัมน์ไล่ซัลเฟตร์ด้วยน้ำในโรงการนำกลับซัลเฟอร์) ส่วนวิธี A-3 (รูป 2.6ค) เหมาะสำหรับการควบคุมของคอลัมน์แบบสูญญากาศ (vacuum) โดยปรับที่การอัดไอที่สปิลแบ็ค (spillback) ตัวควบคุมจะส่งผลต่อการไหลของไอของยอดหอที่เข้าส่วนดูดของอีเจ็คเตอร์ (ejector suction) เพื่อรักษาความดันของคอลัมน์ ตัวอีเจ็คเตอร์จะดึงเอาอากาศที่รั่วเข้าไปในหอกลั่น โดยการดึงออกพร้อมกระแสไอของยอดหอที่อิ่มตัวด้วยอากาศ อีเจ็คเตอร์ที่ใช้ควรเลือกแบบที่มีการทำงานอย่างง่ายๆ และน่าเชื่อถือภายใต้สภาวะการทำงานดังกล่าว และเครื่องมือที่ใช้วัดความดันจะต้องมีความน่าเชื่อถือ ในส่วนของตัวดูดอีเจ็คเตอร์ ต้องไม่อุด, จุก (throtted) เพราะจะทำให้อีเจ็คเตอร์ไม่เสถียร และถ้าความดันสมบูรณ์ของคอลัมน์ มีช่วงการยอมรับการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงของความดันบรรยากาศแล้ว ควรจะใช้อุปกรณ์วัดความดันสมบูรณ์ด้วย สำหรับวิธีนี้สามารถลดการสะสมของคอนเดนเสดที่ส่งผลทำให้การวัดผิดพลาดได้ 3 หนทาง

(1) ให้ระดับอุปกรณ์วัดอยู่ที่ระดับเดียวกับแท็ป (tap) และเป็นแบบแนวนอน

(2) อยู่ระดับเหนือแท็ป แต่ต้องมีส่วนที่ปล่อยสู่อากาศ (air-purge)

(3) อยู่ระดับเหนือแท็ป

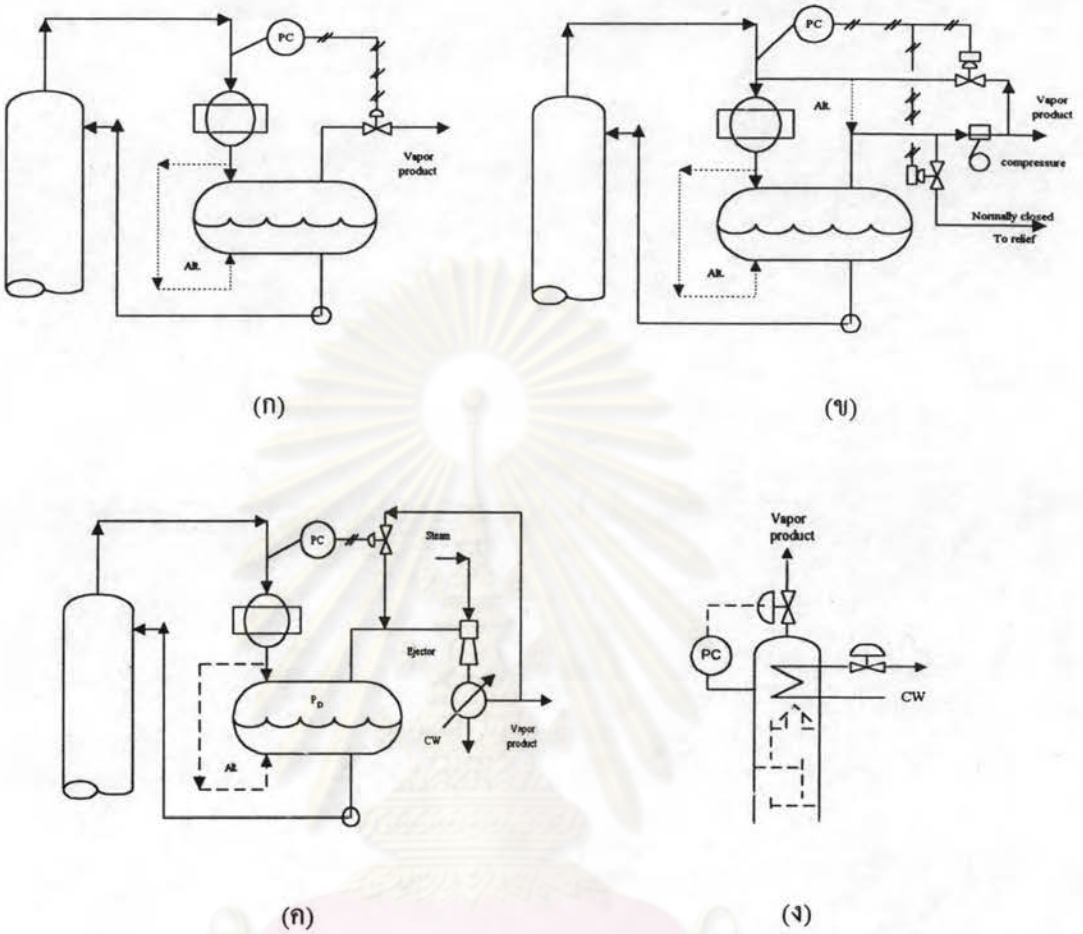
และเพื่อป้องกันการสะสมของคอนเดนเสดก็ควรใช้ฉนวนหรือให้ความร้อนแก่เส้นทางนั้น (คือให้อุณหภูมิในเส้นทางนั้นคงที่)

นั่นคือสำหรับวิธีการควบคุมที่สปิลแบ็คนั้นสามารถใช้กับความดันของคอลัมน์ก็ต่อเมื่อผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอนั้นมีการถูกอัด

ความแตกต่างของวิธี A-2 (รูป 2.6ข) กับวิธี A-3 (รูป 2.6ค) เป็นการปล่อยไอที่สปิลแบ็คในคอลัมน์สูญญากาศ ในขณะที่วิธี A-2 เป็นการปรับที่การอัดไอที่สปิลแบ็คในคอลัมน์ที่ใช้ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศและมักมีการส่งผ่านผลิตภัณฑ์ไอต่อไปยังอุปกรณ์ที่มีความดันสูงกว่า (เช่น คอลัมน์กลั่นแยกปิโตรเลียม และคอลัมน์แตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา)

จากวิธี A-1, A-2 และ A-3 ระดับของตัวถังรองรับจะปรับจากอัตราการควบแน่น แต่สำหรับวิธี A-4 (รูป 2.6ง) นั้นซึ่งเครื่องควบแน่นอยู่ภายในคอลัมน์ การควบคุมอัตราการควบแน่นจะทำได้ยาก อาจจะทำได้โดยการใช้ตัวควบคุม BTU (ดูรูป 2.12e) รักษาการทำงานของเครื่องควบแน่นและอัตราการรีฟลักซ์เข้าคอลัมน์ให้คงที่

การออกแบบท่อของผลิตภัณฑ์ไอที่ดี จะไม่เป็นการรบกวนต่อวิธีการควบคุมข้างต้น ปัญหาที่มักพบ (Kister, 1987) ก็คือการสะสมของเหลวในเส้นทางเชื่อมระดับต่ำ (low leg) ที่ใช้ในการลดความดันของผลิตภัณฑ์ ดังวิธี A-5 (รูป 2.6จ) จะส่งผลรบกวนต่อการควบคุมความดัน ซึ่งของเหลวที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะเกิดจากการติดไปของของเหลว (liquid entrainment) หรือการควบแน่นที่บรรยากาศหรือทั้งสองอย่าง ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงเส้นทางเชื่อมระดับต่ำดังกล่าว โดยจัดให้ระบบการวางท่อของทั้งคอนเดนเสด และสายของไอไหลเข้าสะดวกในที่ว่างของรีฟลักซ์ดรัม เพื่อที่จะลดโอกาสของการปั่นป่วนต่อของเหลวในดรัม และความไม่คงตัวของการไหลไอ เพราะว่าต้องการให้การไหลของไอที่เข้าและออกจากรีฟลักซ์ดรัมคงที่ ตัวอย่างเช่น ระบบการไล่สารโดยการผ่านน้ำเข้าไปในส่วนใส่สารที่มีการนำกลับซัลเฟอร์ (sulfur recovery plant with sour water stripper feed)



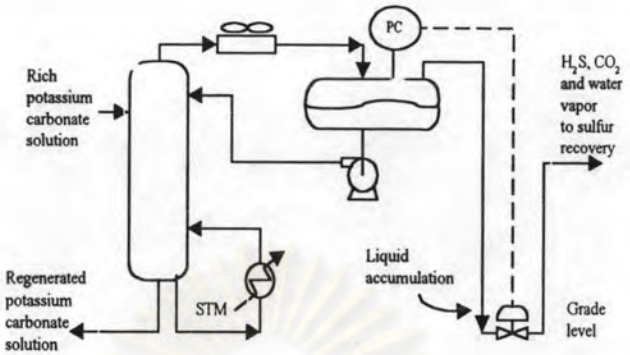
รูปที่ 2.6 แสดงวิธีการควบคุมความดัน โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของไอผลิตภัณฑ์ยอดหอ

(ก) วิธี A-1 ปรับที่อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ ใช้กับคอลัมน์แบบบรรยากาศ

(ข) วิธี A-2 ปรับที่การปล่อยไอที่สปิลแบ็ค ใช้กับคอลัมน์แบบสูญญากาศ

(ค) วิธี A-3 ปรับที่การอัดไอที่สปิลแบ็ค ใช้กับคอลัมน์แบบความดันต่ำ

(ง) วิธี A-4 ปรับที่อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ ใช้กับคอลัมน์ที่มีเครื่องควบแน่นภายใน



(จ)

รูปที่ 2.6 (ต่อ) แสดงวิธีการควบคุมความดัน โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของไอผลิตภัณฑ์ยอดหอ

(จ) วิธี A-5 ปรับที่อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ เมื่อวางระบบท่อไม่ดี

ข. การใช้เครื่องควบแน่นแบบท่วม (Flooded condensers)

วิธีนี้เหมาะกับเครื่องควบแน่นแบบทั้งหมดที่ให้ผลิตภัณฑ์เป็นเฟสของเหลว ซึ่งพื้นผิวของเครื่องควบแน่นบางส่วนจะมีการท่วม (Flooded) ด้วยของเหลวตลอดเวลา อัตราการควบแน่นของตัวเครื่องควบแน่นจะขึ้นกับการปรับเปลี่ยนพื้นที่ในการท่วมทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในบริเวณที่ท่วม โดยการเปลี่ยนแปลงความร้อนแฝง (sensible heat) เมื่อความดันของคอลัมน์เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการไหลของคอนเดนเสดที่ออกมาจากเครื่องควบแน่นช้าลง ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ท่วมในเครื่องควบแน่นและเป็นการลดพื้นที่ว่างในการควบแน่นไอ ดังนั้นอัตราการควบแน่นจะลดลง

วิธี B-1 (รูป 2.7ก) แสดงเครื่องควบแน่นแบบท่วมชนิดหนึ่งที่มีวาล์วควบคุมอยู่ที่ขาออกของเครื่องควบแน่น โดยการปรับการไหลของคอนเดนเสดที่ออกมาจากเครื่องควบแน่น ขนาดวาล์วควบคุมจะมีขนาดเล็ก และวางอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับรีฟลักซ์ดรัมให้มากที่สุดเพื่อ

ที่จะให้ได้เฮดมากที่สุด (Chin, 1979) วิธีนี้ถือเป็นวิธีที่ง่าย, มีความเป็นเชิงเส้น และรักษาความดันของคอลัมน์และรีฟลักซ์ให้เท่ากันเพื่อความเหมาะสม

ท่อขาออกของเครื่องควบแน่นที่จะเข้าดรัมอาจจะเข้าที่ระดับสูง หรือต่ำกว่าระดับของเหลว Chin (1979) กล่าวว่าควรจะให้เข้าที่ระดับสูงกว่าระดับของเหลว เพื่อที่จะได้ไม่เป็นการรบกวนระดับของเครื่องควบแน่น ส่วน Buckley (1985) แนะนำว่าควรจะให้เข้าที่ระดับต่ำกว่าเพื่อให้ของเหลวที่เย็นเกิดขึ้นที่บริเวณติดกับส่วนล่างของดรัม ถ้าเข้าที่เหนือระดับของเหลว ปัญหาที่พบ คือ เมื่อของเหลวที่เย็นต่ำ (subcooled liquid) ที่อยู่เหนือระดับของเหลวในดรัม อาจจะทำให้ไอในดรัมมีการยุบตัวลง และเมื่อไอสัมผัสกับของเหลวจะส่งผลทำให้เกิดการปั่นป่วนของความดัน การเพิ่มความยาวท่อของเหลวที่เข้าดรัม จะเป็นการช่วยปิดกั้นไม่ให้ไอมีการผ่านไปยังเครื่องควบแน่น

วิธีควบคุมนี้จะไม่สามารถใช้งานได้ถ้าไม่มีเส้นรักษาความดันให้เท่ากัน (pressure-cqualizing line) (Chin, 1979 และ Hollander, 1957) ซึ่งในกรณีที่ไม่มีเส้นนี้ ความดันในรีฟลักซ์ดรัมจะไม่คงที่ สำหรับขนาดของเส้นรักษาความดันให้เท่ากันนั้น ในกรณีที่ของเหลวเย็นต่ำ เข้าดรัมที่ระดับต่ำกว่าระดับของเหลวจะใช้ขนาดของเส้นดังกล่าวเล็กกว่าในกรณีเข้าที่ระดับสูงกว่า

วิธี B-2 (รูปที่ 2.7ข) แสดงรีฟลักซ์ดรัมแบบท่วม นั่นคือไม่ต้องมีการควบคุมระดับที่รีฟลักซ์ดรัม เนื่องจากรีฟลักซ์ดรัมจะเต็มไปด้วยของเหลว หรืออาจไม่จำเป็นที่จะต้องมีรีฟลักซ์ดรัมก็ได้ ตัวควบคุมความดันจะควบคุมที่การไหลของดิสทิเลตโดยตรง ซึ่งการควบคุมการไหลของดิสทิเลตมักจะมีการปั่นป่วน จึงต้องการการควบคุมความดันแบบแน่นอน การ

ปั่นป่วนดังกล่าวอาจจะส่งผลต่อหน่วยถัดไป ดังนั้นการควบคุมดิสทิเลตด้วยวิธีนี้จึงไม่เหมาะสมกับกรณีที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ได้นำไปเก็บไว้เลย

วิธีนี้บางครั้งจะใช้ควบคุมการไหลของรีฟลักซ์ แต่ไม่นิยมในทางปฏิบัติ เนื่องจากการไหลของรีฟลักซ์จะมีการปั่นป่วนกว่าการไหลของผลิตภัณฑ์ และส่งผลต่อความไม่เสถียรของคอลัมน์ แต่ Chin (1979) กล่าวว่าวิธีนี้นิยมใช้กับดรงแยกแกสธรรมชาติ

Shinskey (1975) กล่าวว่าตัวควบคุมความดัน ควรจะปรับเปลี่ยนที่อัตราการไหลของรีฟลักซ์ หรือคอนเดนเสด มากกว่าที่ดิสทิลเลต ยกเว้นถ้าดิสทิลเลตมีอัตราการไหลสูง และนำไปเก็บโดยตรง เหตุผลอยู่ที่ตัวแปรปรับเป็นดิสทิลเลต

(1) ถ้าอัตราการไหลของดิสทิลเลตน้อยกว่าอัตราการไหลของรีฟลักซ์ จะส่งผลต่อความดันของคอลัมน์น้อยกว่า

(2) การเปลี่ยนแปลงตัวรบกวนเนื่องจากความร้อนจะรบกวนสมดุลมวลสารของคอลัมน์ และรบกวนต่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์

(3) การเปลี่ยนแปลงตัวรบกวนเนื่องจากความร้อนจะรบกวนคอลัมน์ที่สารป้อนมาจากสายดิสทิลเลต

การสะสมของสารที่ไม่สามารถควบแน่นในดรัมในวิธี B-2 นี้ อาจจะส่งผลทำให้ดรัมไม่ท่วม และรบกวนการควบคุมได้ ถ้าการสะสมดังกล่าวไม่ได้เกิดขึ้นบ่อยนัก ใช้วิธีการปล่อยแบบแมนวล (manual) ที่ด้านบนของดรัมเพื่อรักษาสภาวะการทำงาน แต่ถ้าการสะสมดังกล่าวเกิดขึ้นบ่อย หรือคอลัมน์ไม่ได้ทำงานตลอด ก็ควรใช้การปล่อยแบบอัตโนมัติ

วิธี B-3 (รูป 2.7ค) แสดงรีฟลักซ์ดรัมแบบท่วม ที่มีการปล่อยแบบอัตโนมัติที่สามารถใช้งานได้ดี ซึ่งมีการเพิ่มตัวควบคุมความดันตัวที่ 2 (PC No.2), ตัวควบคุมระดับ และวาล์วควบคุมที่สายปล่อย โดยที่เซ็ทพอยท์ของ PC No.2 จะต่ำกว่าที่ตัวควบคุมความดันธรรมดา (PC No. 1) เมื่อดรัมเต็ม ตัวควบคุมระดับจะรักษา PC No.2 ให้ปิด และวาล์วปล่อยจะปิด สำหรับกรณีดรัมไม่เท่ากัน (เมื่อเกิดการสะสมของสารที่ไม่ควบแน่นจะแสดงออกมาที่มีการลดระดับของเหลวในดรัม เมื่อระดับลดลงจะกระตุ้นให้ PC No.2 ที่ต่ำกว่า PC No.1 จึงทำให้วาล์วปล่อยเปิด ในขณะที่ความดันลดลง, วาล์ว PC No.1 จะปิดทำให้ระดับในดรัมเพิ่มขึ้น และเมื่อดรัมเต็ม ตัวควบคุมระดับจะไปทำให้ PC No.2 เปิด และวาล์วปล่อยปิด

ถ้าผลิตภัณฑ์ไม่ได้ถูกทำให้เย็นต่ำ และมีความดันมากกว่าที่เก็บผลิตภัณฑ์ ควรเก็บผลิตภัณฑ์จากส่วนดาวน์สตรีมของรีฟลักซ์ดรัม และถ้าผลิตภัณฑ์เก็บถัดจากดรัมโดยตรง (วิธี B-3) อาจจะเกิดการแฟลช (flashing) ที่ส่วนดาวน์สตรีมของวาล์วควบคุม หรืออาจจะทำให้การเก็บผลิตภัณฑ์ทำได้ยากเมื่อความดันในที่เก็บสูง ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้ไม่มีความเสถียร หรือมีของเหลวที่มากเกินพอไหลย้อนกลับเข้าเครื่องควบแน่น เป็นการลดประสิทธิภาพของการควบแน่น

วิธี B-4 (รูป 2.7ง) แสดงการควบคุมความดันโดยใช้บายพาสของไอร้อน (hot vapor bypass) หรือเครื่องควบแน่นแบบจุ่ม "submerged condenser" ตัวเครื่องควบแน่นจะอยู่ในตำแหน่งต่ำกว่าระดับของเหลวในดรัม จะวางอยู่ใกล้กับระดับพื้น ทำให้มีระดับของคอนเดนเสด (ซึ่งเครื่องควบแน่นอาจเป็นแบบแนวตั้ง หรือแนวนอน) ส่วนรีฟลักซ์ดรัมต้องอยู่สูงกว่าเครื่องควบแน่นให้สูงพอที่จะทำให้เกิดแรงส่งของปั๊มได้ ส่วนคอนเดนเสดจะต้องถูกทำให้เย็น

ต่ำ เพื่อให้ผิวสัมผัสของเหลวในดรัมมีอุณหภูมิ เพื่อทำให้เกิดความดันของไอแตกต่างที่มากพอที่จะทำให้คอนเดนเสดไหลจากเครื่องควบแน่นเข้าไปในดรัมได้ และเมื่อความดันคอลัมน์เพิ่มขึ้นตัวควบคุมความดันจะปิดวาล์วควบคุม เป็นการลดการควบแน่นที่ผิวสัมผัสของดรัมและลดอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสดรัม อีกทั้งลดความดันไอของดรัม เมื่อมีความดันแตกต่างระหว่างเครื่องควบแน่นและดรัม ก็จะทำให้เป็นแรงส่งให้ของเหลวออกจากเครื่องควบแน่นเข้าสู่ดรัม นั่นคือการเพิ่มผิวสัมผัสการควบแน่นในเครื่องควบแน่นจะเป็นการเพิ่มอัตราการควบแน่น

การจัดวางบายพาสของไอร้อนมีข้อดีตรงที่ช่วยลดโครงสร้างเสริมเครื่องควบแน่นอื่น ๆ ง่ายต่อการบำรุงรักษา มีการใช้วาล์วควบคุมขนาดเล็ก และให้ผลการตอบสนองที่เร็ว จากข้อดีดังกล่าววิธีนี้จึงสามารถทำให้รูปแบบการจัดวางที่เหมาะสม เป็นการประหยัดการใช้เครื่องมือ, อุปกรณ์ติดตั้ง และการบำรุงรักษา สำหรับระบบที่มีการติดตั้งขนาดใหญ่ โดยเฉพาะถ้าใช้เครื่องควบแน่นเรียงกันเป็นแถวมากกว่าใช้แบบเดี่ยว จะช่วยประหยัดได้มากขึ้น

อย่างไรก็ตามการจัดวางบายพาสของไอร้อนก็มีข้อเสีย กล่าวคือการทำงานจะมีปัญหาเพราะว่าการเกิดของเหลวในเส้นทางเชื่อมระหว่างถังรองรับ กับดรัม และยังเกิดผลกระทบต่อกันระหว่างดรัม และระดับของเหลวในเครื่องควบแน่น และจากการแกว่งไปมา (oscillation) ของท่อรูปตัวยู (U tube) ทางแก้ไขผลกระทบต่อกันดังกล่าวควรจะให้ตัวควบคุมความดันมีการปรับจูนที่ให้การควบคุมแน่นอน กว่าตัวควบคุมระดับของดรัม เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะเกิดปัญหาผลตอบสนองที่ตรงข้าม นั่นคือวาล์วที่บายพาสจะปิดซึ่งจะทำให้ความดันเพิ่มขึ้นจนกระทั่งระดับของเครื่องควบแน่นตกลง นั่นคือจะต้องแน่ใจว่าคอนเดนเสดเป็นถูกทำให้เย็นต่ำพอที่จะให้ของเหลวไหลผ่านไปได้ และการควบแน่นของไอร้อนไม่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของ

ดรัม สำหรับการทำงานอาจจะมีปัญหาเกิดขึ้นถ้าผิวสัมผัสของเหลวในดรัมถูกรบกวน (Chin, 1979) และเพื่อที่จะให้วิธีนี้สามารถทำงานได้ดีควรจะรักษาความแตกต่างความดันไอไม่ให้สูง นักควรจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และบริเวณที่ว่างของไอในรีฟลักซ์ ดรัมจะต้องการหุ้มฉนวนเพื่อลดผลกระทบจากพายุฝน ผลของความไม่เสถียรดังกล่าวมาแล้ว ทั้งหมดข้างต้นได้เกิดขึ้นดังเช่น การใช้กับของผสมที่ช่วงจุดเดือดแคบ และการใช้ในกรณีความดันสูง นั่นคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเล็กน้อย จะส่งผลอย่างมากมายต่อการแยก (split) ของการไหลของไอด้านบนระหว่างไปเครื่องควบแน่นและบายพาส แต่ในกรณีที่ใช้งานกับของผสมที่มีช่วงจุดเดือดกว้างใน Rayliegh fractionator (องค์ประกอบหนักสามารถควบแน่นได้เลยโดยไม่มีการผสมกับของผสมที่เหลือ) ปริมาณของไอเย็นต่ำ และอัตราไหลของไอที่บายพาส จะสามารถประเมินได้เพียงคร่าว ๆ ทำให้การออกแบบทำได้ยาก จึงต้องกำหนดขนาดและออกแบบอย่างง่าย และสุดท้ายการรั่วของไอที่วาล์วบายพาสเมื่ออยู่ในตำแหน่งที่ปิด ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่นต่ำลง ซึ่งได้มีรายงานแสดงไว้ (โดย Lieberman, 1985) กล่าวโดยสรุปวิธีการควบคุมโดยใช้บายพาสของไอร้อน มีข้อดีอยู่หลายข้อแต่การใช้งานมักจะเกิดปัญหาดังนี้

การวางท่อที่ถูกต้องสำหรับวิธีนี้ จะต้องให้ไอของบายพาสไหลเข้าที่ส่วนว่างของรีฟลักซ์ดรัม โดยที่ระหว่างทางนั้นจะต้องไม่มีของเหลวสะสมอยู่ จึงควรใช้ท่อที่วางในแนวตั้งเพื่อให้ไหลเข้าดรัมโดยสะดวก และในกรณีที่มีสารไม่ควบแน่น จำเป็นต้องใช้ท่อระบายที่ตัวเครื่องควบแน่นและที่ดรัม ที่ระบายของเครื่องควบแน่นสามารถทำได้ที่บริเวณว่างของดรัมได้ โดยสิ่งสำคัญก็คือของเหลวจากเครื่องควบแน่นจะต้องเข้าที่ระดับต่ำกว่าผิวสัมผัสของเหลวใน

รีฟลักซ์ดรัม ตำแหน่งเข้าที่เหมาะสมที่สุด คือ ส่วนล่างของดรัม ถ้าของเหลวเย็นต่ำเข้าที่บริเวณว่างของดรัม ซึ่งเป็นบริเวณที่มีไอมีอุณหภูมิสูงกว่า 100°F จะทำให้เกิดการควบแน่นอย่างรวดเร็วส่งผลทำให้เกิดการดูดของเหลวในเส้นทางเชื่อมระหว่างดรัม และเครื่องควบแน่นเข้าดรัมภายในไม่กี่วินาที

วิธี B-5 (รูป 2.7จ) เป็นวิธีบายพาสของไอร้อน ที่มีการวางท่อของระบบไม่ดี ทำให้เกิดการปั่นป่วนของความดัน โดยไม่สามารถรักษาความดันคอลัมน์ให้คงที่ได้ จากรูป 2.7จ ของเหลวที่ถูกทำให้เย็นต่ำจะมีการผสมกับไอที่จุดกลั่นตัว (dew point) ทำให้ไอมีการยุบตัวลง (collapse) ณ จุดที่เกิดการผสม การไหลของไอที่ยุบตัวขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของการทำให้เย็นต่ำ, อุณหภูมิของส่วนยอดหอ และอัตราการยุบตัวนี้แสดงถึงการปั่นป่วนของความดัน ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยแยกสายของเหลวออกจากสายไอ และให้สายของเหลวเข้าดรัมที่ระดับต่ำกว่าผิวสัมผัสของเหลว ส่วนสายไอเข้าที่ระดับเดิม

วิธี B-6 (รูป 2.7ฉ) เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจาก B-4 ที่ ความดันของดรัมถูกควบคุมด้วยความดันของคอลัมน์ โดยมีลูพควบคุม 2 ลูพ การทำงานคล้ายกับ B-4 การควบคุมความดันของคอลัมน์ จะปรับเปลี่ยนพื้นที่ในการควบแน่น โดยปรับการไหลคอนเดนเสดที่ออกจากเครื่องควบแน่น มักใช้เมื่อในกรณีที่วิธี B-4 (ที่วาล์วควบคุมอยู่ที่ขาออกของเครื่องควบแน่น) ไม่สามารถใช้ได้ เพราะว่าตัวเครื่องควบแน่นแบบยกสูงที่ใช้ไม่แน่นอนที่จะให้การไหลฯของคอนเดนเสดที่เข้าดรัมตามแรงโน้มถ่วง (ตัวอย่างเช่น เครื่องควบแน่นแบบให้ความเย็นโดยใช้อากาศในกระบวนการกลั่นน้ำมัน ถูกติดตั้งให้สูงถึงประมาณ 15 ฟุต และส่วนบนของดรัมอยู่ห่างจากตัวเครื่องควบแน่นเล็กน้อย) ซึ่งวิธี B-6 จะเหมาะกว่า โดยประสบการณ์แล้ววิธีนี้จะใช้

ได้ดีเมื่อเครื่องควบแน่นเป็นการไหลแบบพาสเดี่ยว (single-pass) และวางแบบเอียง เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาระหว่างการทำงานโดยใช้ตัวควบคุม 2 ตัว โดยใช้ตัวควบคุมเพียงตัวเดียวที่แบ่งช่วงการทำงาน (split-range) ให้กับวาล์วควบคุม 2 ตัว

วิธี B-7 (รูป 2.7ช), B-8 (รูป 2.7ช) แสดงเครื่องควบแน่นแบบท่วมคล้ายกับแบบ B-1 แต่ตำแหน่งของวาล์วควบคุมอยู่ที่เครื่องควบแน่นขาเข้า วิธีนี้ด้อยกว่าวิธีที่ B-1 เนื่องจากต้องการวาล์วควบคุมขนาดใหญ่กว่า, ยากที่จะเข้าใจวิธีการทำงาน และส่งผลกระทบต่อการควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำ เส้นขาออกของเครื่องควบแน่นต้องเข้ารีฟลักซ์ดรัมที่ระดับต่ำกว่าของเหลวในดรัม และต้องการเส้นรักษาความดันเท่ากันเช่นเดียวกับวิธี B-1

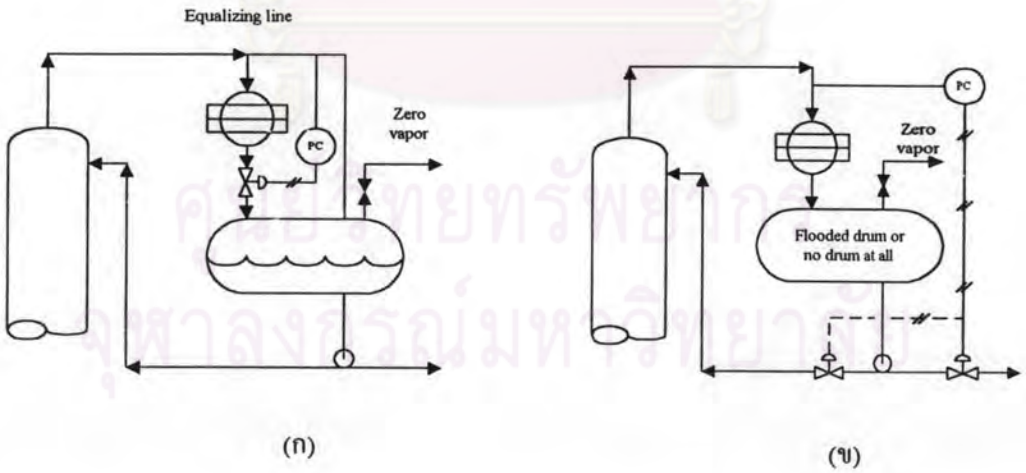
วิธีนี้มีข้อจำกัด คือในกรณีที่วาล์วปิดเต็มที่ (fully close) (ได้แก่ ขณะที่เริ่มเดินเครื่องทำงาน) ไอที่อยู่ช่วงต่ำกว่าวาล์วจะมีการควบแน่นอย่างทันทีทันใด ทำให้ของเหลวไหลเข้าดรัมอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุให้เกิดสภาวะการกระแทกที่ของเหลว ทำให้การทำงานมีการแกว่ง ปัญหานี้แก้ไขได้โดยเปลี่ยนวาล์วไม่ให้เป็นแบบปิดเต็มที่

ส่วนวิธี B-7 (รูป 2.7ช) เป็นเครื่องควบแน่นชนิดใช้ของเหลวเป็นสารทำความเย็น ตัวควบคุมความดันจะปรับเปลี่ยนพื้นที่ในการควบแน่น โดยการปรับอัตราการไหลไอเมื่อวาล์วควบคุมปิด ทำให้ความดันในเครื่องควบแน่นลดลง และระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นจะเพิ่มขึ้น ข้อดีของวิธีนี้เป็นวิธีที่มีการใช้งานง่าย, ความดันในดรัม กับในคอลัมน์เท่ากัน และเหมาะกับกรณีที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอไม่มีแกสอื่นปนเปื้อน ข้อเสียเป็นการทำงานเข้าใจยากกว่าวิธีอื่น ท่อคอนเดนเสตจะต้องออกแบบสำหรับการไหลตามแรงโน้มถ่วง และต้องพิจารณาถึง

เครื่องควบแน่นแบบยกสูงได้, ตำแหน่งวาล์วควบคุม, ขนาดและระบบการวางท่อ โดยที่วาล์วควบคุมจะต้องใหญ่กว่าของวิธี B-1

วิธี B-8 (รูป 2.7ช) เป็นวิธีคล้ายกับวิธี B-7 โดยใช้เครื่องควบแน่นชนิดทำให้เย็นด้วยอากาศ และมีคำแนะนำเพิ่มจากวิธี B-7 สองข้อดังนี้ ข้อแรก พาสของท่อในเครื่องควบแน่น จะมีการจัดวางที่เหมาะสมกว่าวิธีอื่น และถ้าใช้พาสเดี่ยวจะดีกว่า ข้อสอง นักออกแบบบางคนใช้เครื่องควบแน่น เป็นพาสเดี่ยว และเอียงเครื่องควบแน่นด้วยจะดีกว่าการวางแนวนอน เพื่อการออกแบบที่มีการปรับเปลี่ยนพื้นที่การควบแน่น

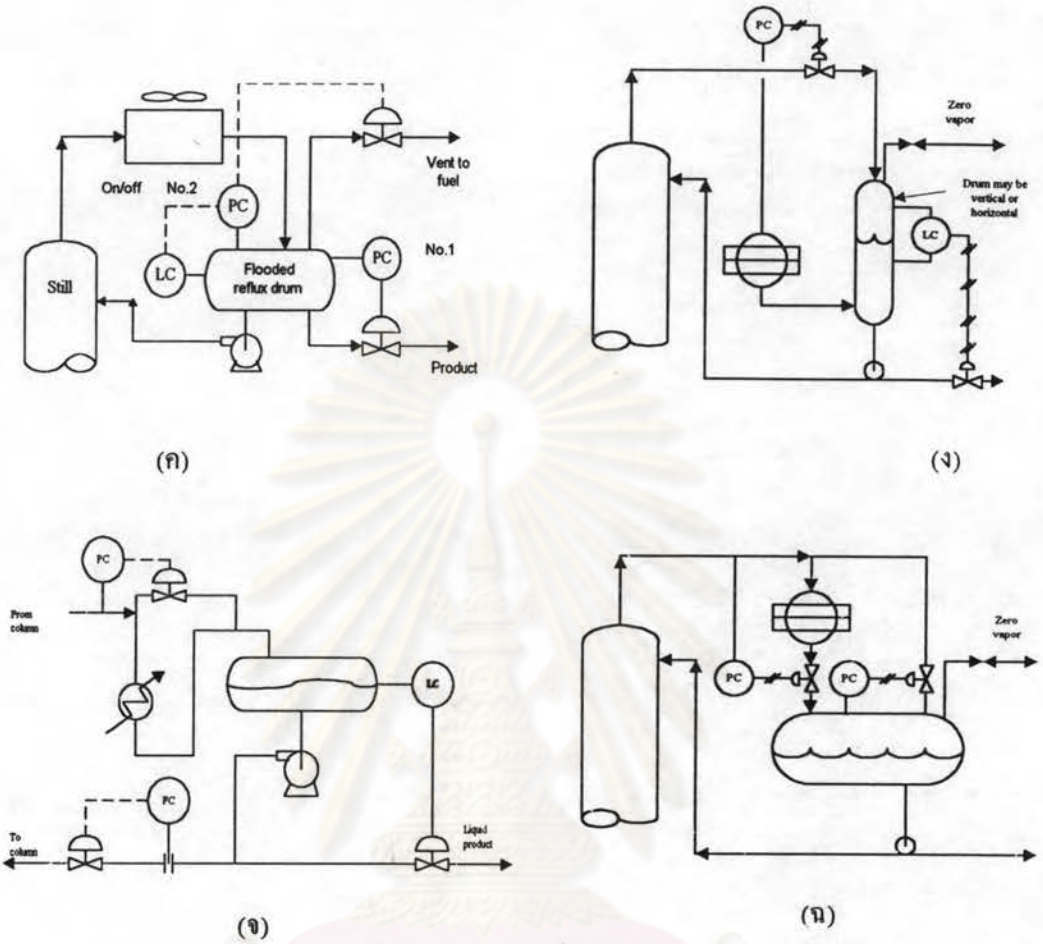
นักออกแบบควรจะวางวาล์วควบคุมให้ใกล้รีฟลักซ์ดรัม เท่าที่จะทำได้เพื่อให้ได้การไหลที่คงตัวสูงสุดของเครื่องควบแน่น และให้ได้ผลกระทบที่น้อยที่สุดของของเหลวที่อยู่ในท่อแนวตั้งของวาล์วควบคุม



รูปที่ 2.7 แสดงวิธีการควบคุมความดัน โดยการปรับเปลี่ยนพื้นที่ท่วมของเครื่องควบแน่น

(ก) วิธี B-1 วาล์วควบคุมอยู่ที่ขาออกจากเครื่องควบแน่น

(ข) วิธี B-2 เมื่อใช้รีฟลักซ์ดรัมแบบท่วม



รูปที่ 2.7 (ต่อ) แสดงวิธีการควบคุมความดัน โดยการปรับเปลี่ยนพื้นที่ท่วมของเครื่องควบแน่น

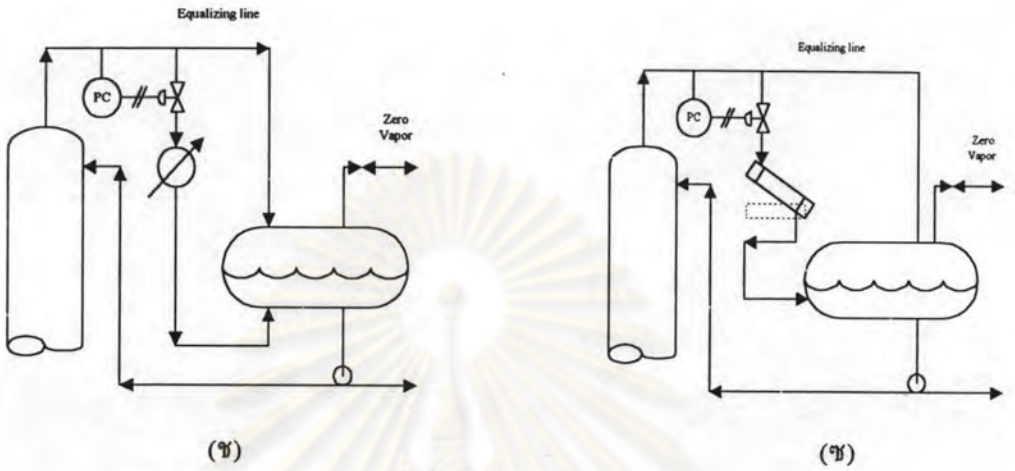
(ค) วิธี B-3 เมื่อใช้รีฟลักซ์ดรัมแบบท่วม และมีท่อระบายสารที่ไม่ควบแน่นอัตโนมัติ

(ง) วิธี B-4 เมื่อใช้บายพาสของไอร้อน

(จ) วิธี B-5 เมื่อใช้บายพาสของไอร้อน ที่มีระบบท่อไม่ดี

(ฉ) วิธี B-6 วาล์วควบคุมอยู่ที่ขาออกจากเครื่องควบแน่น กรณีที่เครื่องควบแน่นไม่สามารถยกสูงได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ช) (ซ)

รูปที่ 2.7 (ต่อ)แสดงวิธีการควบคุมความดัน โดยการปรับเปลี่ยนพื้นที่ท่วมของเครื่องควบแน่น

(ช) วิธี B-7 วาล์วควบคุมอยู่ที่ขาเข้าเครื่องควบแน่น เป็นของเหลว

(ซ) วิธี B-8 วาล์วควบคุมอยู่ที่ขาเข้าเครื่องควบแน่น เป็นอากาศ

ค. การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำความเย็น (Coolant flow variations)

เป็นการปรับอัตราการไหลของสารทำความเย็นของเครื่องควบแน่น เพื่อควบคุมความดัน

วิธี C-1 (รูปที่ 2.7ก) เป็นรูปแบบที่ใช้กับการใช้น้ำเป็นสารทำความเย็น ผลการตอบสนองจะช้า และไม่เป็นเชิงเส้น คล้ายกับกรณีของรีบอยเลอร์ที่ใช้ของเหลวร้อนเป็นสารให้ความร้อน สำหรับน้ำหล่อเย็นนั้นจะมีตะกอนเกิดขึ้น โดยเฉพาะการใช้งานที่อัตราการไหลต่ำ (ความเร็วน้ำหล่อเย็นต่ำ และอุณหภูมิน้ำขาออกสูง) จากประสบการณ์สำหรับเครื่องควบแน่นที่ใช้น้ำหล่อเย็น เมื่อมีตะกอนสะสมเพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิน้ำขาออกสูงถึง 180-200 องฯฟาเรนไฮต์ และถ้าอุณหภูมิของดิสทิเลตสูง อาจจะส่งผลให้น้ำในเครื่องควบแน่นเดือดได้ ซึ่งมี

ผลต่อระบบความปลอดภัย และสำหรับหน้าหนาวความเร็วจะต่ำ ยังส่งผลให้เกิดการแข็งตัวของน้ำได้ ดังนั้นจึงควรรักษาอุณหภูมิของน้ำขาออกจากเครื่องควบแน่นให้ต่ำกว่า 120-130 องศาฟาเรนไฮต์ ตลอดเวลา และไม่ควรให้ความเร็วของน้ำหล่อเย็นต่ำกว่า 3-5 ฟุต/วินาที

ตัวควบคุมความดันจะลดความดัน โดยการเพิ่มอัตราการไหลของสารทำความเย็น และในทางกลับกันจะเพิ่มความดัน โดยการลดอัตราการไหลของสารทำความเย็น

ระบบนี้สามารถใช้งานได้หลายอย่าง ถ้ามีการออกแบบอย่างระมัดระวัง โดยเฉพาะการใช้งานในช่วงความเร็วต่ำ โดยต้องคำนึงความเร็ว และอุณหภูมิน้ำขาออกให้เหมาะสมด้วย

ข้อแนะนำในการใช้เทคนิคนี้แสดงดังข้างล่าง

1. ใช้โอเวอร์ไรด์จากอุณหภูมิน้ำขาออก เพื่อรักษาอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินไป

2. ใช้ลิมิตเตอร์ หรือโอเวอร์ไรด์การไหล เพื่อป้องกันความเร็วของน้ำไม่ให้ต่ำกว่าขีดจำกัดข้างต้น

3. ถ้าอุณหภูมิของน้ำมีความผันแปรในช่วงกว้าง ควรใช้วาล์วขนาดเล็ก 1 ตัว และวาล์วขนาดใหญ่ 1 ตัวต่อขนานกัน โดยปกติวาล์วน้ำหล่อเย็นมักจะทำงานได้ไม่ดี และมีแนวโน้มที่เปิดกว้างในหน้าร้อน และปิดในหน้าหนาว เป็นผลให้อัตราการไหลไม่คงที่ ดังนั้นจึงควรใช้วาล์วทั้งสองจัดในลักษณะแบ่งช่วงการทำงานกัน คือ ใช้วาล์วขนาดเล็ก (ซึ่งมักจะใช้สำหรับหน้าหนาว) เปิดก่อน แล้วค่อยเปิดวาล์วขนาดใหญ่

4. กรณีใช้งานที่ความเร็วสูง ควรใช้วิธี D-1, D-2 หรือ D-3 เพื่อที่จะทำให้ได้อุณหภูมิที่สูงพอ

5. ดีกรีของการถูกทำให้เย็นต่ำ ส่งผลต่อความว่องไวของระบบ จึงควรให้ภาระการรบกวนทางความร้อนทั้งหมดประมาณ 5% เพื่อการถูกทำให้เย็นต่ำ

6. สำหรับการใช้งานที่อัตราต่ำ สามารถใช้แกสเฉื่อยฉีดเข้าไปในเครื่องควบแน่น เพื่อลดสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนให้ต่ำลง โดยตัวควบคุมจะชดเชยโดยการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องควบแน่น การเพิ่มอัตราการไหลเข้าจะเป็นการลดอุณหภูมิขาออก การประยุกต์ใช้งานนี้แสดงโดย Hughart (1977)

7. การเปลี่ยนทิศทางการไหลของสารทำความเย็นของเครื่องควบแน่นจากทิศสวนกัน (counter current) เป็นทิศทางเดียวกัน (cocurrent) สามารถทำให้การถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่นต่ำลง คล้าย ๆ กับหัวข้อที่ 6 ที่จะส่งผลให้อุณหภูมิขาออกลดลง และเพิ่มอัตราการไหล อย่างไรก็ตามจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่นลดลง

วิธี C-2 (รูปที่ 2.7ข) เป็นรูปแบบที่ใช้สารหล่อเย็น ในการให้ความเย็นแก่เครื่องควบแน่น ตัวเครื่องควบแน่นเป็นแบบรีบอยเลอร์เค็ทเทิล (kettle condenser-reboiler) เพื่อต้มสารหล่อเย็นที่เป็นของเหลว วาล์วควบคุมความดันจะปรับที่กระแสสารหล่อเย็น เมื่อความดันคอลัมน์เพิ่มขึ้น ตัวควบคุมความดันจะเซ็ทให้ระดับของเหลวสารหล่อเย็นที่ต่ำลงถึงขีดกำหนด ซึ่งจะส่งผลถึงผิวสัมผัสของท่อและลดการไหลของสารหล่อเย็นที่เข้าตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

ผลการตอบสนองวิธีนี้ช้า เนื่องจากขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวหล่อเย็น แต่การทำงานก็ให้ผลที่น่าพอใจ แต่นักออกแบบบางท่าน (Hughart, 1977) ไม่ใช้วิธีนี้ เพราะให้ผลการตอบสนองช้านั่นเอง และมักไม่ได้ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ปกติวิธีนี้เหมาะสมในการปรับเปลี่ยนพื้นที่ในการควบแน่น และจะใช้เมื่อไอเป็นไอแบบเย็นต่ำ

วิธี C-3 (รูปที่ 2.7ค) เป็นทางเลือกของการจัดรูปแบบอื่นของการใช้สารหล่อเย็นคือ ให้ระดับของสารหล่อเย็นอยู่เหนือท่อควบแน่น และควบคุมความดันคอลัมน์ โดยการปรับวาล์วควบคุมในเส้นไอของสารหล่อเย็น การจัดรูปแบบนี้มีแนวโน้มที่จะให้เกิดสภาวะ การนำพาของเหลวออกจากเครื่องควบแน่น โดยเฉพาะในกรณีที่ความดันของสารหล่อเย็นมีการตกลงอย่างทันทีทันใด จะต้องมีวาล์วควบคุมเพิ่มอีก 1 ตัว วาล์วควบคุมที่เพิ่มเข้ามาเพื่อทำให้เพิ่มความแตกต่างของความดันที่จะทำให้ไอของสารหล่อเย็นปล่อยออกจนต่ำกว่าระดับความดันพื้นฐาน แต่ว่าจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน หรืออีกทางหนึ่ง คือ ปล่อยไอสารหล่อเย็นที่ความดันเดียวกับคอมเพรซเซอร์ ถึงแม้การเพิ่มความแตกต่างความดันนี้จะลดประสิทธิภาพของเครื่องควบแน่น แต่ผลตอบสนองการควบคุมด้วยวิธีนี้จะดีเยี่ยม

วิธี C-4 (รูปที่ 2.7ง) และ C-5 (รูปที่ 2.7จ) เป็นการจัดรูปแบบการเปลี่ยนแปลงการไหลของสารทำความเย็น สำหรับเครื่องควบแน่นแบบใช้อากาศ ตัวควบคุมจะปรับที่ความเร็วของใบพัด หรือระยะพิทช์ (pitch) ของใบพัด เพื่อควบคุมความดัน การจัดรูปแบบนี้จะให้พลังงานเต็มที่ และลดการใช้พลังงานของใบพัด แต่ต้องการการบำรุงรักษาสูงและต้องใช้ตัวปรับระยะพิทช์ใบพัด หรือมอเตอร์ปรับความเร็ว สำหรับการควบคุมระยะพิทช์ของใบพัดนั้นมักจะให้ผลการควบคุมที่ไม่แน่นอน ส่วนการควบคุมโดยใช้มอเตอร์ปรับความเร็วใบพัดจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า แต่ราคาค่อนข้างแพง

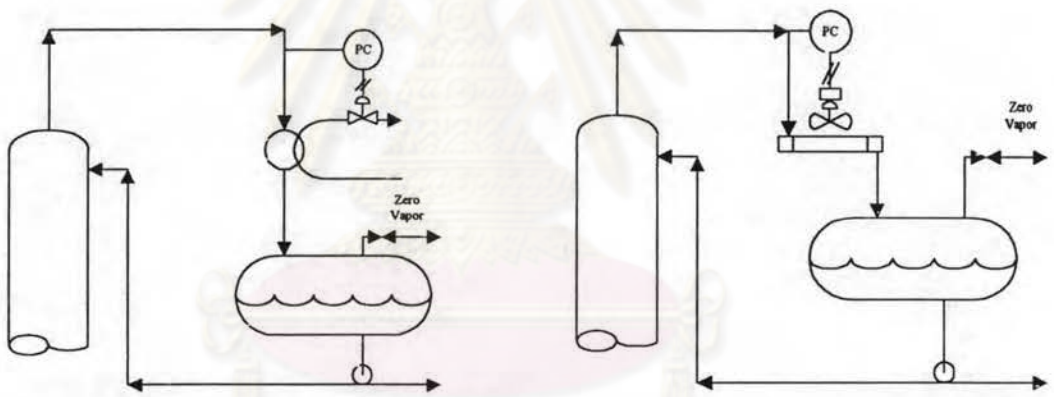
การควบคุมความเร็ว หรือระยะพิทช์ของใบพัดดังวิธี C-4 จะทำงานได้ดีในกรณีที่ใช้ใบพัดแบบดราฟท์โดยนำ (induced-draft) ซึ่งจะให้ผลไม่ดีในกรณีใบพัดแบบดราฟท์โดยบังคับ (forced-draft) และถ้ามีฝุ่น หรือตะกอน จะส่งผลกระทบต่อการควบแน่นมากกว่า ส่งผลต่อ

ความเร็ว หรือพิทช์ของใบพัด นั่นคือฝุ่นจะไปรบกวนการควบคุม จึงควรใช้หลังคาคลุมตัวทำความเย็นแบบอากาศนี้ ในการปรับระยะพิทช์ของใบพัดนั้น ควรปรับอย่างค่อยเป็นค่อยไป และระยะที่แน่นอน ควรปรับให้พอกับระยะที่จะทำให้ชดเชยการนำความร้อนได้ โดยที่ใช้กำลังของเครื่องควบแน่นต่ำๆ ถ้ากรณีที่เครื่องควบแน่นที่ใช้มีพัดลมมากกว่า 1 ตัว พัดลมทุกตัวต้องมีระยะพิทช์ไม่ต่างกัน

ส่วนในกรณีที่ไม่ต้องการติดตั้งหลังคา ก็ต้องใช้ใบพัดแบบดราฟท์โดยบังคับ เพื่อควบคุมความดันดัววิธี C-5 โดยการปรับมุมของบานเกล็ด (louvers) ถ้าตำแหน่งของบานเกล็ดอยู่สูงกว่าเครื่องควบแน่น จะช่วยป้องกันฝนให้เครื่องควบแน่นได้ด้วย สำหรับระบบการควบคุมแบบนี้จะต้องมีการออกแบบเชิงกลสำหรับมอเตอร์ที่ใช้ปรับบานเกล็ด ซึ่งการควบคุมด้วยระบบบานเกล็ดนี้มีการสูญเสียประสิทธิภาพของพลังงานเพียงบางส่วนซึ่งดีกว่า วิธีการปรับพิทช์ และความเร็วของมอเตอร์ แต่ตัวบานเกล็ด มักจะมีขนาดใหญ่, เสียหายได้ง่ายจากการเสียดสี, การเกิดสนิมเมื่อมีน้ำภายในระบบ และเปลืองค่าใช้จ่าย ในกรณีใช้แบตเตอรี่ของเครื่องควบแน่น ดังนั้นการเลือกชนิดเครื่องควบแน่นต้องพิจารณาที่ราคา, การบำรุงรักษา, กำลังงานที่ตก, วงจรอากาศ เป็นต้น

กรณีที่มีการใช้แบตเตอรี่ 1 ตัว สำหรับเครื่องควบแน่นหลายตัว ตัวเครื่องควบแน่นที่ต้องการควบคุมด้วยบานเกล็ด, พิทช์ใบพัด หรือมอเตอร์จะมีเพียงไม่กี่ตัว ส่วนตัวอื่นจะถูกควบคุมด้วยการสวิทช์ปิด/เปิดใบพัด เมื่อมีการถึงขีดจำกัดการควบคุม โดยที่สวิทช์ดังกล่าวจะทำงานแบบอัตโนมัติ

วิธี C-6 (รูปที่ 2.7ฉ) แสดงการควบคุมความดัน โดยการปรับราง (guide) ของเวนส์ (vanes) ที่อยู่ภายในของเทอร์โบเอ็กซ์แพนเดอร์ โดยปกติแล้วมักจะใช้วิธีนี้ควบคุมความดันของแกสในหอกลั่นเย็นแยกมีเธนออกยอดหอ (plant cryogenic demethanizers) การปรับรางของเวนส์จะเป็นการเปลี่ยนแปลงความเร็ว และกำลังของตัวเอ็กซ์แพนเดอร์ รวมถึงปริมาณการควบแน่นในตัวเอ็กซ์แพนเดอร์ด้วยระบบควบคุมนี้จะให้ผลตอบสนองที่เร็ว และผลการควบคุมที่ดี

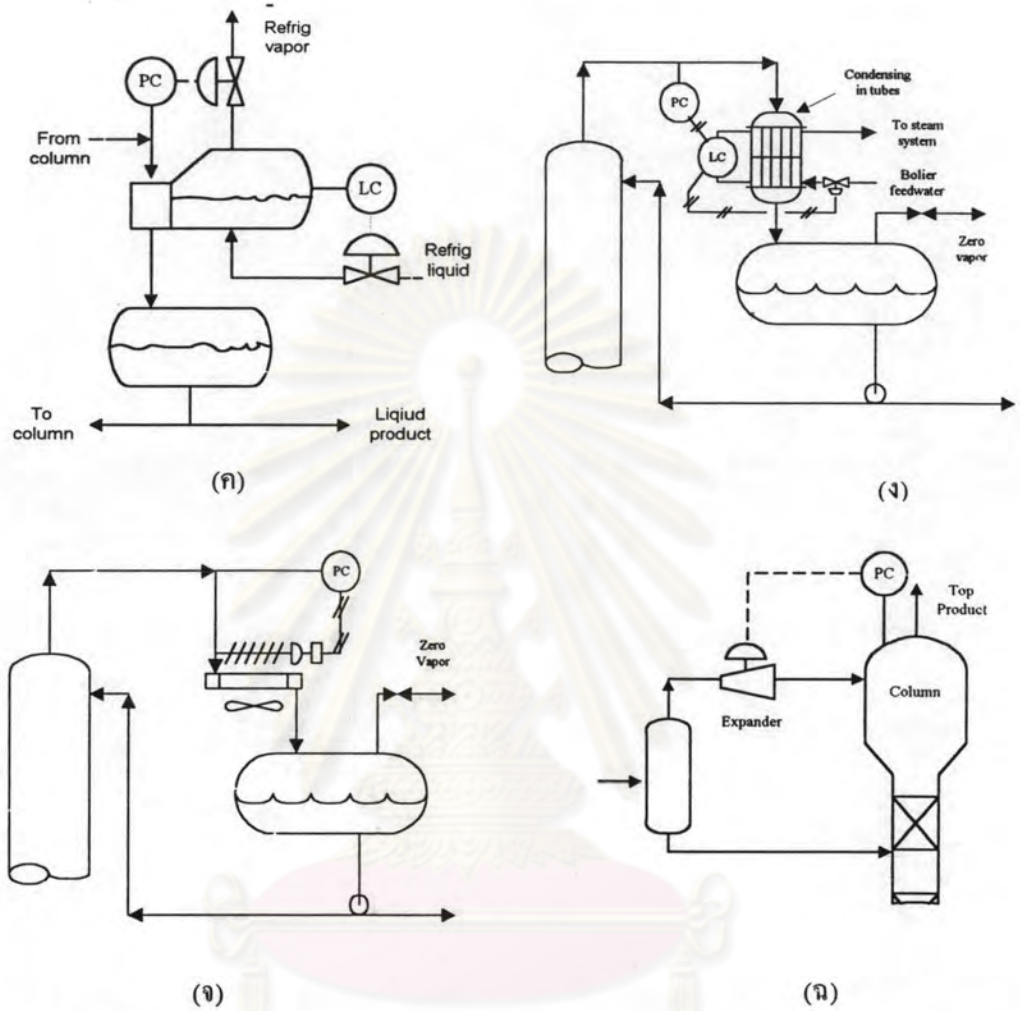


(ก) (ข)

รูปที่ 2.8 แสดงวิธีการควบคุมความดัน โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารตัวกลางให้ความเย็น

(ก) วิธี C-1 เมื่อใช้ของเหลวเป็นสารหล่อเย็น

(ข) วิธี C-2 เมื่อใช้สารทำความเย็น และควบคุมความดันจากการควบคุมระดับของเหลวในเครื่องควบแน่น



รูปที่ 2.8 (ต่อ) แสดงวิธีการควบคุมความดัน โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารตัวกลางให้ความเย็น

(ค) วิธี C-3 เมื่อใช้สารทำความเย็น และควบคุมความดันที่อัตราการไหลออกของสารทำความเย็น

(ง) วิธี C-4 เมื่อใช้อากาศเป็นสารหล่อเย็น และควบคุมความดันโดยการปรับระยะพิทช์ของใบพัด

(จ) วิธี C-5 ปรับที่มุมของบานเกล็ด

(ฉ) วิธี C-6 ควบคุมความดัน โดยการปรับเวนส์ที่เอกซ์แพนเดอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง. วิธีการควบคุมความดันอื่นๆ (Miscellaneous pressure control methods)

ในส่วนนี้จะแสดงวิธีอื่น ๆ ที่มีความหลากหลายในการควบคุมความดัน

วิธี D-1 (รูปที่ 2.9ก), วิธี D-2 (รูปที่ 2.9ข) , วิธี D-3 (รูปที่ 2.9ค) แสดงการควบคุมความดัน โดยใช้การไหลเวียนของของเหลว หรือสารทำความเย็น ที่มีการควบคุมอุณหภูมิขาเข้า หรือขาออกของสารทำความเย็น ซึ่งถ้าอุณหภูมิขาออกของสารทำความเย็นใกล้เคียงกับอุณหภูมิของดิสทิเลตควรควบคุมที่อุณหภูมิขาเข้าดีกว่า โดยวิธี D-1 เป็นกรณีที่ใช้กับน้ำหล่อเย็น วิธี D-2 เป็นกรณีที่ใช้กับอากาศหล่อเย็น ส่วนวิธี D-3 เป็นกรณีที่ใช้กับการระเหย (evaporation) ของอากาศเพื่อหล่อเย็น ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กับกระบวนการกลั่นน้ำมัน

วิธีนี้สามารถช่วยแก้ปัญหาในภาวะวิกฤติที่ความเร็วต่ำที่เกิดกับวิธี C-1 และยังมีความเป็นเชิงเส้น และความเร็วการตอบสนองเพิ่มขึ้นจากวิธี C-1 อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถนำกลับความร้อนได้สูงสุดด้วย บางครั้งเรียกว่าเป็นระบบ "hot liquid belt" ซึ่งมีการประหยัดพลังงานเป็นสำคัญ เมื่อความร้อนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และยังเป็นวิธีที่ให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นสูงสุด ซึ่งเหมาะกับเครื่องควบแน่นที่มีจุดแข็งตัวสูง ๆ

ข้อเสียของวิธีนี้ คือต้องการปั๊ม และผลตอบสนองจะช้ากว่าวิธีอื่นที่ใช้เครื่องควบแน่นแบบท่วม ซึ่งถ้าไม่มีข้อดีที่สามารถนำกลับความร้อนได้สูงสุด แล้ววิธีนี้จะเป็นวิธีที่มีการใช้พลังงานมากกว่าวิธีอื่น ๆ ที่คล้ายกัน คือใช้เครื่องควบแน่นแบบใช้อากาศ โดยการผสมอากาศที่ไหลเวียนกับอากาศที่ดูดเข้ามาใหม่ (fresh air) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะกับการใช้งานที่สภาวะเยือกเย็น (freezing climates)

วิธี D-4 (รูปที่ 2.9ง) และวิธี D-5 (รูปที่ 2.9จ) แสดงการควบคุมความดันโดยตัวควบคุมอยู่ที่กระแสยอดหอ ระบบนี้จะมีการสูญเสียพลังงาน ถ้าผลต่างอุณหภูมิระหว่างตัวกลางให้ความร้อน และการควบแน่นไม่สูงพอ โดยที่จะมีการใช้พลังงานปริมาณมากทั้งในคอลัมน์และปั๊มรีฟลักซ์ ระบบนี้ต้องการให้รีฟลักซ์ดรัมเปิดสู่แหล่งที่มีความดันคงที่ (เช่น บรรยากาศ) วาล์วควบคุมที่ใช้จะมีขนาดใหญ่ และต้องมีความต่างความสูง (head) ให้ปั๊มรีฟลักซ์ จากประสบการณ์ระบบนี้มักจะพบปัญหาในหน้าหนาว และการทำงานในช่วงอัตราต่ำ ทำให้ความดันตกลงในการควบคุมที่ทำงานได้ช้า และมีการสูญเสียพลังงานปั๊มรีฟลักซ์ รวมถึงสูญเสียการควบคุม

วิธี D-4 เป็นการเปิดระบายที่ดรัม โดยการควบคุมจากการปรับลิ้นปิด-เปิดที่สายกระแสไอยอดหอ โดยขณะที่อัตราเข้าของไอลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลง เพราะว่าความเข้มข้นของสารที่ไม่สามารถควบแน่นในเครื่องควบแน่นจะมีเพิ่มขึ้น อัตราการไหลของตัวที่ไม่ควบแน่นเข้าและออกจากเครื่องควบแน่นโดยผ่านทางระบายของรีฟลักซ์ดรัม เป็นวิธีที่เหมาะกับกรณีสายไอยอดหอมีขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 3 ฟุต)

ส่วนวิธี D-5 ไม่มีการระบายที่ดรัม ควบคุมความดันโดยการปรับลิ้นปิด-เปิดที่กระแสยอดหอ ไอทุกตัวที่เข้าจะถูกควบแน่นทันที ในขณะที่อัตราการควบแน่นลดลง จะทำให้ความดันที่เครื่องควบแน่น และที่ดรัมลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิในการควบแน่นลดลง ทำให้ผลต่างอุณหภูมิในการถ่ายเทความร้อนลดลงด้วย วิธีนี้ความดันในเครื่องควบแน่นมากกว่าความดันในคอลัมน์ แต่ไม่ได้หมายความว่าจะต้องการพื้นที่ในการควบแน่นมากขึ้น เมื่อต้องการใช้กำลัง

ของเครื่องควบแน่นสูงสุด วาล์วควบคุมจะเปิดกว้างแล้วทำให้ความดันในเครื่องควบแน่นเข้าใกล้ความดันในคอลัมน์

ข้อดีของวิธีนี้คือให้ผลตอบสนองที่เร็ว และการทำงานของเครื่องควบแน่นและรีฟลักซ์ดรัมสามารถทำงานได้ที่ความดันต่ำกว่าความดันคอลัมน์ และยังสามารถใช้กับคอลัมน์ที่มีการเปลี่ยนไปทำงานที่ความดันสูงขึ้นได้ด้วย เนื่องจากข้อดีที่ว่าผลตอบสนองเร็ว Lupfer (1974) จึงได้เสนอว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่ดีที่สุด เมื่อการควบคุมความดันเป็นแบบแน่นอน ที่ใช้เครื่องควบแน่นแบบทั้งหมด ส่วน Chin (1979) และ Hollander (1957) ไม่เห็นด้วย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง และมักมีปัญหาในการทำงานที่อัตราต่ำ

วิธี D-6 (รูปที่ 2.9ฉ) แสดงการควบคุมความดันโดยใช้แกสเฉื่อย ขณะที่ความดันคอลัมน์ตกลง และปริมาณองค์ประกอบเบาในรีฟลักซ์ดรัมไม่พอเพียงที่จะปล่อยออกได้ตลอดการเติมแกสเฉื่อยที่รีฟลักซ์ดรัม หรือควบคุมความดันนั้น จะทำให้ความดันคอลัมน์เพิ่มขึ้น บางครั้งก็มีการเติมแกสเฉื่อยเพื่อควบคุมอัตราการไหล เพื่อให้ดรัมสามารถปล่อยออกได้ต่อเนื่องส่งผลต่อการควบคุมความดัน

วิธีนี้เสียค่าใช้จ่ายสูง และทำให้สูญเสียแกสเฉื่อย ถึงแม้ว่าแกสเฉื่อยสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก ก็จะต้องเสียค่าใช้จ่ายระบบการนำกลับมาใช้ หรือบางครั้งแกสเฉื่อยตัวที่หนัก (heavy inert) บางตัวสามารถละลายในของเหลว และสร้างปัญหาในดาวน์สตรีมได้ ข้อดีของวิธีนี้ คือผลการตอบสนองเร็ว แต่ปกติจะไม่ใช้เนื่องจากค่าใช้จ่ายสูง

วิธี D-7 (รูปที่ 2.9ช) แสดงระบบที่ไม่สามารถใช้งานได้ (Chin, 1979; Hollander, 1957 และ Lieberman, 1977) วิธีนี้คล้ายกับวิธีใช้การควบคุมความดันแบบบายพาสของไอร้อน (วิธี

B-4) แต่เครื่องควบแน่นที่มีการควบคุมแบบ D-7 นี้เป็นแบบไหลถ่ายเท (drained) ไม่ได้เป็นแบบท่วม การทำงานของวิธีนี้เข้าใจยาก Rademaker (1975) ได้ให้ความเห็นว่า การป้อนไอเข้าต่ำกว่าเครื่องควบแน่นอาจจะเป็นการจำกัดการไหลลงของคอนเดนเสด

วิธี D-8 (รูปที่ 2.9ซ) แสดงการควบคุมความดันโดยใช้การปรับที่อัตราการเดือด ของคอลัมน์ วิธีนี้มีความซับซ้อนมาก แต่ก็สามารถใช้งานได้ดีในบางกรณี (Lieberman, 1977) สามารถใช้งานกับรีฟลักซ์ดรัมแบบท่วมหรือแบบไม่ท่วมก็ได้ ในกรณีแบบไม่ท่วม ระดับของรีฟลักซ์ดรัมแสดงถึงอัตราการควบแน่น การไหลของผลิตภัณฑ์ล่างหอก็แสดงจากระดับของเหลวล่างหอ วิธีนี้เหมาะกับคอลัมน์แบบส่วนไล่สาร (stripping) บางคอลัมน์ที่มีการรับสารป้อนเย็นต่ำ ที่ความผันแปรอุณหภูมิของสารป้อนส่งผลต่อความดันคอลัมน์มากกว่า ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องควบแน่น

อุปสรรคของวิธีนี้ คือ วาล์วควบคุมดิสทิเลตอาจจะปล่อยของเหลวออกจากรีฟลักซ์ดรัมเร็วกว่าที่รีบอยเลอร์ผลิตไอขึ้นมา จึงควรใช้โอเวอร์ไรด์แบบระดับต่ำที่รีฟลักซ์ดรัมเพื่อเป็นตัวดักการไหลของดิสทิเลต หรือรีฟลักซ์ เพื่อป้องกันการไหลถ่ายเทของรีฟลักซ์ดรัม อุปสรรคอื่น ๆ ก็คือมีผลกระทบต่อกันระหว่างตัวควบคุมความดัน และอุณหภูมิ ซึ่งโดยปกติมักจะใช้การควบคุมความดันแบบแบ่งช่วงการทำงาน (Split range control) โดยสภาวะปกติความดันจะถูกควบคุมโดยการปล่อยกระแสผลิตภัณฑ์ไอเล็กๆ กระแสหนึ่ง ถ้าความดันตกลงและตัวปล่อยปิด จนยากที่จะให้กลับสู่สภาวะเดิมได้ ก็จะเปลี่ยนไปใช้อีกวิธีโดยอัตโนมัติ

การควบคุมความดันแบบลอยตัว (Floating pressure control) เพื่อให้ได้การควบคุมความดันแบบแน่นอนในคอลัมน์ สิ่งที่เกิดขึ้น คือ จะต้องปรับเซ็ทพอยท์ของตัวควบคุมความดันอย่าง

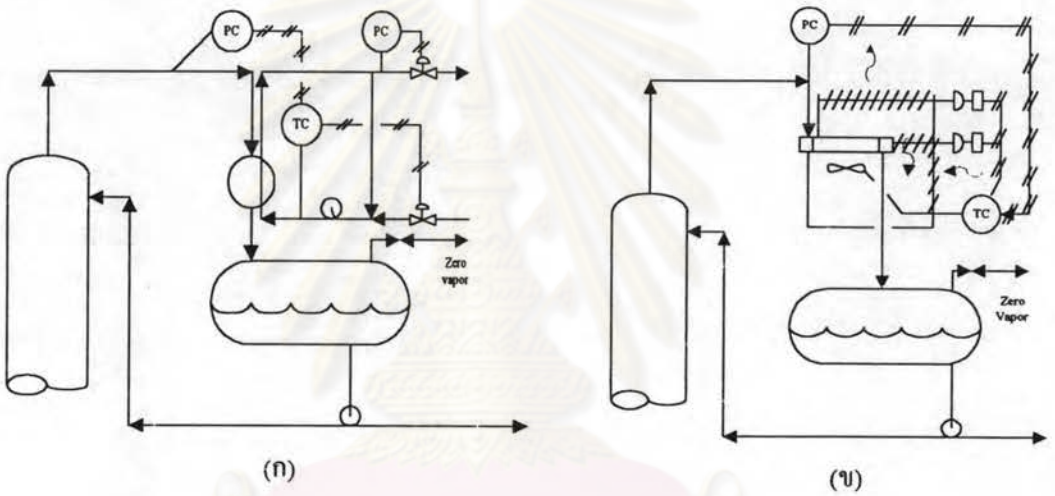
ช้า ๆ วิธีนี้จึงถูกเสนอขึ้นมาโดย "Shinskey" โดยวิธีนี้จะลดความดันคอลัมน์โดยไม่มีเงื่อนไข (เช่น ต้องให้เครื่องควบแน่น หรือคอลัมน์ทำงานเต็มกำลังมากที่สุด) หรือสามารถที่จะส่งผลิตภัณฑ์ของคอลัมน์ไปยังหน่วยดาวน์สตรีมได้

จุดประสงค์สำคัญของวิธีนี้ คือ ต้องการลดปริมาณการใช้พลังงาน (energy consumption) โดยทั่วไปที่ความดันต่ำจะทำให้การแยกสารง่ายขึ้น และต้องการรีฟลักซ์ และ การเดือดน้อยกว่าที่ความดันสูง อีกทั้งยังลดการปล่อยความดันของคอลัมน์ เพราะความดันจะถูกรักษาไว้ที่ขอบเขตสูงสุดที่ต่ำกว่าความดันที่ปล่อยออก สำหรับวิธีนี้ไม่ได้มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานเสมอไป แต่จะเป็นการประหยัดภายในขอบเขต (marginal) รายละเอียดของการลดประสิทธิภาพ และเงื่อนไขของวิธีนี้แสดงไว้ใน Kister (1981) และ Shinskey (1984)

Shinskey ได้พัฒนาวิธี D-9 (รูปที่ 2.9ฌ) สำหรับกรณีทั่วไปที่มีขีดจำกัดการลดลงของความดันที่ความสามารถหนึ่งของเครื่องควบแน่นที่ใช้อยู่ ลักษณะของระบบจะมีตัวควบคุมตำแหน่งวาล์ว (valve position controller, VPC) ที่ใช้ปรับตัวควบคุมความดันให้เข้าเซ็ทพอยท์อย่างช้า ๆ สมมติว่าความดันคอลัมน์ต่ำลง เมื่อวาล์วควบคุมเครื่องควบแน่นเปิด (ดังในวิธี A-1, B-2, C-1) การที่วาล์วตัวหนึ่งเปิดมากกว่า 80% จะแสดงว่าเครื่องควบแน่นทำงานเกิดขีดจำกัด และตัวควบคุมตำแหน่งจะเพิ่มเซ็ทพอยท์ของตัวควบคุมความดันอย่างช้าๆ จนกว่าเครื่องควบแน่นจะอยู่ในสภาวะ "on control" ในทางกลับกันเมื่อวาล์วเปิดอย่างน้อย 70% แสดงว่ามีการเผื่อความสามารถทางเครื่องควบแน่น ตัวควบคุมตำแหน่งวาล์วจะเพิ่มเซ็ทพอยท์ของตัวควบคุมความดันอย่างช้า จนกระทั่งวาล์วเปิดไปจนถึง 70-80% โดยที่ตัวควบคุมตำแหน่งวาล์ว จะลดความดันคอลัมน์โดยที่ความดันไม่เข้าสู่สภาวะ "off control" การปรับตัวควบคุมตำแหน่งวาล์ว

จะถูกจูนไว้อย่างหลวม เพื่อป้องกันการรบกวนใด ๆ อย่างทันเวลาต่อการควบคุมความดันที่เป็นแบบแน่นอน

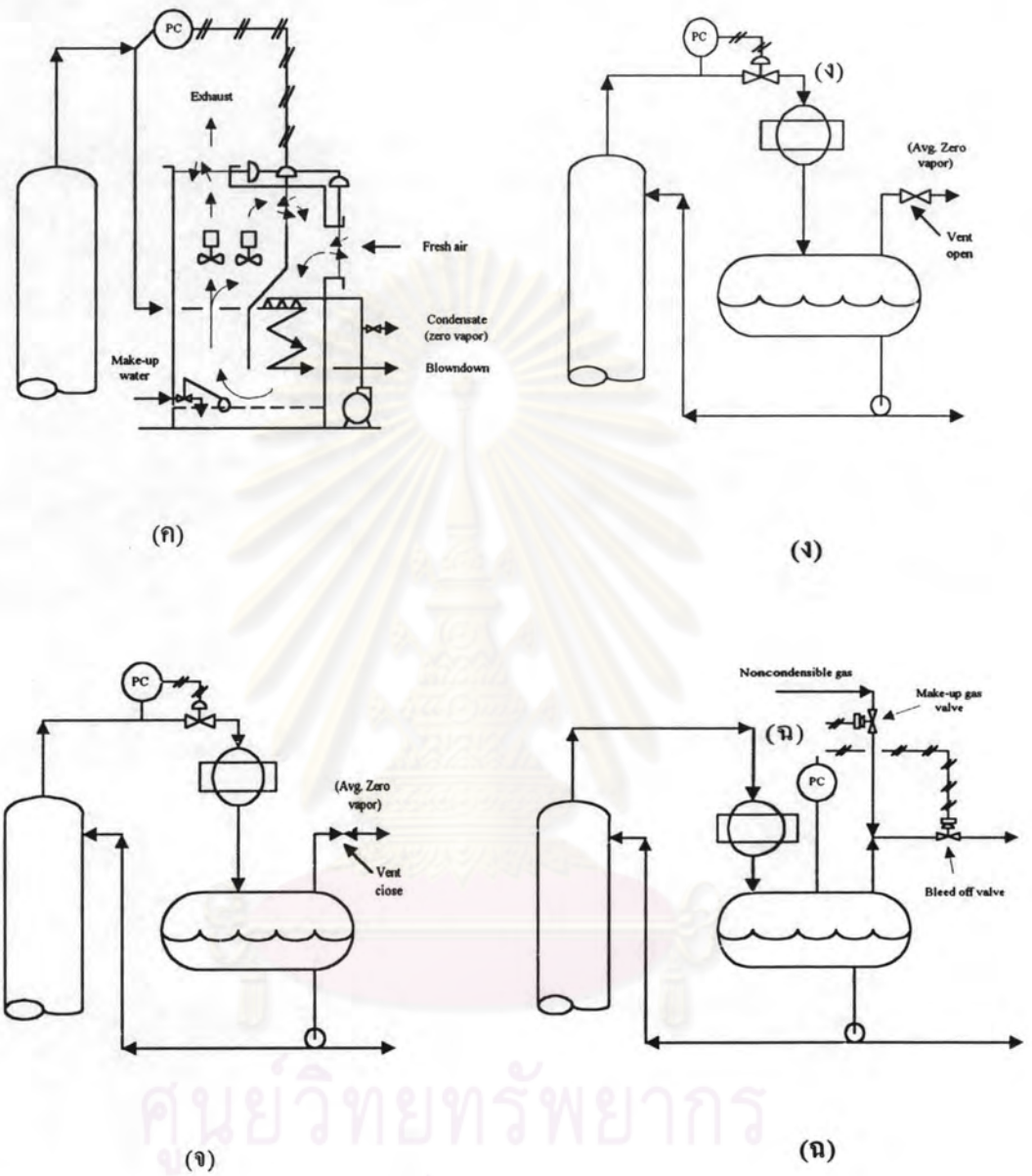
การควบคุมความดันโดยใช้ตัวควบคุมตำแหน่งวาล์ว ถือเป็นระบบควบคุมแบบทั่วไป (conventional) และบางครั้งก็ถือเป็นระบบควบคุมแบบขั้นสูง (advanced) ด้วย



รูป 2.9 แสดงวิธีการควบคุมโดยวิธีอื่นๆ

(ก) วิธี D-1 ควบคุมความดันโดยปรับจากการไหลเวียนของอุณหภูมิ เมื่อใช้เครื่องควบแน่นแบบของเหลวหล่อเย็น

(ข) วิธี D-2 ควบคุมความดันโดยการปรับจากการไหลเวียนของอุณหภูมิ เมื่อใช้เครื่องควบแน่นแบบอากาศหล่อเย็น



รูป 2.9 แสดงวิธีการควบคุมโดยวิธีอื่นๆ

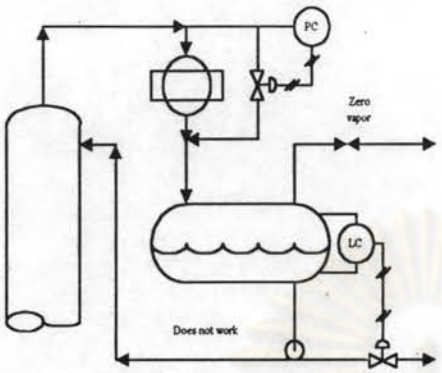
(ค) วิธี D-3 ควบคุมความดันโดยการปรับจากการไหลเวียนของอุณหภูมิ เมื่อใช้เครื่องควบแน่นแบบระเหย

(ง) วิธี D-4 ควบคุมความดันจากสตรีมไอยอดหอ เมื่อที่ระบายของดรัมเปิด

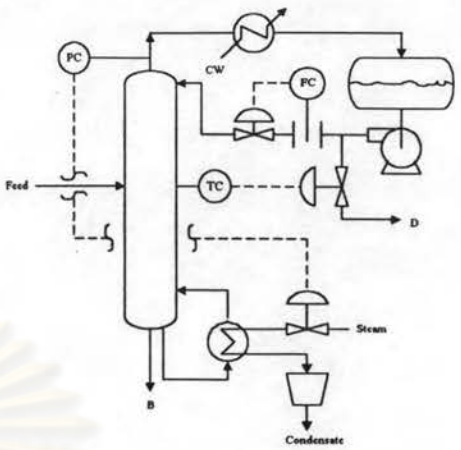
(จ) วิธี D-5 ควบคุมความดันจากสตรีมไอยอดหอ เมื่อที่ระบายของดรัมปิด

(ฉ) วิธี D-6 ควบคุมความดันจากอัตราการไหลของแกสเฉื่อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ช)

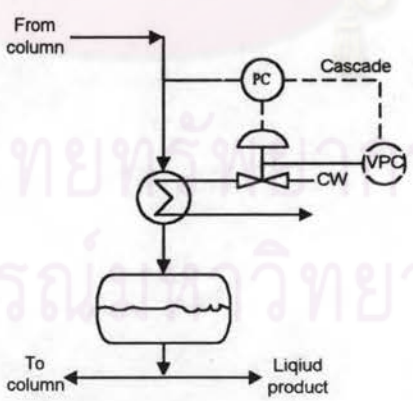


(ซ)

รูป 2.9 (ต่อ) แสดงวิธีการควบคุมโดยวิธีอื่นๆ

(ช) วิธี D-7 ควบคุมความดันจากอัตราการไหลของบายพาส

(ซ) วิธี D-8 ควบคุมความดันโดยปรับจากการเดือด



(ฌ)

รูป 2.9 (ต่อ) แสดงวิธีการควบคุมโดยวิธีอื่นๆ

(ฌ) วิธี D-9 ควบคุมความดันแบบลอยตัว ที่รวมกับการปรับอัตราการไหลของสารทำความเย็น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.2 กรณีที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอมีสองเฟส (Two-Phase Product)

เมื่อระบบต้องการผลิตของเหลวเป็นผลิตภัณฑ์ยอดหอแต่การควบแน่นแบบทั้งหมด ไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากมีปริมาณแกสเฉื่อย หรือคอลัมน์มีการผลิตแกสเฉื่อยเข้าไปกับผลิตภัณฑ์ของเหลวเดิม วิธีการควบคุมที่เหมาะสมนั้นขึ้นกับธรรมชาติ, ปริมาณ และความต้องการความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ สถานการณ์ข้างล่างจะเป็นสิ่งที่แบ่งแยกวิธีควบคุม

1. เมื่อปริมาณของแกสเฉื่อยน้อย ถือว่าการสูญเสียเนื่องจากการกลายเป็นไอของของเหลวที่ผลต่อทางเศรษฐศาสตร์น้อย กรณีนี้จะมีการปล่อยปริมาณแกสเฉื่อยจากที่เครื่องควบแน่น และรีฟลักซ์ดรัม ซึ่งแสดงวิธีควบคุมใน B-1, B-2, B-3, B-4, B-6, B-7, B-8, C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, C-6, D-1 D-2, D-3 และ D-6 โดยที่แกสเฉื่อยถูกปล่อยด้วยแมนวล หรือใช้การควบคุมการไหล (ยกเว้นวิธี D-6)

2. เมื่อปริมาณของแกสเฉื่อยมีปริมาณมาก และแกสเฉื่อยนั้นเบาจนส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว หรือลักษณะธรรมชาติ และผลทางเศรษฐศาสตร์ของแกสเฉื่อยมีผลต่อปริมาณสูงสุดที่มันสามารถปนในของเหลวได้ กรณีนี้จะต้องให้มีการควบแน่นของเหลวที่เต็มกำลัง เพื่อที่จะนำกลับของเหลวจากแกสให้ได้มากที่สุด ตัวอย่างเช่นการปล่อยการแกสเบา เช่น มีเธนจากคอลัมน์ที่ใช้แยกสารอินทรีย์เบา วิธีควบคุมแสดงใน A-1, A-2, A-3, A-5 และ D-6 โดยที่อัตราการควบแน่นมักจะตั้งใจที่เต็มกำลัง แต่สามารถที่จะปรับโดยแมนวลได้

3. เมื่อไอประกอบไปด้วยสารที่สามารถควบแน่นได้ และมีสารที่ไม่ต้องการปนในของเหลวเป็นปริมาณที่มากเกิน และถือว่าการสูญเสีย เนื่องจากการกลายเป็นไอของของเหลวในแกสมีผลต่อทางเศรษฐศาสตร์น้อย กรณีนี้คล้ายกันกรณี 2 ยกเว้นแต่การควบแน่นไม่ต้องตั้งไว้ที่

เต็มกำลัง แต่ตั้งไว้ที่ (ปกติใช้แมนวล) อัตราที่ตั้งค่าเป็นอัตราที่แน่ใจว่าสารที่ไม่ต้องการยังคงอยู่ในสภาพไอ กรณีนี้มักเกิดเมื่อคุณค่า (value) ของผลิตภัณฑ์แกสพอ ๆ กับคุณค่าของของเหลว หรือการกลายไอของของเหลวถูกนำมากลับมาใช้จากการในส่วนถัดไป วิธีควบคุมแสดงไว้ใน A-1, A-2, A-3, A-5 และ D-6

4. เมื่อไอประกอบไปด้วยสารที่สามารถควบแน่นได้ และมีสารที่ไม่ต้องการปนอยู่ในของเหลวเป็นปริมาณที่มากเกิน และถือว่าการสูญเสียเนื่องจากของเหลวที่มีการระเหยในแกสมีผลต่อทางเศรษฐศาสตร์ กรณีมีการควบแน่นที่มากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีปริมาณสารเบาไม่ได้ตามที่ต้องการ (off-spec) และการควบแน่นที่ไม่มีประสิทธิภาพ จะเป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวหลุดรอดไปกับสายไอ เป็นเหตุให้มีการสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์ กรณีนี้เพื่อที่จะควบคุมความดันนั้น อัตราการควบแน่นจะต้องถูกควบคุมเพื่อรักษาการแยกไอ-ของเหลว ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดขึ้นการใช้งานกับอุตสาหกรรมเคมี รายละเอียดแสดงดังข้างล่างนี้

โดยทั่วไป การควบคุมการแยกผลิตภัณฑ์ไอ-ของเหลว ก็คือ ควบคุมอุณหภูมิของคอนเดนเสด (หรือความเข้มข้นในกรณีที่ใช้เครื่องวิเคราะห์) ตำแหน่งที่จะวัดอุณหภูมิ ควรจะใกล้กับเครื่องควบแน่นให้มากที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงไดนามิคแล็กที่สัมพันธ์กับรีฟลักซ์ดรัม (โดยปกติประมาณ 5-10 นาที) Buckley (1985) แนะนำว่าควรจะให้เทอร์โมคัพเปิลวัดในสายของเหลวที่ตำแหน่งใต้เครื่องควบแน่น และเหนือรีฟลักซ์ดรัม วิธีควบคุมที่นิยมทั่วไป ได้แก่วิธี E-1 ถึง E-4 (รูปที่ 2.10ก-2.10ง) ซึ่งถือเป็นการปรับอัตราการควบแน่น โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำความเย็น

ถ้าสารทำความเย็นเป็นน้ำ วิธีควบคุมดังกล่าวจะพบปัญหาเช่นเดียวกับวิธี C-1 ที่เป็นคอลัมน์บรรยากาศ โดยคล้ายกับวิธี E-1 (เมื่อต้องการควบคุมอุณหภูมิ และสายปล่อยที่เปิดสู่บรรยากาศ) จากประสบการณ์ของ Buckley (1985) พบว่ามีการเดือดของน้ำหล่อเย็นได้ในสภาวะการทำงานที่อัตราต่ำ ปริมาตรของไอน้ำที่เกิดขึ้นมากพอที่ผ่านเข้าสู่วาล์วควบคุม ทำให้การไหลเวียนของน้ำหล่อเย็นหยุด และผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ได้ควบแน่น จะมีการหลุดรอดสู่บรรยากาศ จึงต้องระวังให้คอลัมน์สามารถหยุดการทำงานได้อย่างรวดเร็วได้ก่อนที่ส่วนอื่น ๆ จะเสียหาย เทคนิค E-1 ถึง E-4 จึงถูกประยุกต์ขึ้นมาสำหรับวิธี C-1 คล้ายกับวิธี D-1, D-2, D-3 ที่เป็นการปรับปรุงวิธีการปรับเปลี่ยนการไหลของสารทำความเย็น แต่ก็ยังเป็นวิธีที่ให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นสูงเกินไป

Buckley (1985) แนะนำการจัดรูปแบบควบคุม ในวิธี E-3 และ E-4 ดีกว่าวิธี E-1 และ E-2 เพราะว่า E-3 และ E-4 มีผลการตอบสนองของอุณหภูมิคอนเดนเสคอย่างช้า ๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหล่อเย็น เนื่องจากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจะร้ายแรงขึ้น ถ้าอุณหภูมิของคอนเดนเสคใช้ในการปรับน้ำหล่อเย็น อย่างไรก็ตามการจัดวางแบบ E-3 และ E-4 ก็มีอุปสรรคที่สำคัญ คือ วิธีนี้จะไม่สามารถการควบคุมความดันแบบแน่นอนได้ ซึ่งเป็นการควบคุมแบบที่ใช้งานในการกลั่นเป็นส่วนใหญ่

จากการควบคุมความดันโดยใช้เครื่องควบแน่นแบบท่วม วิธี B-1, B-2, B-3, B-4, B-7 และ B-8 ที่ได้กล่าวมาแล้ว สามารถนำมาใช้แทนวิธีการควบคุมความดัน โดยการปรับเปลี่ยนการไหลของสารทำความเย็น หรือใช้อีกวิธีหนึ่งที่แกสเฉื่อยปกติจะออกจากส่วนบนของเครื่องควบแน่นแทนที่จะออกจากรีฟลักซ์ดรัม ซึ่งถ้ารีฟลักซ์ดรัมไม่ท่วมจะต้องมีเส้นรักษาความดัน

เท่ากันเพิ่มเข้าไป หรืออีกนัยหนึ่งคือยากที่จะรักษาความดันในรีฟลักซ์ดรัมให้คงที่ได้ จึงควรจะมีการโอเวอร์โฟลว์ด้วยสำหรับรูปแบบวิธีการควบคุมนี้

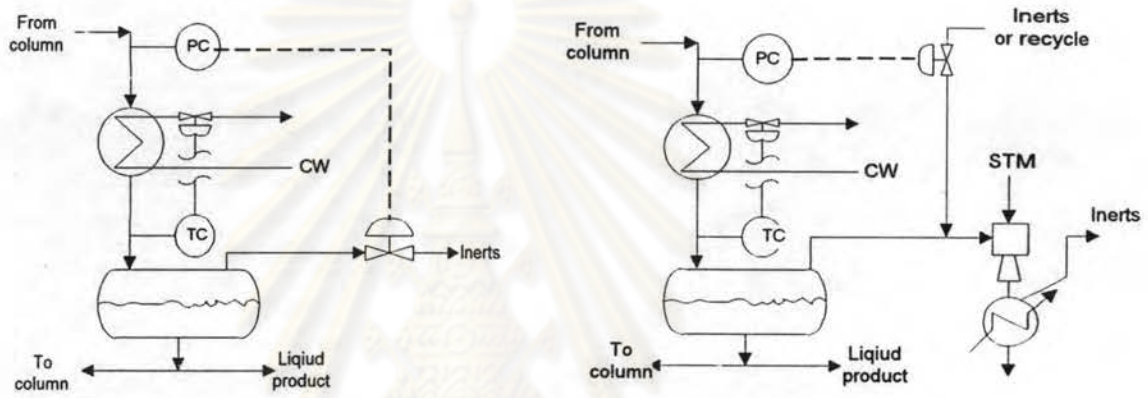
โดยทั่วไปวิธีใช้เครื่องควบแน่นบางส่วนแบบท่วม (E-5, รูปที่ 2.10จ) มีข้อด้อยกว่าวิธีปรับเปลี่ยนการไหลของสารหล่อเย็น (E-1 ถึง E-4) ดังต่อไปนี้

ไอที่ออกจากเครื่องควบแน่นอาจจะไม่มีการผสมกับของเหลว ทำให้ไม่ถึงสมดุล เป็นผลให้มีการสูญเสียผลิตภัณฑ์ในสายแกสเฉื่อย

ที่ภาระความร้อน (heat load) ต่ำ, ระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นจะมีระดับสูง และอาจจะถึงขีดระดับสูงสุดของเชล ซึ่งการที่ของเหลวมีระดับสูงนั้น จะเป็นสาเหตุให้เกิดการปั่นป่วน หรืออีกนัยหนึ่งเกิดการติดไปของของเหลว (มีฟองเกิดขึ้นในของเหลว) เนื่องจากระดับของเหลวจะไม่เท่ากันในเครื่องควบแน่น เพราะเกิดความแตกต่างของความดัน โดยระดับที่ทางออกของน็อซเซิลที่ทางเข้า และควรจะใช้เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงระดับเป็นหน่วยฟุตมากกว่าหน่วยนิ้ว

ในขั้นตอนของการออกแบบ ปัญหาการที่ระดับของเหลวสูงขึ้นสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการเคลียร์ช่องว่างระหว่างด้านบนของท่อและเชลให้มากพอเท่าที่จะทำได้ แต่ก็ยังมีปัญหาการสูญเสียผลิตภัณฑ์บางส่วน ซึ่งในระหว่างการทำงานของคอลัมน์ปัญหาการที่ระดับของเหลวสูงนั้น สามารถลดได้โดยการฉีดแกสเฉื่อยเข้าที่ทางเข้าเครื่องควบแน่น การฉีดแกสเฉื่อยเข้าไปเพื่อปกคลุมท่อและทำให้ระดับของเหลวลดลง และควรให้ความเอาใจใส่ต่อระดับของเหลวในเครื่องควบแน่นด้วย และอาจจะใช้โอเวอร์ไรด์ควบคุมระดับกับวาล์วที่ปล่อยแกสเฉื่อย

Wild (1969) พบว่า ปัญหาเหล่านี้มักพบกับรีบอยเลอร์แบบแนวนอนที่ใช้ไอน้ำ ระดับของเหลวที่สูงในเชลของรีบอยเลอร์ ทำให้เกิดสภาวะกระแทกของของเหลว ทางแก้ไขก็ใช้ฉีดแกสเฉื่อยเมื่อระดับมีความสูงเกินไป

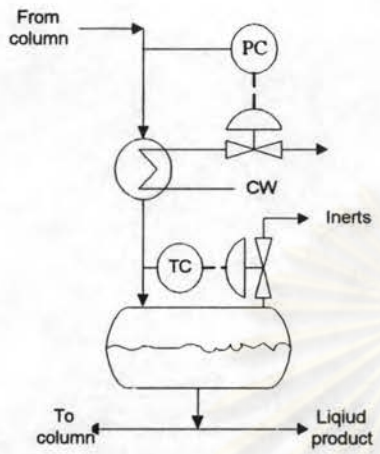


(ก) (ข)

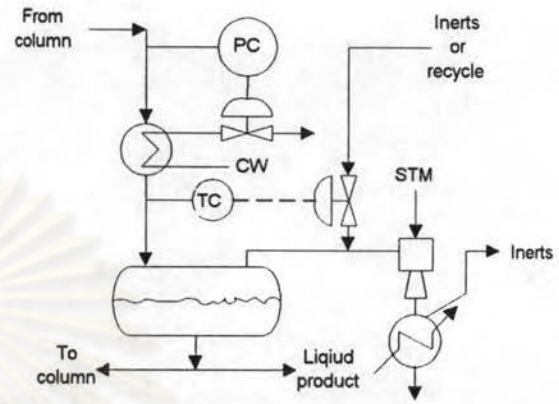
รูปที่ 2.10 แสดงวิธีการควบคุมความดัน และเครื่องควบแน่น ในกรณีผลิตภัณฑ์ยอดหอมี 2 เฟส

(ก) วิธี E-1 วาล์วควบคุมความดันอยู่ที่กระแสแกสเฉื่อย เมื่อใช้กับคอลัมน์บรรยากาศ

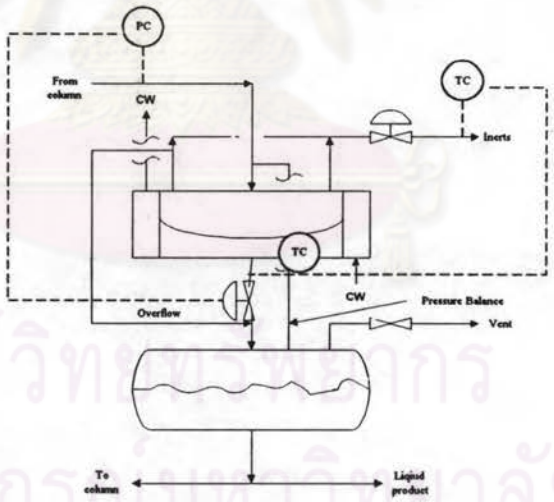
(ข) วิธี E-2 วาล์วควบคุมความดันอยู่ที่กระแสแกสเฉื่อย เมื่อใช้กับคอลัมน์สูญญากาศ



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 2.10 แสดงวิธีการควบคุมความดัน และเครื่องควบแน่น ในกรณีผลิตภัณฑ์ยอดหอมี 2 เฟส

(ค) วิธี E-3 วาล์วควบคุมความดันอยู่ที่สารทำความเย็น เมื่อใช้กับคอลัมน์บรรยากาศ

(ง) วิธี E-4 วาล์วควบคุมความดันอยู่ที่สารทำความเย็น เมื่อใช้กับคอลัมน์สูญญากาศ

(จ) วิธี E-5 การจัดรูปแบบเครื่องควบแน่นที่มีการท่วมบางส่วน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 ความรู้ในการเลือกชนิดการควบคุมของรีบอยเลอร์ (Reboiler Control)

การควบคุมรีบอยเลอร์ไม่เพียงแต่จะต้องให้ผลการตอบสนองที่ดีต่อการรบกวนต่างๆ จากคอลัมน์ แต่ยังสามารถที่จะแยกคอลัมน์จากการรบกวน เนื่องจากตัวกลางให้ความร้อนด้วย ตัวแปรที่ดีที่สุดสำหรับรักษาการควบคุมของคอลัมน์ทั้งหมด คือ การควบคุมที่ตัวหม้อต้มให้มีการเดือดคงที่ โดยจุดประสงค์ตัวหลักๆ แล้วบอยล์อัพจะใช้ปรับเพื่อควบคุมความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ส่วนล่างหอ หรือไม่ก็ถูกเซ็ทให้อัตราการไหลคงที่ เมื่อต้องการให้บอยล์อัพมีอัตราคงที่ วาล์วควบคุมรีบอยเลอร์จะถูกปรับจากตัวควบคุมอัตราการไหลของสารตัวกลางให้ความร้อน ส่วนในกรณีที่บอยล์อัพใช้ปรับความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามที่ต้องการนั้น วาล์วควบคุมรีบอยเลอร์จะถูกปรับโดยตรง หรือทางอ้อมจากอุณหภูมิของเทรย์จากเครื่องมือวิ-เคราะห์ผลิตภัณฑ์ หรือระดับล่างของคอลัมน์ (base level) การปรับทางอ้อมจะเป็นการใช้ตัวควบคุมแบบคาสเคด (cascade controller) เพื่อเป็นเซ็ทพอยท์ให้กับตัวควบคุมการไหลของตัวกลางให้ความร้อน โดยตัวควบคุมการไหลจะไปปรับวาล์วควบคุมรีบอยเลอร์

ส่วนการปรับทางตรงด้วยอุณหภูมิ ตัววิเคราะห์ หรือระดับการบอยล์อัพของคอลัมน์จะให้ผลการตอบสนองไม่ดีเท่ากับการปรับทางอ้อม แต่กระนั้นก็ตามการปรับทางตรงก็ยังนิยมใช้อยู่

ในการใช้บอยล์อัพปรับเพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการนั้น จะทำให้การบอยล์อัพมีการแกว่ง และช้ากว่าการปรับบอยล์อัพให้มีอัตราคงที่ เนื่องจากสัญญาณจากตัวควบคุม หรือความเข้มข้นที่ป้อนกลับมาจะมีการปั่นป่วนต่อสัญญาณที่ใช้ปรับบอยล์อัพ

จากประสบการณ์ของ (Kister, 1990) พบว่าการป้อนกลับในระบบควบคุมบอยล์อัพจะไม่สามารถทำงานได้ แม้จะมีการรบกวนอย่างอ่อน (mild upsets)

จากที่อธิบายมาข้างต้นถึงการแปรปรวนของการบอยล์อัพ และการควบคุมแบบทางตรง เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการแกว่ง และผลตอบสนองช้าของการปรับบอยล์อัพเพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการนั้น วิธีที่ง่าย คือ การใช้อัตราการไหลของตัวกลางให้ความร้อนปรับวาล์วควบคุมรีบอยเลอร์ ในที่นี้แบ่งการควบคุมรีบอยเลอร์เป็น 3 กรณีตามชนิดของการใช้สารตัวกลางในการให้ความร้อน ดังนี้

2.6.1 การต้มซ้ำด้วยของไหลที่ควบแน่น (Reboiling with a condensing fluid)

เป็นตัวอย่างการใช้งานของรีบอยเลอร์แบบใช้ไอน้ำ (steam reboilers) และแบบใช้ไอของสารหล่อเย็น (refrigeration vapor reboilers)ในการเป็นสารตัวกลางให้ความร้อน วาล์วควบคุมอาจจะอยู่ในตำแหน่งขาเข้าดังวิธี F-1 (รูปที่ 2.11ก) หรือขาออกดังวิธี F-2 (รูปที่ 2.11ข) ของรีบอยเลอร์

วิธี F-1 นั้นเมื่อวาล์วควบคุมอยู่ในตำแหน่งขาเข้ารีบอยเลอร์ โดยปรับที่อัตราการไหลของตัวกลางให้ความร้อนขาเข้ารีบอยเลอร์ อัตราการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นกับความดัน และอุณหภูมิในการควบแน่นของรีบอยเลอร์ เมื่อต้องการบอยล์อัพเพิ่มขึ้นควรเปิดวาล์ว จะทำให้ความดันของรีบอยเลอร์เพิ่มขึ้น ทำให้ผลต่างอุณหภูมิในรีบอยเลอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้อัตราการบอยล์อัพเพิ่มขึ้น

ทางเลือกของการควบคุมการไหลของรีบอยเลอร์แบบ F-1 คือ ใช้ความดันที่รีบอยเลอร์เป็นพารามิเตอร์ในการควบคุม แต่การควบคุมความดันของรีบอยเลอร์นั้นไม่เป็นวิธีที่

แพร่หลายเท่าไรนัก เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความดัน กับอุณหภูมิในการควบแน่น และระหว่างบอยล์อัพกับความดัน มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างบอยล์อัพกับความดันจะเปลี่ยนแปลงเมื่อรีบอยเลอร์มีตะกอน และเมื่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนไป

วิธี F-2 เป็นการปรับที่อัตราการไหลของคอนเดนเสด ไอมักจะควบแน่นโดยความดันที่เพียงพอจากส่วนบน อัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรเปลี่ยนตามที่คอนเดนเสดมีการท่วมที่ตัวแลกเปลี่ยน ซึ่งเป็นการแปรเปลี่ยนพื้นที่สัมผัสในการควบแน่นนั่นเอง

ก. ข้อเปรียบเทียบระหว่างการใช้วาล์วควบคุมที่ไอขาเข้ารีบอยเลอร์ กับวาล์วควบคุมที่คอนเดนเสดขาออกจากรีบอยเลอร์ (Vapor Inlet valve versus condensate outlet valve)

ตำแหน่งวาล์วควบคุมรีบอยเลอร์นั้นมีความสำคัญต่อสมรรถนะความสามารถในการทำงาน และประสิทธิภาพทางความร้อนของคอลัมน์ทั้งหมด จากงานวิจัยของ Mathur (1973) แสดงข้อดี และข้อเสียของการเปลี่ยนตำแหน่งในการควบคุม ซึ่งได้แสดงเพิ่มเติมถึงข้อพิจารณาสำคัญ ดังข้างล่างนี้

1. ผลการตอบสนองทางไดนามิคของการควบคุมไอขาเข้า จะได้ผลดีกว่าการควบคุมคอนเดนเสด เนื่องจากการปรับวาล์วขาเข้าจะเป็นการปรับเปลี่ยนการไหลของไออย่างทันทีทันใด ความดันและอัตราการถ่ายเทความร้อนของรีบอยเลอร์มีแล็ก (lag) เพียงไม่กี่นาที ในทางกลับกันการปรับวาล์วขาออกที่คอนเดนเสดจะไม่ส่งผลต่อการไหลของไอ อัตราการไหลของคอนเดนเสดจะแสดงระดับของคอนเดนเสด ซึ่งระดับนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ อัตราการไหลของไอ และการถ่ายเทความร้อนที่รีบอยเลอร์ แสดงจากระดับคอนเดนเสดมีการ

เปลี่ยนแปลง และเนื่องมาจากการตอบสนองของระดับคอนเดนเสดที่ช้า การปรับการไหลของไอจึงใช้ควบคุมได้ดีกว่าการปรับการไหลของคอนเดนเสด

แต่วิธีควบคุมคอนเดนเสดขาออกนั้น เวลาในการตอบสนองจะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับคอนเดนเสดในเครื่องแลกเปลี่ยน ดังนั้นปริมาตรของคอนเดนเสดจะต้องมีการพิจารณาให้มีอยู่ประมาณ 10% จากระดับใกล้ติดส่วนล่างของเครื่องแลกเปลี่ยน และต้องให้ต่ำกว่าส่วนบนสุดของเครื่องแลกเปลี่ยนประมาณ 10% ผลการตอบสนองจากการเปลี่ยนแปลงการไหลของคอนเดนเสดจะเร็วขึ้น ขณะที่ระดับคอนเดนเสดเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อผลตอบสนองเร็วอาจจะทำให้ระดับของคอนเดนเสดไม่คงที่

2. วิธีควบคุมที่ขาออกของคอนเดนเสดมักจะพบปัญหา ได้แก่ ถ้าวาล์วคอนเดนเสดไม่สามารถรักษาปริมาณของคอนเดนเสดได้แล้ว รีบอยเลอร์จะสามารถผลิตไอน้ำจนถึงขีดสูงสุด ทำให้คอนเดนเสดไปปกคลุมบางส่วนของท่อในรีบอยเลอร์ วิธีแก้ไขนั้นขึ้นกับสาเหตุของปัญหา ดังเช่น ถ้ามีผลต่างความดันระหว่างรีบอยเลอร์กับสตรีมคอนเดนเสดหลังวาล์วมากพอก็เป็นการพอเพียงที่จะปรับขนาดของวาล์ว หรือท่อคอนเดนเสด แต่ถ้าผลต่างความดันมีน้อยจะต้องใช้ปั๊มที่มีถังรองรับคอนเดนเสด (condensate pot) เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวดังวิธี F-3 (รูปที่ 2.11ค)

ลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้นต่อระบบควบคุม คือ เมื่อรีบอยเลอร์ไม่สามารถควบแน่นไอให้เร็วพอกับการที่วาล์วคอนเดนเสดปล่อยของเหลวออก ซีล (seal) กั้นของเหลวในรีบอยเลอร์อาจจะเสียหาย ส่งผลให้ไอผ่านเข้าไประบบการควบแน่น ทำให้เกิดการสูญเสียการถ่ายเทความร้อนอย่างฉับพลัน และในกรณีที่ตัวกลางให้ความร้อนเป็นไอน้ำ จะเกิดการทุบกระแทก

ของของเหลวในระบบควบแน่น ซึ่งมักเกิดขึ้นกับรีบอยเลอร์ที่ใช้ไอควบแน่นของสารหล่อเย็นควบแน่น เช่น ในวิธี F-2 ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยใช้ วิธี F-3 ซึ่งเป็นแบบที่มีปั๊ม วิธี F-4 (รูปที่ 2.11ง) ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งตัวควบคุมการไหลจะปรับที่วาล์วคอนเดนเสด โดยการใช้โอเวอร์ไรด์ระดับแม้ว่าระดับจะต่ำลงมาก การโอเวอร์ไรด์ระดับไม่ควรให้แนวตั้งมีความสูงกว่าส่วนล่างของรีบอยเลอร์ เนื่องจากท่อส่วนใหญ่มีการท่วมตลอดเวลา จะทำให้สมรรถนะของรีบอยเลอร์ลดลง

บางครั้งเครื่องมือวัดระดับของเหลวในเชลของรีบอยเลอร์ ถูกนำมาใช้เพื่อการควบคุมแบบโอเวอร์ไรด์ ในกรณีที่ดรัม(หรือถังรองรับ)ไม่จำเป็นต้องใช้

3. วิธีควบคุมที่ขาออกคอนเดนเสด ไม่เหมาะสมกับการทำงานของรีบอยเลอร์แบบเทอร์โมไซฟอน (thermosiphon reboiler) เนื่องจากระดับที่ขึ้น-ลงของคอนเดนเสด จะส่งผลเสียหายต่อความเสถียรในการทำงานของรีบอยเลอร์ชนิดดังกล่าว ซึ่งปัญหาดังกล่าวมักจะเกิดกับการทำงานภายใต้ระบบสูญญากาศ

4. วิธีควบคุมที่ขาออกของคอนเดนเสด สามารถใช้งานได้ในกรณีที่ความดันสูง ๆ ได้ เนื่องจากวิธีดังกล่าวจะมีการกำจัดความดันลด (pressure drop) ของรีบอยเลอร์ ที่เกิดขึ้นในกรณีใช้วาล์วควบคุมที่ขาเข้า

ถ้าใช้ไอสารหล่อเย็นเป็นตัวกลางความร้อน แล้วจะให้ผลดียิ่งขึ้น โดยที่มีคอมเพรสเซอร์ที่ปรับความดันระหว่างภาค (interstage pressure) ของสารหล่อเย็น ทำหน้าที่เป็นตัวขับ ("ride") ความดันในการควบแน่นของรีบอยเลอร์ หรือทำให้เกิดการควบแน่นที่สมบูรณ์ด้วยไอของสารหล่อเย็นในรีบอยเลอร์เมื่อความดันสูงขึ้น นั่นคือจะมีการใช้พลังงานของคอมเพรช

เซอร์ลดลง เมื่อรีบอยเลอร์ซึ่งมีภาระความร้อน (heat load) มาก การลดความดันระหว่างภาคเพียงไม่กี่ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) จะทำให้ปริมาณการใช้พลังงานของคอมเพรซเซอร์เพิ่มขึ้น จากเหตุผลดังกล่าว วิธีควบคุมที่ขาออกของคอนเดนเสดจึงเหมาะกับรีบอยเลอร์แบบที่ใช้สารหล่อเย็น แต่วิธีนี้ก็มีข้อเสียดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 1-3

วิธีนี้อาจนำไปใช้กับรีบอยเลอร์แบบใช้ไอน้ำเป็นตัวกลางให้ความร้อน แต่ความดันของไอน้ำที่นำมาใช้นั้นเหมาะกับหม้อต้ม (boiler) หรือกังหัน (turbine) มากกว่าการใช้กับรีบอยเลอร์ ผลต่างความดันระหว่างความดันที่นำมาใช้ที่ใกล้กัน (adjacent supply pressure) มักจะสูง จากเหตุผลผลต่างความดันนั้นหมายถึงผลต่างความดันระหว่างความดันไอน้ำที่ต้องการใช้ในรีบอยเลอร์ และความดันไอน้ำที่มีอยู่เดิมซึ่งสูงกว่า ซึ่งผลต่างความดันดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดการทำงานของวาล์วขาเข้า วิธีควบคุมที่ขาออกของคอนเดนเสดเป็นวิธีเดียวที่จะประหยัดพลังงาน โดยการกำจัดผลต่างความดันที่วาล์วขาเข้า เพื่อลดขั้นตอนการปรับความดันไอน้ำที่นำมาใช้ อย่างไรก็ตามเป็นกรณีที่ไม่บ่อยนักที่มีการใช้วิธีควบคุมไอเข้ารีบอยเลอร์กับรีบอยเลอร์แบบใช้ไอน้ำร้อน

5. ในรีบอยเลอร์แบบใช้ไอน้ำร้อนนั้น วิธีควบคุมไอเข้านั้นจะลดอุณหภูมิผนังท่อของรีบอยเลอร์ ส่งผลให้การเกิดตะกอนที่รีบอยเลอร์ลดลง อีกทั้งยังลดความเค้น (stress) เนื่องจากความร้อนที่ส่วนบนของรีบอยเลอร์ ความเค้นดังกล่าวนั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรั่วที่บริเวณช่องว่างส่วนบนของปะเก็นท่อ

ถ้าเกิดปัญหาเรื่องตะกอน หรือการรั่วนั้นถือเป็นปัญหาใหญ่ จะต้องควบคุมให้อุณหภูมิผนังของรีบอยเลอร์ให้ต่ำลงเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังเช่นวิธี F-5 (รูปที่ 2.11จ) ที่เป็นการ

ควบคุมไอขาเข้าโดยมีตัวปรับความดันให้คงที่ (pressure regulator) ที่มีรูปแบบการใช้พื้นที่ของรีบอยเลอร์ที่ลดอุณหภูมิการควบแน่น (หรืออุณหภูมิผนังท่อ) ไว้อย่างอัตโนมัติ ปั๊มที่ใช้จะทำให้ความดันของรีบอยเลอร์ต่ำที่สุดเท่าที่ต้องการสำหรับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการควบแน่นได้ หรือนัยหนึ่ง คือ ทำให้ความดันส่วนบนของคอนเดนเสดตกลง สำหรับการออกแบบตัวรีบอยเลอร์ และปั๊มต้องออกแบบไว้ใช้งานกับระบบสูญญากาศ

6. การกัดกร่อนจะส่งผลต่อการรักษาระดับคอนเดนเสดในรีบอยเลอร์ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับวิธีควบคุมที่ขาออกของคอนเดนเสด ในบางกรณี (Lieberman, 1988) สนิมที่เกิดขึ้นในรีบอยเลอร์แบบใช้ไอน้ำ แสดงถึงระดับที่ไอน้ำควบแน่นมักจะเกิดขึ้น

7. วิธีควบคุมคอนเดนเสดขาออก มักต้องการใช้วาล์วควบคุมขนาดเล็กกว่าวิธีควบคุมไอขาเข้า

8. วิธีควบคุมไอขาเข้า มักจะมีปัญหาเกิดขึ้นถ้ามีการใช้ผิวสัมผัสในรีบอยเลอร์มากเกินพอ (ตัวอย่าง เช่น รีบอยเลอร์ที่มีการใช้เกินจากที่ออกแบบ หรือในช่วงเริ่มเดินเครื่องนั้นท่อยังสะอาดอยู่) ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ วาล์วควบคุมขาเข้านั้นจะปิดเพื่อลดอุณหภูมิการควบแน่น (จาก $Q=UA\ \Delta T_{lm}$ เมื่อ UA มีขนาดใหญ่ ,ขณะที่ Q เป็นปริมาณความร้อน, BTU/h; U เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, BTU/(h.ft^2.F); A เป็นพื้นที่ของรีบอยเลอร์, ft^2; ΔT_{lm} เป็นความแตกต่างอุณหภูมิเชิงลอกาลิทึมเฉลี่ย, °F) เมื่อวาล์วปิด ความดันในการควบแน่นจะลดลง ถ้าความดันควบแน่นลดลงต่ำกว่าความดันส่วนบนของคอนเดนเสด จะทำให้คอนเดนเสดไหลออกไม่ได้ คอนเดนเสดที่ไม่สามารถไหลออกมาจะย้อนกลับเข้าไปในรีบอยเลอร์ทำ

ให้เกิดการท่วมเต็มพื้นผิวสัมผัสของท่อจนกระทั่งถึงจุดสมดุลใหม่ โดยที่จุดดังกล่าวการคำนวณปริมาณคอนเดนเสดจะถูกนำมาคำนวณใหม่ ด้วยสมการของ Pathak (1988)

ในขณะที่บางส่วนของท่อคอนเดนเสดเกิดการท่วม จะเกิดการแปรปรวนในการไหลของไอน้ำที่เข้ารีบอยเลอร์ที่จะส่งผลต่อทั้ง ΔT ในรีบอยเลอร์ และผิวสัมผัสบางส่วนของท่อที่ถูกปกคลุมไปด้วยคอนเดนเสด ซึ่งผลดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อกัน ทำให้การทำงานช้าลง และอาจให้ผลการตอบสนองที่ผิดพลาด ตัวดักไอน้ำ (steam trap) จะมีส่วนช่วยเพียงเล็กน้อยในการควบคุมระดับคอนเดนเสด และถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวนรีบอยเลอร์อย่างทันทีทันใด สมดุลดังที่กล่าวข้างต้นจะไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นได้แต่ไม่คงที่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงผิวสัมผัสในการแลกเปลี่ยนความร้อนของวาล์วขึ้น เมื่อผิวสัมผัสของวาล์วควบคุมเสมือนเป็นตัวแลกเปลี่ยนระหว่างส่วนที่ถูกปกคลุมกับส่วนที่ไม่ถูกปกคลุม ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวได้อธิบายโดย Lieberman (1985) ว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะทำให้เกิดการแกว่งต่อสมรรถนะของรีบอยเลอร์ และต่ออัตราการไหลของไอในคอลัมน์ เนื่องจากการไหลย้อนกลับของส่วนบนคอนเดนเสด, ตัวรบกวน, การปกคลุมผิวสัมผัส และความเสียหายต่ออุปกรณ์

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ควรใช้ถังรองรับคอนเดนเสดแบบจุ่ม (submerged condensate pot) แทนการใช้ตัวดักไอ ดังวิธี F-5 (รูปที่ 2.11จ) ซึ่งอธิบายได้ดังข้อ 5 หรือใช้อีกวิธีหนึ่งโดยการใช้ถังรองรับคอนเดนเสดแบบระดับ (level condensate pot) วิธี F-6 (รูปที่ 2.11จ) แทนตัวดักไอ ซึ่งวิธี F-6 เป็นการปรับเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ของตัวควบคุมระดับ โดยที่ผิวสัมผัสในรีบอยเลอร์จะต้องสามารถปรับได้ เพื่อให้รีบอยเลอร์สามารถปฏิบัติงานได้ที่ความดันสูง เพื่อให้แน่ใจว่ามีการไหลออกของคอนเดนเสดตลอดเวลาได้โดยไม่ต้องใช้ปั๊ม นั่นคือส่วนล่าง

ของดรัมจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่า ส่วนล่างของตำแหน่งที่เกิดการควบแน่นในรีบอยเลอร์ หรืออีกนัยหนึ่ง คือ รีบอยเลอร์ไม่สามารถปฏิบัติงานได้ที่อัตราสูงๆ ที่จะทำให้รีบอยเลอร์เกิดสภาวะแห้งได้ ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของรีบอยเลอร์ลดลง

สำหรับถังรองรับคอนเดนเสดจะต้องมีการออกแบบ และใช้งานที่เหมาะสมด้วย มีตัวอย่างใช้งานของ Pathak (1988) กับคอลัมน์ที่มีพรีฮีตเตอร์ด้วยการใช้วิธีควบคุมไอขาเข้า และมีถังรองรับคอนเดนเสด (แบบไม่มีปั๊ม) จากประสบการณ์พบว่า ปัญหาการไหลออกของคอนเดนเสดจะไม่เกิดขึ้น ถ้ามีการวางรูปแบบที่เหมาะสม ดังวิธี F-5 ก็จะต้องมีปั๊มเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ส่วนวิธี F-6 ก็จะต้องให้ตัวถังรองรับคอนเดนเสดมีความสูงพอ และตัวควบคุมระดับต้องสามารถปฏิบัติงานที่อัตราต่ำได้ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว แต่ Pathak (1988) กล่าวว่า การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจจะไม่ได้ตามที่ต้องการทั้งหมด

มีรายงานเทคนิคการใช้ถังรองรับคอนเดนเสดที่ประสบความสำเร็จในงานของ Helzner (1977) และ Mathur (1973) บางกรณีนั้นอาจจะใช้ปั๊มคอนเดนเสดแบบ self-priming โดยไม่ต้องมีถังรองรับคอนเดนเสด หรือใช้ปั๊มแบบมีตัวดักไอ ติดตั้งแทนวิธี F-5 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูกกว่าการใช้ถังรองรับคอนเดนเสด แต่ว่าไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานโดยมีข้อเสียของวิธีการควบคุมขาออกของคอนเดนเสด ดังแสดงข้อเสียในข้อ 1-3, 5, 6, 12 และ 13

9. วิธีควบคุมไอขาเข้า อาจจะพบปัญหาเมื่อมีผลต่างความดันต่ำระหว่างตัวกลางให้ความร้อนของรีบอยเลอร์ และความดันของคอนเดนเสดที่ส่วนอัพสตรีม (ตัวอย่างเช่น ในรีบอยเลอร์แบบใช้ไอน้ำที่ใช้ความดันไอน้ำเพียง 15-35 psig) ปัญหาที่เกิดขึ้นแสดงในข้อ 8 แต่

สาเหตุเนื่องมาจากผลต่างความดัน (ΔP) ไม่เพียงพอมากกว่า สาเหตุจากการออกแบบที่ไม่ถูกต้องหรือผิวสัมผัสสะอาดไป ในกรณีนี้วิธีควบคุมคอนเดนเสดขาออก ดังวิธี F-4 (รูปที่ 2.11ง) จะเหมาะสมกว่า หรือจะใช้วิธีควบคุมไอขาเข้าวิธี F-5 ที่ให้ผลการควบคุมดีกว่าก็ได้ แต่จะเสียค่าใช้จ่ายในการเพิ่มปั๊ม

10. การใช้ตัวดักไอน้ำอาจจะพบปัญหา เนื่องจากว่าตัวมันเองมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตัน หรือทำให้เกิดการติดขัดในการเปิดกว้าง ดังวิธี F-1 ถ้าใช้วิธี F-5 หรือ F-6 ก็จะแก้ปัญหาดังกล่าวได้

11. การจูนตัวควบคุมในวิธีควบคุมไอขาเข้าก็พบปัญหาได้ ในกรณีที่การไหลผ่านวาล์วมีการเปลี่ยนแปลงจากช่วงไม่วิกฤต (noncritical) สู่ช่วงวิกฤต (critical) ในรีบอยเลอร์ขณะที่การเดือดตกลง ส่งผลต่อความดันขาออกของวาล์วต่ำลง เมื่ออัตราส่วนความดันของขาเข้ากับขาออกของวาล์วเกินจุดวิกฤต จะทำให้เกิดการไหลวิกฤตผ่านตัววาล์ว และความดันขาออกต่ำลงจนส่งผลต่ออัตราการไหลของไอ การควบคุมตัวควบคุมที่สภาวะไดนามิคจะแตกต่างกันระหว่างการไหลแบบวิกฤต กับแบบไม่วิกฤต ขณะที่การจูนลูพของการไหลแบบวิกฤตมีแนวโน้มที่จะทำได้ยากกว่า (Buckley, 1974; 1985)

เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว ควรจะออกแบบให้การไหลอันใดอันหนึ่งสามารถปฏิบัติงานได้เหนือช่วงการทำงานปกติ จากวิธี F-6 ที่มีถังรองรับคอนเดนเสดแบบระดับ จะสามารถรักษาความดันขาออกของวาล์วระหว่างสภาวะที่ไม่ปกติเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว หรืออาจใช้วิธีการติดตั้งเครื่องปรับความดันให้คงที่สำหรับการควบคุมการไหลแบบวิธี F-7 (รูปที่ 2.11ช) ที่สามารถรักษาความดันขาเข้าวาล์วให้ต่ำลงได้ ซึ่งทั้งสองเทคนิคนี้จะเป็นการลดการ

การกัดเซาะวาล์วที่สภาวะความดันคร่อมวาล์วสูง จากประสบการณ์ของ Kister (1990) พบว่าเทคนิคอย่างหลังสามารถทำงานได้ดี

12. วิธีควบคุมคอนเดนเสดขาออกนั้น ที่สภาวะไม่ปกติ (turned-down) จะเกิดการสะสมของคอนเดนเสดในเชลแบบนอน สามารถทำให้แผ่นกั้นในเครื่องแลกเปลี่ยนท่วมได้ และเป็นการจำกัดไอที่จะผ่านเข้าไปในหน้าต่างของเครื่องแลกเปลี่ยน เป็นผลให้เกิดการกระทบกระแทกของของเหลว

13. วิธีควบคุมไอขาเข้าเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพในการลดการรบกวน เนื่องจากการใช้ไอน้ำมากกว่าวิธีการควบคุมคอนเดนเสดขาออก

เนื่องจากระดับของคอนเดนเสดในเชลของรีบอยเลอร์จะต้องมีการเอาใจใส่จากผู้ดูแลงาน การออกแบบรูปแบบการจัดวางถังรองรับคอนเดนเสดของวิธี F-1 ถึง F-6 จึงแสดงได้ดังนี้

ข. รูปแบบการจัดวางถังรองรับคอนเดนเสด (Condensate pots Arrangement)

รูปที่ 2.11ค ถึง 2.11ฉ แสดงการจัดวางของถังรองรับคอนเดนเสดต่างๆ กัน ข้อพิจารณาหลักในการออกแบบและการใช้งาน คือ

1. จะต้องมีเส้นรักษาความดันเท่ากัน ขนาดของเส้นมีขนาดเล็ก (ปกติเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 นิ้ว) ต่อเข้ากับส่วนบนของรีบอยเลอร์ กับส่วนบนของถังรองรับคอนเดนเสด ถ้าไม่มีเส้นนี้จะไม่สามารถรักษาความดัน และระดับของเหลวในถังรองรับคอนเดนเสดให้คงที่ได้

2. ถังรองรับคอนเดนเสดอาจจะใช้แบบแนวตั้ง หรือแนวนอนก็ได้

3. ปริมาตรในถังรองรับคอนเดนเสดที่ต้องปล่อยออก (surge) ในการจัดวางแบบ F-3, F-4 และ F-6 จะต้องการปริมาตรที่ต้องปล่อยออก เพื่อป้องกันการแปรปรวนของระดับในรีบอย-เลอร์จากการเกิดการท่วม หรือการปล่อยทิ้งของของเหลวในถังรองรับ ส่วนการจัดวางแบบ F-5 (ทั้งแบบมี หรือไม่มีปั๊ม) ต้องการปริมาตรน้อยกว่า โดยต้องมีความสูงของซีลพอที่จะไม่ให้ไอไหลย้อนกลับไป ซึ่งระดับของเหลวนั้นจะต้องต่ำกว่าส่วนล่างของรีบอยเลอร์

4. Bertram (1981) ได้อธิบายถึงขนาดของถังรองรับคอนเดนเสด แสดงเป็นแผนผังขนาด และมีตัวอย่างเล็กน้อย แต่ไม่มีข้อแนะนำเบื้องต้น แต่ Kister (1990) ได้นำมาแสดง และเพิ่มข้อแนะนำไว้ดังนี้

a) การจัดวางทั่วไป (วิธี F-3 ถึง F-6)

- ความเร็วสูงสุดของของเหลวที่ผ่านถังรองรับแบบแนวตั้ง จะเป็นฟังก์ชันกับขนาดของวาล์วคอนเดนเสดดังตารางข้างล่างนี้

ขนาดของวาล์วควบคุมคอนเดนเสด (นิ้ว)	ความเร็วสูงสุดของของเหลว (แกลลอนต่อนาทีต่อตารางฟุต)
1	25
1½ - 3	37
> 4	50

- ถังรองรับควรจะสูงกว่าน๊อซเซิลที่อยู่ด้านบนอย่างน้อย 6 นิ้ว และต่ำกว่าน๊อซเซิลที่อยู่ด้านล่างอย่างน้อย 6 นิ้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ช่องว่างของไอระหว่างระดับสูงสุดของของเหลวที่คาดหมายกับน๊อซเซิลที่อยู่ด้านบน ควรมีอย่างน้อย 12 - 24 นิ้ว ซึ่งความสูงดังกล่าวจะเป็นขอบเขตปลอดภัยที่แสดงการเตือนภัย เมื่อระดับของเหลวสูง

b) การจัดวางเมื่อถังรองรับคอนเดนเสดมีขนาดใหญ่ (วิธี F-3, F-4 และ F-6 เท่านั้น)

- ระยะห่างระหว่างส่วนล่างของแผ่นท่อ (tubesheet) และน๊อซเซิลที่อยู่ด้านล่างอย่างน้อย 12 นิ้ว หรือ 24 % ของความสูงของตัวถังรองรับเอง (ควรจะให้มีระยะห่างมากกว่านี้)

- ควรเพิ่มขนาดดรัม เพื่อป้องกันความต้องการปริมาตรที่ต้องปล่อยออกในดรัม ดังอธิบายไว้ในข้อ 3

c) การจัดวางเมื่อถังรองรับคอนเดนเสดมีขนาดเล็ก (วิธี F-5 เท่านั้น)

- ความสูงของการควบคุมระดับที่สามารถทำงานได้สำหรับถังรองรับขนาดเล็ก คือ 32 นิ้ว

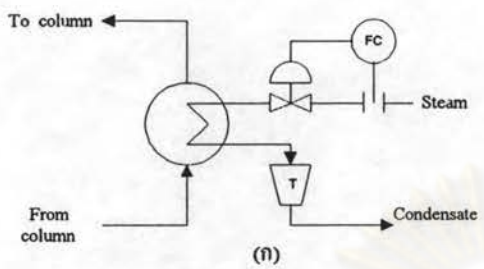
- ถังรองรับควรจะสูงประมาณ 4 ฟุต โดยที่จุดกึ่งกลางจะอยู่ประมาณที่ความสูงส่วนล่างของแผ่นท่อ (Lieberman, 1977)

d) การจัดวางเมื่อถังรองรับคอนเดนเสดเป็นแบบระดับ (วิธี F-6 เท่านั้น) (เป็นข้อแนะนำของ Kister) ควรตั้งระดับของเหลวให้สูงที่สุด ตามที่ระดับของเหลวในรีบอยเลอร์จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะไม่ปกติ หรือในสภาวะเริ่มเดินเครื่องที่รีบอยเลอร์ยังสะอาด และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง

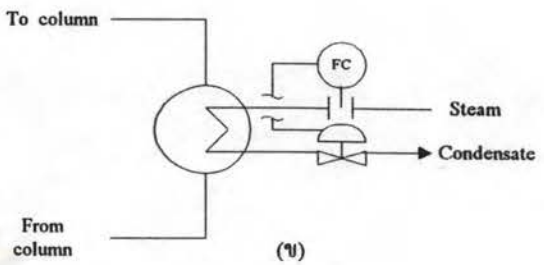
5. ในรีบอยเลอร์แบบใช้ไอน้ำ ควรจะมีท่อระบาย (vent) สู่บรรยากาศเล็ก ๆ อันหนึ่งที่ส่วนบนของถังรองรับคอนเดนเสด และควรจะเปิดไว้ตลอด (ยกเว้น กรณีที่ความดันไอน้ำลดลงต่ำกว่าบรรยากาศ) ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดสารที่ไม่ควบแน่น ที่ทำให้ประสิทธิภาพของรีบอยเลอร์ลดลง ถ้าแกสคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนหนึ่งของสารที่ไม่ควบแน่น จะทำให้เกิดการกัดกร่อนเช่นเดียวกับการใช้ตัวกลางให้ความร้อนชนิดอื่นที่ไม่ใช้ไอน้ำ ก็ควรจะต้องมีถังรองรับคอนเดนเสดให้พอเพียง

ลูพซีล (Loop seal) ในรีบอยเลอร์ที่ใช้ไอน้ำเป็นตัวกลางให้ความร้อนแบบมีถังรองรับคอนเดนเสดที่ใช้ในสภาวะความดันต่ำ จะใช้ลูพซีล (วิธี F-8, รูปที่ 2.11ซ) แทนการใช้ถังรองรับคอนเดนเสด จากรูปแบบของวิธี F-8 การเพิ่มการไหลเข้ารีบอยเลอร์จะเป็นการเพิ่มความดันในเชลของรีบอยเลอร์ เป็นการลดระดับของเหลวในรีบอยเลอร์เป็นการขยาย (expose) ผิวสัมผัสของท่อมากขึ้น ไดนามิคของระบบนี้คล้ายคลึงกับวิธีควบคุมคอนเดนเสดขาออก ความสูงของของเหลวในลูพประมาณ 5 - 10 ฟุต เนื่องจากในระบบมีปัญหาเมื่อภาวะรบกวนของความร้อนของรีบอยเลอร์ หรือความดันของไอน้ำเกิดการปั่นป่วน ซึ่งควรจะตั้งความสูงดังกล่าวไว้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้

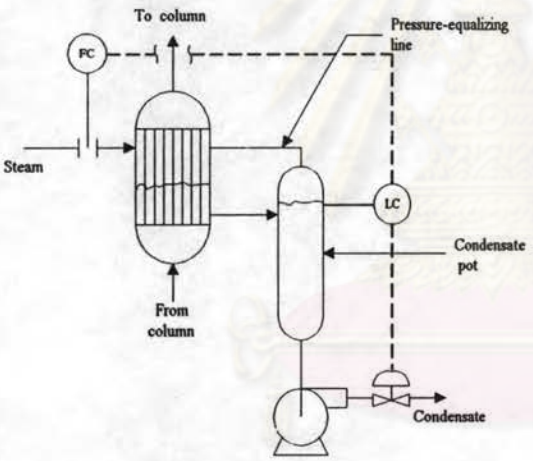
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



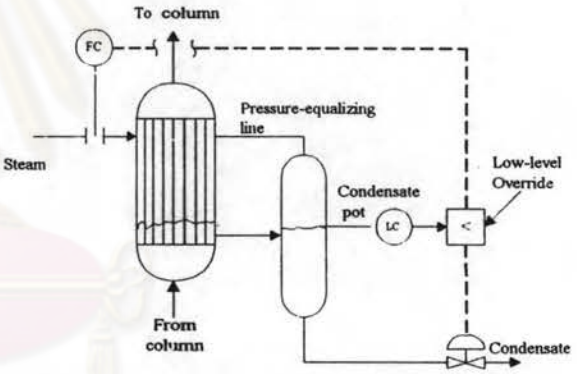
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

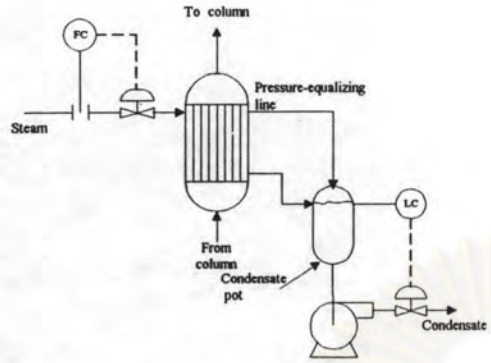
รูปที่ 2.11 แสดงการควบคุมรีบอยเลอร์แบบที่ใช้ไอน้ำเป็นสารตัวกลางให้ความร้อน

(ก) วิธี F-1 การควบคุมไอขาเข้า แบบไม่มีถังรองรับคอนเดนเสด

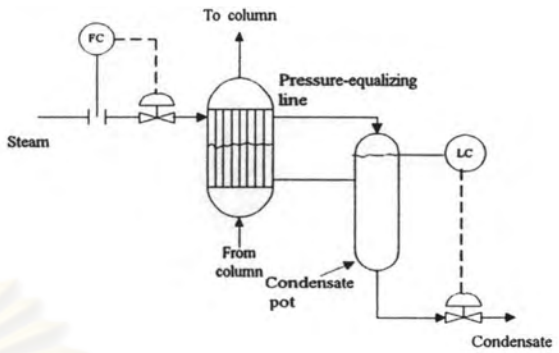
(ข) วิธี F-2 การควบคุมคอนเดนเสดขาออก แบบไม่มีถังรองรับคอนเดนเสด

(ค) วิธี F-3 การควบคุมคอนเดนเสดขาออก แบบมีถังรองรับคอนเดนเสดแบบระดับ

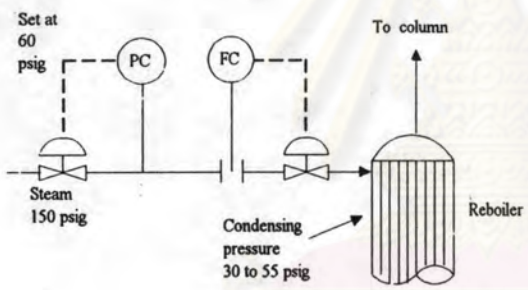
(ง) วิธี F-4 การควบคุมคอนเดนเสดขาออก แบบมีถังรองรับคอนเดนเสดโอเวอร์ไรด์กับระดับ



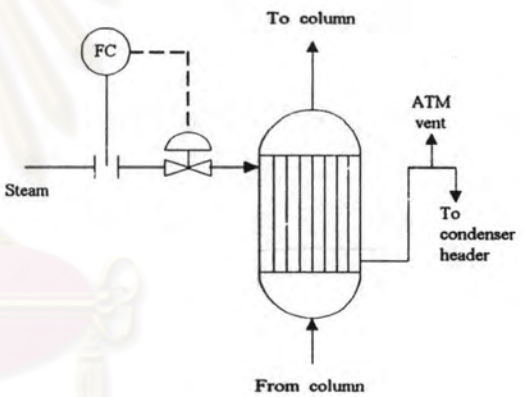
(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.11 (ต่อ) แสดงการควบคุมรีบอยเลอร์แบบที่ใช้ไอน้ำเป็นสารตัวกลางให้ความร้อน

(จ) วิธี F-5 การควบคุมไอขาเข้า แบบมีถังรองรับคอนเดนเสดแบบจุ่ม ที่ไม่มีระดับของเหลวในรีบอยเลอร์

(ฉ) วิธี F-6 การควบคุมไอขาเข้า แบบมีถังรองรับคอนเดนเสดแบบระดับ ที่มีการรักษาระดับของเหลวในรีบอยเลอร์

(ช) วิธี F-7 การควบคุมไอขาเข้า แบบใช้ตัวปรับความดันให้คงที่ (pressure regulator)

(ซ) วิธี F-8 การควบคุมไอขาเข้า แบบใช้ลูพซีล (seal loop)

2.6.2 การต้มซ้ำโดยอาศัยความร้อนแฝงของตัวกลางให้ความร้อน (Reboiling with sensible heat)

ตัวอย่างของการเดือดซ้ำโดยอาศัยความร้อนแฝง คือ การใช้น้ำมันร้อน (hot oil) , หรือใช้สารหล่อเย็นที่อยู่ในสภาวะเย็นต่ำ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการไหลผ่านรีบอยเลอร์ของตัวกลางให้ความร้อน นั่นคือ ส่งผลต่อการแปรเปลี่ยนของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และผลต่างอุณหภูมิ (ΔT) ที่คร่อมรีบอยเลอร์ ผลการตอบสนองของรีบอยเลอร์ขึ้นอยู่กับการแปรเปลี่ยนของสัมประสิทธิ์การถ่ายความร้อน หรือผลต่างอุณหภูมิที่เป็นแฟกเตอร์หลักต่อปริมาณความร้อนที่เข้า โดยทั่วไปรีบอยเลอร์ที่มี ΔT สูง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเป็นตัวแปรหลัก ในขณะที่ ΔT จะเป็นตัวแปรหลักก็ต่อเมื่อรีบอยเลอร์มี ΔT ต่ำ

การเปลี่ยนแปลงการไหลของสารให้ความร้อนเพียงเล็กน้อย จะส่งผลอย่างรวดเร็วต่อรีบอยเลอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารตัวกลางให้ความร้อน (ซึ่งโดยปกติจะต้องควบคุมสัมประสิทธิ์) นั่นคือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจะรวดเร็ว แต่ไม่เป็นเชิงเส้นของปริมาณความร้อนที่เข้ารีบอยเลอร์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการไหลของตัวกลางให้ความร้อน

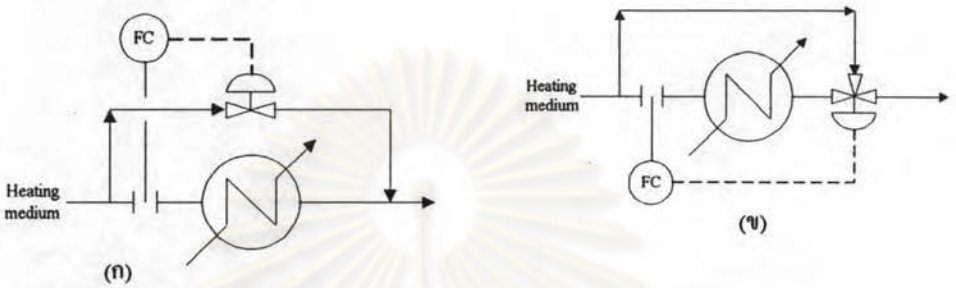
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการไหลของสารตัวกลางให้ความร้อน ผลตอบสนองของ ΔT จะช้า และซับซ้อนยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาการเพิ่มเป็นขั้นของการไหลของตัวกลางให้ความร้อน ผลการเปลี่ยนแปลงการไหลดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิขาออกของตัวกลางให้ความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ (stepping up) ส่งผลทำให้ ΔT สูงขึ้น และการเดือดเพิ่มขึ้น ใน

ขณะที่การเดือดเพิ่มขึ้นจะมีความร้อนที่ออกมาจากตัวกลางให้ความร้อนมากขึ้น อุณหภูมิขาออกจะต่ำลง เป็นการลด ΔT และการเดือด เมื่อการเดือดลดลงก็จะทำให้อุณหภูมิขาออกของตัวกลางเพิ่มขึ้น ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจะเกิดสลับกันไปอย่างนี้จนกว่ารีบอยเลอร์จะถึงจุดสมดุลใหม่ ส่งผลทำให้การตอบสนองช้ามากๆ ส่วนในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงผลต่างของอุณหภูมิเป็นตัวแปรหลัก รีบอยเลอร์จะต้องการการปรับจูนใหม่ เนื่องจากผลตอบสนองเร็วเกินไปจนทำให้การเดือดไม่คงที่

เมื่อ ΔT เป็นตัวแปรหลัก ผลตอบสนองจะมีความซับซ้อนมากขึ้น เมื่อตัวกลางให้ความร้อนเป็นของไหลที่ไหลเวียน การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนของรีบอยเลอร์จะส่งผลต่อการรบกวนทางความร้อนรวมของระบบการไหลเวียนของตัวกลาง ถ้าระบบควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นแบบเบาบาง (well-dampened) หรือเป็นระบบที่ควบคุมแบบแน่นอน (ซึ่งปกติจะทำได้ยาก) การเปลี่ยนแปลงการรบกวนทางความร้อนของรีบอยเลอร์ อาจจะส่งผลต่ออุณหภูมิขาเข้ารีบอยเลอร์ และส่งผลต่อไปยัง ΔT ของรีบอยเลอร์ ทางแก้ไขปัญหานี้ คือ การจูนตัวควบคุมใหม่ หรือใช้ระบบควบคุม BTU ช่วย (ดังจะแสดงในหัวข้อ 2.7.2)

จากที่กล่าวมาข้างต้น ถือเป็นวิธีการควบคุมที่ไม่เหมาะสม แต่จากนี้จะแสดงวิธีควบคุมการเดือดโดยอาศัยความร้อนแฝงดังวิธี G-1 (รูปที่ 2.12ก) ซึ่งเป็นวิธีเสียค่าใช้จ่ายน้อยและสามารถอิมพลีเมนต์ได้ด้วย แต่มีข้อเสียที่เป็นระบบการควบคุมที่เฉื่อยช้า การทำงานที่ต้องการเพิ่มการทำงานของรีบอยเลอร์ โดยการปิดวาล์วบายพาสซึ่งเป็นการเพิ่มการไหลของรีบอยเลอร์ ส่งผลให้ความดันคร่อมรีบอยเลอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีเส้นทางบายพาสคร่อมรีบอยเลอร์นั่นเอง จนในที่สุดระบบจะเข้าสู่สมดุลหลังจากระบบมีการไหลสลับไปมา (back and

forth flow fluctuation) เป็นสาเหตุให้เกิดความเฉื่อยช้าที่อัตราการไหล และส่งผลให้เกิดความเฉื่อยที่การควบคุมอุณหภูมิด้วย



รูปที่ 2.12 แสดงการควบคุมรีบอยเลอร์แบบที่ใช้การปรับจากความร้อนแฝงของสารตัวกลางให้ความร้อน

(ก) วิธี G-1 การควบคุมโดยใช้วาล์วบายพาส แต่ให้การควบคุมที่ไม่ดี

(ข) วิธี G-2 การควบคุมโดยใช้วาล์วบายพาส แต่ให้การควบคุมที่ดี

การเฉื่อยของอัตราการไหลนี้สามารถกำจัดได้โดยใช้วาล์ว 3 ทาง ดังวิธี G-2 (รูปที่ 2.12ข) ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกเสนอโดย Shinskey (1984) วาล์ว 3 ทางสามารถแทนด้วยวาล์ว 2 ตัวแต่เป็นวาล์วชนิดผสานกัน (interlinked valve) โดยวาล์วตัวหนึ่งใช้เป็นทางผ่านแลกเปลี่ยน ส่วนอีกตัวหนึ่งใช้เป็นบายพาส ซึ่งวาล์วทั้ง 2 ตัวนั้นขณะที่ตัวหนึ่งปิด ตัวหนึ่งจะเปิด มีวิธีหนึ่งที่ป้องกันการเฉื่อยของการไหล โดยใช้การควบคุมการไหลของรีบอยเลอร์ด้วยตัวควบคุมการไหล และการไหลบายพาสด้วยตัวควบคุมผลต่างความดัน (differential pressure controller : PDC) ดังวิธี G-3 (รูปที่ 2.12ค)

สาเหตุเนื่องมาจากผลต่างความดัน (ΔP) ไม่เพียงพอมากกว่า สาเหตุจากการออกแบบที่ไม่ถูกต้องหรือผิวสัมผัสสะอาดไป ในกรณีนี้วิธีควบคุมคอนเดนเสดขาออก ดังวิธี F-4 (รูปที่ 2.11ง) จะเหมาะสมกว่า หรือจะใช้วิธีควบคุมไอขาเข้าวิธี F-5 ที่ให้ผลการควบคุมดีกว่าก็ได้ แต่จะเสียค่าใช้จ่ายในการเพิ่มปั๊ม

10. การใช้ตัวดักไอน้ำอาจจะพบปัญหา เนื่องจากว่าตัวมันเองมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตัน หรือทำให้เกิดการติดขัดในการเปิดกว้าง ดังวิธี F-1 ถ้าใช้วิธี F-5 หรือ F-6 ก็จะแก้ปัญหาดังกล่าวได้

11. การจูนตัวควบคุมในวิธีควบคุมไอขาเข้าก็พบปัญหาได้ ในกรณีที่การไหลผ่านวาล์วมีการเปลี่ยนแปลงจากช่วงไม่วิกฤต (noncritical) สู่ช่วงวิกฤต (critical) ในรีบอยเลอร์ขณะที่การเดือดตกลง ส่งผลต่อความดันขาออกของวาล์วต่ำลง เมื่ออัตราส่วนความดันของขาเข้ากับขาออกของวาล์วเกินจุดวิกฤต จะทำให้เกิดการไหลวิกฤตผ่านตัววาล์ว และความดันขาออกต่ำลงจนส่งผลต่ออัตราการไหลของไอ การควบคุมตัวควบคุมที่สภาวะไดนามิคจะแตกต่างกันระหว่างการไหลแบบวิกฤต กับแบบไม่วิกฤต ขณะที่การจูนลูพของการไหลแบบวิกฤตมีแนวโน้มที่จะทำได้ยากกว่า (Buckley, 1974; 1985)

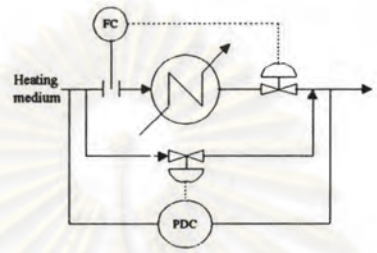
เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว ควรจะออกแบบให้การไหลอันใดอันหนึ่งสามารถปฏิบัติงานได้เหนือช่วงการทำงานปกติ จากวิธี F-6 ที่มีถังรองรับคอนเดนเสดแบบระดับ จะสามารถรักษาความดันขาออกของวาล์วระหว่างสภาวะที่ไม่ปกติเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว หรืออาจใช้วิธีการติดตั้งเครื่องปรับความดันให้คงที่สำหรับการควบคุมการไหลแบบวิธี F-7 (รูปที่ 2.11ช) ที่สามารถรักษาความดันขาเข้าวาล์วให้ต่ำลงได้ ซึ่งทั้งสองเทคนิคนี้จะเป็นการลดการ

ถ้าอัตราการไหลของตัวกลางให้ความร้อนที่เข้ารีบอยเลอร์ไม่ได้ขึ้นกับความต้องการของระบบตัวกลางให้ความร้อน อัตราการไหลดังกล่าวสามารถที่จะปรับได้โดยตรงดังวิธี G-4 (รูปที่ 2.12ง) โดยไม่ต้องใช้วาล์วบายพาส วิธีการปรับการไหลโดยตรงนั้นสามารถใช้ได้ เพราะว่าการใช้บายพาสนั้นจะเป็นการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากเป็นการทำให้เกิดการผสมของของเหลวเย็นขาออก กับของเหลวร้อนจากบายพาส วิธีปรับการไหลโดยตรงนี้จึงเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธี G-2 และ G-3 และไม่เกิดการเฉื่อยของอัตราการไหลเช่นในวิธี G-1

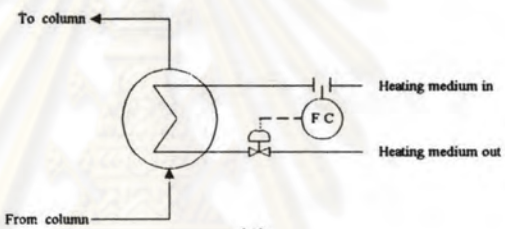
ปัญหาที่มักจะเกิดกับรีบอยเลอร์แบบปรับที่ความร้อนแฝงของสารตัวกลางให้ความร้อนนั้น คือ การแปรปรวนของอุณหภูมิขาเข้าของตัวกลางให้ความร้อน การใช้ตัวควบคุมปริมาณความร้อนเข้า (BTU control) ในวิธี G-5 (รูปที่ 2.12จ) จะสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ การควบคุมปริมาณความร้อนเข้าถือเป็นวิธีที่ดีกว่าการใช้การปรับโดยตรง หรือการใช้บายพาส โดยที่ตัวควบคุม BTU จะชดเชยต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางให้ความร้อน ตัวควบคุมปริมาณความร้อนเข้านิยมนำมาใช้ในทางปฏิบัติ เมื่อผลต่างอุณหภูมิคร่อมตัวแลกเปลี่ยน (ในที่นี้ คือ รีบอยเลอร์) มีผลต่างน้อย (ΔT เป็นตัวแปรหลัก) และการแปรปรวนอุณหภูมิของตัวกลางให้ความร้อนที่ส่งผลต่อการเดือดมีน้อย

ไดนามิคของการควบคุม BTU มักจะไม่คงที่ เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของตัวกลางเพิ่มขึ้นเป็นขั้น จะส่งผลต่อปริมาณความร้อนโดยตรงและเป็นเชิงเส้น แต่การเปลี่ยนแปลงการไหลและอุณหภูมิขาออกจะส่งผลต่อปริมาณความร้อนได้ช้า และมีผลกระทบต่อกัน ดังที่อธิบายไว้ข้างต้น จากปัญหาดังกล่าว Shinskey (1984) จึงแนะนำให้ใช้ตัวควบคุม BTU ทำคาสเคดกับตัวควบคุมการไหล แทนการใช้วิธีควบคุมวาล์วโดยตรง

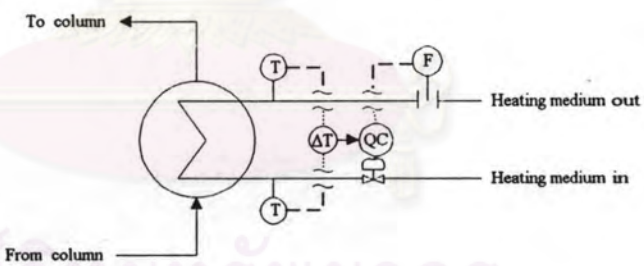
ถ้าตัวกลางให้ความร้อนมีตะกอนเกิดขึ้น วิธีการควบคุมดังกล่าวมาข้างต้น จะทำให้รีบอยเลอร์เกิดการอุดตันในขณะที่ปฏิบัติงานที่อัตราต่ำ หรือเมื่อความเร็วในการไหลเวียนของรีบอยเลอร์ช้าลง



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 2.12 (ต่อ) แสดงการควบคุมรีบอยเลอร์แบบที่ใช้การปรับจากความร้อนแฝงของสารตัวกลางให้ความร้อน

(ค) วิธี G-3 การควบคุมแบบบายพาสโดยใช้ตัวควบคุมความดันแตกต่าง (differential pressure control: PDC)

(ง) วิธี G-4 การควบคุมจากอัตราการไหลของสารตัวกลางให้ความร้อนโดยตรง

(จ) วิธี G-5 การควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมปริมาณความร้อนเข้าระบบ (heat input (BTU) control)

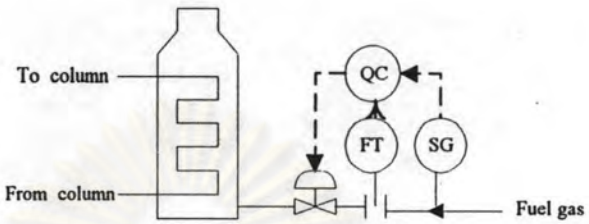
2.6.3 การต้มซ้ำแบบใช้การเผาไหม้โดยตรง (Reboiling with direct-fired)

รีบอยเลอร์แบบใช้การเผาไหม้โดยตรงนี้มักใช้งานกับโรงกลั่น โดยทั่วไปจะเป็นการเผาไหม้แกสผสมที่ถูกปล่อยออกมาจากหน่วยอื่น หรือใช้แกสธรรมชาติ ปัญหาที่พบสำหรับรี-บอยเลอร์แบบนี้ คือความร้อนเข้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบที่ผสมในแกสเชื้อเพลิง จากเหตุผลดังกล่าวจึงจำเป็นต้องควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่เข้าเตาเผาเพื่อควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้น

เพื่อให้ได้องค์ประกอบที่ถูกต้อง ควรใช้แฟกเตอร์ปริมาณความร้อน ($\sqrt{SG}$) ที่เป็นดัชนีวูปบี (Wobbe index) เมื่อ *SG* (specific gravity) เป็นความถ่วงจำเพาะของแกส สำหรับการผสมไฮโดรคาร์บอนนั้นค่าดัชนีวูปบี จะแปรตามค่า *SG* และการวัด *SG* ก็พอเพียงที่จะใช้ปรับองค์ประกอบของแกสให้ถูกต้องได้ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับดัชนีวูปบี จะไม่สัมพันธ์ต่อกันเมื่อมีสารบางชนิดเข้าไปในระบบ ได้แก่ แกสคาร์บอน-มอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน หรือแกสไฮโดรเจนในปริมาณหนึ่ง เครื่องมือวัดความร้อน (Thermal Calorimeter) ถูกนำมาใช้วัดปริมาณความร้อนของแกสเชื้อเพลิง แต่โดยทั่วไปผลการวัดปริมาณความร้อนช้าพอที่จะนำมาควบคุมเตาเผา แต่ก็มีบางกรณีที่เวลาการ ตอบสนองการวัดปริมาณความร้อนของแกสเชื้อเพลิงมากกว่าเวลาควบคุมเตาเผา กรณีนี้จึงไม่ใช่วิธีที่จะลดการรบกวนที่เตาเผา

วิธีควบคุมรีบอยเลอร์แบบเผาไหม้โดยตรงโดยการใช้ดัชนีวูปปี แสดงดังวิธี H (ในรูปที่ 2.13) ที่มีการติดตั้งเครื่องวัดความหนาแน่น (density meter) โดยตรงที่สายแกสเชื้อเพลิงที่จุด

ขาออกของถังเก็บแกส และจุดอื่นๆ ที่มีการเติมแกสเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นจุดที่ไม่มีผลกระทบจากการสันสะเทือน



รูปที่ 2.13 วิธี H แสดงรีบอยเลอร์แบบใช้การเผาไหม้โดยตรงที่มีการควบคุมปริมาณความร้อนเข้าระบบ

2.7 ความรู้ในการเลือกชนิดของรีบอยเลอร์ และเครื่องควบแน่น (Reboiler and condenser type)

เนื่องจากการเลือกชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าวที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานมักก่อให้เกิดปัญหาในการใช้งานได้ ซึ่งข้อดี และข้อเสียของรีบอยเลอร์และเครื่องควบแน่นแต่ละชนิดจะเป็นตัวกำหนดชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่สามารถแก้ปัญหาในการใช้งานต่างๆ กันได้

2.7.1 ชนิดของรีบอยเลอร์ (Reboiler type)

โดยทั่วไปแล้วชนิดของรีบอยเลอร์ (ดังในรูปที่ 2.14) จะเป็นแบบเทอร์โมไซฟอนแนวตั้ง เทอร์โมไซฟอนแนวนอน รีบอยเลอร์แบบการหมุนเวียนบังคับ รีบอยเลอร์แบบเค็ทเทิล และรีบอยเลอร์แบบภายใน ตารางที่ 2.7 แสดงเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละชนิดของรีบอยเลอร์ จากตารางดังกล่าวและการอธิบายขยายความที่จะกล่าวต่อไปนี้ จะเป็นข้อแนะนำ

ทั่วไปสำหรับการเลือกชนิดของรีบอยเลอร์ ซึ่งการประยุกต์ใช้งานของรีบอยเลอร์แต่ละชนิดแสดงรายละเอียดดังนี้

ก. รีบอยเลอร์แบบเทอร์โมไซฟอนแนวตั้ง (Vertical thermosiphon reboilers) ถือได้ว่าเป็นชนิดที่นิยมใช้งานกับกระบวนการกลั่นมากที่สุด เนื่องจากมีข้อดีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง, มีแนวโน้มการเกิดตะกอนที่ต่ำ และมีค่าเวลาเรซิเด็นท์ต่ำของการเดือดของสารในช่วงขณะที่ให้ความร้อน อีกทั้งยังเป็นชนิดที่กระทัดรัด, ต้องการพื้นที่ใช้งาน (plot space) น้อย และมีโครงสร้างของระบบท่อที่ง่าย มีค่าใช้จ่ายในการลงทุน (capital cost) ที่เทียบกับชนิดอื่นแล้วต่ำกว่า และไม่มีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน (operating cost) (ได้แก่ การใช้ปั๊ม) แต่ถึงแม้ว่ารีบอยเลอร์ชนิดอื่นจะมีข้อดีแตกต่างกันไป รีบอยเลอร์ชนิดนี้ก็ยังเป็นที่นิยมใช้มาก จะมีเพียงการใช้งานบางอย่างที่ทำให้รีบอยเลอร์ชนิดนี้ไม่เหมาะที่ใช้งานคือ

- เมื่อสารตัวกลางให้ความร้อน เกิดตะกอนและมีการสะสมภายในท่อรีบอยเลอร์แบบเทอร์โมไซฟอนแนวตั้งจะไม่สามารถใช้งานได้
- เมื่อความสูงของของเหลวหรือเฮดไม่เพียงพอ หรือการเพิ่มเฮดเสียค่าใช้จ่ายสูง ควรใช้รีบอยเลอร์ชนิดอื่นที่ต้องการเฮดต่ำกว่า
- เมื่อต้องการพื้นผิวสัมผัสมาก รีบอยเลอร์ชนิดอื่นจะสามารถให้พื้นที่ต่อเชล และจำนวนเชลต่อคอลัมน์มากกว่า
- ถ้าต้องการใช้งานที่ของเหลวมีการไหลเวียนด้วย เหมาะที่จะใช้รีบอยเลอร์แบบการหมุนเวียนบังคับ

- ในการใช้งานแบบสูญญากาศ รีบอยเลอร์แบบเทอร์โมไซฟอนแนวตั้งจะเกิดปัญหาขณะใช้งาน ริบอยเลอร์แบบการหมุนเวียนบังคับและแบบเค็ทเทิล เหมาะที่ใช้งานมากกว่า
- เมื่อใช้กับงานที่ต้องการความเชื่อถือสูง (high reliability) เป็นสิ่งสำคัญ รีบอยเลอร์แบบการหมุนเวียนบังคับ และแบบเค็ทเทิลเหมาะที่ใช้งานมากกว่า

ข. รีบอยเลอร์แบบเทอร์โมไซฟอนแนวนอน (Horizontal thermosiphon reboilers) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบเทอร์โมไซฟอนแนวตั้งแล้ว แบบแนวนอนจะต้องการโครงสร้างของระบบท่อ และพื้นที่ในการติดตั้งมากกว่า มีแนวโน้มการเกิดตะกอนมากกว่า (เมื่อของไหลมีการเดือดในเชล) และมีความน่าเชื่อถือต่ำกว่า อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า ส่วนข้อดีของรีบอยเลอร์ชนิดนี้ที่เหมาะกับการใช้งานต่างๆดังนี้

- เมื่อของไหลที่ถูกทำให้ร้อนมีการเกิดตะกอน และมักจะสะสมในท่อ
- เมื่อต้องการใช้กับงานที่การเพิ่มเฮดในรีบอยเลอร์เทอร์โมไซฟอนแนวตั้ง หรือการใช้ปั๊มเพิ่มในรีบอยเลอร์แบบการหมุนเวียนบังคับ ไม่สามารถทำได้หรือเสียค่าใช้จ่ายสูง
- เมื่อใช้กับงานที่ต้องการพื้นที่ผิวสัมผัสมาก และเป็นการยากที่จะใช้กับรีบอยเลอร์เทอร์โมไซฟอนแนวตั้ง
- เมื่อใช้กับงานที่ต้องการอัตราการไหลเวียนสูงสุด หรือต้องการลดการเพิ่มขึ้นของจุดเดือด (boiling point elevation) ที่สัมพันธ์กับเฮดของเหลว (ได้แก่ การกลั่นแยกสารที่ว่องไวต่อความร้อน ภายใต้ระบบสูญญากาศ)

หมายเหตุ ข้อพิจารณาที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นว่ารีบอยเลอร์เทอร์โมไซฟอนแนวนอนเหมาะอย่างยิ่งกับการแยกสารที่แยกยากๆ (superfractionator columns) (ได้แก่ การแยกโพรเพน-โพรพิลีน) ซึ่งเป็นการแยกที่ต้องการพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสูง และเสียค่าใช้จ่ายในการเพิ่มความสูงของคอลัมน์เพื่อเพิ่มเฮดของเหลว

ค. รีบอยเลอร์แบบการหมุนเวียนบังคับ (Forced-circulation reboilers)

โดยทั่วไปจะเป็นชนิดที่ไม่นิยมใช้เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายของปั๊ม และมีความเป็นไปได้ที่จะมีการรั่วของปั๊ม อย่างไรก็ตามก็มีบางสถานการณ์ที่ใช้รีบอยเลอร์แบบนี้

- เมื่อระบบมีการเกิดตะกอนหรือประกอบไปด้วยของแข็งค่อนข้างสูง รีบอยเลอร์แบบนี้จะสามารถให้ความเร็วในการทำงานสูงกว่า และสามารถปฏิบัติงานได้ที่อัตราการระเหยต่อพาส (pass) ต่ำกว่าชนิดอื่นๆ
- ในระบบที่มีการให้ความร้อนแบบใช้การเผาไหม้ การไหลเวียนที่ต่อเนื่องและพอเพียง และมีการควบคุมอัตราการไหลเวียน จะช่วยป้องกันการเกิดความร้อนที่สูงเกินไปภายในท่อ
- ในระบบที่มีความหนืดสูงๆ (> 25 เซ็นติพอยท์, cP) ซึ่งของเหลวจะต้องมีถูกดัน ("pushed") ผ่านตัวรีบอยเลอร์
- เมื่อรีบอยเลอร์วางห่างจากคอลัมน์ ณ ตำแหน่งที่พอเพียง
- ในระบบสูญญากาศ (ความดัน < 4 psia) รีบอยเลอร์แบบเทอร์โมไซฟอนมักเกิดปัญหาในการใช้งาน
- เมื่อใช้งานกับระบบที่ต้องการระบบควบคุมที่ดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง. รีบอยเลอร์แบบเค็ทเทิล (Kettle reboilers)

รีบอยเลอร์แบบเค็ทเทิลจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ, มีแนวโน้มการเกิดตะกรันสูง, มีการใช้พื้นที่ในการติดตั้งสูง และเป็นชนิดที่มีราคาแพง โดยทั่วไปจึงไม่นิยมใช้งานกับการกลั่น มีบางสถานการณ์ที่ใช้รีบอยเลอร์ชนิดนี้คือ

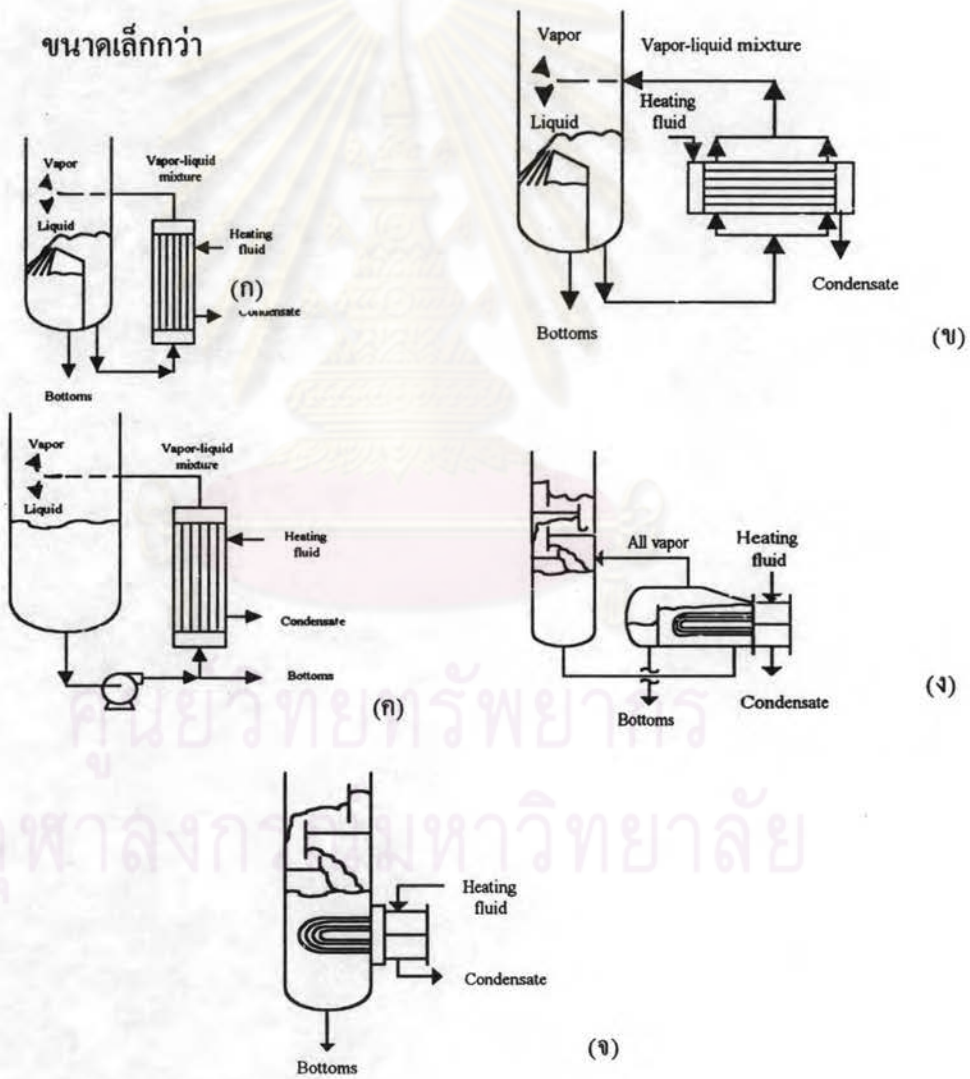
- เมื่อคอลัมน์มีเฮด หรือความสูงแนวตั้งไม่เพียงพอ
- เมื่อต้องการพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนมาก
- เมื่อสามารถคาดเดาความไม่เสถียรที่จะเกิดขึ้นได้
- เมื่อต้องมีการทำความสะอาดบ่อยๆ เช่นในคอลัมน์แบบสูญญากาศ
- เมื่อต้องการลดของเหลวควบแน่นขาออกจากรีบอยเลอร์ให้น้อยที่สุด
- เมื่อมีการปฏิบัติงานที่ใกล้จุดความดันวิกฤตที่ต้องการความน่าเชื่อถือเป็นสิ่งสำคัญ

จ. รีบอยเลอร์แบบภายใน (Internal reboilers)

เป็นชนิดรีบอยเลอร์ที่ไม่ควรนำมาใช้เนื่องจากการประกอบต่อ (fitting) ตัวรีบอยเลอร์เข้ากับคอลัมน์ต้องมีการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความสูงของคอลัมน์ และอาจจะต้องการการทำความสะอาดคอลัมน์ในขณะที่มีการปฏิบัติงานอยู่ด้วย

ขณะที่ของเหลวมีการเดือดเป็นฟอง ซึ่งเป็นการทำให้ความหนาแน่นของของเหลวแปรปรวน ส่งผลให้การควบคุมระดับล่างของคอลัมน์ทำได้ยาก จึงทำให้รีบอยเลอร์แบบภายในนี้ไม่เหมาะกับการใช้งานในสภาวะการเกิดฟอง (foaming) และสภาวะสูญญากาศ สำหรับการใช้งานบางสภาวะที่เหมาะกับรีบอยเลอร์แบบนี้คือ

- เหมาะกับการกลั่นแบบแบทช์ ที่มีมัดท่อ (tube bundle) ที่สามารถประกอบเข้ากับแบทช์ดรัมได้ง่าย และสามารถทำความสะอาดได้ง่าย
- เหมาะกับการทำความสะอาดคอลัมน์ที่มีการทำความสะอาดที่ภาระความร้อนต่ำๆ กล่าวคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ใหญ่กว่ากรณีใช้รีบอยเลอร์ชนิดอื่นๆ และมีมัดท่อในรีบอยเลอร์ขนาดเล็กกว่า



รูปที่ 2.14 แสดงชนิดของรีบอยเลอร์
(ก) แบบเทอร์โมไซฟอนแนวตั้ง (ข) แบบเทอร์โมไซฟอนแนวนอน
(ค) แบบการหมุนเวียนบังคับ (ง) แบบเค็ทเทิล (จ) แบบภายในคอลัมน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบชนิดของรีบอยเลอร์

	เทอร์โมไซฟอนแบบแนวตั้ง รูปที่ 2.14ก	เทอร์โมไซฟอนแบบแนวนอน รูปที่ 2.14ข	เค็ทเทิล รูปที่ 2.14ค	การหมุนเวียนบังคับ รูปที่ 2.14ง	รีบอยเลอร์แบบภายใน รูปที่ 2.14จ
บริเวณที่เกิดการเดือด	ภายในท่อ	ภายในเชล	ภายในเชล	ภายในท่อ	ภายในเชล
อัตราการถ่ายเทความร้อน	สูง	ปานกลางถึงสูง	ต่ำถึงปานกลาง	สูง	ต่ำถึงปานกลาง
ระบบท่อ	ต้องการจำนวนท่อเพียงเล็กน้อยสำหรับโครงสร้างอย่างง่าย ๆ	ต้องการท่อเป็นพิเศษ	ต้องการท่อเป็นพิเศษ	ต้องการท่อเป็นพิเศษ	ไม่ต้องการ
ความต้องการปั๊ม	ไม่ต้องการ	ไม่ต้องการ	ไม่ต้องการ	ต้องการ	ไม่ต้องการ
ความต้องการเพิ่มขอบ (skirt) ของคอลัมน์ (ในกรณีที่ส่วนล่างหอไม่มีปั๊ม)	ต้องการเพิ่มขอบความสูงของคอลัมน์	ต้องการเพิ่มขอบความสูงของคอลัมน์แต่น้อยกว่าชนิดเทอร์โมไซฟอน	ต้องการเพียงเล็กน้อย	ต้องการเพียงเล็กน้อย แต่จะต้องการมากขึ้น ถ้าค่า NPSH (net positon suction head) สูง หรือถ้าค่าเวลาเรซิเดนท์ ในส่วนก้นหอ ไม่เพียงพอที่ปล่อยไอออกไป	ต้องการเพียงเล็กน้อย
ค่าเวลาเรซิเดนท์ ในโซนให้ความร้อน	ต่ำ	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง
แนวโน้มการเกิดตะกอน (process side)	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	ค่อนข้างต่ำ	ปานกลาง
ประสิทธิภาพเมื่อของเหลวมีความหนืดสูง (> 25 CP)	ต่ำ	ต่ำ (แต่ดีกว่าแบบแนวตั้ง)	ต่ำ	ดี	ต่ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบชนิดของรีบอยเลอร์

	เทอร์โมไซฟอนแบบแนวตั้ง รูปที่ 2.14ก	เทอร์โมไซฟอนแบบแนวนอน รูปที่ 2.14ข	เค็ทเทิล รูปที่ 2.14ค	การหมุนเวียนบังคับ รูปที่ 2.14ง	รีบอยเลอร์แบบภายใน รูปที่ 2.14จ
การจัดการพื้นผิวสัมผัสขนาดใหญ่	ต้องการมากกว่า 1 เชล	ง่ายกว่าแบบแนวตั้ง แต่ยากกว่าแบบเค็ทเทิล	พื้นผิวสัมผัสขนาดใหญ่ สามารถใช้ในเชลเดียวได้	ต้องการมากกว่า 1 เชล	ความต้องการจำกัดจากขนาดของคอลัมน์ ซึ่งโดยทั่วไปจะทำได้ยาก
การบำรุงรักษา และการทำความสะอาด	ทำได้ยากขึ้นอยู่กับความข้น	ค่อนข้างยาก	ค่อนข้างยาก	ทำได้ยาก ขึ้นอยู่กับความข้น (ถ้าเป็นแบบแนวตั้ง)	ทำได้ยาก ในกรณีออนไลน์ , ทำได้ง่ายในกรณีปิดเครื่อง
การควบคุมการเกิดตะกอน	ดี	ดี	แย่	ดีมาก	ดี
ความว่องไวต่อความไม่เสถียร	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
การใช้ fin ในท่อที่เกิดการเดือด	-	เป็นไปได้	เป็นไปได้	-	เป็นไปได้
การใช้ข้อมูลในการออกแบบ	มีพร้อม	มีบางส่วน	มีพร้อม	มีพร้อม	มีพร้อม
พื้นที่ในการปล่อยไอ	ไม่มี	ไม่มี	ต้องการสร้างเพิ่ม	ไม่มี	-
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	ปานกลาง	ค่อนข้างต่ำ
ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน (ไม่นับรวมตัวกลางให้ความร้อน)	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ค่าปั๊ม และบางครั้งเป็นการรั่วของปั๊ม	ไม่มี
ความน่าเชื่อถือ	ดี	ปานกลาง	ดีมาก	ดีถึงดีมาก	ปานกลาง
ความต้องการผลต่างของอุณหภูมิที่ครอบรีบอยเลอร์	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลางถึงสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.2. ชนิดของเครื่องควบแน่น (Condenser type)

ในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเลียม พบว่ามีการใช้งานเครื่องควบแน่นแตกต่างกันอยู่ 6 ชนิด ดังนี้

ก. เครื่องควบแน่นแบบไอควบแน่นอยู่ในเชลที่วางเครื่องในแนวนอน (Horizontal in-shell condensers) หมายถึง ไอที่ต้องการควบแน่นอยู่ภายในเชล (shell) ส่วนของเหลวหล่อเย็นอยู่ในท่อ (tube) เป็นชนิดเครื่องควบแน่นที่นิยมใช้กับการกลั่นปิโตรเลียม มักนิยมใช้กับเครื่องควบแน่นแบบใช้น้ำเป็นสารทำความเย็น และเหมาะกับการใช้งานในช่วงเวลาเริ่มเดินเครื่อง และเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดที่วางในแนวตั้งแล้ว พบว่าเครื่องควบแน่นที่วางในแนวนอนนี้สามารถใช้กับการปฏิบัติงานแบบท่วมบางส่วน (partially "flooded" operation) แบ่งได้เป็น 2 ชนิด

- เชลชนิดทีม่า อี (TEMA E type) มีการติดตั้งแผ่นกั้น (baffle) แบบแนวตั้งซึ่งนิยมใช้เนื่องจากเป็นเชลที่ให้การถ่ายเทความร้อนดี และยอมให้เกิดการไหลสวนกลับได้ แต่มักให้ความดันลด (pressure drop) สูง แสดงดังรูปที่ 2.15ก
- เชลชนิดเจ (J type) เป็นแบบไม่มีแผ่นกั้น จึงนำมาใช้กับระบบที่พิจารณาถึงความดันตกเป็นสำคัญ เช่น ในระบบสูญญากาศ แสดงดังรูปที่ 2.15ข

ข. เครื่องควบแน่นแบบไอควบแน่นอยู่ในเชลที่วางเครื่องในแนวตั้ง (Vertical in-shell condensers) เหมาะกับการใช้เป็นอุปกรณ์ควบแน่นในรีบอยเลอร์มากกว่าที่จะใช้ในเครื่องควบแน่นของกระแสยอดหอ ไอจะมีลักษณะไหลลงอีกทั้งเชลสามารถมีแผ่นกั้นได้ แต่มักจะไม่นำมาใช้ในการควบแน่นไอที่มีองค์ประกอบเดียว

ค. เครื่องควบแน่นแบบไอควบแน่นอยู่ในท่อที่วางเครื่องในแนวนอน (Horizontal in-tube condensers) หมายถึง ไอที่ต้องการควบแน่นอยู่ภายในท่อ ส่วนของเหลวหล่อเย็นอยู่ในเชล เหมาะกับเครื่องควบแน่นแบบใช้อากาศเป็นสารทำความเย็น และใช้กับเครื่องแลกปลี่ยนความร้อนที่เป็นทั้งเครื่องควบแน่นและรีบอยเลอร์แบบวางแนวนอน (horizontal condenser-reboilers) เครื่องควบแน่นแบบนี้มักจะมีการจัดวางเป็นพาสเดี่ยว (single-pass) หรือมีการจัดวางเป็นรูปตัวยู (U-tube) แต่บางครั้งจะใช้การจัดวางแบบมัลติพาส (multipass) ก็ได้ แต่การควบแน่นในการจัดวางแบบมัลติพาส มักจะพบปัญหาในกรณีใช้ควบแน่นสารผสมที่มีหลายองค์ประกอบ

ง. เครื่องควบแน่นแบบไอควบแน่นอยู่ในท่อที่วางเครื่องในแนวตั้ง (Vertical in-tube condensers) หมายถึง ไอที่ต้องการควบแน่นอยู่ภายในท่อ ส่วนของเหลวหล่อเย็นอยู่ในเชล แบ่งเป็น 2 ชนิด

- ชนิดที่มีการไหลของไอขึ้นบน (upflow) หรือเรียกอีกอย่างว่า inerts condenser, vent condenser or knockback แสดงดังรูปที่ 2.15ค มักจะใช้กับเครื่องควบแน่นแบบบางส่วน (partial condensers) ที่มีการไหลของไอออกด้านบนในปริมาณหนึ่ง ส่วนคอนเดนเสตส่วนใหญ่จะไหลออกด้านล่างโดยแรงโน้มถ่วง การประยุกต์ใช้งานของหอกลั่นของเครื่องควบแน่นชนิดนี้ เป็นการใช้เครื่องควบแน่นแบบภายในคอลัมน์ (internal condensers) หรือเป็นเครื่องควบแน่นแบบทุติยภูมิ (secondary condensers) การประยุกต์อย่างหลังนั้นมักจะใช้ในการนำกลับองค์ประกอบหนักจากกระแสที่มีแกสเฉื่อยที่ออกมาจากรีฟลักซ์ดรัม

ปัญหาหลักของชนิดการไหลของไอขึ้นบน คือ มักจะเกิดการท่วม หรือการติดไปกับของเหลวที่มากเกินไป เนื่องจากความเร็วของไอสูงพอที่จะทำให้ของเหลวไหลขึ้น โดยที่

ความเร็วในการเกิดการท่วมสามารถประมาณโดยอาศัยความสัมพันธ์ของ Diehl และ Koppany (1969) ดังนั้นจึงต้องให้ความเร็วไอที่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ต่ำ ๆ และให้มีความเร็วสูงสุดที่บริเวณใกล้ทางเข้า เพื่อที่จะลดความเร็วของไอนั้น จะต้องให้ขนาดสายระบาย (vent) ของเครื่องควบแน่นสั้น และมีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่

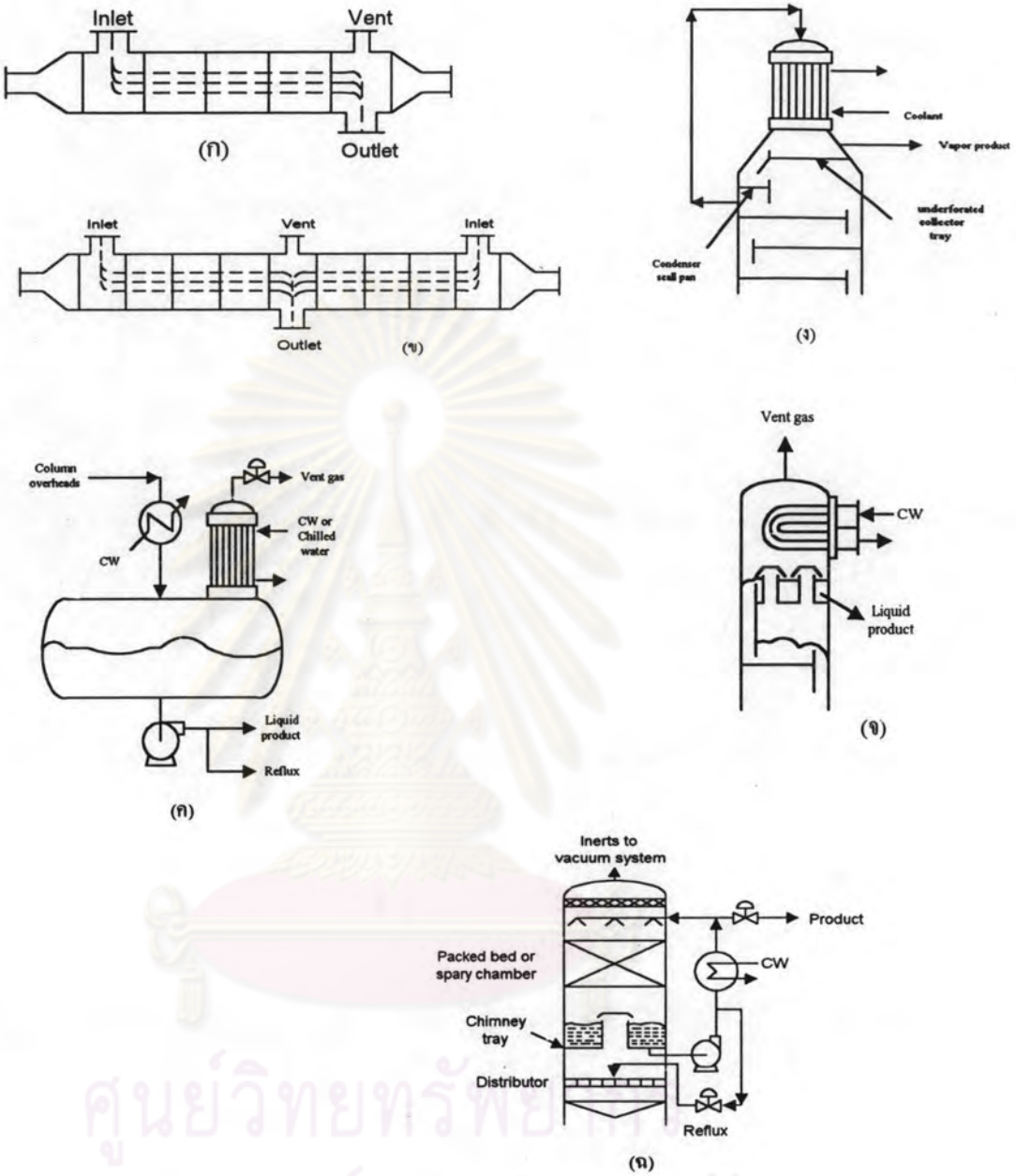
- ชนิดที่มีการไหลของไอลงล่าง (downflow) แสดงดังรูปที่ 2.15ง เหมาะกับการใช้งานในอุตสาหกรรมเคมี ที่มักจะมีการใช้สารกัดกร่อนด้วย ซึ่งให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการควบแน่นแบบไอควบแน่นอยู่ในเชล และสามารถใช้งานกับของผสมที่มีหลายองค์ประกอบได้ ถ้าความดันตกอยู่ในช่วงที่พอรับได้ และการใช้เครื่องควบแน่นชนิดนี้จะเป็นการลดค่าใช้จ่ายของเครื่องควบแน่นในกรณีที่มีการปนของสารกัดกร่อน การใช้งานของเครื่องควบแน่นชนิดนี้มักจะทำเป็นเครื่องควบแน่นแบบภายในคอลัมน์

จ. เครื่องควบแน่นแบบภายในคอลัมน์ (Internal condenser) เป็นการใช้งานที่เหมาะสมกับการกลั่น โดยสามารถออกแบบให้มีไอควบแน่นมีการไหลขึ้น หรือไหลลงผ่านท่อหรือเชลก็ได้ รูปแบบส่วนใหญ่เป็นดังรูปที่ 2.15ง, 2.15จ

เครื่องควบแน่นแบบภายในคอลัมน์นี้เป็นการลดการใช้รีฟลักซ์ดรัม ปั๊มรีฟลักซ์ และระบบท่อบางส่วน ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการลงทุน และในการปฏิบัติงาน และยังเป็นการปฏิบัติงานของคอลัมน์อย่างง่ายๆ แต่ในทางตรงกันข้ามเครื่องควบแน่นแบบนี้ จะทำให้ความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการทำให้การประหยัดลดลง ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการท่วมและลดความสูงของคอลัมน์จึงมักมีการออกแบบเครื่องควบแน่นให้ท่อมีแนวตั้งที่สั้น แต่ก็จะเป็นการลดความเร็วไอส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง และค่าใช้จ่ายของ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น และเป็นวิธีที่ไม่ต้องมีการควบคุมอัตราการไหลรีฟลักซ์ ดังนั้นที่สภาวะเริ่มเดินเครื่องการสร้างซีลของเหลวในซีลพาสของเครื่องควบแน่น (รูปที่ 2.15ง) จะทำได้ยาก

ฉ. เครื่องควบแน่นแบบสัมผัสโดยตรง (Direct-contact condensers) แสดงดังรูปที่ 2.15 ฉ มักจะนำมาใช้เพื่อลดความดันตกในการควบแน่นที่สภาวะสูญญากาศ บริเวณที่มีการสัมผัสโดยตรงนั้นจะมีลักษณะที่ภายในมีความดันตกต่ำ เช่น ในคอลัมน์แบบแพค หรือมีลักษณะเป็นสเปรย์ (spary chamber) การประยุกต์อีกอย่างหนึ่ง คือ การใช้เครื่องควบแน่นนี้เป็นตัวกลางนำความร้อนออก (หรือ "pumparounds") ในการกลั่นแยก จุดประสงค์หลัก คือ การนำกลับความร้อนให้มากที่สุดที่ระดับอุณหภูมิสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การประยุกต์ใช้งานอย่างที่ 3 คือการใช้เครื่องควบแน่นเป็นตัวกลางนำความร้อนออกจากหอดูดซับ (absorbers) หรือหอกลั่นแบบรีแอกทีฟ (reactive distillation column) ซึ่งมีปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ซึ่งการประยุกต์ที่กล่าวมาทั้งหมดนั้น การควบแน่นจะเกิดจากการสัมผัสกับของเหลวเย็นต่ำ ที่ไหลวนภายนอก ปัญหาหลักในการปฏิบัติงานคือสมรรถนะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บของเหลว และอุปกรณ์ภายใน (เช่น packing และ distributors) การใช้งานในคอลัมน์แบบสูญญากาศนั้นแกสที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะต้องกำจัดออกตลอดเวลา เพื่อรักษาความดันสมบูรณ์ให้ได้ตามต้องการ



รูปที่ 2.15 แสดงชนิดของเครื่องควบแน่น

(ก) แบบไอควบแน่นอยู่ในเชลที่วางแนวตั้ง , ชนิด ทีม่า อี, (ข) แบบไอควบแน่นอยู่ในเชลที่วางแนวนอน , ชนิด เจ, (ค) แบบไอควบแน่นอยู่ในท่อที่วางแนวตั้ง , ชนิดไอไหลขึ้นบนที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องควบแน่นแบบทุติยภูมิ, (ง) แบบภายในคอลัมน์ที่วางแนวตั้ง, (จ) แบบภายในคอลัมน์ที่วางแนวนอน, (ฉ) แบบสัมผัสโดยตรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8 ความรู้ในการเลือกจุดวัดตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (Sample points for analyzer control)

ตำแหน่งที่วัดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบที่ได้จากการวัด และองค์ประกอบจากผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงเป็นผลมาจากความถูกต้องในการวัด, ความเร็วของผลตอบสนอง, ลักษณะธรรมชาติของตัวอย่าง และความน่าเชื่อถือ (reliability) ของระบบ ข้อดี และข้อเสียของตำแหน่งวัดต่างกัน เพื่อควบคุมองค์ประกอบของคอลัมน์แสดงดังข้างล่างนี้

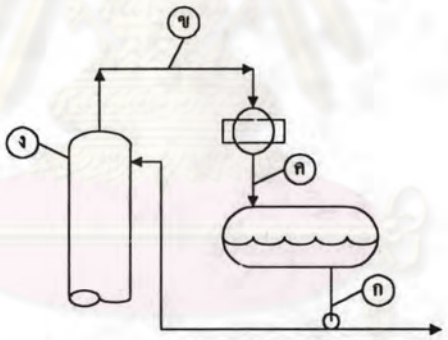
ข้อแนะนำสำหรับเลือกตำแหน่งวัดที่ดีที่สุด เช่น เมื่อการควบคุมองค์ประกอบ โดยการใช้ตัววิเคราะห์ (analyzer) ที่ไม่มีการคาสเคดกับตัวควบคุมอุณหภูมิ ในกรณีนี้ไดนามิคของระบบตัววิเคราะห์จะเป็นข้อพิจารณาสำคัญของการเลือกควบคุมองค์ประกอบ แต่ถ้ามีการคาสเคดระหว่างตัววิเคราะห์กับตัวควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ด้วย ไดนามิคของระบบการใช้ตัววิเคราะห์จะพิจารณาเป็นแฟกเตอร์ที่ 2 ในกรณีจะพิจารณาจากการประยุกต์ใช้งาน แต่ตำแหน่งวัดที่ดีที่สุดมักจะต่างจากตำแหน่งที่ให้ไดนามิคที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีปัญหาน้อยที่สุด

2.8.1 จุดวัดตำแหน่งองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ

ก. ที่ทางออกของถังรองรับ (โดยทั่วไปจะวัด ณ ตำแหน่งพ้นจากรีฟลักซ์ปั๊ม)

เป็นตำแหน่งที่ถือว่าสะดวกที่สุด (ดูรูปที่ 2.16 ประกอบ) โดยมีข้อดีตรงที่เป็นการวัดตัวอย่างจากกระแสผลิตภัณฑ์โดยตรง ซึ่งเป็นการทำให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุดจากการกลายเป็นไอ, การควบแน่น, การการไหลถ่ายเทของฟองไอ หรือการไหลถ่ายเทของหยดของเหลวในสายตัวอย่าง (เมื่อรีฟลักซ์ หรือผลิตภัณฑ์มักจะถูกทำให้เย็นต่ำ) และเป็นวิธีที่ให้สายตัวอย่างสั้นที่สุด ง่ายต่อการปฏิบัติงาน และการซ่อมบำรุง และเสียค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ข้อเสียของการวัดที่

ตำแหน่งนี้ คือ การมีแล็กมากในถังรองรับ ซึ่งทำให้ใช้เวลาหลายนาทีกว่าที่ตัวอย่างจะไปถึงตัววิเคราะห์ และยังมีข้อเสียในการมีแนวโน้มทำให้เกิดการผสมอย่างไม่สม่ำเสมอในรีฟลักซ์ดรัม และมีเดดไทม์ในสายตัวอย่าง (เนื่องจากตัวอย่างจะเป็นของเหลวมากกว่าไอ) การเก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งนี้ มักจะให้การควบคุมที่ช้าเนื่องจากการเกิดแล็กดังกล่าว จากข้อเสียที่กล่าวมาเพียงพอที่จะลบล้างข้อดีของวิธีนี้ได้ และมีหลาย ๆ คน (Lupfer, 1974; Nisenfeld, 1981; Rademaker, 1975) ไม่แนะนำให้วัดตัวอย่าง ณ ตำแหน่งนี้ มีบางกรณีที่การควบคุมจากตำแหน่งนี้ไม่เหมาะสม และให้ย้ายไปติดตั้งที่เทรย์ยอดหอแทน (Stanton, 1979) แต่ในกรณีอื่น (Tyler, 1962) แสดงว่าการวัดตัวอย่าง ณ ตำแหน่งนี้ให้การควบคุมที่ดี



รูปที่ 2.16 แสดงจุดวัดองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ

ข. ที่สายไอยอดหอ หรือบริเวณไอยอดหอ

ถ้าพิจารณาจากไดนามิคเป็นสำคัญแล้วตำแหน่งนี้ถือเป็นตำแหน่งที่น่าใช้มากที่สุด แล็กที่เกิดจากการวัดระหว่างคอลัมน์กับจุดวัดตัวอย่าง และในสายตัวอย่าง (ตัวอย่างเป็นเฟสไอ) จะถูกลดลงมากที่สุด อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็มีข้อเสียหลายอย่าง

ตัวอย่างที่ออกที่ตำแหน่งนี้มักจะเกิดสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิด (nonreproducibility) เนื่องจากหยดของเหลวที่เกิดจากการไหลถ่ายเท หรือการควบแน่นที่บรรยากาศ อาจจะกระทบต่อ

องค์ประกอบของตัวอย่าง ปริมาณของเหลวในตัวอย่างอาจเปลี่ยนแปลง แต่ส่งผลต่อการวัดได้ และเนื่องจากเกรเดียนท์ขององค์ประกอบมีมาก (มักเกิดกับเฟสไอเหนือเทรย์ยอดหอในสายไอยอดหอ) ในกรณีอื่น (Oglesby, 1966) แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นขององค์ประกอบหนักที่วัดใกล้เคียงผนังสายไอยอดหอ เป็นครึ่งหนึ่งของการวัดที่กลางสายไอยอดหอ และเกรเดียนท์ขององค์ประกอบไม่คงที่ เพื่อจะแก้ไขปัญหาดังกล่าว ก็ควรจะวัดตัวอย่างจากส่วนยอดของเส้นทางในแนวนอนระหว่างทางในสายไอยอดหอ และเพิ่มถังดักของเหลวที่เกิดขึ้นเพื่อกำจัดหยดของเหลว แต่วิธีนี้ไม่ใช่ว่าจะเพียงพอกำจัดปัญหาการเกิดสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดได้หมด

ตัวอย่างจากสายไอยอดหอจะให้ความสัมพันธ์ภายใน (inferior correlation) จากองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ เมื่อเป็นเครื่องควบแน่นแบบบางส่วน เนื่องจากเป็นเสมือนการเพิ่มชั้นการแยกที่รีฟลักซ์ดรัม ปัญหานี้อาจจะไม่เกิดขึ้นถ้ามีปริมาณสารไม่ควบแน่นเพียงเล็กน้อยปะปนอยู่ในผลิตภัณฑ์ทั้งหมด แต่จะมีปัญหานี้เกิดขึ้นถ้ามีปริมาณสารที่ไม่ควบแน่นในปริมาณมาก และสำหรับระบบสูญญากาศซึ่งมีสารเฉื่อยปนอยู่ตลอดเวลา จะมีแนวโน้มเกิดปัญหานี้ได้ง่าย

ข้อเสียอย่างอื่นนอกจากการวัดตัวอย่างที่ตำแหน่งนี้ คือสายตัวอย่างยาว, ต้องเก็บตัวอย่างในเฟสไอ (เช่น การใช้ heat tracing) และเป็นวิธีที่ยากต่อการใช้งาน และบำรุงรักษาอีกทั้งยังมีราคาแพง

แม้จะมีข้อเสียดังกล่าวข้างต้น มีนักออกแบบบางท่านนิยมใช้วิธีนี้ แม้ว่าจะใช้เครื่องควบแน่นแบบบางส่วน นั่นก็เนื่องมาจากข้อเด่นในเรื่องไดนามิค

ค. ที่สายของเหลวที่ออกจากเครื่องควบแน่นในเข้าถังรองรับ

ตำแหน่งนี้จะใช้เมื่อสายดังกล่าวจะต้องเต็มไปด้วยคอนเดนเสตตลอดเวลา ตำแหน่งนี้จะให้ผลตอบสนองทางไดนามิคดี (ไม่มีแล็กในถังรองรับ) และแสดงถึงตัวอย่างแท้จริง (อาจจะเนื่องจากฟองไอที่มีอยู่ แต่ความหนาแน่นไอน้อยกว่าของเหลว ผลกระทบจากฟองไอจึงมีน้อยต่อการวิเคราะห์) ข้อเสียของการวัดตำแหน่งนี้ ได้แก่ ความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ไม่ถูกต้อง เมื่อมีการปล่อยที่รีฟลักซ์ดรัม, สายตัวอย่างค่อนข้างยาว (fairly long) มีเดดไทม์เพิ่มขึ้นในสายตัวอย่าง (เนื่องจากตัวอย่างเป็นของเหลวไม่ใช่ไอ) วิธีนี้นิยมใช้มากกว่า 2 วิธีที่กล่าวมาแล้ว

ง. ที่เทรย์ยอดหอ

เหตุผลสำคัญที่วัด ณ ตำแหน่งนี้ คือ เป็นความต้องการความว่องไวของตัววิเคราะห์ที่ง่าย ซึ่งเหมาะกับคอลัมน์ที่มีการลดการทำงานลง ระดับความไม่บริสุทธิ์จะเพิ่มขึ้น จึงเหมาะกับตัววิเคราะห์แบบที่มีความว่องไวน้อย

ตำแหน่งนี้ให้ผลตอบสนองไดนามิคดี แต่มีเสียหลายอย่าง ได้แก่ ความสัมพันธ์กับองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ไม่ดี และมักจะขึ้นกับรีฟลักซ์, สายตัวอย่างยาว, มีเดดไทม์เพิ่มขึ้นในสายตัวอย่าง (ถ้าใช้เฟสของเหลวเป็นตัวอย่าง), มักเกิดการไหลถ่ายเทของของเหลวในไอ หรือไอในของเหลว และต้องใช้ถังดักของเหลวที่เกิดขึ้นในการเก็บตัวอย่าง, ยากที่จะใช้งาน และบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายแพง

การควบคุมเทรย์ยอดหอควรเลือกตำแหน่งที่ใกล้ยอดหอ เพื่อให้แน่ใจว่าจะให้ความสัมพันธ์กับองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ไม่ดี แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องห่างจากยอดหอพอที่ให้ความ

ว่องไวแก่ตัววิเคราะห์ โดยทั่วไปมักใช้เทรย์ที่ 5 ถึง 10 นับจากเทรย์บนสุดลงมาในการวัดของการแยกที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง เทรย์บนสุดควรจะหลีกเลี่ยง และถ้ามีการผสมที่ไม่ดีในเทรย์ของคอลัมน์อาจจะเปลี่ยนไปใช้ตำแหน่งรีฟลักซ์แทน ซึ่งเท่ากับเป็นการวัด ณ ตำแหน่งทางออกของรีฟลักซ์ดรัม (แบบวิธีที่ ก.) ถ้าพิจารณาถึงความว่องไวของตัววิเคราะห์เป็นสำคัญแล้วตำแหน่งวัดนี้จะเหมาะสม

2.8.2 จุดวัดตำแหน่งองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ล่างหอ

คำแนะนำของการหาตำแหน่งวัดสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบยอดหอสามารถใช้ที่นี่ได้ สำหรับจุดวัดของล่างหอนั้นแสดงได้ดังนี้

ก. ที่กระแสก้นหอ

เป็นตำแหน่งที่สะดวกที่สุด คล้ายกับการวัด ณ ตำแหน่งทางออกของถังรองรับยอดหอ และมีข้อดีและข้อเสียคล้าย ๆ กัน แต่มีข้อแตกต่างที่สำคัญ คือถังก้นหอจะมีแล็กน้อยกว่าที่ถังรองรับคอนเดนเสด การต่อสารตัวอย่างควรจะทำที่ตำแหน่งบนสุดของเส้นทางในแนวนอนที่เชื่อมระหว่างทางในสายผลิตภัณฑ์ล่างหอ เพื่อที่จะลดการเข้ามาของตะกอนในระบบตัวอย่าง สำหรับข้อเสียต่าง ๆ นั้น สามารถลบล้างข้อดีของวิธีนี้ได้

ข. ที่ขาออกจากก้นหอ

เมื่อพิจารณาถึงไดนามิคเป็นสำคัญ ตำแหน่งนี้จะถูกนำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นการหลีกเลี่ยงแล็กที่เกิดในถังก้นหอและให้ผลตอบสนองที่เร็วกว่า ข้อเสียที่สำคัญของวิธีนี้ คือของเหลวที่ออกจากก้นหอจะมีปริมาณมาก และมีไอปะปนด้วย และในกรณีที่มีความดันสูง, อัตราการไหลของของเหลวสูง ๆ จะส่งผลต่อองค์ประกอบของตัวอย่าง เนื่องจากมีปริมาณไอที่

ปะปนอยู่ทำให้ตัวอย่างมีการผันแปร การใช้ถังดักของเหลวจะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว แต่เป็นการแก้ปัญหาได้บางส่วนเท่านั้น ข้อเสียอย่างที่สอง คือ ความสัมพันธ์ภายในกับองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์เป็นการเก็บตัวอย่างจากกระแสขาเข้าของการแยกสุดท้าย (เช่น รีบอยเลอร์) ข้อเสียอย่างอื่น ได้แก่ การใช้สายตัวอย่างยาว และยากต่อการปฏิบัติงาน และบำรุงรักษา ถ้าไม่พิจารณาถึงข้อเสียที่กล่าวมาแล้ว การที่มีไดนามิคเร็วจะทำให้วิธีนี้นิยมใช้

ค. ที่กระแสผลิตภัณฑ์ยอดหอของคอลัมน์ถัดไป

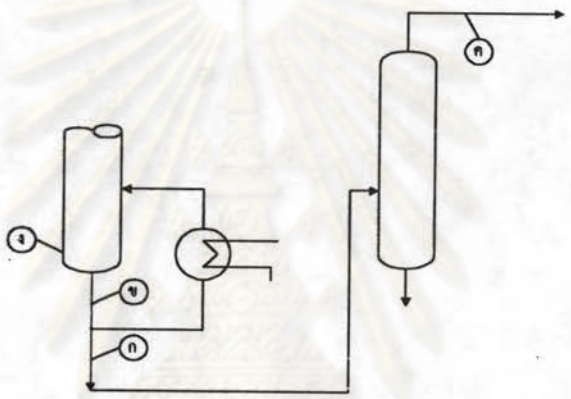
มักจะใช้กับกรณีที่ต้องการให้น้ำมัน, น้ำมันดิน, สิ่งปนเปื้อน หรือองค์ประกอบหนักอื่นๆ ออกจากตัวอย่าง ตัววิเคราะห์ และระบบการเก็บตัวอย่าง วิธีนี้เป็นการวัดจากความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์โดยตรง เนื่องจากปริมาณองค์ประกอบเบาจะออกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ออกจากคอลัมน์ถัดไป อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีแล็กมากทำให้ผลตอบสนองของพวกไดนามิคไม่ดีมาก ๆ มีผู้แนะนำ (Kister, 1987) ว่าแม้จะเพิ่มลูปตัววิเคราะห์คาสเคดกับตัวควบคุมอุณหภูมิ ก็ทำให้การควบคุมองค์ประกอบเลวร้ายไปยิ่งกว่าการไม่มีตัววิเคราะห์ ผลการตอบสนองของระบบทำได้การควบคุมจากตัววิเคราะห์ที่ไม่ปะติดปะต่อ ที่ให้การเปลี่ยนแปลงแบบเป็นขั้นกับอุณหภูมิของส่วนไล่สาร ตัววิเคราะห์จะอ่านการเปลี่ยนแปลงได้ใช้เวลา 5 ชั่วโมงต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และอ่านได้เมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวเท่านั้น การจัดวางรูปแบบดังรูปที่ 2.18 จะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้, กล่าวคือให้การควบคุมที่ดีพร้อม ๆ กับมีการกำจัดองค์ประกอบหนักจากตัวอย่าง

ถ้าพิจารณาถึงไดนามิคของระบบและแล็กที่เกิดขึ้นแล้ว วิธีเก็บตัวอย่างจากยอดหอของคอลัมน์ถัดไปนี้ควรจะหลีกเลี่ยง ควรจะใช้เทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบแฟลชพ็อท (sample

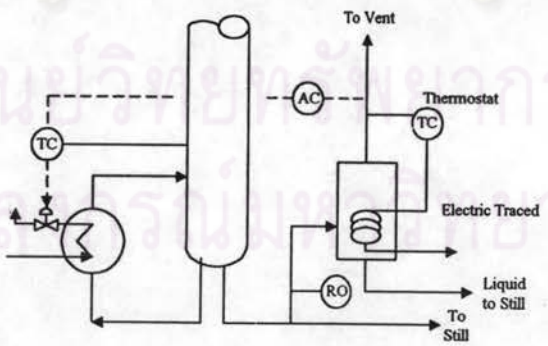
flashpot technique, รูปที่ 2.18) เพื่อกำจัดองค์ประกอบหนักจากตัวอย่างก่อนที่จะเข้าระบบการเก็บตัวอย่าง

ง. ที่เทรย์ล่างหอ

วิธีนี้คล้ายคลึงกับการเก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งยอดหอของการเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยอดหอ ข้อพิจารณาต่างๆ ใช้แบบเดียวกัน



รูปที่ 2.17 แสดงจุดวัดองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ล่างหอ



รูปที่ 2.18 แสดงเทคนิคการวัดตัวอย่างโดยใช้แฟลชพ็อท